

การเสื่อมอายุของยางซิลิโคนวัสดุโครงหุ้มสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์  
จากการทดสอบด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ

นางสาวเจนจิรา กระแสโสม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2555

**AGEING DETERIORATION OF SILICONE RUBBER  
HOUSING MATERIAL FOR POLYMER INSULATOR  
UNDER SALT WATER DIP WHEEL TEST**

**Janejira Grasaesom**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2012**

การเสื่อมอายุของยางซิลิโคนวัสดุโครงหุ้มสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์  
จากการทดสอบด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.อนันต์ อุ่นศิริไธย์)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.บุญเรือง มะรังศรี)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. รอ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เจนจิรา กระแสโสม : การเสื่อมอายุของยางซิลิโคนวัสดุโครงหุ้มสำหรับลูกถ้วยฉนวน  
พอลิเมอร์จากการทดสอบด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ (AGEING DETERIORATION OF  
SILICONE RUBBER HOUSING MATERIAL FOR POLYMERIC INSULATOR  
UNDER SALT WATER DIP WHEEL TEST) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์  
ดร.บุญเรือง มะรังศรี, 184 หน้า.

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุและทดสอบเร่งการ  
เสื่อมอายุของยางซิลิโคนวัสดุโครงหุ้มสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ด้วยการทดสอบวงล้อจุ่ม  
น้ำเกลือ เพื่อศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุ ความทนทานต่อการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากควา  
บไฟ และการสึกกร่อนของพื้นผิวยางซิลิโคนที่ใช้ทำเป็นวัสดุโครงหุ้มของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์  
ในการทดสอบนี้อยู่ภายใต้ข้อกำหนดตามมาตรฐาน IEC Publ. 62217 โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น  
4 ชุดการทดสอบคือ การทดสอบลูกถ้วยพอลิเมอร์สำหรับระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 การทดสอบลูกถ้วย  
พอลิเมอร์สำหรับระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 จากการทดสอบในน้ำเปล่า การทดสอบลูกถ้วยพอลิเมอร์  
สำหรับระบบ 24 kV ชนิดที่ 2 และการทดสอบลูกถ้วยพอลิเมอร์สำหรับระบบ 36 kV  
จากผลการวิจัยพบว่าฉนวนยางซิลิโคนที่ได้รับการทดสอบ เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าเกิดการ  
เปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวฉนวนยางซิลิโคน เช่น การเกิดโคโรนาดีสชาร์จหรืออาร์กแถบแห้งขึ้นใน  
ระหว่างการทดสอบ การเกิดคราบสกปรกบนพื้นผิว การเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากควา  
บไฟ เป็นต้น  
เกิดการเพิ่มขึ้นของคุณสมบัติหยดน้ำล้น ความแข็งและความขรุขระของฉนวนยางซิลิโคนเพิ่มขึ้น  
เมื่อเปรียบเทียบกับฉนวนยางซิลิโคนที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน การวิเคราะห์ทางเคมีด้วย FTIR พบว่า  
ปริมาณ Si-CH<sub>3</sub> และ Si-O ลดลงไปจากเดิม นอกจากนี้การวิเคราะห์ทางกายภาพจากกล้อง  
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าพื้นผิวของฉนวนยางซิลิโคนเกิดการสึกกร่อน  
ซึ่งสอดคล้องกันกับการวิเคราะห์ด้วยตาเปล่าอีกด้วย

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2555

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

JANEJIRA GRASAESOM : AGEING DETERIORATION OF SILICONE  
RUBBER HOUSING MATERIAL FOR POLYMERIC INSULATOR UNDER  
SALT WATER DIP WHEEL TEST. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.  
BOONRUANG MARUNGSRI, D.Eng., 184 PP.

AGEING OF SILICONE RUBBER/SALT WATER DIP WHEEL TEST/SILICONE  
RUBBER POLYMER INSULATOR

This thesis presents ageing deterioration of silicone rubber housing material for polymeric insulator under salt water dip wheel test. The strength of tracking and erosion of silicone surface were studied in this thesis. In this study, 4 kinds of polymer insulator (type-1 for 24 kV system, type-1 for 24 kV system in De-ionized water, type-2 for 24 kV system and 36 kV system) were tested based on IEC Publ. 62217. The physical analysis by visual observation, changing on silicone surface was showed the effect from discharge activities. In addition, corona discharge and dry band arc were observed in during the test. After 30,000 test cycles, tracking, puncture and erosion were observed on silicone surface. Increasing of hydrophobicity, hardness and roughness were observed when compared with the new silicone. The chemical analysis by fourier transforms infrared spectroscopy, decreasing of Si – CH<sub>3</sub> and Si – O were showed in the results section. Finally, the physical analysis by scanning electron microscopy was showed erosion of silicone surface as same as analyzed from visual observation.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2012

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

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

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่ให้ คำปรึกษาแนะนำและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าอย่างดียิ่งตลอดมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์ อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ที่ให้ คำปรึกษาแนะนำและให้ความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่ง

ขอขอบคุณบริษัท พีรีไซเคิลเคอริค แมนูแฟคเจอร์ริง จำกัด ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ ทดสอบ ชิ้นงานในการทดสอบ รวมถึงให้คำปรึกษา ความรู้ และคำแนะนำ ต่อการสร้างชุดทดสอบ มาโดยตลอด

ขอขอบคุณ คุณประวีติ บุญดี และบุคลากรฝ่ายอาคารและสถานที่ คุณณรงค์ เขียวสูงเนิน และบุคลากรฝ่ายงานพัฒนาเครื่องมือและปรับปรุงห้องปฏิบัติการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุก ท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ สนับสนุนทางด้านอุปกรณ์และให้คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ยังต่อ งานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณชัยวัฒน์ คงมันกลาง คุณประวีตรา หมายสุข และบุคลากรศูนย์เครื่องมือ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสังคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกใน การทำงานของผู้วิจัย

ขอขอบคุณ คุณจิรทีปต์ สุทธิลักษณ์ คุณสหัสชัย ทิพยเนตร์ และบุคลากรฝ่ายห้องปฏิบัติการ วิศวกรรมทุกท่าน ที่สนับสนุนเครื่องมือในการทดสอบอันเป็นประโยชน์ยังต่องานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณอัญชุลี รักด่านกลาง และคุณภัทรวรรณ เคนพะนาน ที่อำนวยความสะดวก ในการทำงานของข้าพเจ้า และขอบคุณที่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหาย ทั้งในอดีตและปัจจุบันที่ทำให้ข้าพเจ้ามีกำลังใจในการทำวิจัยตลอดมา

ทำนนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ทางด้านวิชาการทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณนายนายสิริมงคล กระแสโสม ผู้เป็นบิดา และนางดวงพร กระแสโสม ผู้เป็นมารดา ที่ให้ความรักความห่วงใย และการส่งเสริมทางการศึกษาอย่างเปี่ยมล้นตลอดมาจนทำให้ผู้วิจัยไม่ย่อท้อต่ออุปสรรคที่เกิดขึ้นตลอดมา

เจนจิรา กระแสโสม



# สารบัญ

หน้า

|  |           |
|--|-----------|
| บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....                              | ก         |
| บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....                           | ข         |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                 | ง         |
| สารบัญ .....   | ฉ         |
| สารบัญตาราง .....                                    | ญ         |
| สารบัญรูป .....                                      | ฎ         |
| <b>บทที่</b>   |           |
| <b>1 บทนำ .....</b>                                  | <b>1</b>  |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....              | 1         |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....                    | 3         |
| 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น .....                           | 3         |
| 1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....                           | 3         |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....                  | 4         |
| 1.6 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์ .....                    | 4         |
| <b>2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b> | <b>5</b>  |
| 2.1 กล่าวนำ.....                                     | 5         |
| 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                       | 5         |
| 2.3 สรุป.....  | 11        |
| <b>3 ทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง.....</b>          | <b>12</b> |
| 3.1 กล่าวนำ.....                                     | 12        |
| 3.2 ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์.....                        | 12        |
| 3.3 โครงสร้างของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์.....            | 14        |
| 3.4 ยางซิลิโคน .....                                 | 15        |
| 3.5 ผลกระทบที่เกิดจากเครือข่ายเชื่อมขวาง.....        | 18        |
| 3.5.1 High temperature vulcanization .....           | 18        |



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 3.5.2   | Room temperature vulcanization.....                                | 18 |
| 3.6     | การเสื่อมอายุของยางซิติโคน.....                                    | 19 |
| 3.6.1   | ปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน.....                     | 20 |
| 3.6.2   | การเกิดไฮโดรไลซิสที่ผิวของโพลีไดเมทิลไซลอกเซน.....                 | 21 |
| 3.7     | การเกิดดีสซาร์จบางส่วนของยางซิติโคน.....                           | 23 |
| 3.8     | การเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน.....                | 24 |
| 3.9     | ความเสียหายของคุณสมบัติหยดน้ำเนื่องจากการเกิดดีสซาร์จทางไฟฟ้า..... | 26 |
| 3.10    | ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมต่อคุณสมบัติหยดน้ำ.....            | 29 |
| 3.10.1  | การแช่น้ำ.....   | 29 |
| 3.10.2  | รังสีอัลตราไวโอเล็ต.....   | 29 |
| 3.11    | ลักษณะการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์.....                    | 30 |
| 3.11.1  | ฝุ่นซอล์ก.....   | 30 |
| 3.11.2  | การรั่วไหลของแก๊วซิติโคน.....                                      | 30 |
| 3.11.3  | การสะสมของคราบสกปรก.....   | 31 |
| 3.11.4  | การลดลงของคุณสมบัติหยดน้ำ.....                                     | 32 |
| 3.11.5  | ความเสียหายทางกลของปีกลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์.....                    | 33 |
| 3.11.6  | การนิกขาดบริเวณปีกลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์.....                        | 33 |
| 3.11.7  | รอยหักที่มีความลึกน้อยกว่า 0.1 mm.....                             | 34 |
| 3.11.8  | รอยหักที่มีความลึกมากกว่า 0.1 mm.....                              | 35 |
| 3.11.9  | การเสื่อมอายุของยางซิติโคนจากการเกิดโคโรนาดีสซาร์จ.....            | 35 |
| 3.11.10 | การเจาะทะลุของปีกลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์.....                         | 36 |
| 3.11.11 | การเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟ.....                              | 36 |
| 3.11.12 | การสึกกร่อนของยางซิติโคน.....                                      | 37 |
| 3.12    | สรุป.....  | 38 |
| 4       | การสร้างชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์.....         | 39 |
| 4.1     | กล่าวนำ.....   | 39 |

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 4.2   | การออกแบบชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของ<br>ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์..... | 39  |
| 4.2.1 | โครงสร้างเหล็กสำหรับติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ .....                      | 40  |
| 4.2.2 | ถังน้ำเกลือสแตนเลส.....  | 42  |
| 4.3   | การสร้างชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ .....     | 43  |
| 4.4   | โวลเตจดีไวเดอร์วัดแรงดันสูง .....                                  | 48  |
| 4.5   | การสร้างโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุวัดแรงดันกระแสสลับ .....     | 50  |
| 4.5.1 | ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง.....   | 50  |
| 4.5.2 | ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ.....   | 52  |
| 4.6   | สรุป .....   | 53  |
| 5     | การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์.....                 | 54  |
| 5.1   | กล่าวนำ .....  | 54  |
| 5.2   | มาตรฐาน IEC Publ. 62217 .....                                      | 54  |
| 5.3   | การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ .....             | 55  |
| 5.4   | วิธีการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ.....                                 | 59  |
| 5.5   | สรุป .....   | 61  |
| 6     | ผลการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุยางซิลิโคน.....                         | 62  |
| 6.1   | กล่าวนำ .....  | 62  |
| 6.2   | การวิเคราะห์ทางกายภาพของยางซิลิโคน.....                            | 62  |
| 6.2.1 | การสังเกต .....  | 62  |
| 6.2.2 | คุณสมบัติหยดน้ำลื่น .....  | 75  |
| 6.2.3 | ระดับความเปราะเปื้อน .....   | 85  |
| 6.2.4 | การวัดความแข็งด้วยวิธี Shore .....                                 | 88  |
| 6.2.5 | การวัดความขรุขระ .....   | 95  |
| 6.3   | การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของยางซิลิโคน.....                       | 102 |

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 6.3.1 | เครื่องมือวิเคราะห์แบบฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรด<br>สเปคโตรสโกปี .....          | 102 |
| 6.3.2 | การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของยางซิลิโคน<br>จากการเร่งการเสื่อมอายุ.....       | 104 |
| 6.4   | การวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์<br>อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ..... | 122 |
| 6.5   | สรุป .....  | 131 |
| 7     | สรุปและข้อเสนอแนะ .....   | 133 |
| 7.1   | สรุป .....  | 133 |
| 7.2   | ข้อเสนอแนะ.....   | 135 |
|       | รายการอ้างอิง .....   | 136 |
|       | ภาคผนวก .....   | 139 |
|       | ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบ .....   | 139 |
|       | ภาคผนวก ข. มาตรฐาน IEC Publ. 62217 Annex A.....                                 | 164 |
|       | ภาคผนวก ค. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ .....                               | 167 |
|       | ประวัติผู้เขียน .....   | 184 |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่ |   | หน้า |
|----------|---|------|
| 2.1      | ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....  | 6    |
| 4.1      | รายละเอียดชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวน<br>พอลิเมอร์ที่ได้ออกแบบไว้ ..... | 40   |
| 4.2      | รายละเอียดชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวน<br>พอลิเมอร์ที่คิดตั้งจริง.....   | 48   |
| 5.1      | แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบฉนวนพอลิเมอร์ตาม<br>มาตรฐาน IEC Publ. 62217 .....             | 60   |
| 5.2      | แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์สำหรับการวิจัย.....                       | 61   |
| 6.1      | พื้นที่ผิวของยางซิลิโคนประเภทต่าง ๆ .....   | 87   |
| 6.2      | ค่า SDD ของยางซิลิโคน.....  | 87   |
| 6.3      | ช่วงคลื่นอินฟราเรดของยางซิลิโคน .....   | 103  |

## สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า   |
|--------|--|
| 3.1    | โครงสร้างของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์..... 16   |
| 3.2    | โครงสร้างโมเลกุลของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน ..... 16                                    |
| 3.3    | กระบวนการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน..... 19   |
| 3.4    | รอยแตกที่เกิดจากดีสชาร์จทางไฟฟ้า..... 23   |
| 3.5    | กลไกการเกิดปฏิกิริยาแตกตัว ..... 25  |
| 3.6    | กลไกการเกิดเครือข่ายเชื่อมขวาง..... 27   |
| 3.7    | การรวมตัวของกลุ่มไซลานอลโดยการก่อตัว<br>เครือข่ายการเชื่อมขวางของออกซิเจน ..... 28 |
| 3.8    | การรั่วไหลของกาวซิลิโคน..... 31  |
| 3.9    | การสะสมของคราบสกปรกบนพื้นผิวยางซิลิโคน ..... 32                                    |
| 3.10   | การเกิดคุณสมบัติหยดน้ำขึ้นบนพื้นผิวยางซิลิโคน ..... 32                             |
| 3.11   | ความเสียหายทางกลที่เกิดขึ้นกับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ..... 33                        |
| 3.12   | การฉีกขาดบริเวณปีกลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ..... 34                                    |
| 3.13   | รอยหักขนาดเล็กบนพื้นผิวยางซิลิโคน ..... 34   |
| 3.14   | รอยหักที่มีความลึกมากกว่า 0.1 mm. .... 35  |
| 3.15   | การเจาะทะลุของปีกลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์..... 36                                      |
| 3.16   | การเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาวไฟ..... 37   |
| 3.17   | การสึกกร่อนของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์..... 38   |
| 4.1    | ชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์<br>ได้ออกแบบไว้..... 39           |
| 4.2    | ขนาดของฐานส่วนล่างที่ได้ออกแบบไว้..... 41  |
| 4.3    | ขนาดของโครงสร้างหลักส่วนบนที่ได้ออกแบบไว้..... 41                                  |
| 4.4    | โครงสร้างหลักทั้ง 2 ส่วนที่ได้ออกแบบไว้..... 42                                    |
| 4.5    | ถังสแตนเลสที่ได้ออกแบบไว้..... 43  |
| 4.6    | ถังสแตนเลสเพื่อติดตั้งลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์..... 44                                 |

## สารบัญญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า  |
|--------|---|
| 4.7    | วงจรถดสอบลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ..... 45  |
| 4.8    | ชุดทดสอบเรื่องการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์<br>ที่ประกอบเสร็จ..... 45  |
| 4.9    | ชุดควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ..... 46  |
| 4.10   | ชุดกรองน้ำแยกไอออน ..... 46   |
| 4.11   | ชุดทดสอบเรื่องการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์<br>จากที่ได้ออกแบบไว้..... 47  |
| 4.12   | วงจรมูลของโวลเตจดีไวเซอร์แบบตัวเก็บประจุ<br>แรงดันสูงกระแสลับ ..... 49  |
| 4.13   | ตัวเก็บประจุที่ใช้สำหรับสร้างตัวเก็บประจุภาคแรงสูง ..... 50   |
| 4.14   | วงจรภายในของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง..... 51   |
| 4.15   | ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงที่สร้างขึ้น ..... 52  |
| 4.16   | วงจรภายในของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ..... 52   |
| 4.17   | ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำที่สร้างขึ้น..... 53   |
| 5.1    | การทดสอบตัวอย่างของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ..... 55  |
| 5.2    | ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์สำหรับระบบ 24 kV ชนิดที่ 1..... 56  |
| 5.3    | ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์สำหรับระบบ 24 kV ชนิดที่ 2..... 57  |
| 5.4    | ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์สำหรับระบบ 36 kV ..... 58   |
| 5.5    | ตำแหน่งต่าง ๆ ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ถูกติดตั้ง<br>บนชุดทดสอบ..... 59  |
| 6.1    | การเกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งบนพื้นผิวสำหรับ<br>ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1..... 63                       |
| 6.2    | การเกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งบนพื้นผิวสำหรับ<br>ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 จากการทดสอบในน้ำเปล่า..... 64 |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 6.3 การเกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งบนพื้นผิวสำหรับ<br>ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2.....   | 65   |
| 6.4 การเกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งบนพื้นผิวสำหรับ<br>ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ระบบ 36 kV.....  | 66   |
| 6.5 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวของซิลิโคน<br>สำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1.....   | 68   |
| 6.6 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวของซิลิโคนสำหรับลูกถ้วย<br>ฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 จากการทดสอบในน้ำเปล่า.....   | 70   |
| 6.7 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวของซิลิโคน<br>สำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2.....   | 72   |
| 6.8 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวของซิลิโคน<br>สำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 36 kV.....   | 74   |
| 6.9 ลักษณะตัวอย่างโดยทั่วไปของพื้อนผิว HC1 – HC6.....  | 76   |
| 6.10 คุณสมบัติหยดน้ำขึ้นของยางซิลิโคนสำหรับ<br>ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1.....   | 77   |
| 6.11 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติหยดน้ำขึ้นของผิวของซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวน<br>พอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือ.....                          | 78   |
| 6.12 คุณสมบัติหยดน้ำขึ้นของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวน<br>พอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 จากการทดสอบในน้ำเปล่า.....   | 79   |
| 6.13 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติหยดน้ำขึ้นของผิวของซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวน<br>พอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือจากการ<br>ทดสอบในน้ำเปล่า..... | 80   |
| 6.14 คุณสมบัติหยดน้ำขึ้นของยางซิลิโคนสำหรับ<br>ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2.....   | 81   |
| 6.15 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติหยดน้ำขึ้นของผิวของซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวน<br>พอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2 หลังจากการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือ.....                       | 82   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 6.16 คุณสมบัติหยดน้ำลื่นของยางซิลิโคนสำหรับ<br>ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 36 kV .....   | 83   |
| 6.17 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติหยดน้ำลื่นของผิวยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวน<br>พอลิเมอร์ระบบ 36 kV หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือ.....                       | 84   |
| 6.18 เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Shore Duromet Model. 202 .....   | 89   |
| 6.19 ค่าความแข็งเฉลี่ยของผิวยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวน<br>พอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือ .....                            | 90   |
| 6.20 ค่าความแข็งเฉลี่ยของผิวยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวน<br>พอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือจาก<br>การทดสอบในน้ำเปล่า .....   | 91   |
| 6.21 ค่าความแข็งเฉลี่ยของผิวยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวน<br>พอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2 หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือ .....                            | 92   |
| 6.22 ค่าความแข็งเฉลี่ยของผิวยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวน<br>พอลิเมอร์ระบบ 36 kV หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือ.....                                       | 93   |
| 6.23 เครื่องมือทดสอบวัดความขรุขระ Mitutoyo SV-400 .....   | 96   |
| 6.24 ค่าความขรุขระเฉลี่ยของผิวยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวน<br>พอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือ .....                          | 97   |
| 6.25 ค่าความขรุขระเฉลี่ยของผิวยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวน<br>พอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือจาก<br>การทดสอบในน้ำเปล่า ..... | 98   |
| 6.26 ค่าความขรุขระเฉลี่ยของผิวยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวน<br>พอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2 หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือ .....                          | 99   |
| 6.27 ค่าความขรุขระเฉลี่ยของผิวยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวน<br>พอลิเมอร์ระบบ 36 kV หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือ.....                                     | 100  |
| 6.28 เครื่องวิเคราะห์ Spectrometer .....  | 102  |



## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า  |
|--------|---|
| 6.29   | วิธีการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีจาก %Transmittance ..... 104  |
| 6.30   | การเปลี่ยนแปลงของพันธะเคมีในโครงสร้างยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วย<br>ฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือ ..... 105                         |
| 6.31   | การเปลี่ยนแปลงของพันธะเคมีในโครงสร้างยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วย<br>ฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือจาก<br>การทดสอบในน้ำเปล่า..... 106 |
| 6.32   | การเปลี่ยนแปลงของพันธะเคมีในโครงสร้างยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วย<br>ฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2 หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือ ..... 107                         |
| 6.33   | การเปลี่ยนแปลงของพันธะเคมีในโครงสร้างยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วย<br>ฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 36 kV หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือ ..... 108                                   |
| 6.34   | การลดลงของ Si – CH <sub>3</sub> ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวน<br>พอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือ ..... 110                            |
| 6.35   | การลดลงของ Si – CH <sub>3</sub> ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวน<br>พอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือจาก<br>การทดสอบในน้ำเปล่า..... 111    |
| 6.36   | การลดลงของ Si – CH <sub>3</sub> ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวน<br>พอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2 หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือ ..... 112                            |
| 6.37   | การลดลงของ Si – CH <sub>3</sub> ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวน<br>พอลิเมอร์ระบบ 36 kV หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือ..... 113                                       |
| 6.38   | การลดลงของ Si – O ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวน<br>พอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือ ..... 114  |
| 6.39   | การลดลงของ Si – O ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวน<br>พอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือจาก<br>การทดสอบในน้ำเปล่า..... 115                  |
| 6.40   | การลดลงของ Si – O ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวน<br>พอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2 หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือ ..... 116  |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 6.41 การลดลงของ Si – O ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวน<br>พอลิเมอร์ระบบ 36 kV หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือ.....  | 117  |
| 6.42 อัตราส่วนของ Si-CH <sub>3</sub> /Si – O ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวน<br>พอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือ .....                         | 118  |
| 6.43 อัตราส่วนของ Si-CH <sub>3</sub> /Si – O ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวน<br>พอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือจาก<br>การทดสอบในน้ำเปล่า..... | 119  |
| 6.44 อัตราส่วนของ Si-CH <sub>3</sub> /Si – O ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวน<br>พอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2 หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือ .....                         | 120  |
| 6.45 อัตราส่วน Si-CH <sub>3</sub> /Si – O ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวน<br>พอลิเมอร์ระบบ 36 kV หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือ.....                                       | 121  |
| 6.46 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Neoscope JCM-5000 .....  | 122  |
| 6.47 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้านซ้ายป้อนแรงดัน<br>ของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1.....                                | 123  |
| 6.48 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้านจุดสัมผัสกราวด์<br>ของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1.....                               | 124  |
| 6.49 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้านซ้ายป้อนแรงดัน<br>ของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1<br>จากการทดสอบในน้ำเปล่า .....      | 125  |
| 6.50 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้านจุดสัมผัสกราวด์<br>ของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1<br>จากการทดสอบในน้ำเปล่า .....     | 126  |
| 6.51 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้านซ้ายป้อนแรงดัน<br>ของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2.....                                | 127  |
| 6.52 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้านจุดสัมผัสกราวด์<br>ของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2.....                               | 128  |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 6.53  |      |
| ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้านซ้ายป้อนแรงดัน<br>ของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 36 kV .....  | 129  |
| 6.54  |      |
| ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้านจุดสัมผัสสกรวด์<br>ของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 36 kV ..... | 130  |



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ความมั่นคงของระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาด้านเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมของประเทศ ระบบการฉนวนก็เป็นส่วนหนึ่งในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงที่สามารถช่วยส่งเสริมเสถียรภาพของการส่งจ่ายให้ดียิ่งขึ้น ถ้าได้รับการออกแบบอย่างถูกต้องและเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ที่เหมาะสม ในปัจจุบัน ระบบไฟฟ้าแรงสูงของประเทศไทยเกือบทั้งหมดเป็นแบบสายชิงในอากาศใช้ลูกถ้วยฉนวนแบบทั่วไป ซึ่งได้แก่ ลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนและลูกถ้วยฉนวนแบบแก้วเหนียว จากข้อมูลของการไฟฟ้าพบว่า เกิดการขัดข้องของสายส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ที่อยู่ใกล้ชายฝั่งทะเล หรือใกล้กับโรงงานอุตสาหกรรม เช่นการเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากความเปราะเปื้อนของลูกถ้วยฉนวนเป็นประจำหรือที่ร้ายแรง บางครั้งมลภาวะอาจทำให้แกนของลูกถ้วยเป็นสนิมและสึกกร่อน ซึ่งทำให้เกิดความผิดปกติขึ้น ในบางครั้งต้องใช้เวลามากกว่าที่จะกู้ระบบนำมาสู่ที่สภาวะปกติอีกครั้ง แต่เดิมการแก้ปัญหา ก็คือการเปลี่ยนลูกถ้วยชุดใหม่ แต่ปัญหายังเกิดเหมือนเดิม วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสมสำหรับที่มีมลภาวะก็คือ การนำลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์มาใช้งาน

ข้อดีของลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคนหรือลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์เมื่อเปรียบเทียบกับลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนหรือลูกถ้วยฉนวนแก้วเหนียวคือ

- 1) ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์มีแรงตึงผิวต่ำ (low surface tension energy) จึงทำให้ผิวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์มีคุณสมบัติผิวหาคน้ำลื่น (hydrophobic surface property) ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวทำให้ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์มีสมรรถนะทางไฟฟ้าภายใต้สภาวะเปราะเปื้อนและสภาวะเปียกชื้นดีกว่าลูกถ้วยฉนวนแบบธรรมดา

- 2) ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์มีอัตราส่วนความทนทานแรงกดต่อน้ำหนัก (mechanical strength to weight ratios) สูงกว่าลูกถ้วยฉนวนแบบธรรมดา ซึ่งจะช่วยให้ลดราคา ในการก่อสร้างและการบำรุงรักษาสายส่งจ่ายและจำหน่ายกำลังงานไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถออกแบบก่อสร้างสายส่งแบบกะทัดรัดได้อีกด้วย

3) ลูกถ้วยพอลิเมอร์ไม่มีปัญหาที่ปีกลูกถ้วยฉนวนแตกหักหรือชำรุดเสียหายที่เกิดจากกลุ่มคนที่ชอบทำลายสมบัติสาธารณะด้วยการใช้เป็นที่ลงแอมป์

ข้อเสียของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์เมื่อเทียบกับลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนและลูกถ้วยแก้วเหนียวคือ

1) เนื่องจากยางซิลิโคนที่ใช้ทำลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ทำจากสารอินทรีย์ เมื่อใช้งานภายใต้สภาวะแวดล้อมต่าง ๆ เป็นเวลานานและมีอาร์กจากแถบแห้ง (dry band arcing) จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของฉนวน

2) พื้นผิวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์จะสึกกร่อนเมื่อใช้งานไปนาน ๆ ซึ่งสามารถก่อความเสียหายแก่ลูกถ้วยฉนวนได้

3) ความเชื่อมั่นในระยะยาว (long term reliability) และอายุการใช้งาน (life expectancy) ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ยังยากที่จะประมาณคาดเดา

4) ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ผิวดำรง ยากในการตรวจสอบ

ในปัจจุบัน มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับปัจจัยที่ทำให้เกิดการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน กลไกการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน และสมรรถนะความทนทานของยางซิลิโคนต่อการสึกกร่อนของพื้นผิวฉนวน และการเสียดสภาพคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของยางซิลิโคน เป็นต้น ทั้งในสภาวะแวดล้อมจริงและสภาวะจำลองในห้องปฏิบัติการกันอย่างกว้างขวางทั่วโลก โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อประเมินค่าความเชื่อมั่นระยะยาวในการนำลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ทำจากยางซิลิโคนมาใช้แทนลูกถ้วยฉนวนแบบธรรมดาและเพื่อออกแบบลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ให้เหมาะสมกับสภาวะแวดล้อมที่ใช้งาน

เนื่องจากสภาวะแวดล้อมเป็นสาเหตุสำคัญประการหนึ่งในการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้ทำลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ และในประเทศไทยยังไม่มีข้อมูลการวิจัยดังกล่าว การที่จะออกแบบลูกถ้วยฉนวนที่เหมาะสมกับสภาวะแวดล้อมของประเทศไทยจึงทำได้ยาก ด้วยเหตุนี้ การไฟฟ้าต่าง ๆ จึงยังคงลังเลที่จะนำลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์มาใช้งานในบริเวณที่มีปัญหาด้านมลภาวะซึ่งเป็นมูลเหตุที่มาของโครงการวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

โครงการวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนภายใต้สภาวะแวดล้อมที่แปรเปลี่ยนด้วยเกลือ โดยจะนำตัวอย่างมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีและกายภาพ ในการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีที่ผิวของยางซิลิโคน ด้วยการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC Publ. 62217 เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบกันสำหรับเป็นแนวทางในการออกแบบลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ใช้ในประเทศไทยต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่นำมาใช้เป็นวัสดุโครงหุ้มของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

1.2.2 เพื่อออกแบบและสร้างชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือตามมาตรฐาน IEC Publ. 62217

1.2.3 เพื่อทดสอบและศึกษาความทนทานต่อการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากควาไฟฟ้า (Tracking) และการสึกกร่อนของผิวยางซิลิโคนที่นำมาใช้เป็นวัสดุโครงหุ้มในลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ภายใต้การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือตามมาตรฐาน IEC Publ. 62217

## 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 ฉนวนยางซิลิโคนที่ใช้ในการทดสอบเป็นวัสดุโครงหุ้มของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ใช้งานจริง

1.3.2 ระยะเวลาในการทดสอบแต่ละครั้งคือ 1,600 ชั่วโมง หรือ 30,000 cycle ตามมาตรฐาน IEC Publ. 62217

1.3.3 ความเข้มข้นของน้ำเกลือสำหรับใช้ในการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ  $1.4 \text{ kg/m}^3$  ตามมาตรฐาน IEC Publ. 62217 และเปลี่ยนน้ำเกลือ ทุก ๆ 7 วัน

1.3.4 รอบการหมุนของลูกถ้วยฉนวนใช้เวลา 192 s/cycle

## 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 ทำการศึกษาปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน สำหรับใช้ทำลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

1.4.2 ศึกษาข้อกำหนดการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุตามมาตรฐาน IEC Publ. 62217

1.4.3 ออกแบบและสร้างชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุตามข้อกำหนดของมาตรฐาน

1.4.4 ทำการทดสอบความทนทานต่อการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากควาไฟฟ้าและการสึกกร่อนของยางซิลิโคนที่นำมาใช้เป็นวัสดุโครงหุ้มในลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ภายใต้การทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ 30,000 cycle ตามมาตรฐาน IEC Publ. 62217

1.4.5 ทำการทดสอบในกรณีจุ่มในน้ำสะอาดเพื่อเปรียบเทียบผล

1.4.6 วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงยางซิลิโคนทั้งทางกายภาพและทางเคมี ประกอบด้วย

1) การสังเกต (visual Observation)

2) คุณสมบัติหดรน้ำลื่น (hydrophobicity)

- 3) การวัดความขรุขระ (roughness measurement)
- 4) การวัดความแข็ง (hardness measurement)
- 5) การตรวจสอบทางเคมีแบบฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (attenuated total reflection fourier transform infrared : ATR-FTIR)
- 6) การวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM)
- 7) ระดับความประอะเปื้อน (salt deposit density: SDD)

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้ชุดทดสอบการเสื่อมอายุของยางซีลิกอนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์
- 1.5.2 ได้ข้อมูลลักษณะเสื่อมอายุของยางซีลิกอนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์
- 1.5.3 ได้เรียนรู้และศึกษาการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของยางซีลิกอน
- 1.5.4 ได้ข้อมูลสำหรับการประเมินอายุการใช้งานของยางซีลิกอนที่ใช้เป็นฉนวนโครงหุ้มสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

## 1.6 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 8 บท ดังต่อไปนี้

**บทที่ 1** เป็นบทนำกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมทั้งแนะนำเนื้อหาพอสั่งเขบที่เป็นองค์ประกอบของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

**บทที่ 2** กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

**บทที่ 3** กล่าวถึงทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้องกับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

**บทที่ 4** กล่าวถึงวิธีการสร้างชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

**บทที่ 5** กล่าวถึงวิธีการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

**บทที่ 6** กล่าวถึงการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีและกายภาพของฉนวนยางซีลิกอน

**บทที่ 7** กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2

### ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กล่าวนำ

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 ว่าวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือ การสร้างชุดทดสอบ เร่งการเสื่อมอายุศึกษาลักษณะการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน โดยทดสอบความทนทานต่อการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟและการสึกกร่อนของผิวยางซิลิโคนที่ใช้เป็นฉนวนไฟฟ้า ภายใต้การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้อง ดำเนินการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัย ระเบียบวิธีที่เคยมีการใช้งานมาก่อน ผลการดำเนินงาน ข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณະนักวิจัยตั้งแต่ อดีตเป็นต้นมา โดยใช้ฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมรายงานวิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้าน วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอันได้แก่ฐานข้อมูลจาก IEEE, IEE, Scopus และ Science Direct เป็นต้น ผลการสำรวจสืบค้นงานวิจัยดังกล่าวจะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

#### 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่องการศึกษาการเร่งการเสื่อมอายุของลูก ถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่นักวิจัยหลายท่านได้ทำการค้นคว้าและวิจัยสามารถสรุปการดำเนินงานวิจัย โดยอธิบายได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

| ค.ศ. | คณะผู้ทำวิจัย                                 | การดำเนินงานวิจัย   |
|------|---|---|
| 1990 | Oliveira de, S. M., and<br>Tourreil de, C. H. | ศึกษาการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน โดยการจำลองสภาพแวดล้อมให้ยางซิลิโคนสัมผัสกับรังสี อัลตราไวโอเลต พบว่า รังสีอัลตราไวโอเลตเป็นสาเหตุต่อการ เสื่อมอายุของยางซิลิโคน |



ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

| ค.ศ. | คณะผู้ทำวิจัย                                       | การดำเนินงานวิจัย  |
|------|---|--|
| 1996 | Xu, G., Mcgrath, B. and Burns, W.                   | เปรียบเทียบการเสื่อมอายุระหว่างเอทิลีน โพรพิลีน ไดอีน โมโนเมอร์ (ethylene propylene diene monomer : EPDM) กับ ยางซิลิโคน (silicone rubber : SiR) ภายใต้ความเครียดทางสภาพแวดล้อมและความเครียดทางไฟฟ้า พบว่ายางซิลิโคนทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดีกว่า EPDM แต่มีความต้านทานต่อการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟและการสึกกร่อนต่ำกว่า EPDM |
| 1997 | Gorur, R. S., Montesinos, J., and Varadadesikan, L. | เปรียบเทียบลักษณะการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟและการสึกกร่อนของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของอะลูมินาไตรไฮเดรต (Alumina trihydrate : ATH) ที่แตกต่างกัน พบว่าสารเติมแต่ง ATH มีผลต่อระยะเวลาของการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟและการสึกกร่อนของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์   |
| 1998 | Koshino, Y., Nakajima, I., and Umeda I.             | ศึกษาผลกระทบจากการเติมสารแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ในยางซิลิโคนพบว่ายางซิลิโคนมีการดูดซึมของน้ำเพิ่มขึ้น เกิดอาร์กแถบแห้ง ร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟ และการสึกกร่อนบนพื้นผิวของยางซิลิโคน   |
| 2000 | Mcgrath, P. B., Crudele I. D., and Burns, C. W.     | แสดงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีของอีพดีเอ็มและยางซิลิโคน พบว่าเมื่อลูกถ้วยทั้ง 2 ชนิดได้รับการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุโดยการจำลองสภาวะฝนกรด เมื่อระยะเวลาที่ถูกทดสอบยิ่งมาก การเสื่อมสภาพของพื้นผิวจะมากตามไปด้วย นอกจากนี้ปริมาณธาตุพื้นฐานของอีพดีเอ็มและยางซิลิโคนจะลดตามไปด้วย   |
| 2001 | Hillborg, H. C.                                     | ศึกษาคูณสมบัติหยดน้ำลื่นของพอลิไดเมทิลไซโลเซน (polydimethylsiloxane) หลังจากการเกิดดีสชาร์จทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ พบว่าคูณสมบัติหยดน้ำลื่นเป็นสาเหตุสำคัญต่อการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟและการสึกกร่อนต่าง ๆ ของพื้นผิวยางซิลิโคน   |

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

| ค.ศ. | คณะผู้ทำวิจัย                                      | การดำเนินงานวิจัย  |
|------|--|--|
| 2002 | Kumagai, S., and Yoshimura, N.                     | ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของยางซิติโคนที่มีสารเติมแต่งอะลูมินาไตรไฮดรอกไซด์ที่แตกต่างกันจากการจำลองสภาพแวดล้อมที่ใช้งานจริง พบว่าฝนกรด รังสีอัลตราไวโอเล็ต การเกิดโคโรนาดีสชาร์จ และน้ำ เป็นสาเหตุต่อการเกิดการเสื่อมสภาพและการสึกกร่อนของยางซิติโคน                |
| 2002 | Cho, H. G., Han, S. W., and Lee, U. Y.             | แสดงผลการทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ด้วยการจำลองสถานะต่าง ๆ ในหลาย ๆ มาตรฐาน ซึ่งแต่ละมาตรฐานที่ใช้ทดสอบมีความแตกต่างกันตามลักษณะและวัตถุประสงค์ของการทดสอบ   |
| 2002 | Mcgrath, P. B., Crudele, I. D., and Burns, C. W.   | ศึกษาการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวابلไฟของปีกลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ทำจากยางซิติโคนและอีพ็อกซีพบวابلไฟสภาพแวดล้อมมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกระแสรั่วไหลของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์  |
| 2003 | Yu, Y., Xidong, L., Yuanxiang, Z., and Xuesong, L. | ศึกษาผลจากการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวابلไฟของแรงดันกระแสตรงและแรงดันกระแสสลับจากการทดสอบร่องผิวเสื่อมสภาพจากวابلไฟ โดยอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC Publ. 62217 พบว่าเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวابلไฟและการสึกกร่อนบนพื้นผิวของยางซิติโคนทั้งแรงดันกระแสตรงและแรงดันกระแสสลับ |
| 2003 | Ito A., et al.                                     | วินิจฉัยลักษณะการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ถูกใช้งานในระบบไฟฟ้าแรงสูงมาแล้วประมาณ 10 ปี พบว่าเกิดการสึกกร่อนอย่างรุนแรงบนพื้นผิวของยางซิติโคน  |
| 2004 | Kumagai, S., and Yoshimura, N.                     | ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของพอลิไดเมทิลไซโลเซนและสารเติมแต่ง ATH ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์จากการเกิดอาร์กแถบแห้ง พบว่าสารเติมแต่ง ATH มีผลต่อความทนทานต่อการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวابلไฟ การเกิดดีสชาร์จ และอาร์กแถบแห้ง บนพื้นผิวของยางซิติโคน                     |

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

| ค.ศ. | คณะผู้ทำวิจัย  | การดำเนินงานวิจัย  |
|------|--|--|
| 2004 | Marungsri, B., et al.                                    | ศึกษาผลกระทบของสภาวะการทดสอบการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน จากการทดสอบด้วยหมอกเกลือที่มีขนาดของหมอกที่แตกต่างกัน พบว่าขนาดของหมอกมีอิทธิพลต่อการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน  |
| 2006 | Khan, Y. Z., et al.                                      | พบว่าความเครียดทางไฟฟ้าและรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีผลต่อการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังส่งผลต่อการเกิดกระแสรั่วไหลของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์   |
| 2006 | Marungsri, B., Shinokubo, H., and Matsuoka, R.           | ศึกษาการเสื่อมอายุที่มีต่อยางซิลิโคนสำหรับใช้ทำ ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ด้วยวิธีหมอกเกลือของลูกถ้วย 3 ชนิดคือ ลูกถ้วยปีกตรง ลูกถ้วยปีกสลับ และยางซิลิโคนแท่งทรงกระบอก พบว่า ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์แบบปีกตรงมีการสึกกร่อนรุนแรงกว่าลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์แบบปีกสลับ ส่วนยางซิลิโคนชนิดแท่งทรงกระบอกไม่มีการสึกกร่อนของพื้นผิว |
| 2007 | Amin, M.   | ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ จากการเร่งการเสื่อมอายุ ภายใต้การจำลองสภาพแวดล้อมต่าง ๆ พบว่าฝนกรด รังสีอัลตราไวโอเล็ต หมอก และผลจากการเกิดดีเอสอาร์จะเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ และนำไปสู่การเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์              |
| 2009 | Muncivi, A., Sarkar, P., and Haddad, A.                  | อธิบายถึงการออกแบบชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุด้วยวิธีการทดสอบร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟและสร้างซอฟต์แวร์สำหรับการวิเคราะห์การเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์  |
| 2010 | Holtzhausen, J. P., Pieterse, P.J., and Vermeulen, H. J. | เปรียบเทียบการทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุระหว่างแรงดันสูง กระแสตรงและแรงดันสูงกระแสสลับ ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ต่างชนิดกัน พบว่าลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ได้รับการทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสตรงมีการสึกกร่อนที่รุนแรงกว่าลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ได้รับการทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสสลับ                                     |

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

| ค.ศ. | คณะผู้ทำวิจัย  | การดำเนินงานวิจัย   |
|------|--|---|
| 2010 | Vas, J. V.,<br>Venkatesulu, B.,<br>and Thomas, M. J. | ศึกษาและเปรียบเทียบความทนทานต่อการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟและการสึกกร่อนของยางซิลิโคนระหว่างแรงดันสูงกระแสตรงขั้วบวกและแรงดันสูงกระแสตรงขั้วลบ พบว่ายางซิลิโคนที่ถูกทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสตรงขั้วลบมีความทนทานต่อการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟและการสึกกร่อนได้ดีกว่ายางซิลิโคนที่ได้รับการทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสตรงขั้วบวก |

จากวรรณกรรมและผลงานวิจัยที่สรุปผ่านมา ทำให้ทราบว่า มีผู้วิจัยได้คิดค้นและนำเสนอแนวคิดวิเคราะห์การเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ด้วยวิธีต่าง ๆ สามารถทำให้ผู้ศึกษาวิจัยทางด้านนี้มองเห็นแนวทางในการออกแบบอุปกรณ์ทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน รวมไปถึงแนวทางในการวิเคราะห์ทางกายภาพและทางเคมีของยางซิลิโคนที่ผ่านการทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุได้ง่ายขึ้น ดังนั้นในส่วนถัดไปนี้จึงได้ทำการสรุปงานวิจัยที่มีความสำคัญต่องานวิจัยโดยกล่าวถึงรูปแบบการทดสอบต่าง ๆ เพื่อศึกษาการเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนโดยย่อ

โดยเริ่มต้นจาก Yin Yu et al. (2003) ได้ทำการศึกษาร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์จากการทดสอบร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟด้วยแรงดันกระแสตรง โดยที่สถานะการทดสอบอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC Publ. 62217 ใช้เวลาในการทดสอบทั้งหมด 1000 ชั่วโมง ในการศึกษานี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างแรงดันกระแสตรงขั้วบวกเปรียบเทียบกับแรงดันกระแสตรงขั้วลบ ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบด้วยแรงดันกระแสตรงขั้วบวกพบว่า คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นบนพื้นผิวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการทดสอบ เกิดดีสซาร์จบางส่วนบริเวณตัวและปีกของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ นอกจากนี้ค่ากระแสรั่วไหลที่ได้มีมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการทดสอบ ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบด้วยแรงดันกระแสตรงขั้วลบพบว่า เกิดดีสซาร์จบางส่วนบริเวณตัวและปีกของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ และมีกระแสรั่วไหลเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการทดสอบ

Marungsri et al. (2006) ได้ศึกษาผลกระทบของการเสื่อมอายุที่มีต่อยางซิลิโคนที่ใช้สำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ด้วยการจำลองสภาวะหมอกเกลือ โดยอ้างอิงจากมาตรฐาน CIGRE WG 15-04 ลักษณะของยางซิลิโคนที่ใช้ในการทดสอบมี 3 ลักษณะ คือ ยางซิลิโคนแบบ

แท่งทรงกระบอก ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์แบบปีกตรง และลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ชนิดปีกเล็กและปีกใหญ่สลับกัน โดยลูกถ้วยทั้ง 3 ชนิดถูกติดตั้งอยู่ในอุปกรณ์ทดสอบ ซึ่งในการทดสอบทำการเปิดหมอกเกลือให้กับยางซิลิโคนทั้ง 3 ชนิด โดยที่ภายในเวลา 24 ชั่วโมง จะเปิดหมอกเกลือ 8 ชั่วโมง และอีก 16 ชั่วโมง หมอกเกลือจะถูกปิด ทำการทดสอบทั้งสิ้น 50 cycle (1 cycle เท่ากับ 24 ชั่วโมง) ในระหว่างการทดสอบ ยางซิลิโคนทั้ง 3 ชนิดเกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งขึ้นบริเวณพื้นผิวของยางซิลิโคน หลังจากการทดสอบ การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพพบว่า บนพื้นผิวของยางซิลิโคนเกิดการสึกกร่อน คุณสมบัติผิวหยาบน้ำดีลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการทดสอบ นอกจากนี้ เมื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางเคมีพบว่า ปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบมูลฐานของยางซิลิโคนลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการทดสอบ

Muncivi et al. (2009) ได้อธิบายการสร้างชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์รวมถึงออกแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการควบคุมและวัดค่ากระแสรั่วไหลของการทดสอบเพื่อง่ายต่อการติดตามผลการทดสอบ โดยในการทดสอบอ้างอิงจากมาตรฐาน BS EN 62217: 2006 ซึ่งเป็นการศึกษาการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาทไฟของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ โดยมีโปรแกรมสำหรับควบคุมมอเตอร์และโปรแกรมจัดเก็บข้อมูลของการเกิดกระแสรั่วไหลของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ หลังจากจัดทำอุปกรณ์เร่งการทดสอบเรียบร้อยแล้ว ลูกถ้วยที่ใช้ทดสอบได้ถูกติดตั้งบนอุปกรณ์ทดสอบและดำเนินการทดสอบทั้งสิ้น 100 cycles โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้จัดเก็บข้อมูลค่ากระแสรั่วไหลอยู่ตลอดเวลา จากการทดสอบพบว่า มีค่ากระแสรั่วไหลที่มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการทดสอบ นอกจากนี้เกิดการสึกกร่อนบนพื้นผิวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์อีกด้วย

Holtzhausen et al. (2010) ทำการศึกษาการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์โดยการเปรียบเทียบชนิดของแรงดันที่ใช้ทดสอบที่ต่างชนิดกันคือ แรงดันกระแสสลับ แรงดันกระแสตรง ขั้วบวก และแรงดันกระแสตรงขั้วลบ โดยในแต่ละชนิดของแรงดันที่ใช้ทดสอบลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ใช้เวลาในการทดสอบ 1,000 ชั่วโมง หลังจากการทดสอบพบว่า เกิดการสึกกร่อนบนพื้นผิวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ นอกจากนี้พบว่า ค่ากระแสรั่วไหลของแรงดันกระแสตรงขั้วบวก เท่ากับค่ากระแสรั่วไหลของแรงดันกระแสตรงขั้วลบ ซึ่งมีค่าที่มากกว่าค่ากระแสรั่วไหลของแรงดันกระแสสลับอีกด้วย

### 2.3 สรุป

ในบทที่ 2 นี้ได้นำเสนอวรรณกรรมและการวิจัยในรูปแบบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่จะดำเนินการ โดยค้นคว้าจากฐานข้อมูลของ IEEE, IEE และอื่น ๆ ทำให้ทราบถึงผลงานดำเนินงานวิจัย จุดประสงค์ แนวทางการวิจัยของผู้วิจัยอื่น ๆ ซึ่งจะถูกใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง และเป็นแนวทาง

สำหรับการดำเนินงานวิจัยต่อไป จากการสืบค้นปริทัศน์และวรรณกรรมเห็นได้ชัดว่า ยางซิลิโคนกำลังเป็นที่สนใจในงานวิจัยการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้สำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ เพราะลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ได้ถูกนำมาใช้ในระบบส่งจ่ายและจำหน่ายไฟฟ้ากันอย่างกว้างขวาง ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงได้เริ่มวิจัยขึ้นเพื่อการทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนที่ใช้สำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ด้วยสภาพแวดล้อมและภูมิอากาศของประเทศไทยซึ่งยังไม่ปรากฏงานวิจัยที่ใด โดยใช้วิธีการทดสอบด้วยวิธีการ ตามมาตรฐาน IEC Publ. 62217



## บทที่ 3

### ทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง

#### 3.1 กล่าวนำ

ก่อนทำการทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุของยางซิติโคนที่ใช้สำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ จำเป็นอย่างยิ่งต้องรู้ถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของยางซิติโคน ในบทนี้จึงได้ทำการอธิบายเกี่ยวกับยางซิติโคนอย่างละเอียด ประกอบด้วย โครงสร้างทั่วไปของยางซิติโคน ผลกระทบที่เกิดจากโครงสร้างเชื่อมขวาง (crosslink) และลักษณะการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์สำหรับใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ โดยอธิบายรายละเอียดดังนี้

#### 3.2 ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

ลูกถ้วยฉนวนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้รองรับสายไฟ ทำหน้าที่เป็นฉนวนและป้องกันไม่ให้เกิดกระแสไฟฟ้ารั่วลงดินหรือลัดวงจรลงดิน เพราะถ้าปริมาณกระแสที่รั่วไหลมีจำนวนมาก อุปกรณ์ป้องกันที่ติดตั้งในระบบจำหน่ายก็จะตัดวงจรออก ทำให้การจ่ายไฟฟ้าหยุดชะงัก ลูกถ้วยฉนวนจึงมีความสำคัญตราบใดที่ยังมีการจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปตามสายเหนือดิน สายส่ง สายส่งแรงสูง และสายระบบจำหน่าย

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา นักวิจัยส่วนใหญ่ได้ค้นคว้าและวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งทางด้านการประยุกต์ใช้งานให้มีความหลากหลายขึ้น วิธีการเทคโนโลยีต่าง ๆ ในการผลิตลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ การเลือกเฟ้นวัสดุพอลิเมอร์มาเป็นฉนวนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ตัวอย่างพัฒนาการที่กล่าวมาข้างต้นสามารถแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วิวัฒนาการและพัฒนาการของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

| ปี   | พัฒนาการของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์  |
|------|--|
| 1940 | เริ่มมีการใช้ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ทำจากไซโคลอะลิฟาติกอีพอกซีเรซิน (cycloaliphatic epoxy resin: CE) ใช้สำหรับเป็นฉนวนภายในอาคาร |
| 1957 | มีการเติมสาร ATH เพื่อเพิ่มความต้านทานการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากควาบไฟและการสึกกร่อนของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์                     |

ตารางที่ 3.1 วิวัฒนาการและพัฒนาการของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ (ต่อ)

| ปี   | พัฒนาการของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์  |
|------|--|
| 1963 | ประเทศอังกฤษได้เริ่มนำลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์มาใช้สำหรับเป็นฉนวนภายนอกอาคาร   |
| 1963 | ประเทศสหรัฐอเมริกาได้นำลูกถ้วยมาใช้สำหรับเป็นฉนวนภายนอกอาคาร หลังจากติดตั้งไม่นาน ได้เกิดปัญหาอันเนื่องมาจากสิ่งแวดล้อมเป็นสาเหตุ จึงได้พัฒนา CE ขึ้นมาใหม่โดยใช้ชื่อว่า GEPOL       |
| 1970 | ประเทศอังกฤษได้นำลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์มาติดตั้งในสถานีไฟฟ้า โดยใช้เป็นปลอกฉนวนนำสายไฟขนาด 115 kV และ 500 kV นอกจากนี้ ผู้ผลิตประเทศอื่น ๆ ได้เริ่มผลิตลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์เพื่อการค้า |
| 1975 | ประเทศฝรั่งเศสเลือกใช้อย่างเอทิลีนโพรพิลีน (ethylene Propylene Rubber : EPR) เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์โดยบริษัทที่ผลิตคือ Ceraver                                |
| 1976 | ประเทศสหรัฐอเมริกาเลือกใช้ EPR เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์โดยบริษัทที่ผลิตคือ Ohio Brass   |
| 1976 | ประเทศเยอรมนีเลือกใช้อย่างซิลิโคน (silicone Rubber : SiR) เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์โดยบริษัทที่ผลิตคือ Rosential   |
| 1977 | ประเทศสหรัฐอเมริกาเลือกใช้ EPR เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์โดยบริษัทที่ผลิตคือ Sediver  |
| 1977 | ประเทศอังกฤษเลือกใช้ CE เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์โดยบริษัทที่ผลิตคือ TDL   |
| 1980 | ประเทศสหรัฐอเมริกาเลือกใช้ EPR เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์โดยบริษัทที่ผลิตคือ Lapp   |
| 1983 | ประเทศสหรัฐอเมริกาเลือกใช้อย่างซิลิโคนเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์โดยบริษัทที่ผลิตคือ Reliable  |

เมื่อฉนวนพอลิเมอร์ได้ถูกพัฒนาให้มีรูปลักษณะที่สวยงาม มีน้ำหนักเบา มีคุณสมบัติหยดน้ำลื่น และมีประสิทธิภาพที่เหนือกว่าลูกถ้วยชนิดอื่น ๆ เมื่ออยู่ในสภาวะที่เปรอะเปื้อนสูง ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์จึงได้เริ่มมาแทนที่อุตสาหกรรมลูกถ้วยเซรามิก และได้ถูกนำมาใช้เป็นฉนวนภายนอกอาคารอย่างกว้างขวางในช่วงปลายทศวรรษที่ 1990 จนถึงปัจจุบัน



ปัจจุบันฉนวนพอลิเมอร์เป็นที่ยอมรับและถูกนำมาใช้ในการฉนวนของระบบไฟฟ้าแรงสูง และระบบจำหน่าย ข้อดีของฉนวนพอลิเมอร์จากการเปรียบเทียบกับฉนวนพอร์ซเลนและฉนวนแก้วเหนียว มีดังนี้

1) ฉนวนพอลิเมอร์มีแรงดึงผิวต่ำ จึงทำให้ผิวของฉนวนพอลิเมอร์มีคุณสมบัติผิวหยดน้ำดี ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวทำให้ฉนวนพอลิเมอร์มีสมรรถนะทางไฟฟ้าภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนและสภาวะเปียกชื้นดีกว่าฉนวนแบบธรรมดา

2) ฉนวนพอลิเมอร์มีอัตราส่วนความทนทานแรงกลต่อน้ำหนัก สูงกว่าฉนวนแบบธรรมดา ซึ่งจะทำให้ลดราคา ในการก่อสร้างและการบำรุงรักษาสายส่งจ่ายและจำหน่ายกำลังงานไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถออกแบบก่อสร้างสายส่งแบบกะทัดรัดได้อีกด้วย

3) ฉนวนพอลิเมอร์ไม่มีปัญหาที่ปฏิกิริยาของฉนวนแตกหักหรือชำรุดเสียหายที่เกิดจากกลุ่มคนที่ชอบทำลายสมบัติสาธารณะด้วยการใช้เป็นที่ลงแมนปิ่น

ข้อเสียของฉนวนพอลิเมอร์เมื่อเทียบกับฉนวนพอร์ซเลนและฉนวนแก้วเหนียวคือ

1) เนื่องจากยางซิลิโคนที่ใช้ทำฉนวนพอลิเมอร์ทำจากสารอินทรีย์ เมื่อใช้งานภายใต้สภาวะแวดล้อมต่าง ๆ เป็นเวลานานและมีอาร์คจากแถบแห้ง จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของฉนวน

2) พื้นผิวของฉนวนพอลิเมอร์จะสึกกร่อนเมื่อใช้งานไปนาน ๆ ซึ่งสามารถก่อความเสียหายแก่ฉนวนได้

3) ความเชื่อมั่นในระยะยาวและอายุการใช้งานของฉนวนพอลิเมอร์ยังยากที่จะประมาณค่าได้

4) ฉนวนพอลิเมอร์ที่ผิวดำรงยากในการตรวจสอบ

### 3.3 โครงสร้างของฉนวนพอลิเมอร์

โครงสร้างพื้นฐานของฉนวนพอลิเมอร์แสดงในรูปที่ 3.1 ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

1) แกนฉนวน (fiber reinforced plastic (FRP) core) มีส่วนประกอบของใยแก้วและยางสำหรับเสริมใยแก้ว โดยมียางสำหรับเสริมใยแก้วประมาณ 70-75% ของน้ำหนักใยแก้วทั้งหมด เส้นใยแก้วที่เป็นส่วนผสมของแกนฉนวน มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5-20  $\mu\text{m}$  ในส่วนผสมของแกนฉนวนพอลิเมอร์ ยางสำหรับเสริมใยแก้วสามารถใช้ได้ทั้ง โพลีเอสเตอร์ (polyester) อีพอกซี (epoxy) นอกจากนี้ แท่งโลหะสามารถใช้เป็นส่วนประกอบในการผลิตแกนฉนวนได้ด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตาม ยางอีพอกซีได้ถูกพิจารณาให้เป็นวัสดุที่ดีที่สุดในการผลิตแกนฉนวน

ด้วยฉนวนพอลิเมอร์เพราะมีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำกว่า และยังเป็นวัสดุที่ใช้ในการผลิตแกนลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์มาจนถึงทุกวันนี้

2) metal fittings เป็นวัสดุโลหะประกบกับแกนลูกถ้วยทั้งสองด้านเพื่อใช้เป็นโครงสร้างรับน้ำหนัก

3) ปีกลูกถ้วย (weather sheds) ทำจากวัสดุที่ไม่เป็นเซรามิกชนิดต่าง ๆ โดยมีรูปร่างที่เอื้อประโยชน์ต่อการใช้งานทางไฟฟ้า วัสดุที่ใช้ในการผลิตปีกลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์มีหลายชนิด เช่น โพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีน (poly tetra fluoro ethylene : PTFE) เทฟลอน (teflon) ยางอีพอกซี (epoxy resins) โพลีเอทิลีน (polyethylene: PE) คอนกรีตพอลิเมอร์ (polymer concretes) ยางเอทิลีนโพรพิลีน (ethylene propylene elastomers) และยางซิลิโคน (silicone elastomers) ซึ่งในวัสดุแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป อย่างไรก็ตาม มีเพียงวัสดุชนิดยางเท่านั้นที่แสดงให้เห็นถึงประโยชน์ที่มีต่อลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าภายนอกอาคารซึ่งยางซิลิโคนเป็นวัสดุที่มีอายุการใช้งานที่ยาวนานและสามารถทนได้ทุกสภาพแวดล้อม

ถ้าลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์มีเพียงแกนลูกถ้วยและ metal fittings เท่านั้น ความเครียดทางไฟฟ้าเสริมกันกับการเกิดขึ้นของหยดน้ำและหมอกไอต่าง ๆ ในสภาวะเปรอะเปื้อน จะทำให้เกิดดีสชาร์จบางส่วนหรือดีสชาร์จเฉพาะส่วน (local discharges) ซึ่งส่งผลให้ สารเคมีที่ใช้ทำแกนลูกถ้วยเกิดการเสื่อมถอย อย่างเช่น ร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟและการสึกกร่อน เพื่อป้องกันแกนลูกถ้วยจากสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ และเพื่อสร้างระยะกระแสรั่ว (leakage distance) ให้ได้ความยาวตรงตามข้อกำหนดของลูกถ้วยฉนวน ซึ่งเป็นข้อกำหนดที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการใช้งานในสภาวะเปียกและแห้ง ปีกลูกถ้วยจึงได้รับการออกแบบมาเพื่อให้ทำหน้าที่ดังกล่าว และยางซิลิโคนก็ถูกนำมาใช้เป็นฉนวนโครงหุ้มสำหรับทำปีกลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

### 3.4 ยางซิลิโคน

โครงสร้างโมเลกุลพื้นฐานของยางซิลิโคนคือ พอลิไดเมทิลไซลอกเซน (polydimethylsiloxane : PDMS) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 องค์ประกอบมูลฐานในโมเลกุลของ พอลิไดเมทิลไซลอกเซนจะประกอบด้วย สายโซ่หลักเป็นสารอนินทรีย์ (inorganic backbone) จากอะตอมของ ซิลิกอน (silicon : Si) กับ ออกซิเจน (oxygen : O) และมีเมทิล (methyl : CH<sub>3</sub>) เป็นห่วงโซ่ด้านข้างบนอะตอมของซิลิกอนเป็นหมู่ข้างเคียง (side group)



ระยะของพันธะซิลอกเซน ( $1.6 \times 10^{-10}$  m) มีความยาวมากกว่าระยะของพันธะคาร์บอน-คาร์บอน ( $1.54 \times 10^{-10}$  m) และมุมของพันธะซิลอกเซน (O - Si - O) ( $140^\circ$ ) ก็มีค่ามากกว่ามุมของพันธะคาร์บอนของพอลิเอทิลีน (C - C - C) ( $109^\circ$ ) นอกจากนี้พลังงานที่ใช้ในการหมุนพันธะ Si - O ( $< 0.5$  kJ/mol) มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานที่ใช้ในการหมุนของพันธะ C - C (15.4 kJ/mol) หรือพันธะ C - O (11.31 kJ/mol) จึงทำให้พันธะซิลอกเซนหมุนได้ง่าย ด้วยเหตุนี้โครงสร้างโมเลกุลของซิลิโคนพอลิเมอร์จึงเป็นแบบเกลียว (helical structure) โดยประกอบด้วยพันธะ Si - O จำนวน 6 พันธะในหนึ่งรอบเกลียว ซึ่งโครงสร้างแบบนี้จะส่งผลให้ผิวของซิลิโคนพอลิเมอร์ปกคลุมไปด้วยเมทิลซึ่งมีคุณสมบัติผิวหยดน้ำดีและมีพลังงานแรงดึงผิวต่ำจากโครงสร้างดังกล่าว ทำให้ผิวของ PDMS มีคุณสมบัติที่สำคัญประกอบด้วย

- 1) แรงระหว่างหมู่ของเมทิลต่ำ
- 2) ความสามารถในการยืดหยุ่นของพันธะซิลอกเซนที่ดี
- 3) ความแข็งแรงของพันธะซิลอกเซนสูง
- 4) การมีคุณสมบัติเป็นพันธะที่มีขั้วบางส่วนของพันธะซิลอกเซน

ลักษณะสมบัติที่กล่าวมาข้างต้นของพอลิไดเมทิลซิลอกเซนซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้ยางซิลิโคนมีคุณสมบัติเหมาะสมที่จะนำมาใช้ทำลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์สำหรับใช้ในระบบไฟฟ้าแรงสูงซึ่งคุณสมบัติเหล่านั้นประกอบด้วย

- 1) คุณสมบัติของการเป็นไดอิเล็กตริกที่ดี
- 2) มีความทนทานเยื่อมต่อสภาวะอากาศ
- 3) คุณสมบัติของผิวแบบหยดน้ำดี
- 4) มีเสถียรภาพสูงทางความร้อนและการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน

ยางซิลิโคน (cross linked PDMS หรือ XPDMS) ที่นำมาใช้เป็นฉนวนภายนอกในระบบไฟฟ้าแรงสูงสามารถแบ่งได้ 2 แบบตามขบวนการผลิต คือ high temperature vulcanization silicone rubber (HTV SiR) และ room temperature vulcanization silicone rubber (RTV SiR) นอกจากนี้ยังมีการเติมสารเติมแต่งและสารต่อเติมลงไปในยางซิลิโคนเพื่อทำการเพิ่มหรือปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของยางซิลิโคนให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานและทนต่อสภาวะแวดล้อม

สารต่อเติมเป็นสารที่เติมเข้าไปเสริมแรงยางซิลิโคนเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพ โดยสามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) ค่าความยืดหยุ่น (Modulus) ค่าความทนต่อการฉีกขาด (tear strength) และค่าความต้านทานต่อการขูดขีด (abrasion resistance) ของยางซิลิโคน ตัวอย่างเช่น เหม่าซิลิกา (fumed silica) ที่เติมเข้าไปเพื่อควบคุมความหนืดของยางซิลิโคน อลูมินาไตรไฮดรอกไซด์ ( $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ : ATH) ที่เติมเข้าไปเพื่อเพิ่มความทนทานต่อร่องผิวเสื่อมสภาพ

จากวาทไฟ และเพื่อเพิ่มความสามารถในการทนไฟ โดยอลูมินาไตรไฮดรอกไซด์จะแตกตัวเป็น อลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และ น้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) เมื่อถูกทำให้ร้อนและอุณหภูมิเพิ่มสูงกว่า  $200^\circ\text{C}$  เนื่องจากการเกิดขึ้นของน้ำเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน จึงทำให้ผิวของยางซิลิโคนเย็นลง ซึ่งทำให้อาร์กทางไฟฟ้าดับได้

สารคู่ควบ (coupling agents) เป็นสารที่เติมเข้าไปเพื่อทำปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อเพิ่มความสามารถในการเชื่อมเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารต่อเติมและสายโซ่พอลิเมอร์ การเชื่อมกันอย่างดีของสารต่อเติมและสายโซ่พอลิเมอร์จะทำให้ยางซิลิโคนมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี ค่าความยืดหยุ่น และค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มมากขึ้น

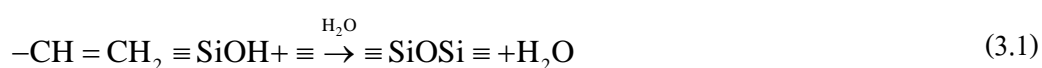
### 3.5 ผลลัพธ์ที่เกิดจากโครงสร้างเชื่อมขวาง

#### 3.5.1 High temperature vulcanization

โครงสร้างเชื่อมขวางของซิลิโคนของสายโซ่พอลิเมอร์ที่ไม่เป็นส่วนประกอบของสารประกอบเปอร์ออกไซด์ที่อุณหภูมิ  $100^\circ\text{C}$  โดยที่สารประกอบเปอร์ออกไซด์มีอนุมูลอิสระอยู่ในซึ่งอะตอมของไฮโดรเจนที่ไม่อิ่มตัวเป็นปฏิกิริยาโต้ตอบกับอนุมูลอิสระนี้ โดยถูกผสมกันจากการเกิด โครงสร้างเชื่อมขวางที่อยู่ระหว่างสายโซ่ของไซลอกเซน ส่วนสารที่ไม่เป็นส่วนประกอบของซิลิโคนจะถูกกระเหยกลายเป็นไออย่างรวดเร็ว

#### 3.5.2 Room temperature vulcanization

วิธีนี้มีความแตกต่างจากวิธีที่ใช้โดยทั่วไปในการผลิตยางซิลิโคนสำหรับภายนอกอาคาร ซึ่งการรวมตัวกันอย่างหนาแน่นของกลุ่มซิลานอล (silanol group หรือ Si - OH) จากพันธะไซลอกเซนกับน้ำ ดังสมการที่ (3.1) โดยที่ปฏิกิริยาการรวมตัวของน้ำ เป็นกระบวนการที่มีกรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

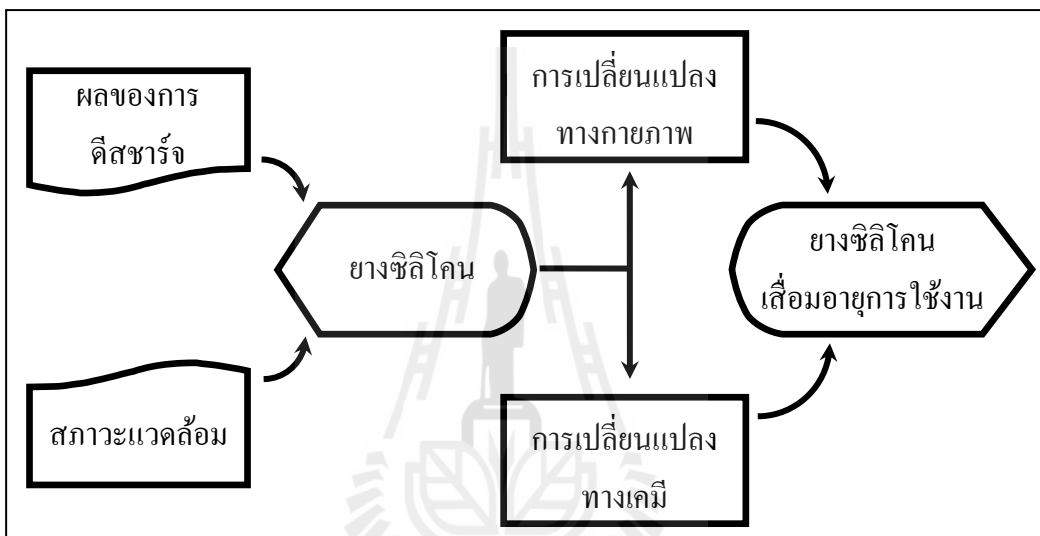


ปฏิกิริยา hydrosilylation เป็นปฏิกิริยาที่มีการเพิ่มขึ้นของอะตอมซิลิกอนและไฮโดรเจน (Si-H) ของพันธะคาร์บอนที่ยังไม่อิ่มตัว ซึ่งโดยทั่วไปแล้วกลุ่มไวนิล (vinyl group หรือ  $-\text{CH} = \text{CH}_2$ ) ถูกเร่งปฏิกิริยาโดยโลหะผสม เช่น แพลตตินัม เป็นต้น ดังสมการที่ (3.2)



### 3.6 การเสื่อมอายุของยางซิลิโคน

การใช้ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์เป็นเวลานานย่อมต้องมีการเกิดการเสื่อมอายุทางฉนวน ซึ่งเกิดได้หลายสาเหตุ เช่น ผลกระทบทางความร้อนและความเครียดทางไฟฟ้าที่ส่งผลต่อการฉนวนไฟฟ้า ในบางกรณีการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนสามารถเกิดจากสภาวะแวดล้อมได้เช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น ความชื้น รังสี และ ความร้อนจากทางกลต่าง ๆ สิ่งเหล่านี้เป็นตัวการทำให้เกิดการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนได้เช่นกัน กระบวนการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 กระบวนการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน

เมื่อลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ถูกนำมาใช้งานในระบบไฟฟ้าแรงสูง ภายใต้สภาพอากาศและสิ่งแวดลอมแบบต่าง ๆ เป็นเวลานาน การเปลี่ยนแปลงในคุณสมบัติต่าง ๆ ของยางซิลิโคนจะเกิดขึ้นโดยไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ เนื่องจากยางซิลิโคนทำจากสารอนินทรีย์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ อาจจะเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ (เช่น การเกิดการสึกกร่อน การเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากควาบไฟ เป็นต้น) การเปลี่ยนแปลงทางเคมี (เช่น เกิดการแตกตัวของพอลิเมอร์ (depolymerization)) หรือการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเคมี (physicochemical) เช่น การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติหยดน้ำดื่น เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้จะนำไปสู่ปัญหาการลัมเหลวทางไฟฟ้าและทางกลของพอลิเมอร์ที่ใช้ทำฉนวน การเปลี่ยนแปลงในระยะยาวของคุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้เรียกว่า “การเสื่อมอายุ (ageing)”

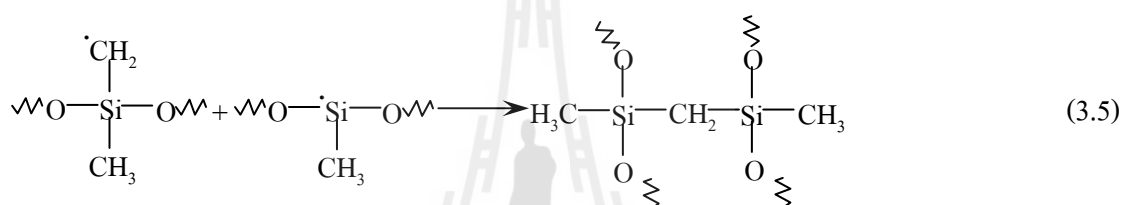
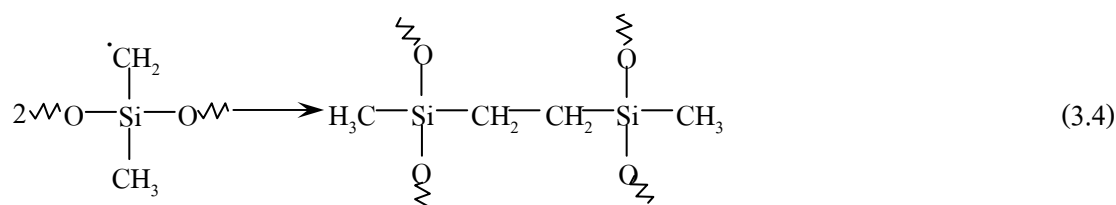
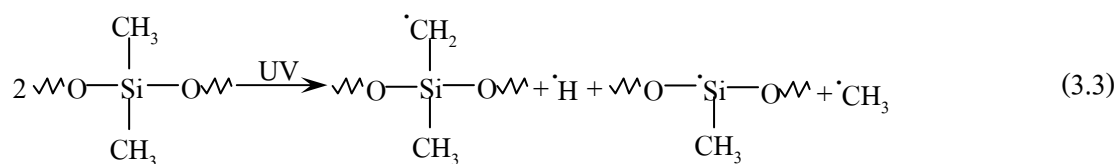
ปัญหาที่เป็นกังวลมากที่สุดในการใช้งานลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ก็คือ การเสื่อมถอยของผิวลูกถ้วยฉนวน (surface deterioration) ซึ่งเมื่อเกิดขึ้นแล้วจะทำให้ความสามารถในการป้องกันการแทรกซึมของน้ำไปยังแกนลูกถ้วย (RFP core) ของลูกถ้วยฉนวนลดลง นอกจากนี้ผลของการเสื่อมถอยของผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์เนื่องจากผลของคีสซาร์จและสภาวะแวดล้อม ยังเร่งให้คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของยางซิลิโคนลดลง ส่งผลให้ผิวของยางซิลิโคนเปียกน้ำ และมีฟิล์มน้ำที่มีความหนาไฟฟ้าสูงเกาะที่ผิว ผลที่ตามมาก็คือ จะทำให้มีกระแสรั่ว (leakage current) และคีสซาร์จจากแถบแห้ง (dry band arc discharge) ที่ผิวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ปฏิบัติทางเคมีที่อาจเกิดขึ้นได้ เนื่องจากมีกระแสรั่วและคีสซาร์จจากแถบแห้งที่ผิวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ซึ่งนำไปสู่การเสื่อมถอยของผิวลูกถ้วยฉนวนโดยประกอบด้วย

- 1) การเกิดการแตกตัว (scission) หรือเกิดการเปลี่ยนแปลง (interchange) ของ  $\text{Si-CH}_3$  หรือ  $\text{Si-O}$  ของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน
- 2) การเกิดไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ของ  $\text{Si-CH}_3$  หรือ  $\text{Si-O}$  ของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน
- 3) การเกิดออกซิเดชัน (oxidation) ของ  $\text{Si-CH}_3$  หรือ การเกิดการเชื่อมขวางของ  $\text{Si-O}$  ของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน

### 3.6.1 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ผิวของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน

ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ผิวของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน เป็นปฏิกริยาที่มีบทบาทต่อการสลายตัวทางเคมีของยางซิลิโคน ออกซิเจนในอากาศเป็นตัวการสำคัญต่อการเร่งปฏิกริยาออกซิเดชันในโครงสร้างทางเคมีของฉนวนยางซิลิโคน ออกซิเจนสามารถอยู่ได้ทั้งในรูปของแก๊สออกซิเจนและในรูปของอนุมูลอิสระ ซึ่งออกซิเจนในรูปของอนุมูลอิสระนี้เองมีความไวทางเคมีสูงและเกี่ยวข้องกับเกิดออกซิเดชันได้เองของยางซิลิโคน โดยเฉพาะเมื่อมีตัวเร่งปฏิกริยาต่าง ๆ เช่น ความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเลต

ปฏิกริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นได้เล็กน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของยางซิลิโคน อนุมูลออกซิเจนอิสระ และตัวเร่งปฏิกริยา โดยทั่วไปแล้ว พันธะในโครงสร้างของยางซิลิโคนที่สามารถแตกตัวได้ในปฏิกริยาลูกโซ่ได้แก่ พันธะโควาเลนต์ (covalent bond) ระหว่างไฮโดรเจนและอะตอมอื่น ๆ เช่น คาร์บอนและออกซิเจน เป็นต้น หากยางซิลิโคนมีโครงสร้างทางเคมีที่เอื้อต่อการแตกตัวได้ง่าย ยางซิลิโคนนั้นจะเสื่อมสภาพตัวทางเคมีโดยปฏิกริยาออกซิเดชันได้ง่ายตามไปด้วย



จากสมการที่ (3.3) ถึง (3.5) เป็นสมการของกลุ่มไฮดรอกซิล (hydroxyl group) กับกลุ่มซิลานอล (Silanol group) ของเมทิลีน (methylene) และออกซิเจน บางปฏิกิริยาถูกแทนที่ด้วยพลังงานที่สูง เช่น จากการเกิดโคโรนา ดังที่แสดงในสมการที่ (3.3) ถึง (3.5) แสดงให้เห็นถึงรังสี อัลตราไวโอเล็ตไม่สามารถถูกดูดซึมได้ด้วยยางซิลิโคนจึงไม่ใช่สาเหตุของการย่อยสลาย อย่างไรก็ตาม รังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีพลังงานสูงได้ถูกสร้างร่วมกับปฏิกิริยาอื่น ๆ ที่ได้จากโคโรนาดีสชาร์จหรือพลาสมาดีสชาร์จ เช่น ไอออน อิเล็กตรอน และอนุภาคอิสระ รังสีอัลตราไวโอเล็ตแสดงให้เห็นถึงแหล่งพลังงานที่ต้องการการโต้ตอบจากอนุภาคอิสระดังสมการที่ (3.3) ในสมการที่ (3.4) และสมการที่ (3.5) เกิดขึ้นจากการรวมตัวกันอีกครั้งและเกิดการรั่วไหลของกลุ่มเมทิลีน

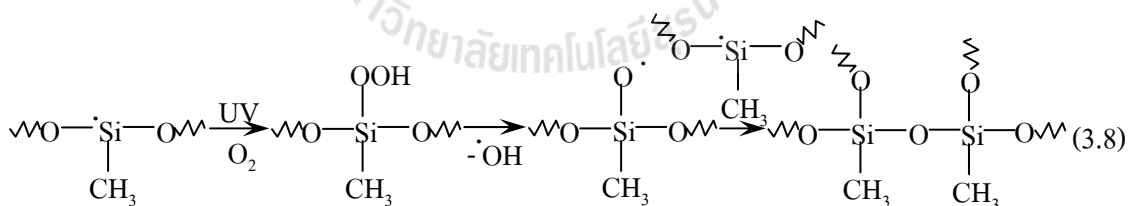
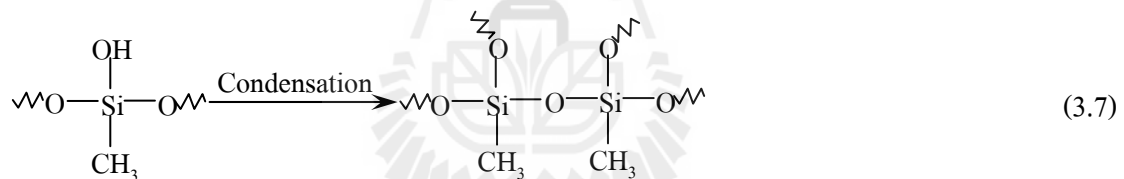
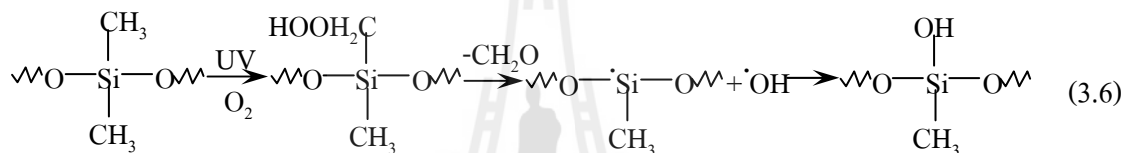
### 3.6.2 การเกิดไฮโดรไลซิสที่มีผลของพอลิไดเมทิลซิลอกเซน

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) เป็นอีกหนึ่งปฏิกิริยาที่พบได้บ่อยในการสลายตัวทางเคมีของยางซิลิโคน ปฏิกิริยานี้เกี่ยวข้องกับการสลายตัวของยางซิลิโคนเมื่อมีน้ำอยู่ด้วย ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้กับยางซิลิโคนที่อยู่ในสถานะที่มีความชื้นหรือมีหยดน้ำเกาะอยู่ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เนื่องจากปฏิกิริยาที่มีน้ำเป็นส่วนร่วมมักจะถูกเร่งปฏิกิริยาด้วยไฮดรอกไซด์ไอออน (hydroxide ion) และปริมาณของน้ำมีผลต่อการเกิด ปฏิกิริยาอีกด้วย



กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเริ่มจากไฮดรอกไซด์ไอออนหรือน้ำเข้าทำปฏิกิริยา แล้วส่งผลทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะคาร์บอนออกซิเจน นอกจากนี้การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสยังขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของยางซิลิโคนอีกด้วย

จากสมการที่ (3.6) เป็นสมการเกี่ยวกับน้ำของกลุ่มไซลันอล ซึ่งเป็นการเกิดไฮโดรไลซิสของพันธะไซลอคเซน โดยสามารถก่อตัวขึ้นมาได้จากปฏิกิริยาอื่นได้ด้วยเช่นกัน ผลลัพธ์ที่เกิดจากการรวมตัวกันแน่นของกลุ่มไซลันอลภายในโครงสร้างเชื่อมขวางของพอลิไดเมทิลไซลอคเซน ส่งผลให้เกิดสะพานไซลันอล แสดงได้ดังสมการที่ (3.7) ถ้าน้ำที่คงอยู่ถูกระเหยกลายเป็นไอ ความร้อนที่ได้จะเกิดจากรังแกบแห้ง พันธะที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อไซลอคเซนทำปฏิกิริยากับธาตุมูลฐานของซิลิโคนร่วมกับออกซิเจน แสดงได้ดังสมการที่ (3.8)

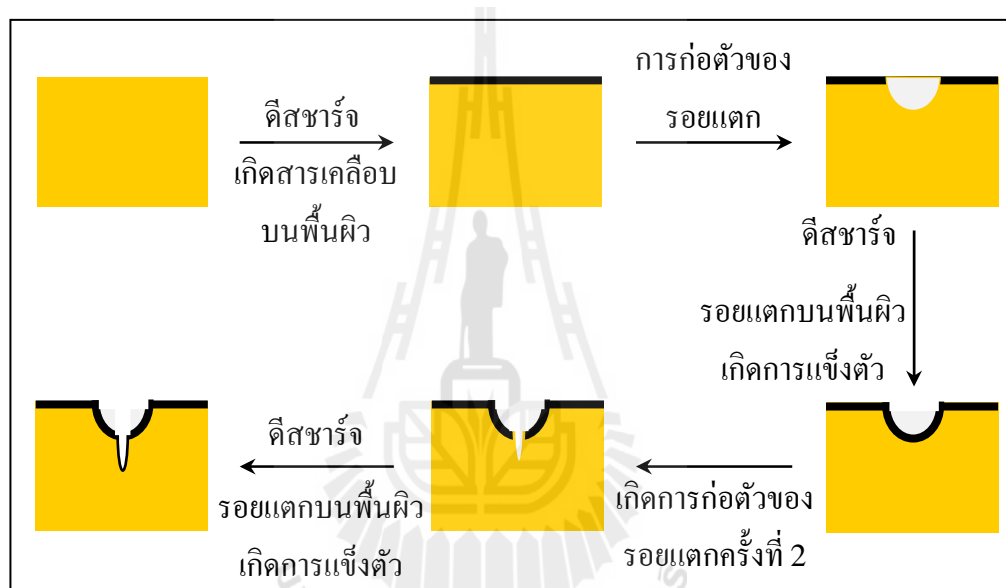


เมื่อไม่คำนึงถึงกลไกการเกิดโครงสร้างเชื่อมขวาง ผลกระทบทั้งหมดที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นของออกซิเจนจะส่งผลไปที่พื้นผิวของพอลิไดเมทิลไซลอคเซน ด้วยเหตุนี้ หลังจากที่เกิดโคโรนาดีสชาร์จและพลาสมาดีสชาร์จ สารอนินทรีย์ที่เกิดขึ้นสามารถสังเกตได้ในบริเวณพื้นผิวของพอลิไดเมทิลไซลอคเซน

โครงสร้างเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของพอลิไดเมทิลไซลอคเซนนำไปสู่การสร้างชั้นผิว ซึ่งชั้นผิวนี้อาจมีความไม่ชอบพอลิไดเมทิลไซลอคเซนบริสุทธิ์ ทำให้เกิดการเปราะด้วยเหตุนี้จึงสามารถแตกหักได้โดยธรรมชาติหรือหลังจากเกิดความผิดปกติทางกล ชั้นผิวนี้อาจถูก

เรียกเป็น glassy หรือ silica-like layer ซึ่งชี้ให้เห็นว่า silica-like layer มีความหนาแน่นที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิไดเมทิลไซลอคเซนบริสุทธิ์

นอกจากนี้ความสำคัญในเรื่องผลต่างด้านความลึกและความหนาของ silica-like layer ทำให้เห็นถึงรอยแตกที่เกิดจากโคโรนาดิสชาร์จและพลาสมาดิสชาร์จจากพื้นผิวของวัสดุซิลิโคนต้นแบบ นั่นคือ เริ่มมีรอยแตกเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อรอยแตกลึกจนถึงจุดสูงสุด รอยแตกนี้จะสิ้นสุดเมื่อวัสดุต้นแบบถูกป้องกันจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิชั่นได้ กลไกการเกิดรอยแตกแสดงได้ดังรูป 3.4



รูปที่ 3.4 รอยแตกที่เกิดจากการดิสชาร์จทางไฟฟ้า (Kamyar, 2004)

### 3.7 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนของยางซิลิโคน

ดิสชาร์จบางส่วน (partial discharge) คือปรากฏการณ์หนึ่งที่ประจุไฟฟ้าทำลายความเป็นฉนวน สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งภายในเนื้อฉนวนและภายนอกเนื้อฉนวน เป็นผลจากการที่ประจุไฟฟ้าไหลผ่านช่องว่างเล็ก ๆ โดยส่งผลต่อความเสียหาย ซึ่งช่องว่างเหล่านี้สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้น้อยกว่าฉนวนที่อยู่รอบ ๆ ความเสียหายจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่รุนแรงขึ้น จะนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ (breakdown) ได้ในที่สุด

ดิสชาร์จบางส่วนก่อให้เกิดผลกระทบหลายอย่างเช่น แสง เสียง รั้งสี ปฏิกิริยาทางเคมี และผลทางไฟฟ้า เป็นต้น ผลจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบการฉนวน

ทำให้ฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพเร็ว อายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลง และนำไปสู่การเกิดเบรกควาน์ได้ในที่สุด ดิสชาร์จบางส่วนแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ

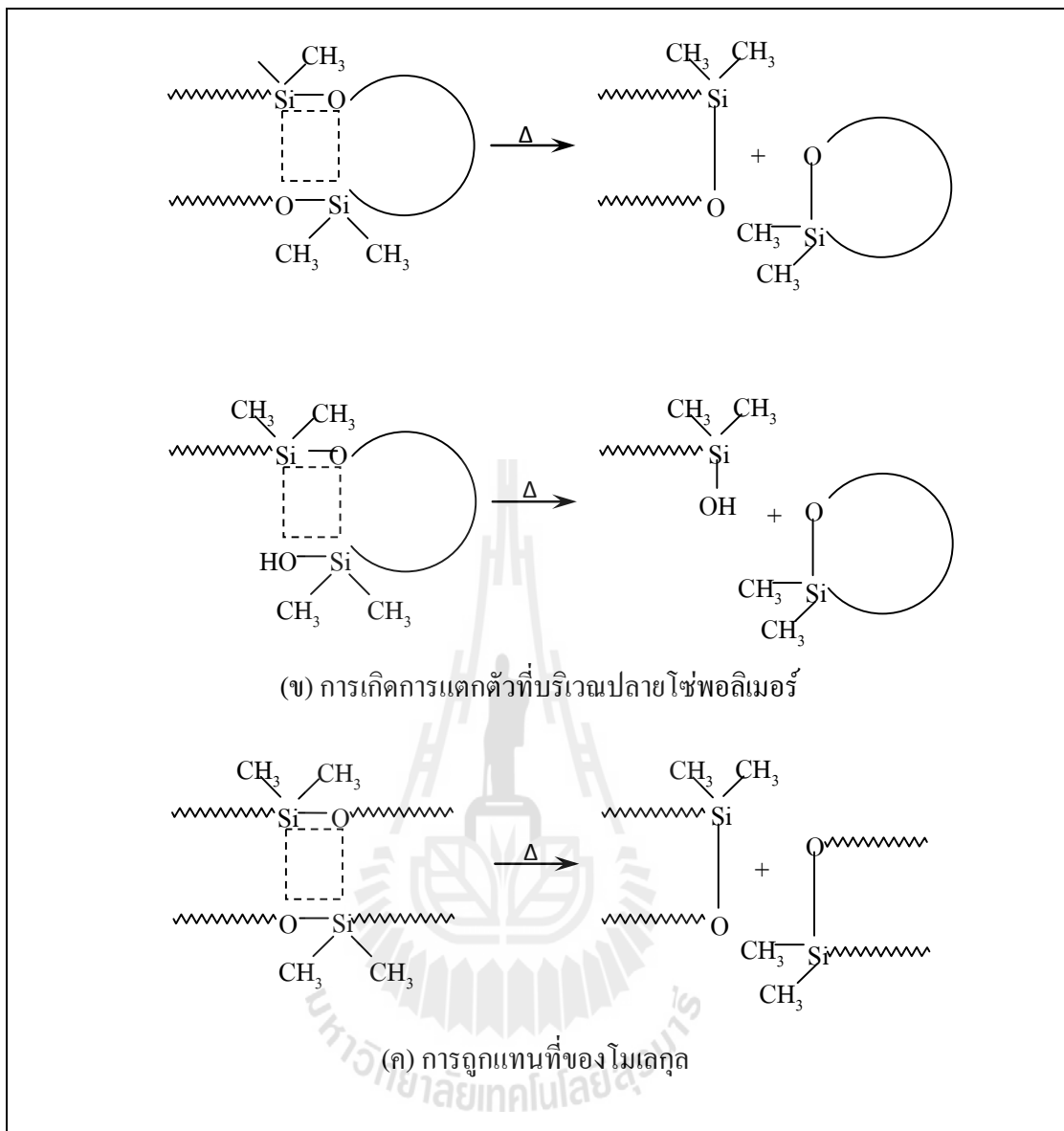
- 1) โครนาดีสชาร์จ (corna discharge)
- 2) ดิสชาร์จตามผิว (surface discharge)
- 3) ดิสชาร์จภายใน (internal discharge)

โครนาดีสชาร์จเป็นดิสชาร์จบางส่วนประเภทหนึ่ง สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งภายในเนื้อฉนวนและภายนอกเนื้อฉนวน เกิดจากอิเล็กตรอนพลังงานสูงจากบริเวณที่มีความเครียดทางไฟฟ้าสูงเช่น ขอบแหลมคมบนตัวนำไฟฟ้า หรือแม้แต่อนวนไฟฟ้าก็ตาม เมื่ออิเล็กตรอนที่หลุดออกมาชนเข้ากับโมเลกุลของแก๊สในอากาศ ทำให้เกิดการแตกตัวและปล่อยพลังงานจากการแตกตัวออกมาบางส่วนในรูปของการเรืองแสง บางส่วนอาจเป็นเสียงซ่า ซึ่ง โมเลกุลของแก๊สที่ถูกชนจนแตกตัวนั้นจะเปลี่ยนจากสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้าไปสู่สภาพขั้วและนำไฟฟ้าได้ ซึ่งการขยายตัวของโครนาดีสชาร์จส่งผลต่อการเกิดควาบไฟตามผิว (flashover) หรืออาร์กที่ฉนวน และเกิดเบรกควาน์ได้ในที่สุด

### 3.8 การเสื่อมสลายทางความร้อนของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน

เมื่อมวลโมเลกุลต่ำของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน ได้มีการเคลื่อนที่ออกไปจากผิวของเนื้อยางซิลิโคน ส่งผลให้เกิดคุณสมบัติหยดน้ำลื่น ความร้อนและไฟฟ้าเช่น อาร์กแถบแห้งต่ออย่างซิลิโคน ดังนั้น พฤติกรรมการย่อยสลายทางความร้อนของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนสามารถช่วยแก้ปัญหาเกี่ยวกับการใช้งานแรงดันสูงได้ไม่น้อย

กลไกการเกิดการแตกตัวในยางซิลิโคนที่มีการเปลี่ยนแปลงพันธะโควาเลนต์ ทั้งก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยาจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ เกิดขึ้น ดังรูปที่ 3.5 โครงสร้างในการผลิตโมเลกุลที่สายโซ่พอลิเมอร์ ดังรูปที่ 3.5 (ก) หรือที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ ดังรูปที่ 3.5 (ข) ปฏิกิริยาของโมเลกุลที่ถูกแทนที่ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ค) ปฏิกิริยาของโมเลกุลส่งผลให้มีวัฏจักรในมวลที่สูงแต่โมเลกุลเหล่านี้จะถูกขัดขวาง ซึ่งอาจส่งผลต่อการเคลื่อนย้ายโครงสร้างภายในเครือข่าย



รูปที่ 3.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาแตกตัว (Henrik, 2001)

การเกิดการแตกตัวหรือการเชื่อมขวาง เป็นกลไกที่โดดเด่นในช่วงที่เกิดการย่อยสลายทางความร้อนของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน การเสื่อมอายุของออกซิเจนอิสระเป็นสาเหตุส่วนใหญ่ในการเกิดการแตกตัวของออกซิเจน ซึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของเมทิล นำไปสู่การแตกตัวที่เพิ่มขึ้นและนำไปสู่โครงสร้างการเชื่อมขวาง การก่อตัวของชั้นผิวที่เปราะบางบนยางซิลิโคน ที่สภาวะอากาศมีอุณหภูมิ 135-240 °C โดยที่พัฒนาการของชั้นผิวที่เปราะบางเกิดจากอัตราการสูญเสียน้ำหนัก

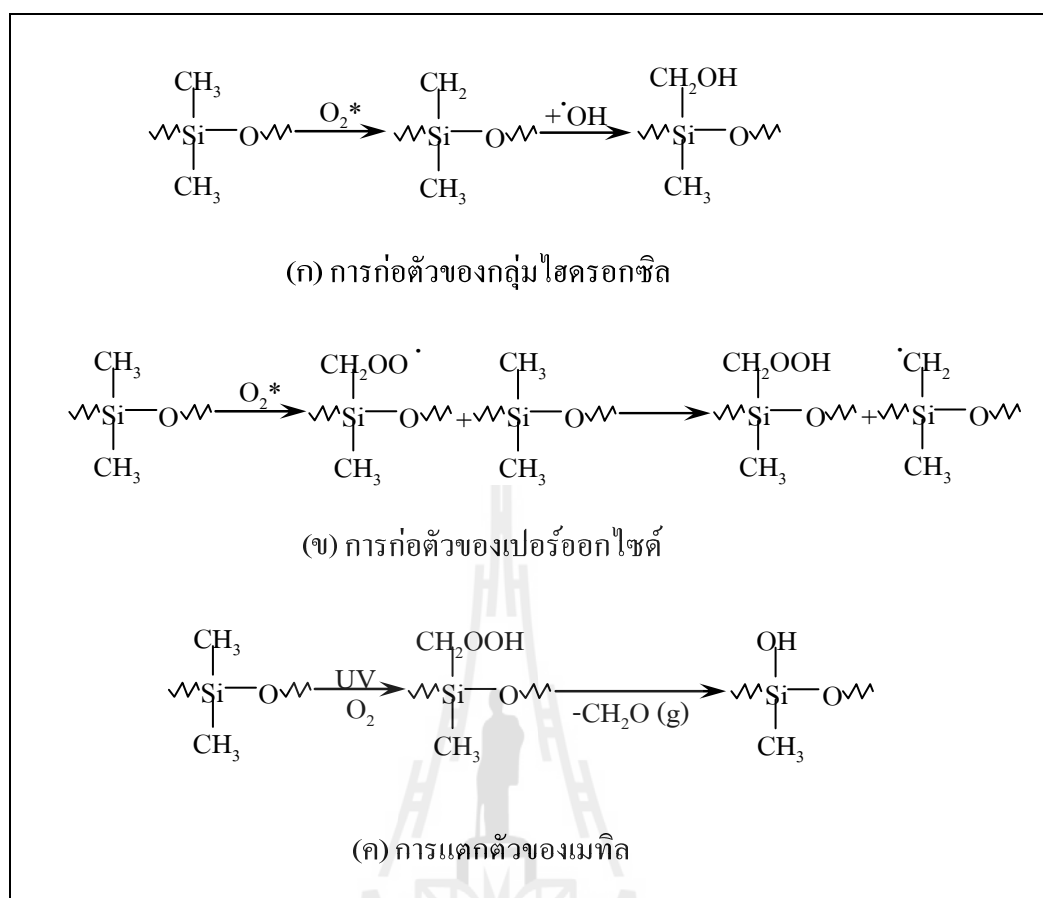
### 3.9 ความเสียหายของคุณสมบัติหยดน้ำเนื่องจากการเกิดดีสซาร์จทางไฟฟ้า

ความเสียหายและการฟื้นคืนสภาพของคุณสมบัติหยดน้ำล้นจากการเกิดดีสชาร์จทางไฟฟ้า ได้มีนักวิจัยวิเคราะห์ถึงคุณสมบัตินี้มาหลายคนแล้ว มีการประยุกต์ใช้ข้อดีของคุณสมบัติหยดน้ำล้น ร่วมกับวัสดุอุปกรณ์อื่น ๆ เช่น การใช้งานในทางการแพทย์ ในด้านเทคโนโลยีการพิมพ์ เป็นต้น ด้วยเหตุนี้คุณสมบัติหยดน้ำล้นสามารถสร้างปัญหาได้ด้วยเช่นกัน ความซับซ้อนของการเกิดโคโรนาดีสชาร์จหรือพลาสมาดีสชาร์จเป็นส่วนหนึ่งของความจริงที่ว่า ความแข็งแรงของพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ ดังนั้นการแผ่รังสีเช่น ประจุอิเล็กตรอน รังสีอัลตราไวโอเล็ต และ ไอโซน ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ขึ้นเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับโครงสร้างและองค์ประกอบของวัสดุ ผลกระทบหลักในการป้องกันโคโรนาดีสชาร์จหรือพลาสมาดีสชาร์จสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) การเพิ่มขึ้นของออกซิเจนโดยการก่อตัวของกลุ่มไฮดรอกซิลและกลุ่มคาร์บอนิล (carbonyl group)
- 2) การเชื่อมขวางของออกซิเดชัน
- 3) การย่อยสลายโครงสร้างเครือข่ายที่เกิดขึ้นในการสร้างมวลโมเลกุลของของสายโซ่พอลิเมอร์ในระดับต่ำ ระดับกลาง ไปจนถึงระดับสูงของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน

คุณสมบัติหยดน้ำล้นของยางซิลิโคนเป็นความเสียหายที่เกิดมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันในระหว่างที่มีการสัมผัสกันของผิวยางซิลิโคนกับไอโซนในอากาศ ซึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชันก่อให้เกิดการก่อตัวของสารอนินทรีย์เกิดโครงสร้างของชั้นคล้ายซิลิกา (silica-like) โครงสร้างเหล่านี้ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของน้ำบริเวณพื้นผิว

ในการใช้อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (infrared spectroscopy) แสดงให้เห็นถึงการก่อตัวของกลุ่มไฮดรอกซิล ( $\text{Si}-\text{CH}_2\text{OH}$ ) และ เปอร์ออกไซด์ ( $\text{Si}-\text{CH}_2\text{OOH}$ ) โดยเกิดจากการทำปฏิกิริยากันของออกซิเจนและพอลิไดเมทิลไซลอกเซน ดังรูปที่ 3.6 (ก) และ (ข)



รูปที่ 3.6 กลไกการเกิดโครงสร้างเชื่อมขวาง (Henrik, 2001)

รังสีอัลตราไวโอเล็ตที่อยู่ในโคโรนาดีสชาร์จหรือพลาสมาดีสชาร์จสามารถนำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและเกิดการแตกตัวของเมทิล ดังรูปที่ 3.6 (ค) อะตอมซิลิกอนซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นบวกมีการตอบสนองมากขึ้นเมื่อหัวของอะตอมออกซิเจนมีมากกว่าหัวของอะตอมคาร์บอน การควบแน่นของกลุ่มไซลานอล จึงส่งผลให้เกิดการก่อตัวของ  $\text{SiO}_x$  นอกจากนี้ โคโรนาดีสชาร์จที่เกิดขึ้นส่งผลให้เกิดธาตุต่าง ๆ ในอากาศเช่น  $\text{NO}_x$ ,  $\text{HNO}_2$  และ  $\text{HNO}_3$  ที่สามารถละลายลงบนพื้นผิวของพอลิ ไดมethyl ซิลอกเซนได้ ซึ่งเป็นกรดที่มีผลต่อการย่อยสลายของพื้นผิวพอลิเมอร์

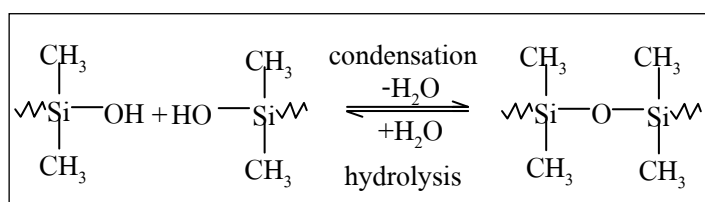
การพ่นคืนตัวของยางซิลิโคนหลังจากการเกิดโคโรนาดีสชาร์จหรือพลาสมาดีสชาร์จ นักวิจัยจำนวนมากแสดงให้เห็นว่าเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน โดยมีความแตกต่างของวัตถุดิบ วิธีการสะสม และสภาวะต่าง ๆ ในระหว่างการเกิดคุณสมบัติหยดน้ำขึ้น กลไกที่เป็นไปได้ในการพ่นคืนตัวจากการเกิดคุณสมบัติหยดน้ำขึ้นของยางซิลิโคนหลังจากการเกิดโคโรนาดีสชาร์จหรือพลาสมาดีสชาร์จดังนี้

- 1) เกิดการเปลี่ยนแปลงที่พื้นผิวเป็นจำนวนมาก

- 2) เกิดการควบแน่นของกลุ่มไฮดรอกซิลที่บริเวณพื้นผิว
- 3) การปนเปื้อนภายนอกของพื้นผิว
- 4) ความเรียบบริเวณพื้นผิวเกิดการเปลี่ยนแปลง
- 5) การสูญเสียออกซิเจนสู่บรรยากาศ
- 6) การย้ายที่ของมวลโมเลกุลต่ำบริเวณพื้นผิว

แรงขับเคลื่อนในการฟื้นคืนตัวของการเกิดคุณสมบัติหยดน้ำขึ้นจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของพลังงานอิสระบริเวณพื้นผิว ซึ่งกลุ่มขั้ว (polar group) ในโครงสร้างของยางซิลิโคนนี้มีความเป็นไปได้น้อยมากที่สามารถเปลี่ยนทิศทางได้อันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมที่จำกัด การเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวเป็นเพียงกระบวนการย่อย ๆ เท่านั้น และไม่สามารถอธิบายการฟื้นคืนตัวของคุณสมบัติหยดน้ำขึ้นของยางซิลิโคนที่เกิดจากการออกซิไดซ์ได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งมีโอกาสน้อยที่เกิดการปนเปื้อนบริเวณพื้นผิวภายนอก และเป็นสาเหตุในการเกิดคุณสมบัติหยดน้ำขึ้นของยางซิลิโคน โดยการฟื้นคืนตัวของคุณสมบัติหยดน้ำขึ้นในห้อง สะอาดนี้มีการฟื้นคืนตัวที่ใกล้เคียงกันกับในสภาวะปกติกลุ่มไฮดรอกซิลบริเวณพื้นผิวทำปฏิกิริยาโดยผ่านกลไกการรวมตัวภายใต้การปลดปล่อยอนุภาคของน้ำ ดังรูปที่ 3.7 อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติหยดน้ำขึ้นที่เกิดขึ้นเกิดจากการเชื่อมขวางของ Si-O ที่มีอยู่ในธรรมชาติ ถึงแม้ว่าการป้องกันการถูกกัดกร่อนจากการเกิดโคโรนาดีสชาร์จไปนั้นอาจเป็นปัจจัยสำคัญในการเปลี่ยนแปลงลักษณะการของการเปียกบนพื้นผิวยางซิลิโคน ซึ่งเป็นส่วนน้อยในกระบวนการฟื้นคืนตัว

Lee and Homan เป็นกลุ่มแรกที่มีการแนะนำให้มีการย้ายที่ของมวลโมเลกุลต่ำบริเวณพื้นผิวที่มีกลไกการเกิดคุณสมบัติหยดน้ำขึ้น โดยศึกษาชนิดพอลิเมอร์ของไดเมทิลไฮดรอกเซน และเมทิลไฮโดรเจนไฮดรอกเซน (methyl-hydrogen-siloxane) โดยการสะท้อนรังสีอินฟราเรดจากเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี และพบว่า Si-O เกิดการลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเกิดโคโรนาดีสชาร์จหรือพลาสมาดีสชาร์จ และจะค่อย ๆ หายไปในเวลาต่อมา



รูปที่ 3.7 การรวมตัวของกลุ่มไฮดรอกซิลซิลานอลโดยการก่อตัวเครือข่ายการเชื่อมขวางของออกซิเจน (Henrik, 2001)

### 3.10 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมต่อคุณสมบัติหยดน้ำลื่น

ในระหว่างการทดสอบยางซิลิโคนภายนอกอาคารที่ถูกสัมผัสกับสภาพแวดล้อมต่าง ๆ เช่น น้ำฝน หมอก และรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากแสงแดด เป็นต้น สภาพแวดล้อมเหล่านี้เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติหยดน้ำลื่น โดยสามารถสรุปปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมต่อคุณสมบัติหยดน้ำลื่นไว้ดังนี้

#### 3.10.1 การแช่น้ำ

น้ำหนักของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนบริสุทธิ์เมื่อถูกแช่น้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิห้องมีค่าประมาณ 0.07% ของน้ำหนัก ในทางกลับกัน ยางซิลิโคนแสดงให้เห็นถึงการไม่ดูดซับน้ำหรือดูดซับน้ำได้น้อยมาก เมื่อน้ำซิลิโคนแช่น้ำเป็นเวลานานส่งผลให้คุณสมบัติหยดน้ำลื่นลดลงที่เล็กน้อย ผลกระทบนี้เป็นผลจากการเกิดไฮเดรชัน (hydration) ใน Si - O ของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน การย่อยสลายของพันธะไซลอกเซนที่สร้างให้กลุ่มไฮดรอกซิลเกิดการชอบน้ำหรือเกิดการกัดเซาะพื้นผิว และนำไปสู่การสูญเสียสารบางชนิดที่อยู่บริเวณพื้นผิว นักวิจัยท่านอื่นได้กล่าวไว้ว่า คุณสมบัติหยดน้ำลื่นลดลงในระหว่างการแช่น้ำไม่ได้เป็นตัวชี้วัดการย่อยสลาย แต่เกิดจากการเพิ่มขึ้นของชั้นผิวบนพื้นผิวที่เกิดจากน้ำเจาะเข้าสู่พื้นผิว ซึ่งอัตราการย่อยสลายของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนในสภาพแวดล้อมที่มีน้ำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แร่ธาตุเหล่านี้ไม่ได้เป็นสารทั่วไปที่เป็นส่วนประกอบของยางซิลิโคนที่ใช้เป็นฉนวนกันความร้อนภายนอกอาคาร อย่างไรก็ตามธาตุเหล่านี้จะอยู่ในมลพิษที่พื้นผิวฉนวนต้องสัมผัส

#### 3.10.2 รังสีอัลตราไวโอเล็ต

พอลิไดเมทิลไซลอกเซนไม่ได้ดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ต ในช่วง 300 – 400 nm แต่ในช่วงความยาวคลื่นที่ 290 nm เป็นต้นไป พอลิไดเมทิลไซลอกเซนมีความเสถียรมากต่อรังสีอัลตราไวโอเล็ต อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติหยดน้ำลื่นของพื้นผิวยางซิลิโคนมีอัตราที่ลดลงเมื่อสัมผัสกับแสงแดด



### 3.11 ลักษณะการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

คุณสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์ได้รับประโยชน์มาจากคุณสมบัติพันธะทางเคมีที่สามารถบิดงอได้ และมีสายโซ่พอลิเมอร์เป็นสายโซ่ที่ยาวและเคลื่อนไหวได้อย่างเป็นธรรมชาติ ซึ่งวัสดุพอลิเมอร์สามารถมีอายุการใช้งานที่ยาวหรือสั้นนั้น ขึ้นอยู่กับความเครียดต่าง ๆ โดยความเครียดที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง สามารถนำไปสู่การเสื่อมสภาพของพื้นผิวบนยางซิลิโคนของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ได้

การเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ถูกติดตั้งภายนอกอาคาร มีจุดเริ่มต้นจากการเปลี่ยนแปลงการเกิดคุณสมบัติหยดน้ำขึ้น จากนั้นผลที่ตามมาคือ การเกิดอาร์กแถบแห้ง และในกรณีของยางซิลิโคนนั้น จะเกิดการลดลงของของเหลวที่มีน้ำหนักมวล โมเลกุลต่ำที่อยู่บนพื้นผิวของซิลิโคน ความขรุขระของยางซิลิโคนเพิ่มมากขึ้น เกิดการสลายตัวของโครงสร้างโมเลกุลที่อยู่บนพื้นผิวของยางซิลิโคน เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างการตกผลึกของพอลิเมอร์ และเกิดการจับกลุ่มใหม่ของสารต่อเติมที่เป็นสารเติมแต่งในยางซิลิโคน ส่งผลให้เกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากควาไฟฟ้าและสึกกร่อนได้ในที่สุดลักษณะการเสื่อมสภาพในการใช้งานของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ประกอบด้วย

#### 3.11.1 ฝุ่นชอล์ก

การเกิดฝุ่นชอล์ก (chalking) เป็นผลจากการเกิดรังสีอัลตราไวโอเล็ตหรือปรากฏการณ์ต่าง ๆ ทางไฟฟ้าส่งผลกระทบต่อยางซิลิโคน ซึ่งในยางซิลิโคนนี้มีส่วนผสมที่เรียกว่า สารต่อเติมในปริมาณที่สูง เมื่อปริมาณของยางซิลิโคนบนพื้นผิวลดลง ทำให้ปริมาณสารต่อเติมที่อยู่ในยางซิลิโคนลดลงตามไปด้วย ซึ่งสารต่อเติมโดยส่วนใหญ่ถูกแปรสภาพกลายเป็นเถ้า ปรากฏให้เห็นเป็นฝุ่นแป้งสีขาวบนพื้นผิวของยางซิลิโคน ลักษณะการเกิดฝุ่นชอล์กนี้โดยส่วนใหญ่มักเกิดกับบริเวณที่ไม่ใช่ยางซิลิโคนของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ถึงแม้ว่าฝุ่นชอล์กที่เกิดขึ้นจะไม่เป็นอันตรายต่อความเป็นฉนวนของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ก็ตาม แต่ส่งผลต่อการเกิดการสะสมสิ่งเจือปนอื่น ๆ บนพื้นผิวของซิลิโคนได้มากกว่าบริเวณที่ไม่มีฝุ่นชอล์กเกิดขึ้น

#### 3.11.2 การรั่วไหลของกาวซิลิโคน

ในแต่ละสถานประกอบการ การผลิตลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์มีลักษณะที่เฉพาะตัวตามแต่การออกแบบของสถานประกอบการนั้น ๆ การซิลิโคนเป็นส่วนประกอบหนึ่งของการผลิตลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นตัวเชื่อมต่อกันระหว่างแกนลูกถ้วยกับยางซิลิโคนที่ใช้เป็นโครงหุ้มฉนวนของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ เมื่อเกิดการรั่วไหลของกาวซิลิโคนจะแสดงให้เห็นเป็นคราบเหนียวและมีสีดำ ซึ่งคราบกาวซิลิโคนที่ติดอยู่นั้นเป็นจุดเริ่มต้นของการสะสมสิ่งสกปรกบนพื้นผิวของซิลิโคนได้เป็นอย่างดี ลักษณะการรั่วไหลของกาวซิลิโคนแสดงได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การรั่วไหลของกาวซิลิโคน (Jeff, 1998)

### 3.11.3 การสะสมของคราบสกปรก

ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ทุกชนิดสามารถเกิดความสกปรกบนพื้นผิวของซิลิโคนได้ด้วยกันทั้งนั้น ความสกปรกที่เกิดขึ้นเล็กน้อยได้ไม่ได้เรียกเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ซึ่งรวมไปถึงการเปลี่ยนลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ถูกติดตั้งด้วย แต่เมื่อใดที่คราบสกปรกมีการเกาะตัวที่หนาขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งคราบสกปรกที่เกิดจากเกลือ ในกรณีนี้อาจเป็นสาเหตุต่อการเกิดวาบไฟตามผิว เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาเหล่านี้ ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์จึงควรได้รับการทำความสะอาดเมื่อถึงเวลาที่เหมาะสม คราบสกปรกที่เกาะบนพื้นผิวของซิลิโคน แสดงได้ดังรูปที่ 3.9

ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์มีคุณสมบัติสามารถรักษารูปร่างและควบคุมการขยายตัวของตะไคร่น้ำที่เกาะบนพื้นผิวของซิลิโคน ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวนี้ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการลดการปนเปื้อนของยางซิลิโคน การเจริญเติบโตของเชื้อราและตะไคร่น้ำ โดยส่วนใหญ่เกิดขึ้นใกล้กับบริเวณที่ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์สัมผัสเกลือ ซึ่งมีผลต่อการเกิดการปนเปื้อนของพื้นผิวของซิลิโคน นอกจากนี้ การเจริญเติบโตของเชื้อราและตะไคร่น้ำนั้น ส่งผลต่อการเกิดวาบไฟตามผิวของยางซิลิโคนอีกด้วย



รูปที่ 3.9 การสะสมของคราบสกปรกบนพื้นผิวของซิลิโคน (Jeff, 1998)

### 3.11.4 การลดลงของคุณสมบัติหยดน้ำ

คุณสมบัติหยดน้ำเป็นคุณสมบัติที่แสดงความสามารถของการเกาะตัวของหยดน้ำบนพื้นผิวของยางซิลิโคน การสูญเสียคุณสมบัติหยดน้ำบนพื้นผิวของยางซิลิโคนนั้นจึงไม่ได้หมายถึงการถูกแทนที่ของน้ำบนพื้นผิวของซิลิโคน ลักษณะการเกิดคุณสมบัติหยดน้ำที่แสดงได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การเกิดคุณสมบัติหยดน้ำบนพื้นผิวของซิลิโคน (Jeff, 1998)

เมื่อยางซีลิโคนเกิดพื้นที่ที่เป็นฝุ่นชอล์ก (chalking) ส่งผลให้บริเวณนั้นทั้งหมดเกิดการสูญเสียคุณสมบัติหยดน้ำสิ้น จากผลกระทบนี้ การจัดระดับของคุณสมบัติหยดน้ำสิ้นจึงเป็นแนวทางที่ถูกลำมาใช้เพื่อการออกแบบลูกถ้วยด้วยฉนวนพอลิเมอร์ต่อไป

### 3.11.5 ความเสียหายทางกลของปีกลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

ปีกลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์อาจถูกฉีกขาด ถูกตัด หรือถูกเจาะได้ จากฝีมือของมนุษย์เช่น ปืน หรืออุปกรณ์ต่าง ๆ ที่มาทำลายลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ปีกของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ถูกสร้างขึ้นมา โดยส่วนใหญ่มีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันการปนเปื้อนที่จะส่งผลโดยตรงต่อลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ความเสียหายของปีกลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่เกิดจากความเสียหายทางกลนี้ เป็นปัญหาที่ไม่ควรเกิดขึ้น และไม่ควรเป็นสาเหตุของการต้องถอนการติดตั้งลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ได้รับความเสียหายด้วย ลักษณะความเสียหายทางกลของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์แสดงได้ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ความเสียหายทางกลที่เกิดกับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ (Jeff, 1998)

### 3.11.6 การฉีกขาดบริเวณปีกลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

การฉีกขาดบริเวณปีกลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์นี้ เริ่มต้นมาจากความผิดพลาดในกระบวนการผลิตลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ โดยสร้างฉนวน โครงหุ้มยึดติดกับแกนลูกถ้วยฉนวนอย่างหลวม ๆ เป็นสาเหตุให้เกิดการฉีกขาดอย่างง่ายดาย ซึ่งปัญหานี้เป็นปัญหาที่ทางผู้ผลิตควรแก้ไข ลักษณะการฉีกขาดบริเวณปีกลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การฉีกขาดบริเวณปีกลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ (Jeff, 1998)

### 3.11.7 รอยหักที่มีความลึกน้อยกว่า 0.1 mm.

รอยหัก (crazing) ที่เกิดบนพื้นผิวของซิลิโคน เป็นผลจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ รอยหักที่เกิดขึ้นนี้มีขนาดเล็กกว่า 0.1 mm. ซึ่งรอยหักที่เกิดขึ้น สามารถมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นได้ และจะส่งผลต่อลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ให้มีความสามารถในการเป็นฉนวนที่ลดลงได้ รอยหักที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของซิลิโคนแสดงได้ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 รอยหักขนาดเล็กบนพื้นผิวของซิลิโคน (Jeff, 1998)

### 3.11.8 รอยหักที่มีความลึกมากกว่า 0.1 mm.

รอยหักที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของซิลิโคน มีลักษณะคล้ายกับหนังของจระเข้ (alligatoring) เป็นผลต่อเนื่องมาจากกระบวนการเกิดรอยหักที่มีความลึกน้อยกว่า 0.1 mm. (crazing) เกิดเป็นรอยไปทั่วพื้นผิวของซิลิโคน มีความลึกอย่างน้อย 0.1 mm. เมื่อรอยหักเหล่านี้เกิดขึ้น จะมีการสะสมรอยหักเหล่านี้เพิ่มมากขึ้นไปเรื่อย ๆ ซึ่งทำให้ยางซิลิโคนมีรอยแตกที่ใหญ่ขึ้น และนำไปสู่ความเสียหายที่รุนแรงไปถึงแกนลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ได้ในที่สุด รอยหักที่มีความลึกมากกว่า 0.1 mm. บนพื้นผิวของซิลิโคน แสดงได้ดังรูปที่ 3.14



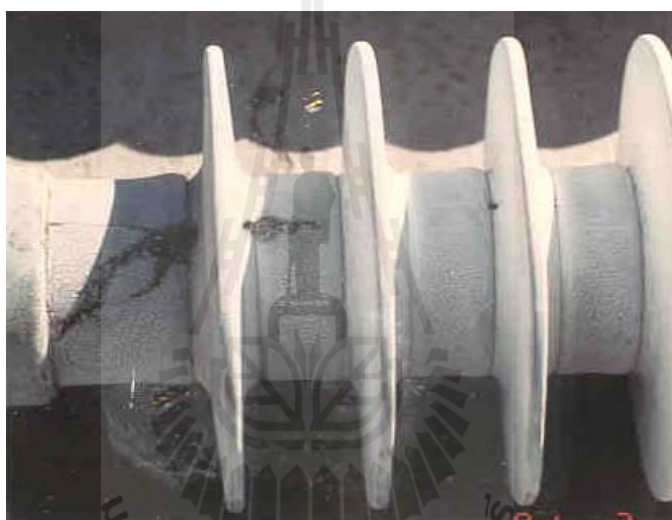
รูปที่ 3.14 รอยหักที่มีความลึกมากกว่า 0.1 mm. (Jeff, 1998)

### 3.11.9 การเสื่อมอายุของยางซิลิโคนจากการเกิดโคโรนาดีสชาร์จ

เป็นที่ทราบกันดีว่า ร่องรอยของยางซิลิโคนที่ได้รับความเสียหายเป็นผลมาจากการเสื่อมอายุที่เกิดจากการเกิดโคโรนาดีสชาร์จ การเกิดดีสชาร์จเหล่านี้ แสดงให้เห็นถึงการเสื่อมสภาพทางเคมีและทางไฟฟ้าอย่างรุนแรงของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ความเสียหายที่เกิดขึ้นนี้มักจะเกิดขึ้นในบริเวณที่มีพันธะทางเคมีของวัสดุที่ไม่เหมาะสม และสามารถเกิดขึ้นได้จากการออกแบบลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ไม่เหมาะสมด้วยเช่นกัน ระดับความรุนแรงของการเกิดร่องรอยการเสื่อมอายุจากการเกิดโคโรนาดีสชาร์จจะมากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ได้รับ ซึ่งปรากฏการณ์นี้ สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งบริเวณยางซิลิโคนที่สะอาดและบริเวณที่มีสิ่งปนเปื้อนได้ด้วยเช่นกัน

### 3.11.10 การเจาะทะลุของปีกลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

การเจาะทะลุ (puncture) ของปีกลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์มีสาเหตุมาจากการถูกทำลายโดยการเกิดดีเอสอาร์จทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนเกิดการทะลุผ่านปีกของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการเกิดรอยเจาะทะลุของปีกลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์คือการสูญเสียความทนทานทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์อย่างถาวร โดยปกติมีสาเหตุมาจากความไม่สมบูรณ์ของยางซิลิโคน ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าว สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในบริเวณที่ยางซิลิโคนสะอาดและบริเวณที่ยางซิลิโคนมีสิ่งปนเปื้อนอยู่ นอกจากนี้ ระดับความรุนแรงของการเจาะทะลุจะมากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ได้รับ ลักษณะการเจาะทะลุของปีกลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การเจาะทะลุของปีกลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ (Jeff, 1998)

### 3.11.11 การเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากควาบไฟ

การเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากควาบไฟ (tracking) มีสาเหตุมาจากการเกิดดีเอสอาร์จบนพื้นผิวของซิลิโคนอันเนื่องมาจากการเกิดโคโรนาดีเอสอาร์จ นอกจากนี้ การเกิดกระแสรั่วไหลเป็นอีกสาเหตุหนึ่งของการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากควาบไฟด้วยเช่นกัน ซึ่งถ้าปราศจากปัญหาเหล่านี้ การเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากควาบไฟจะไม่เกิดขึ้น การเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากควาบไฟเป็นการเสื่อมสภาพที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ เป็นปัญหาที่มีมาตั้งแต่กระบวนการสร้างและพัฒนาพื้นผิวของซิลิโคนของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ร่องผิวเสื่อมสภาพเหล่านี้จะปรากฏให้เห็นเป็นร่องคาร์บอนซึ่งไม่ใช่นักที่จะไม่ทำให้เกิดเหตุการณ์นี้ขึ้นได้ นอกจากนี้ทั้งในสภาพอากาศที่แห้งและเปียก

สามารถเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟได้ด้วยทั้งหมด ลักษณะการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟ แสดงได้ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟ (Jeff, 1998)

### 3.11.12 การสึกกร่อนของยางซิลิโคน

การสึกกร่อนของยางซิลิโคน (erosion) มีลักษณะที่คล้ายคลึงกันกับการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟ การสึกกร่อนเป็นการเสื่อมสภาพของฉนวน โครงหุ้มยางซิลิโคน โดยมีสาเหตุมาจากการเกิดกระแสรั่วไหล ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ และรวมไปถึงความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิวยางซิลิโคนที่มีความแห้งหรือเปียกที่ไม่เท่ากัน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเกิดอาร์กแถบแห้ง การสึกกร่อนนี้เป็นการเสื่อมสภาพที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ของพื้นผิวยางซิลิโคน ซึ่งเป็นความสูญเสียทางด้านวัสดุ ร่องรอยการสึกกร่อนอาจมีขนาดได้มากกว่า 1 mm. และส่งผลถึงความหนาของเปลือกยางซิลิโคนที่หุ้มแกนลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ไว้ การสึกกร่อนที่เกิดขึ้นมีลักษณะที่แตกแขนงคล้ายรูปร่างของต้นไม้ เป็นกระบวนการเสื่อมสภาพของยางซิลิโคนที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ ซึ่งช้ากว่าการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟ โดยทั่วไปจะไม่ส่งผลต่อความผิดปกติของไฟฟ้า เว้นเสียแต่เกิดการสึกกร่อนของยางซิลิโคนที่รุนแรงจนถึงแกนลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ซึ่งจะส่งผลต่อความผิดปกติของไฟฟ้าได้ ลักษณะการสึกกร่อนของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์แสดงได้ดังรูปที่ 3.17





รูปที่ 3.17 การสีกร่อนของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ (Jeff, 1998)

### 3.12 สรุป

ในบทที่ 3 นี้ได้ทำการอธิบายทฤษฎีและสมมติฐานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุของยางซีลิกอนที่ใช้สำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ใช้ภายนอกอาคาร อาทิเช่น วิวัฒนาการและพัฒนาการของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ คุณสมบัติต่าง ๆ ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ โครงสร้างทั่วไปของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ คุณสมบัติของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และสาเหตุการเสื่อมอายุของยางซีลิกอนที่ใช้สำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ เพื่อให้เข้าใจถึงรูปแบบโครงสร้างของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์และยางซีลิกอนได้ดียิ่งขึ้น เพื่อให้เกิดความเข้าใจและทราบถึงผลกระทบต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเสื่อมอายุของยางซีลิกอนของงานวิจัยมากที่สุด

ในการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุเป็นการแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนพื้นผิวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ จึงมีความจำเป็นต้องจำลองสภาวะขึ้นมาเพื่อเร่งให้เกิดการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ให้เร็วยิ่งขึ้น ดังนั้นการสร้างชุดทดสอบให้เหมาะสมกับการจำลองสภาวะการทดสอบมีความจำเป็นต่อการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้สร้างชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ โดยจะกล่าวในบทที่ 4 ต่อไป

## บทที่ 4

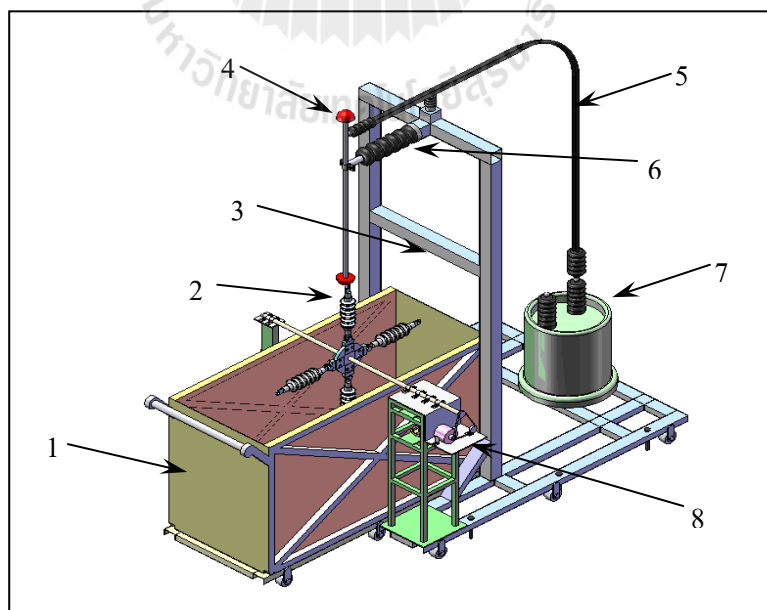
### การสร้างชุดทดสอบแรงการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

#### 4.1 กล่าวนำ

การสร้างชุดทดสอบแรงการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์เพื่อศึกษาผลการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน ความทนทานต่อการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟและการสึกกร่อนบนผิวยางซิลิโคนที่ใช้เป็นฉนวน มีขั้นตอนการออกแบบและการสร้างชุดทดสอบแรงการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ดังนี้

#### 4.2 การออกแบบชุดทดสอบแรงการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

ชุดทดสอบแรงการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ได้ถูกออกแบบและสร้างขึ้นโดยคำนึงถึงความแข็งแรงทนทานและมีความปลอดภัยในการใช้งาน ก่อนทำการสร้างชุดทดสอบแรงการเสื่อมอายุได้มีการออกแบบชุดทดสอบแรงการเสื่อมอายุที่สามารถรองรับการทดสอบของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ใช้ในระบบไฟฟ้าแรงสูงขนาด 24 kV ถึง 36 kV ชุดทดสอบแรงการเสื่อมอายุที่ออกแบบไว้โดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ชุดทดสอบแรงการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ได้ออกแบบไว้

จากรูปที่ 4.1 ชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์มีรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบไว้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ได้ออกแบบไว้

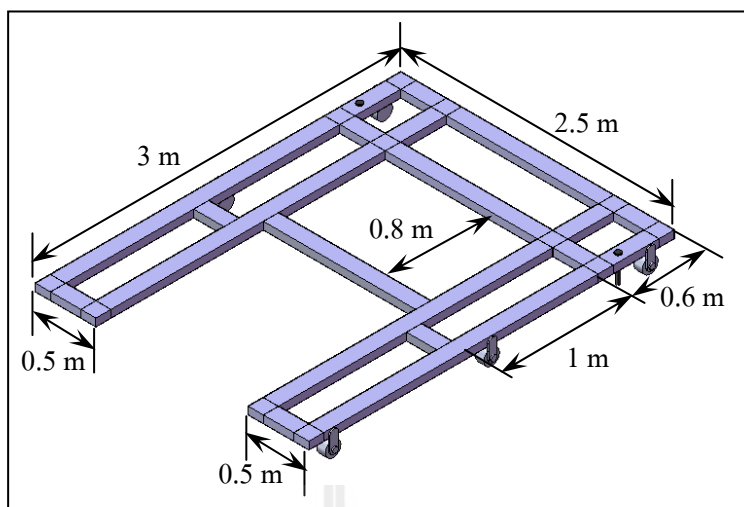
| หมายเลข | อุปกรณ์   |
|---------|---|
| 1       | ถังน้ำเกลือขนาด 1000 cm <sup>3</sup>                                |
| 2       | ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์  |
| 3       | โครงสร้างเหล็กสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ                          |
| 4       | อิเล็กทรอนิกส์สำหรับป้อนแรงดันให้กับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ใช้ทดสอบ |
| 5       | สายเคเบิลแรงสูง   |
| 6       | บุชชิงแรงดันสูง   |
| 7       | หม้อแปลงไฟฟ้า   |
| 8       | มอเตอร์และชุดควบคุมมอเตอร์  |

#### 4.2.1 โครงสร้างเหล็กสำหรับติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ

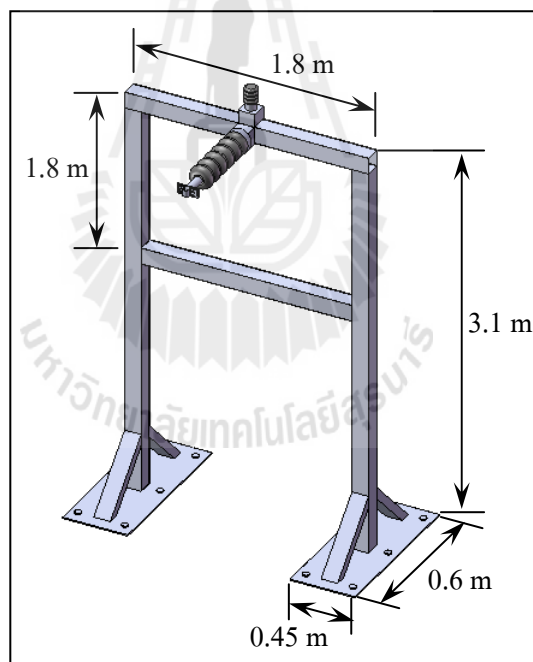
โครงสร้างเหล็กเป็นส่วนที่สำคัญในการรองรับอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ โดยที่โครงสร้างเหล็กแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ฐานส่วนล่างและโครงสร้างเหล็กส่วนบน

ในการออกแบบฐานส่วนล่างเลือกใช้เหล็กกล่องขนาด 5 นิ้ว × 2 นิ้ว ในการสร้างฐานส่วนล่างโดยที่ขนาดของฐานส่วนล่างแสดงได้ในรูปที่ 4.2

จากรูปที่ 4.2 ฐานส่วนล่างมีหน้าที่สำหรับรองรับฐานโครงสร้างเหล็กส่วนบน หม้อแปลงไฟฟ้าและตัวแบ่งแรงดันชนิดตัวเก็บประจุ เมื่อออกแบบฐานส่วนล่างเสร็จเรียบร้อยแล้วต่อไปเป็นการออกแบบโครงสร้างเหล็กส่วนบน ซึ่งมีขนาดของโครงสร้างเหล็กส่วนบนได้แสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 ขนาดของฐานส่วนล่างที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 4.3 ขนาดของโครงสร้างเหล็กส่วนบนที่ได้ออกแบบไว้

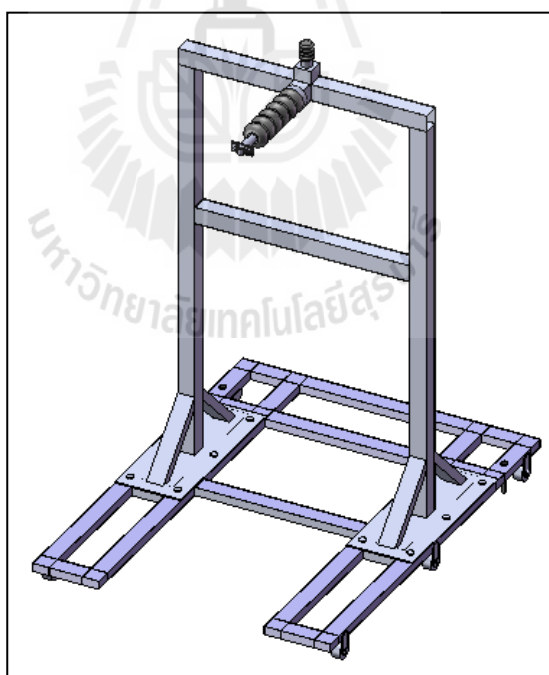
จากรูปที่ 4.3 โครงสร้างเหล็กส่วนบนจะถูกยึดติดกับฐานส่วนล่าง ซึ่งโครงสร้างเหล็กส่วนบนมีหน้าที่รองรับบุชซึ่งแรงสูง และข้ออเล็กโตรดสำหรับจ่ายแรงดันที่ส่งมาจากหม้อแปลง โครงสร้างเหล็กส่วนบนใช้เหล็กกล่องขนาด 4 นิ้ว  $\times$  4 นิ้ว ในการสร้างโครงสร้างเหล็ก

ส่วนบน เมื่อสร้าง โครงสร้างเหล็กทั้ง 2 ส่วนที่ได้ถูกออกแบบเป็นที่เรียบร้อย จะถูกยึดติดกัน แสดงได้ในรูปที่ 4.4

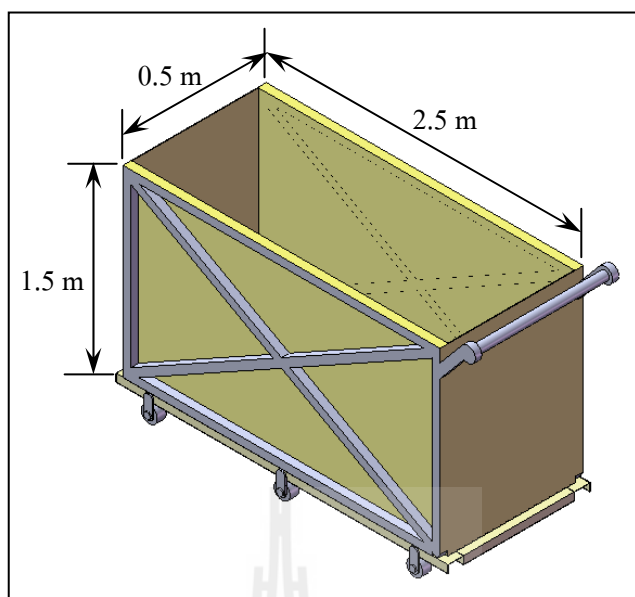
#### 4.2.2 ถังน้ำเกลือสแตนเลส

ถังน้ำเกลือมีหน้าที่รองรับการติดตั้งลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ได้รับการทดสอบ ชุดเพลลา และชุดมอเตอร์สำหรับควบคุมการหมุนของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ นอกจากนี้ ยังเป็นถังบรรจุน้ำเกลือสำหรับการทดสอบแรงการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์อีกด้วย

ถังที่ใช้บรรจุน้ำเกลือทำจากสแตนเลส ซึ่งมีความทนทานต่อการเกิดสนิมมากกว่าเหล็กทั่ว ๆ ไป โดยการสร้างตัวถังสแตนเลส ใช้สแตนเลสแผ่นหนา 3 mm ประกอบกันเป็นตัวถัง และใช้แก๊สเชื่อมระหว่างแผ่นสแตนเลสด้วยกัน ซึ่งเป็นการป้องกันการเกิดสนิมได้ในระดับหนึ่ง และนำเหล็กกล่องขนาด 2 นิ้ว  $\times$  2 นิ้ว ประกอบด้านยาวของตัวถังสแตนเลสเพื่อป้องกันแรงดันของ น้ำที่กระทำต่อด้านข้างตัวถังในขณะที่บรรจุน้ำเกลือซึ่งอาจทำให้ตัวถังแตกออกได้ นอกจากนี้ได้ ติดล้อมบริเวณกันถังเพื่อช่วยต่อการเคลื่อนย้าย ขนาดของถังสแตนเลสที่ได้ออกแบบไว้แสดงได้ใน รูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 โครงสร้างเหล็กทั้ง 2 ส่วนที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 4.5 ถังสแตนเลสที่ได้ออกแบบไว้

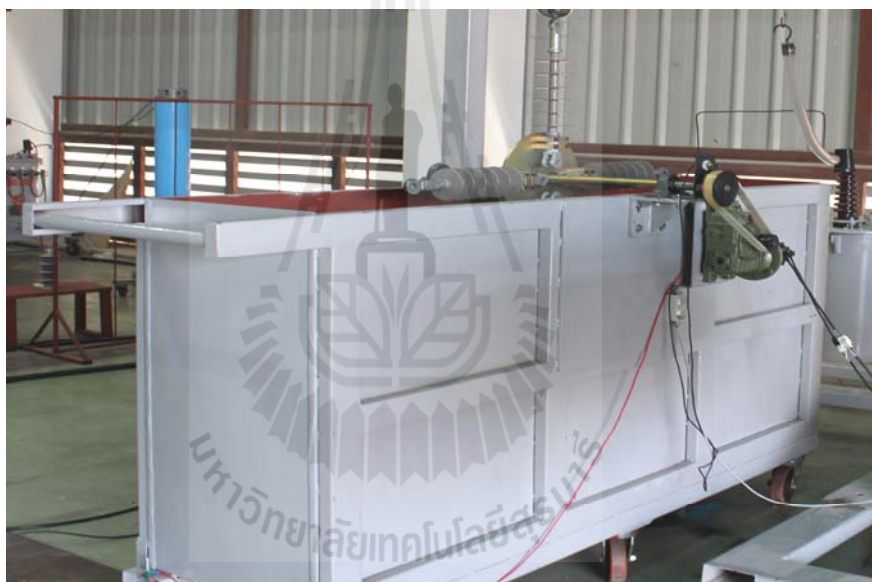
จากฐานส่วนล่าง โครงสร้างส่วนบน และถังน้ำเกลือสแตนเลสที่ได้ออกแบบไว้ ได้ถูกสร้างขึ้นจริง โดยที่ขนาดต่าง ๆ ของแต่ละส่วน ได้สร้างตามที่ได้ออกแบบไว้ และได้มีการติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งจะอธิบายรายละเอียด การสร้างและการติดตั้งอุปกรณ์จริงในส่วนถัดไป

#### 4.3 การสร้างชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

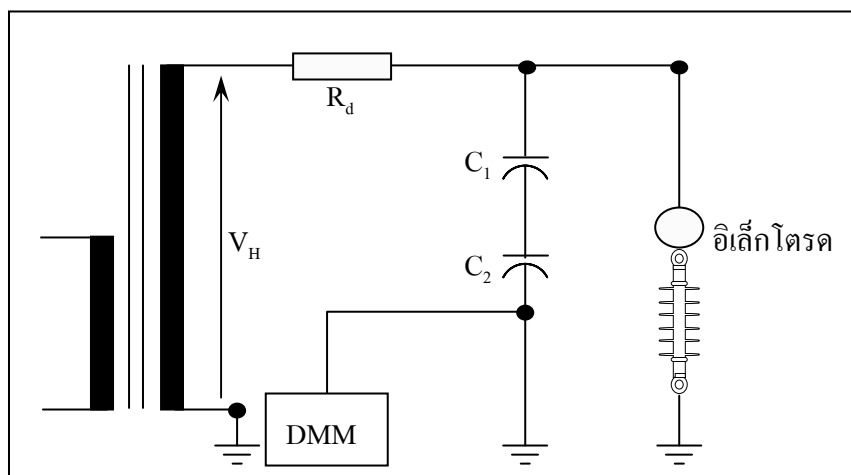
ชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ เป็นเครื่องมือสำหรับใช้ในการทดลองเร่งการเสื่อมอายุให้กับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ โดยจ่ายค่าแรงดันไฟฟ้า ที่เกินการทำงานในสภาวะปกติของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ชุดทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ถังสแตนเลสเพื่อติดตั้งลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ทำการทดสอบ โครงสร้างเหล็กเพื่อรองรับอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ติดตั้งสำหรับการจ่ายแรงดันให้กับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่จะได้รับการทดสอบ ชุดควบคุมมอเตอร์เพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์สำหรับการหมุนของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่จะได้รับการทดสอบ และอุปกรณ์กรองน้ำเพื่อเตรียมการทดสอบ โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

1) ถังสแตนเลสเพื่อติดตั้งลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ เป็นถังสแตนเลสรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด  $0.5\text{ m} \times 2\text{ m} \times 1.5\text{ m}$  เพื่อติดตั้งลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ภายในถังสแตนเลสจะถูกบรรจุไว้ด้วยน้ำเกลือ และมีมอเตอร์สำหรับควบคุมการหมุนของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ถูกติดตั้งอยู่บนชุดทดสอบ ซึ่งจะถูควบคุมโดยวงจรควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ถังสแตนเลสเพื่อติดตั้งลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์แสดงในรูปที่ 4.6

2) โครงสร้างเหล็กเพื่อรองรับอุปกรณ์ต่าง ๆ เป็นโครงสร้างเหล็กที่มีความสูง 3 m โดยมีหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส ขนาด 22 kV 30kVA ต่อผ่านความต้านทานหน่วงและสายเคเบิลแรงสูงที่มีบุหุ้มฉนวนสูงรองรับสายไฟอยู่ ส่งต่อไปยังระบบอิเล็กทรอนิกส์ โดยที่ระบบอิเล็กทรอนิกส์นี้จะสัมผัสกับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ถูกติดตั้งบนถังน้ำเกลือสแตนเลส นอกจากนี้ตัวแบ่งแรงดันชนิดตัวเก็บประจุได้ถูกติดตั้งบนโครงสร้างเหล็กนี้ด้วย เพื่อแปลงค่าแรงดันสูงให้กลายเป็นแรงดันต่ำ และส่งต่อไปยังดิจิทัลมัลติมิเตอร์ (digital multi meter: DMM) ที่อยู่ภายนอกอุปกรณ์ทดสอบ โดยที่ดิจิทัลมัลติมิเตอร์นี้จะทำงานร่วมกันกับวาไรแอค (variac) เพื่อปรับแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการทดสอบนั้น ๆ รูปแบบของชุดทดสอบแรงการเสื่อมอายุแสดงในรูปที่ 4.7 เมื่อประกอบสร้างเสร็จจะมีสัดส่วนแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.6 ถังสแตนเลสเพื่อติดตั้งลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์



รูปที่ 4.7 วงจรทดสอบลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

3) ชุดควบคุมการทำงานของมอเตอร์ มีหน้าที่ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์และเวลาของการหมุนของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ติดตั้งร่วมกับชุดเพลาและมอเตอร์ โดยที่มีการป้อนคำสั่งความเร็วในการหมุน จำนวนรอบที่ต้องการให้หมุน รวมไปถึงการกำหนดเวลาของการหมุนเปลี่ยนตำแหน่งและเวลาที่ให้มอเตอร์หยุดนิ่งด้วยชุดควบคุมมอเตอร์แสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 ชุดทดสอบแรงการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ประกอบเสร็จ





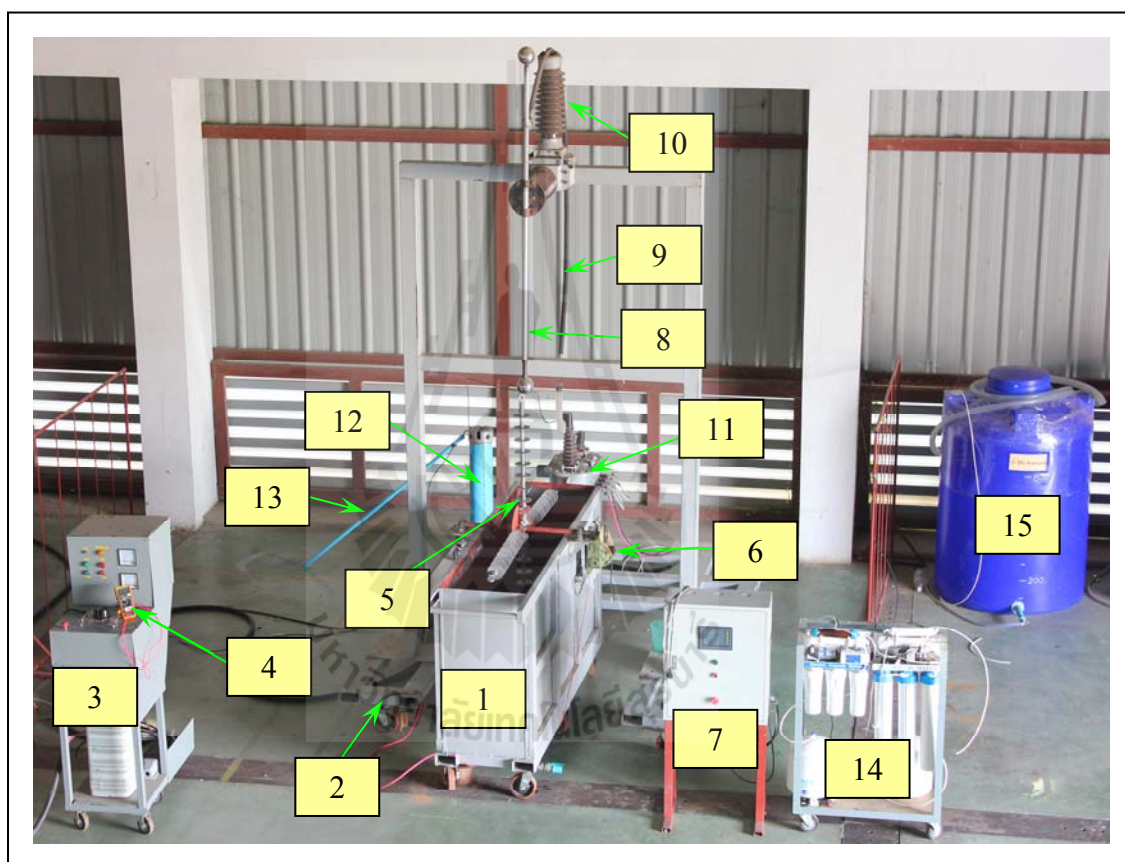
รูปที่ 4.9 ชุดควบคุมการทำงานของมอเตอร์

4) อุปกรณ์กรองน้ำแยกไอออน (de-ionized) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญส่วนหนึ่งของชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ น้ำที่ใช้ในการทดสอบต้องพยายามให้มีค่าความนำไฟฟ้าที่น้อยที่สุดสำหรับการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุจึงใช้เครื่องกรองน้ำแยกไอออนกรองน้ำมาใช้ในการทดสอบ เนื่องจากว่าระยะเวลาของการเปลี่ยนถ่ายน้ำในแต่ละครั้งค่อนข้างมีเวลาจำกัดจึงจำเป็นต้อง เตรียมถังเก็บน้ำไว้ทั้งหมด 3 ถังคือ ถังเก็บน้ำแยกไอออนขนาด  $1 \text{ m}^3$  ถังเก็บน้ำเกลือขนาด  $1 \text{ m}^3$  สำหรับถ่ายจากถังทดสอบเพื่อเตรียมถ่ายทิ้ง และถังน้ำแยกไอออนสำรอง เพื่อป้องกันเหตุฉุกเฉินในกรณีน้ำถังหลักไม่เพียงพอต่อการทดสอบ ชุดกรองน้ำแยกไอออนเพื่อ เตรียมไว้สำหรับการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ชุดกรองน้ำแยกไอออน

หลังจากการออกแบบชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ได้มีการสร้างชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนขึ้นมาตามที่ได้ออกแบบไว้แสดงได้ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งในแต่ละอุปกรณ์ที่มีการติดตั้งอยู่ในชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ ได้มีการต่อกราวด์ให้กับอุปกรณ์ทุกชิ้นเพื่อความปลอดภัยต่อชีวิต นอกจากนี้ ได้ทำตะขอกกราวด์ขึ้นเพื่อในช่วงเวลาที่ต้องเข้าไปตรวจสอบสภาพของอุปกรณ์ทดสอบ มีความจำเป็นต้องนำตะขอกกราวด์ไปคล้องไว้ก่อนสัมผัสชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุเพื่อความปลอดภัยแก่ชีวิตด้วย



รูปที่ 4.11 ชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์จากที่ได้ออกแบบไว้

จากรูปที่ 4.11 ชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์มีรายละเอียดดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 รายละเอียดชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ติดตั้งจริง

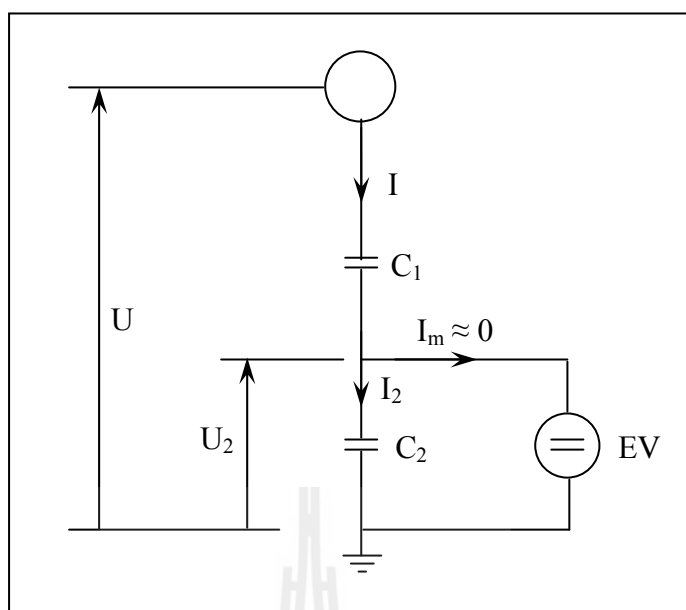
| หมายเลข | อุปกรณ์  |
|---------|--|
| 1       | ถังน้ำเกลือสแตนเลสขนาด 1000 cm <sup>3</sup>              |
| 2       | โครงสร้างเหล็กสำหรับติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ                  |
| 3       | วาไรแอกขนาด 220 V 30 kVA                                 |
| 4       | Digital Multi Meter                                      |
| 5       | ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์สำหรับการทดสอบ                       |
| 6       | มอเตอร์สำหรับควบคุมลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์                  |
| 7       | ผู้ควบคุมการทำงานของมอเตอร์                              |
| 8       | อิเล็กทรอนิกส์สำหรับจ่ายแรงดันให้กับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ |
| 9       | สายเคเบิลแรงสูงขนาด 22 kV                                |
| 10      | บุชชิงแรงสูง   |
| 11      | หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส ขนาด 22 kV 30 kVA                    |
| 12      | ตัวแบ่งแรงดันชนิดตัวเก็บประจุ                            |
| 13      | ตะขอกราวด์   |
| 14      | เครื่องกรองน้ำแยกไอออน                                   |
| 15      | ถังเก็บน้ำแยกไอออนขนาด 1000 cm <sup>3</sup>              |

#### 4.4 โวลเตจดีไวเดอร์วัดแรงดันสูง

โวลเตจดีไวเดอร์ (voltage divider) เป็นอุปกรณ์วัดแรงดันทำหน้าที่แบ่งทอนแรงดันสูงออกเป็นส่วนแรงดันต่ำที่พอที่สามารถใช้โวลมิเตอร์หรือเครื่องวัดแรงดันต่ำได้ โดยใช้อิมพีแดนซ์แรงสูงต่อเข้ากับแรงดันที่จะวัด แล้วแบ่งเอาแรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์แต่เพียงส่วนน้อยออกมาวัด ดังนั้นโวลเตจดีไวเดอร์จึงแบ่งออกเป็นภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำ โดยที่อีกข้างหนึ่งของภาคแรงต่ำจะต่อกับดินบริเวณรอยต่อระหว่างภาคแรงสูงกับภาคแรงต่ำ ซึ่งเป็นจุดที่ต่อออกมาเข้าเครื่องวัดแรงต่ำ เช่น โวลมิเตอร์ หรือเครื่องวัดแรงต่ำที่ต่อเข้ากับโวลเตจดีไวเดอร์นี้

สำหรับงานวิจัยนี้ ขอกว่าถึงเพียงโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุแรงดันสูงกระแสสลับเท่านั้น ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นสำหรับงานวิจัยนี้

โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุแรงดันสูงกระแสสลับแสดงได้ในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 วงจรสมมูลของโวลต์เจดิวอเตอร์แบบตัวเก็บประจุแรงดันสูงกระแสสลับ

จากรูปที่ 4.12 โวลต์เจดิวอเตอร์แบบตัวเก็บประจุประกอบด้วยตัวเก็บประจุภาคแรงสูง ( $C_1$ ) และตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ ( $C_2$ ) โดยหลักการแล้ว กระแสที่เข้าเครื่องวัด  $I_m$  นั้นต้องมีค่าน้อยมาก หรือเกือบเป็นศูนย์ ( $I_m \approx 0$ ) นั่นคือ กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำจะ ต้องเท่ากันคือ

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

$$I_2 = \omega C_2 U_2 = I \quad I_2 = \omega C_2 U_2 = I \quad (4.2)$$

ดังนั้น

$$U = \frac{C_1 + C_2}{C_1} U_2 \quad (4.3)$$

โดยที่  $U$  คือ แรงดันภาคแรงสูง

$U_2$  คือ แรงดันภาคแรงต่ำ

$C_1$  คือ ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

$C_2$  คือ ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

#### 4.5 การสร้างโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุวัดแรงดันกระแสสลับ

ตัวเก็บประจุวัดแรงดันกระแสสลับ เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แบ่งทอนแรงดันสูงออกเป็น ส่วนของแรงดันต่ำ ซึ่งวงจรสมมูลแสดงได้ในรูปที่ 4.12 ซึ่ง โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุแบ่ง ออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

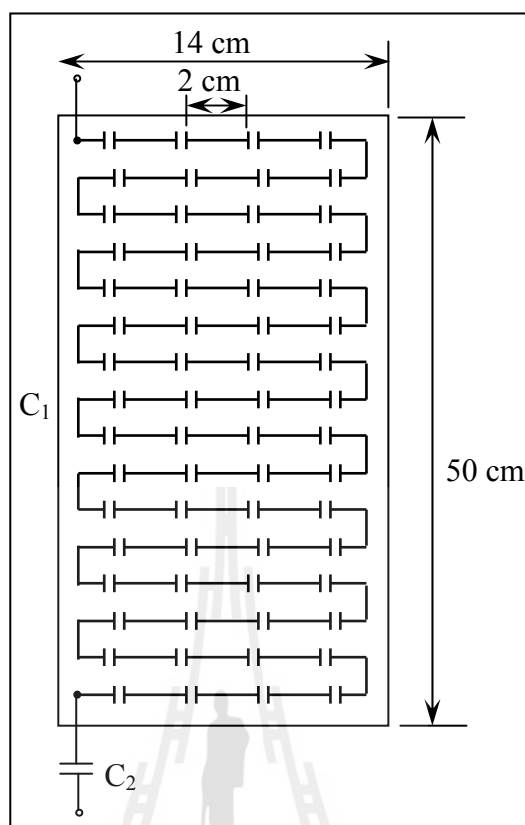
##### 4.5.1 ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง ( $C_1$ ) สร้างได้จากการนำตัวเก็บประจួយ่อยหลาย ๆ ตัวมาต่อ อันดับกัน ลักษณะของตัวเก็บประจุที่ใช้สำหรับสร้างตัวเก็บประจุภาคแรงสูงแสดงได้ในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ตัวเก็บประจุที่ใช้สำหรับสร้างตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

จากรูปที่ 4.13 ตัวเก็บประจุที่ใช้สำหรับสร้างตัวเก็บประจุภาคแรงสูงมีค่าเท่ากับ 68 nF ทั้งหมด 96 ตัว นำมาต่ออันดับกัน โดยนำแผ่นอะคลิลิกหนา 1 cm ขนาด 14 cm × 50 cm นำมา เจาะรูวงกลมให้มีขนาดที่พอดีกับขนาดของตัวเก็บประจุ โดยแต่ละช่องมีระยะห่าง 2 cm รูวงกลมที่ เจาะทั้งหมด 96 รู ซึ่งแบ่งเป็น 16 แถว 4 คอลัมน์ จากนั้นนำตัวเก็บประจุที่เตรียมไว้มาต่ออนุกรมกัน นำท่อพลาสติกครอบตัวเก็บประจุที่ได้ต่ออนุกรมไว้ แล้วนำแผ่นอะลูมิเนียมปิดปากท่อและติดตัวรับ สำหรับติดตั้งตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ ลักษณะของวงจรภายในตัวเก็บประจุภาคแรงสูงแสดงได้ใน รูปที่ 4.14 และตัวเก็บประจุภาคแรงสูงที่สร้างขึ้นแสดงได้ในรูปที่ 4.15 ซึ่งค่า  $C_1$  ที่วัดได้จากการ สร้างมีค่าเท่ากับ 705.5 pF



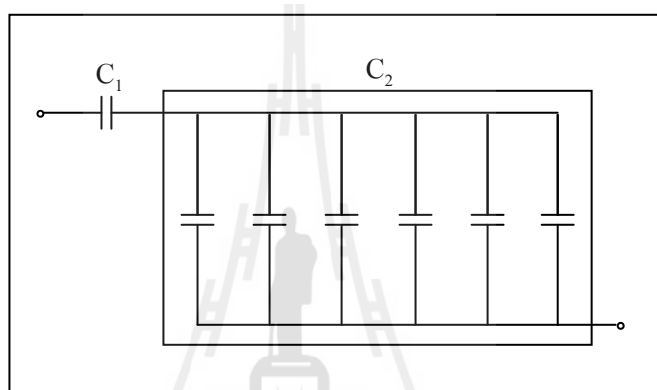
รูปที่ 4.14 วงจรภายในของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง



รูปที่ 4.15 ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงที่สร้างขึ้น

#### 4.5.2 ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ สร้างได้จากการนำตัวเก็บประจุย่อยที่แสดงในรูปที่ 4.13 หลาย ๆ ตัว มาต่ออันดับกัน โดยที่ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำจะมีค่ามากกว่าตัวเก็บประจุภาคแรงสูง ตัวเก็บประจุที่ใช้สร้างตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำมีขนาด 68 nF ทั้งหมด 6 ตัว ต่อขนานกัน แล้วบรรจุอยู่ในทองเหลืองรูปทรงกระบอก โดยทำจุดสำหรับเชื่อมต่อไปยังโวลมิเตอร์ ลักษณะของวงจรภายในของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ แสดงได้ในรูปที่ 4.16 และตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำที่สร้างขึ้น แสดงได้ในรูปที่ 4.17 ซึ่งค่า  $C_2$  ที่วัดได้จากการสร้างมีค่าเท่ากับ 279 nF



รูปที่ 4.16 วงจรภายในของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ



รูปที่ 4.17 ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำที่สร้างขึ้น

#### 4.6 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 4 นี้ได้กล่าวถึงขั้นตอนการสร้างชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ซึ่งประกอบด้วยการออกแบบชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ และการสร้างชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ขึ้นจริงจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ประกอบขึ้นเป็นชุดทดสอบ

หลังจากสร้างชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ขึ้นแล้ว ได้มีการเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบ และจัดเตรียมอุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับจำลองสภาวะการเร่งการเสื่อมอายุโดยอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC Publ. 62217 ซึ่งกล่าวในบทถัดไป





## บทที่ 5

### การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

#### 5.1 กล่าวนำ

การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์จัดทำขึ้นเพื่อเพื่อศึกษาผลการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน ความทนทานต่อการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวับไฟ และการสึกกร่อนบนพื้นผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ซึ่งการจำลองสภาวะในการทดสอบดำเนินการตามมาตรฐาน IEC Publ. 62217 โดยมีรายละเอียดของมาตรฐานของการทดสอบ และการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบไว้ดังนี้

#### 5.2 มาตรฐาน IEC Publ. 62217

การทดสอบลูกถ้วยฉนวนลูกออกแบบให้มีการทดสอบลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่มีระยะตามผิวตั้งแต่ 500 mm ถึง 800 mm โดยลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ในการทดสอบเป็นลูกถ้วยฉนวนที่ยังไม่ผ่านการใช้งานมาก่อนซึ่งนำมาจากสายการผลิตโดยตรง แต่ถ้ากรณีลูกถ้วยฉนวนที่ทดสอบไม่สามารถนำมาจากสายการผลิตได้ จะถูกจัดให้เป็นการทดสอบตัวอย่างแบบพิเศษโดยที่ระยะตามผิวฉนวนสามารถน้อยกว่าหรือมากกว่าที่กำหนดได้

ในการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ ลักษณะของน้ำที่ใช้ในการทดสอบต้องเป็นน้ำแยกไอออน (de-ionized) การทดสอบตัวอย่างของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์เป็นดังรูปที่ 3.7 โดยใน 1 cycle ใช้เวลา 192 s แบ่งออกเป็น 4 ตำแหน่ง กำหนดให้ระยะเวลาในการทดสอบแต่ละตำแหน่งใช้เวลา 40 s จากนั้นหมุนเป็นมุม  $90^\circ$  และใช้เวลา 8 s เพื่อหมุนเปลี่ยนตำแหน่ง โดยมีรายละเอียดของแต่ละตำแหน่งดังนี้

ตำแหน่งที่ 1 ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ถูกแช่น้ำเกลือเป็นเวลา 40 s

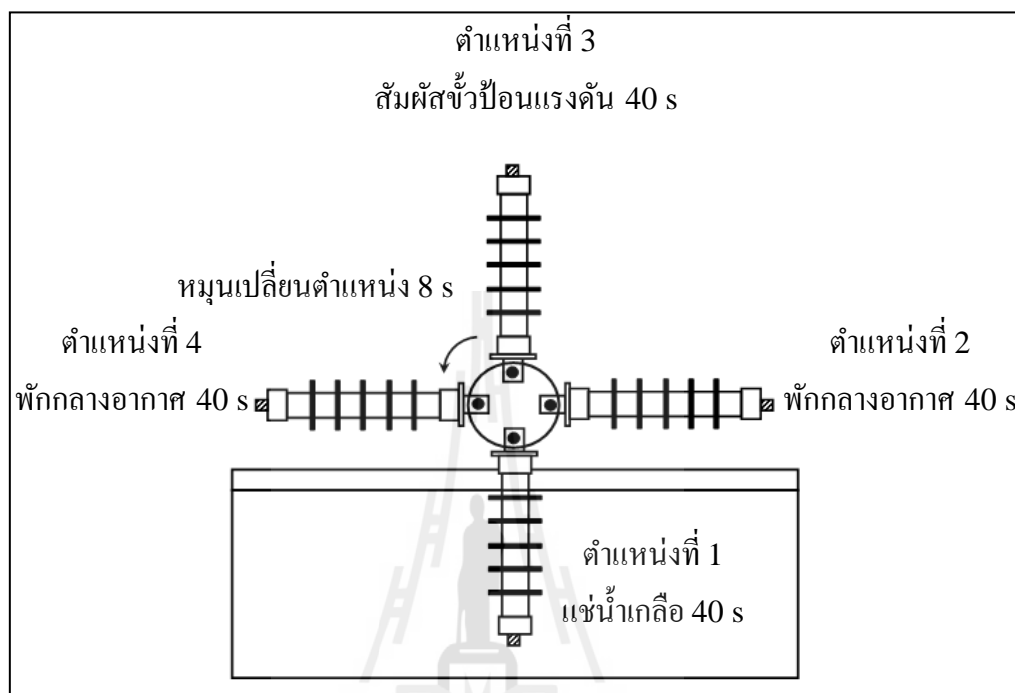
ตำแหน่งที่ 2 ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ถูกพักกลางอากาศเป็นเวลา 40 s

ตำแหน่งที่ 3 ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์สัมผัสขั้วป้อนแรงดันเป็นเวลา 40 s

ตำแหน่งที่ 4 ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ถูกพักกลางอากาศเป็นเวลา 40 s

แรงดันที่ใช้ในการทดสอบได้จากหม้อแปลงแรงดันสูงที่มีความต้านทานกระแสไม่เกิน 250 mA น้ำเกลือต้องทำการเปลี่ยนทุก ๆ สัปดาห์ โดยในแต่ละสัปดาห์ที่มีการหยุดทดสอบเป็นการตรวจสอบและบำรุงรักษาอย่างละเอียดของชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ โดยกำหนดให้ระยะเวลาใน

การหยุดทดสอบต้องไม่เกิน 1 ชั่วโมง ในช่วงที่มีการหยุดทดสอบจะไม่นับรวมกับเวลาของการทดสอบ ดังนั้นระยะเวลาที่มีการหยุดทดสอบทั้งหมดคือ 60 ชั่วโมง ของการทดสอบทั้งหมด



รูปที่ 5.1 การทดสอบตัวอย่างของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

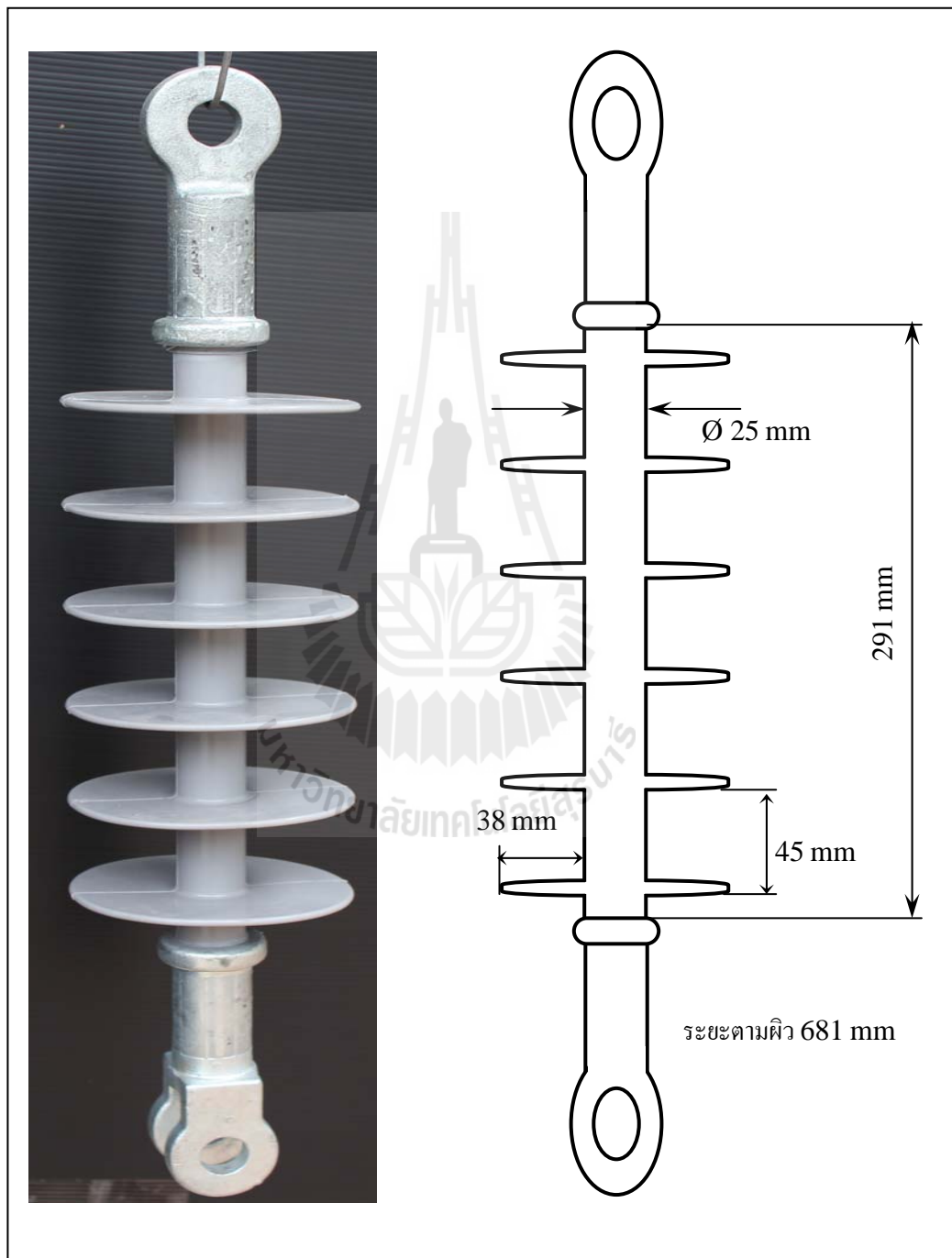
ข้อกำหนดในการทดสอบลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

|                        |  |
|------------------------|--|
| แรงดันที่ใช้ทดสอบ      | 35 V/mm ของระยะตามผิว                                    |
| ความเข้มข้นของน้ำเกลือ | $1.40 \text{ kg/m}^3 \pm 0.06 \text{ kg/m}^3$            |
| อุณหภูมิสภาพแวดล้อม    | $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{K}$ |
| ระยะเวลาในการทดสอบ     | 30,000 cycle (1 cycle = 192 s)                           |

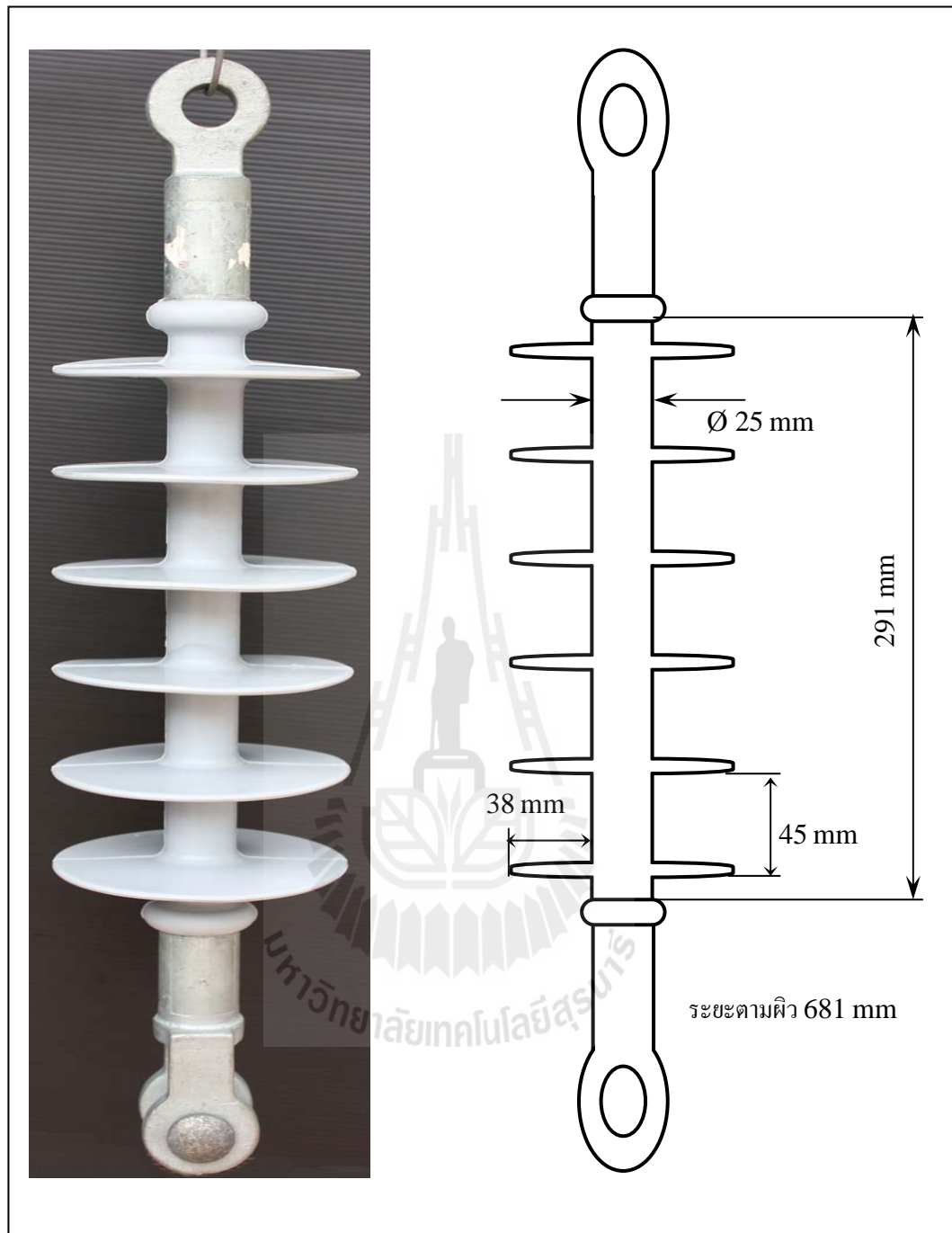
### 5.3 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ

ในการวิจัยนี้เป็นการเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ โดยการจำลองสถานะของลูกถ้วยบริเวณชายฝั่งทะเล โดยการให้ป้อนค่าแรงดันและมีการสัมผัสน้ำเกลือที่สูงกว่าการทำงานปกติของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ โดยใช้ระยะเวลาทดสอบทั้งสิ้น 30,000 cycle ของการทดสอบ 1 ครั้ง ซึ่งดำเนินการตามมาตรฐาน IEC Publ. 62217 โดยตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมดมี 3 ชนิดคือ

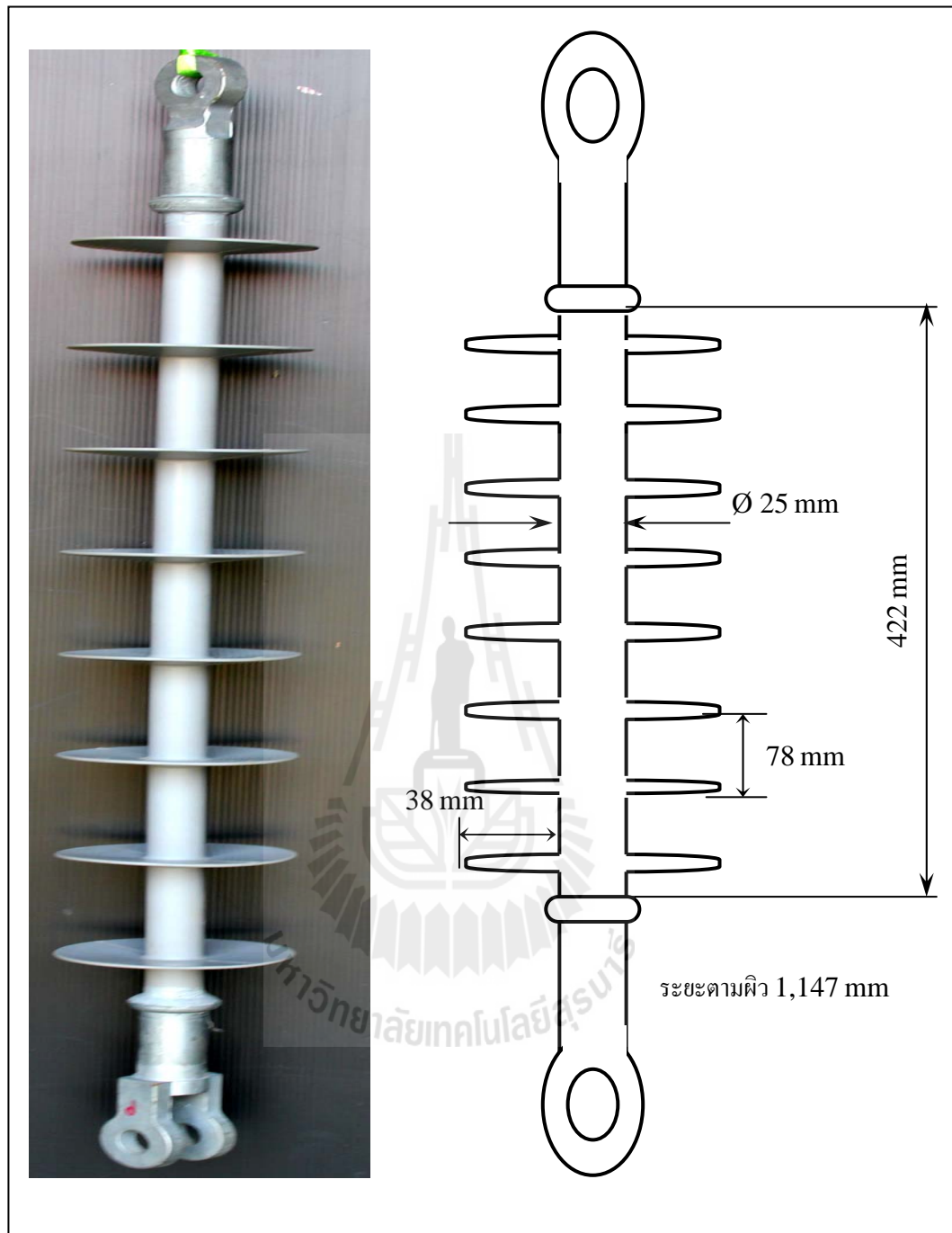
- 1) ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์สำหรับระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 จำนวน 10 ตัว
- 2) ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์สำหรับระบบ 24 kV ชนิดที่ 2 จำนวน 2 ตัว
- 3) ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์สำหรับระบบ 36 kV จำนวน 4 ตัว



รูปที่ 5.2 ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์สำหรับระบบ 24 kV ชนิดที่ 1



รูปที่ 5.3 ลูกถ้วยฉนวนสำหรับระบบ 24 kV ชนิดที่ 2

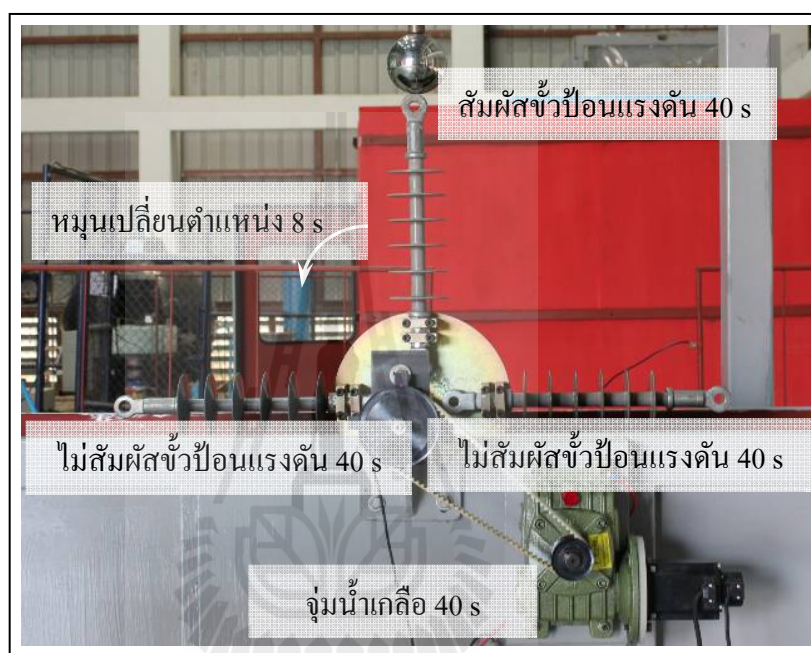


รูปที่ 5.4 ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์สำหรับระบบ 36 kV

จากรูปที่ 5.2 รูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4 เป็นรายละเอียดของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดสอบแรงการเสื่อมอายุ ซึ่งในรูปที่ 5.2 และรูปที่ 5.3 ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์สำหรับระบบ 24 kV ทั้ง 2 ชนิดนี้มีความแตกต่างที่ส่วนผสมของเนื้อยางซิลิโคนที่ไม่เหมือนกัน

#### 5.4 วิธีการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ

การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ในงานวิจัยนี้ จะถูกทดสอบภายใต้สภาวะความเครียดทางไฟฟ้าโดยมีน้ำเกลือเป็นปัจจัยสำหรับการเร่งการเสื่อมอายุของ ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ โดยที่ในการทดสอบแต่ละครั้ง ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์จะถูกติดตั้งบนชุดทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุทั้ง 4 ตำแหน่ง แสดงในรูปที่ 5.5 โดยมีรายละเอียดแต่ละตำแหน่งดังนี้



รูปที่ 5.5 ตำแหน่งต่าง ๆ ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ถูกติดตั้งบนชุดทดสอบ

- ตำแหน่งที่ 1 ด้านสัมผัสขั้วป้อนแรงดัน (HV-energized)
- ตำแหน่งที่ 2 ด้านไม่สัมผัสขั้วป้อนแรงดัน (de-energized)
- ตำแหน่งที่ 3 ด้านจุ่มน้ำเกลือ (salt water dip)
- ตำแหน่งที่ 4 ด้านไม่สัมผัสขั้วป้อนแรงดัน

จากรูปที่ 5.5 เมื่อลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ได้ถูกติดตั้งบนชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์จะถูกจ่ายแรงดันขนาด 35 V/mm ตามขนาดของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ซึ่งอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC Publ. 62217 โดยแสดงตารางการจ่ายแรงดันของลูกถ้วยแต่ละชนิดได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ตามมาตรฐาน IEC Publ. 62217

| ชนิดลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์   | ระยะตามผิว | แรงดันที่ใช้ทดสอบ |
|----------------------------|------------|-------------------|
| สำหรับระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 | 681 mm     | 23.8 kV           |
| สำหรับระบบ 24 kV ชนิดที่ 2 | 681 mm     | 23.8 kV           |
| สำหรับระบบ 36 kV           | 1147 mm    | 40.1 kV           |

จากตารางที่ 5.1 เนื่องจากลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์สำหรับระบบ 36 kV หม้อแปลงไฟฟ้ามีขนาดไม่เพียงพอต่อการทดสอบ จึงทำการทดสอบโดยวิธีใช้แรงดัน 1 เฟส ของระบบแรงดันที่ลูกถ้วยฉนวนใช้งานจริง ดังนั้น แรงดันที่ใช้ทดสอบลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์สำหรับระบบ 36 kV จึงเท่ากับ 20.79 kV สำหรับการทดสอบลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ชนิดนี้

การจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับให้กับชุดทดสอบเร่งเสื่อมอายุจะใช้ชุดควบคุมการจ่ายแรงดัน เพื่อป้องกันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงทดสอบ ส่วนด้านแรงดันแรงสูงที่ใช้ในการทดสอบจะวัดด้วยชุดแบ่งแรงดันชนิดตัวเก็บประจุ การแบ่งแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูงเป็นแรงดันไฟฟ้าแรงดันต่ำสามารถทำได้จากสมการที่ 4.1

$$U_b = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \sqrt{2} \cdot V_{rms} \quad (5.1)$$

โดยที่  $C_1$  คือ ตัวเก็บประจุขนาด 705.5 pF

$C_2$  คือ ตัวเก็บประจุขนาด 272 nF

$U_b$  คือ แรงดันไฟฟ้าแรงดันสูง (kV)

$V_{rms}$  คือ แรงดันไฟฟ้าแรงดันต่ำ (V)

แรงดันไฟฟ้าแรงสูงจะถูกแบ่งแรงดันให้เหลือเพียงแรงดันไฟฟ้าแรงต่ำด้วยสมการที่ (5.1) ดังนั้นการกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่จ่ายให้กับชุดทดสอบ สามารถกำหนดได้จากการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าแรงต่ำที่ทำการแบ่งแรงดันไฟฟ้าออกมาจากการคำนวณ จากนั้นใช้เครื่องมือวัดแรงดันสูงมาตรฐานเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่จ่ายเข้ากับชุดทดสอบ เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนและปรับจนให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าที่เป็นจริงตามที่ต้องการ ดังนั้น แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการวิจัยสำหรับการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์แสดงได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์สำหรับการวิจัย

| ชนิดลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์   | แรงดันสูงที่ใช้ทดสอบ | ค่าแรงดันไฟฟ้าแรงต่ำ<br>ที่ได้จากการแบ่งแรงดัน<br>ตัวเก็บประจุ $V_{rms}$ |
|----------------------------|----------------------|--|
| สำหรับระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 | 23.8 kV              | 16.79 V  |
| สำหรับระบบ 24 kV ชนิดที่ 2 | 23.8 kV              | 16.79 V  |
| สำหรับระบบ 36 kV           | 20.79 kV             | 14.67 V  |

จากรูปที่ 5.5 ในการทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ตามมาตรฐาน IEC Publ. 62217 ได้กำหนดให้ 1 cycle เท่ากับ 192 s และต้องใช้ใช้เวลาของการหมุนเปลี่ยนตำแหน่งเพียง 8 s เท่านั้น ดังนั้นในแต่ละตำแหน่งของการทดสอบลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ใช้เวลา 40 s ต่อการทดสอบ 1 ตำแหน่ง ซึ่งเมื่อครบ 1 cycle ใช้เวลาทั้งสิ้น 192 s โดยต้องทำการทดสอบทั้งหมด 30,000 cycle และในทุก ๆ 1 สัปดาห์ของการทดสอบ จะต้องหยุดทดสอบเป็นเวลา 1 ชั่วโมงเท่านั้น เพื่อเปลี่ยนน้ำเกลือและตรวจสอบบำรุงรักษาอุปกรณ์ทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์

## 5.5 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 5 นี้ได้กล่าวถึงขั้นตอนในการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ซึ่งประกอบด้วยมาตรฐานการทดสอบโดยอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC Publ. 62217 การเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ และวิธีการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ หลังจากได้มีการเตรียมการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ได้มีการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น เมื่อลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ได้รับการทดสอบเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ได้มีการนำยางซิลิโคนของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์มาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ซึ่งจะขอกกล่าวในบทถัดไป



## บทที่ 6

### ผลการทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน

#### 6.1 กล่าวนำ

จากบทที่ 5 ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนเพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การวิเคราะห์ด้วยตาเปล่า คุณสมบัติหยดน้ำลื่น การวัดความแข็ง และการวัดความขรุขระของยางซิลิโคน นอกจากนี้ได้มีการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีด้วยการวิเคราะห์ FTIR อีกด้วย โดยทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของยางซิลิโคนที่ได้รับการเร่งการเสื่อมอายุ และยางซิลิโคนที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน หลักการตรวจสอบสามารถอธิบายได้ดังนี้

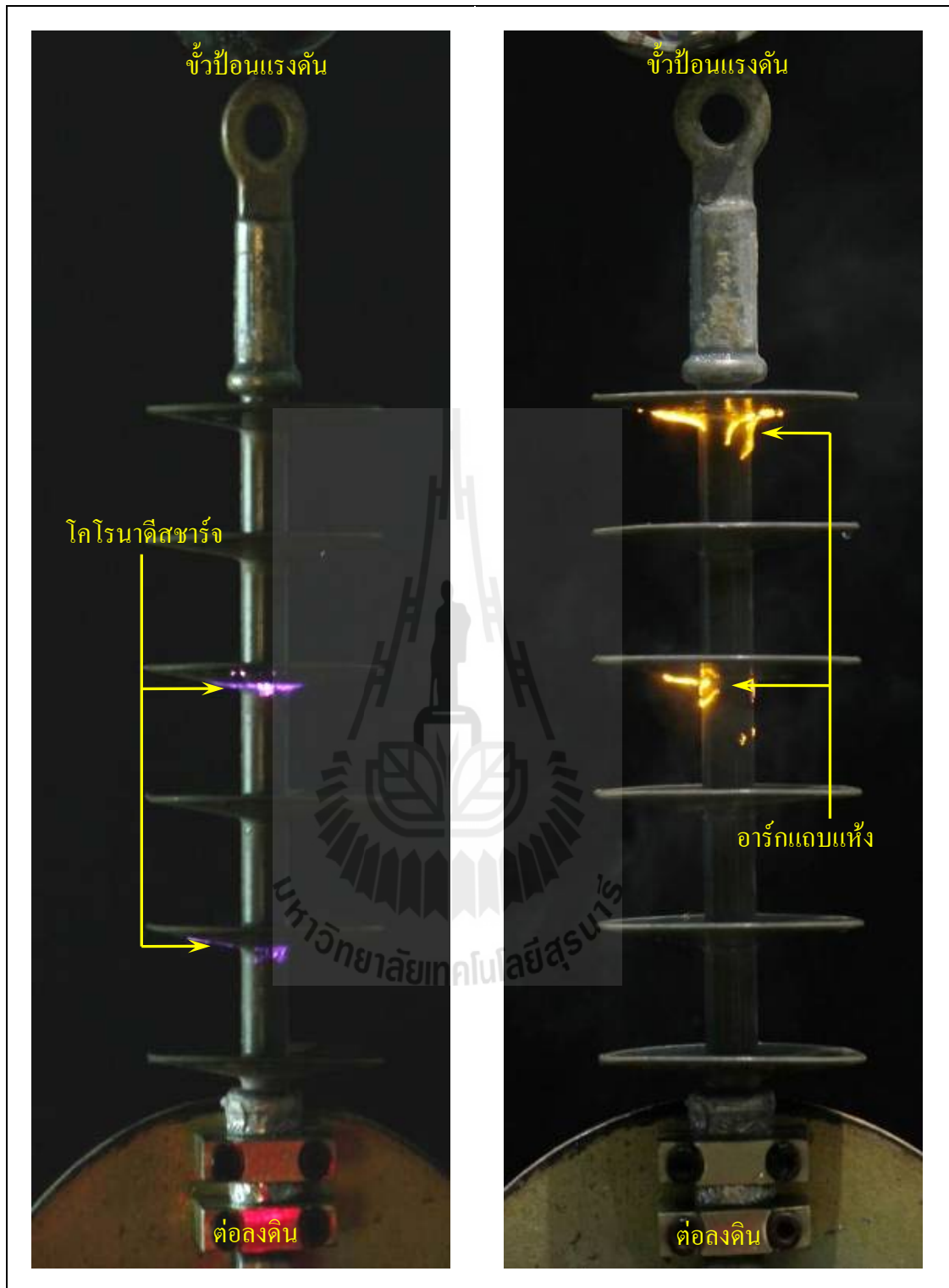
#### 6.2 การวิเคราะห์ทางกายภาพของยางซิลิโคน

ในระหว่างการทดสอบและหลังจากการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์จำนวน 30,000 cycle การวิเคราะห์ทางกายภาพเป็นการตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงต่างๆ ของพื้นผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่าหรือใช้เครื่องมือแบบง่าย ๆ เพื่อช่วยต่อการสังเกต การวิเคราะห์สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

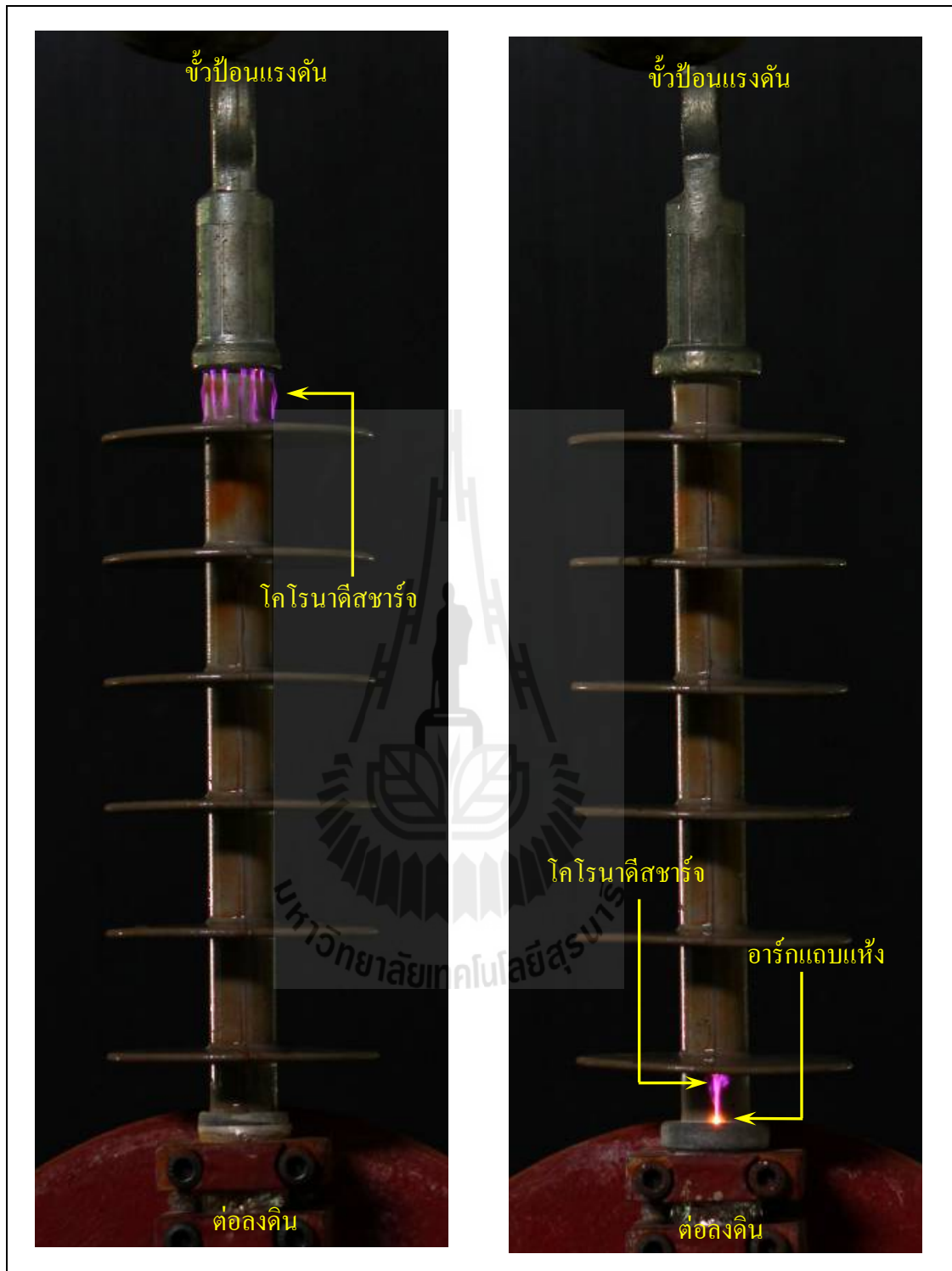
##### 6.2.1 การสังเกต

การสังเกต (visual observation) เป็นการวิเคราะห์ด้วยตาเปล่าถึงความเปลี่ยนแปลงในระหว่างการทดสอบและหลังจากการทดสอบ โดยการบันทึกภาพความเปลี่ยนแปลงต่างๆ ของพื้นผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพต่อไป

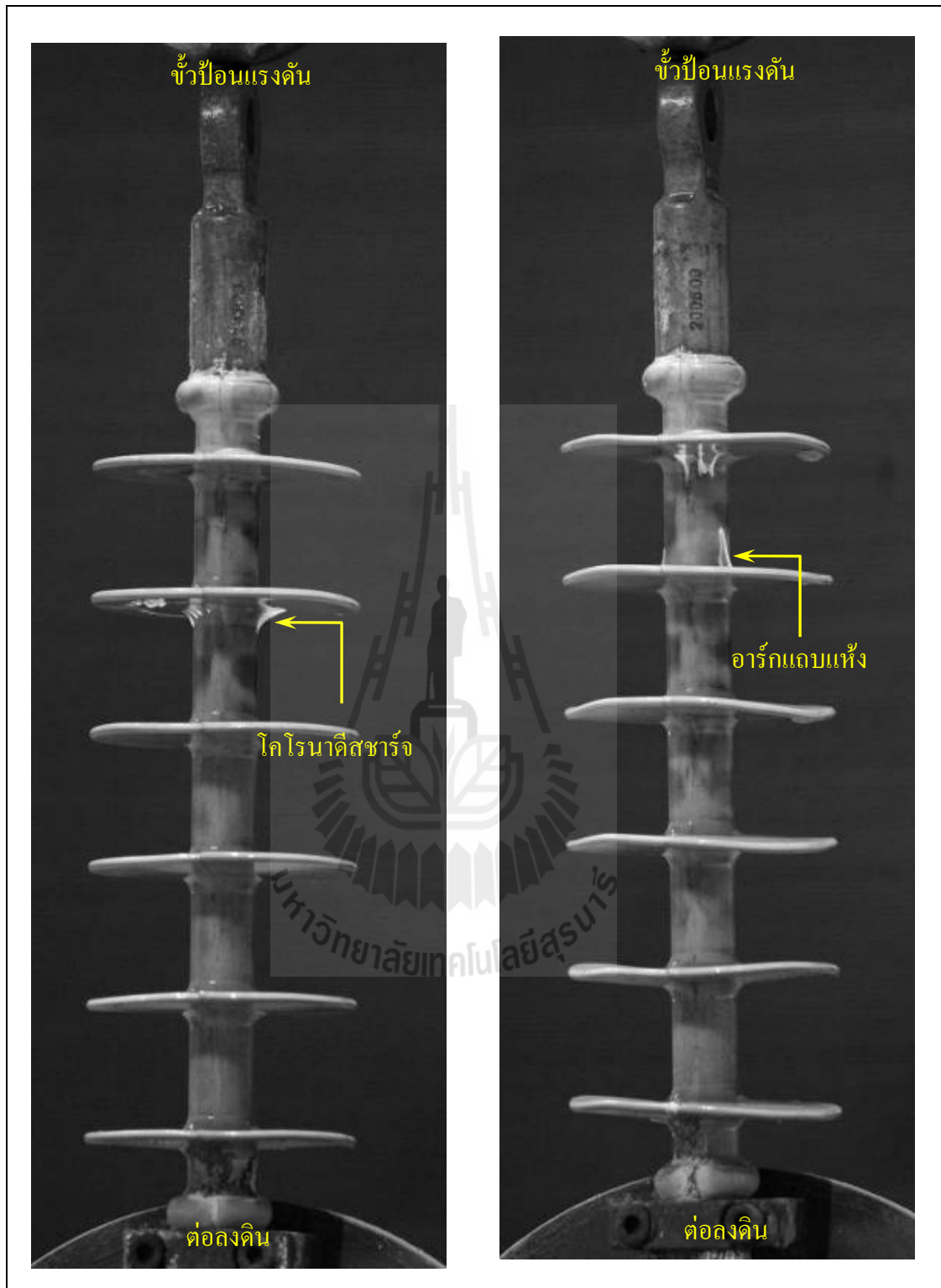
ในระหว่างการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ใช้สำหรับระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 ชนิดที่ 2 และที่ใช้สำหรับระบบ 36 kV ได้มีการเกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งขึ้น โดยที่ลักษณะของโคโรนาดีสชาร์จมีลักษณะเป็นเส้นแสงสีม่วง และอาร์กแถบแห้งมีลักษณะเป็นเส้นแสงสีส้ม ลักษณะของโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์สามารถแสดงได้ในรูปที่ 6.1 รูปที่ 6.2 รูปที่ 6.3 รูปที่ 6.4 และรูปที่ 6.5



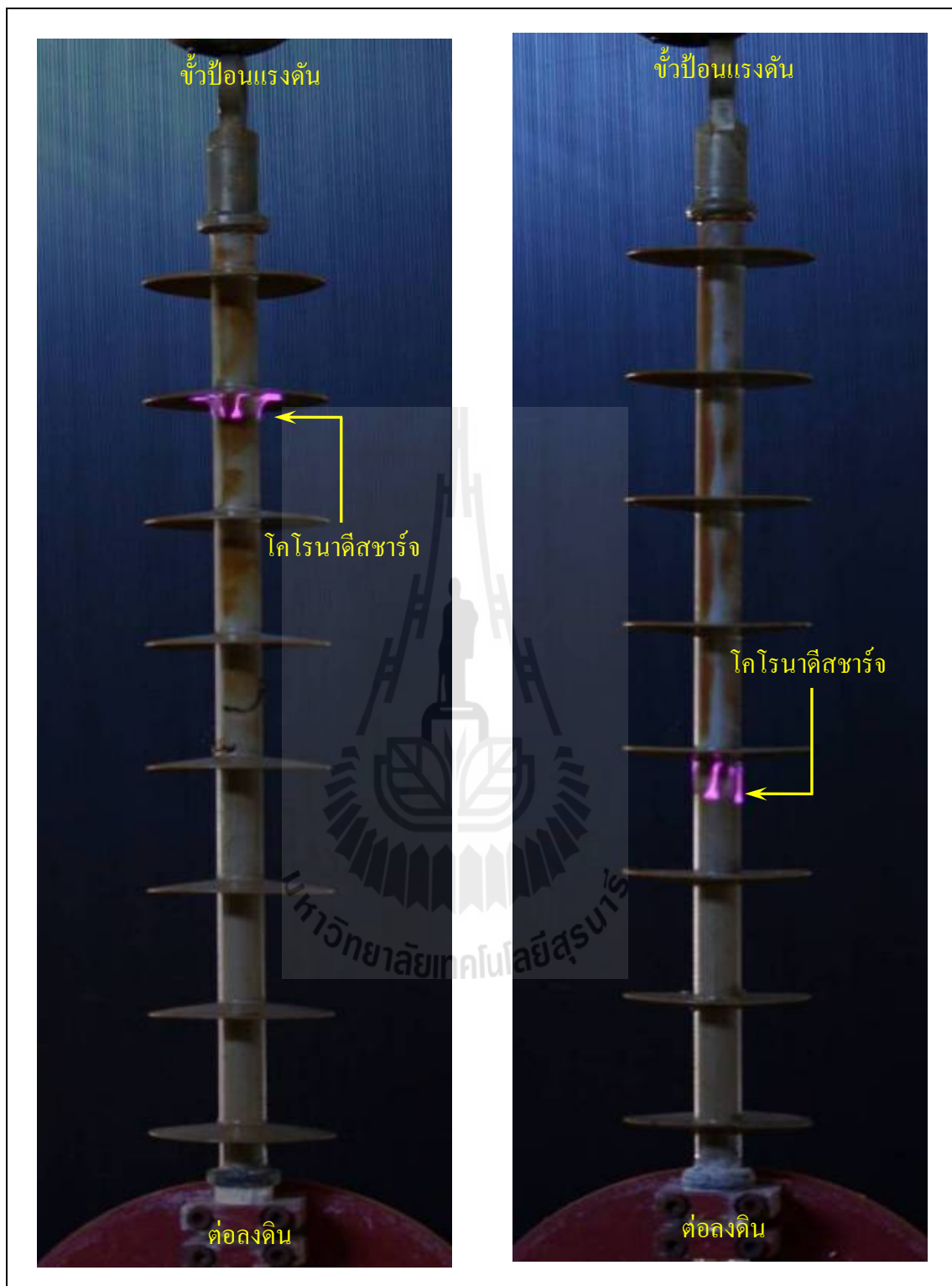
รูปที่ 6.1 การเกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งบนพื้นผิวสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1



รูปที่ 6.2 การเกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งบนพื้นผิวสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 จากการทดสอบในน้ำเปล่า



รูปที่ 6.3 การเกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งบนพื้นผิวสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2



รูปที่ 6.4 การเกิดโคโรนาดีสชาร์จบนพื้นผิวลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 36 kV

จากรูปที่ 6.1 รูปที่ 6.2 รูปที่ 6.3 และรูปที่ 6.4 เป็นลักษณะของการเกิดโคโรนา ดิสชาร์จและอาร์กแถบแห้งที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของยางซิลิโคน สังเกตได้ว่าเส้นแสงที่เกิดขึ้นทั้ง โคโรนา ดิสชาร์จและอาร์กแถบแห้งนั้น เกิดบริเวณตัวและใต้ปีกของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ของ ทั้ง 3 ชนิด ซึ่งในช่วงแรกของการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ การเกิดโคโรนา ดิสชาร์จและอาร์กแถบ แห้งเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ถูกทดสอบนานขึ้นในช่วง 25,000 – 30,000 cycles ความรุนแรงของการเกิดโคโรนา ดิสชาร์จและอาร์กแถบแห้งจึงมีมากขึ้นและได้ปรากฏ ออกมาอย่างชัดเจน เมื่อยางซิลิโคนได้รับความเครียดทางไฟฟ้าเป็นเวลานาน ส่งผลต่อการเกิด โคโรนา ดิสชาร์จและอาร์กแถบแห้ง ซึ่งปรากฏการณ์ทั้ง 2 นี้ ส่งผลกระทบต่าง ๆ ต่อการเกิดการ เปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวของยางซิลิโคน

หลังจากการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์จำนวน 30,000 cycle พื้นผิวของยางซิลิโคนได้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ เป็นผลจาก การเกิดโคโรนา ดิสชาร์จและอาร์กแถบแห้งทั้งสิ้น ลักษณะการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวของยางซิลิโคน สำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 แสดงได้ในรูปที่ 6.5 ลักษณะการเปลี่ยนแปลง บนพื้นผิวของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 จากการทดสอบใน น้ำเปล่า แสดงได้ในรูปที่ 6.6 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวน พอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2 แสดงได้ในรูปที่ 6.7 และลักษณะการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวของ ยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยที่ใช้ในระบบ 36 kV แสดงได้ในรูปที่ 6.8

จากรูปที่ 6.5 เมื่อยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 ถูกทดสอบเร่งการเสื่อมอายุจำนวน 30,000 cycle ได้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ขึ้นคือ เกิดคราบ สกปรกบนพื้นผิวของยางซิลิโคนของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ได้รับการทดสอบทั้งหมด ซึ่งคราบ สกปรกที่อยู่บริเวณตัวของยางซิลิโคนมีความสกปรกมากกว่าคราบสกปรกที่อยู่บริเวณบนปีกและ ใต้ปีกของยางซิลิโคน เกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟขึ้นตามรอยตะเข็บของยางซิลิโคน และตาม ตัวของยางซิลิโคนด้วย โดยส่วนใหญ่ร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟเกิดขึ้นบริเวณใกล้ ๆ กับขั้วต่อ ลงดินมากที่สุด นอกจากนี้ มียางซิลิโคนบางตัวเกิดรูเจาะทะลุบนปีกของยางซิลิโคนอีกด้วย



ก่อนทำความสะอาด

หลังทำความสะอาด

(ก) คราบสกปรกบริเวณตัวขางซิลิโคน



ก่อนทำความสะอาด

หลังทำความสะอาด

(ข) คราบสกปรกบริเวณปีกขางซิลิโคน



ก่อนทำความสะอาด

หลังทำความสะอาด

(ค) รูเจาะทะลุบนปีกขางซิลิโคน

รูปที่ 6.5 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวขางซิลิโคนสำหรับรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1



(ง) ร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟบริเวณรอยตะเข็บบนปีกยางซิลิโคน



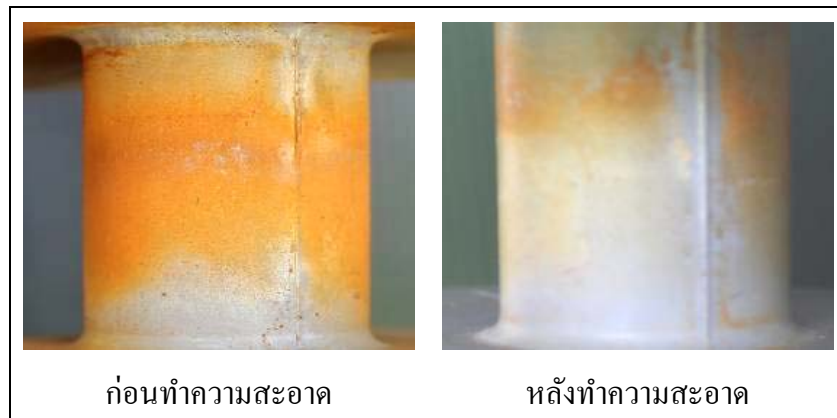
(จ) ร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟบริเวณตัวยางซิลิโคน



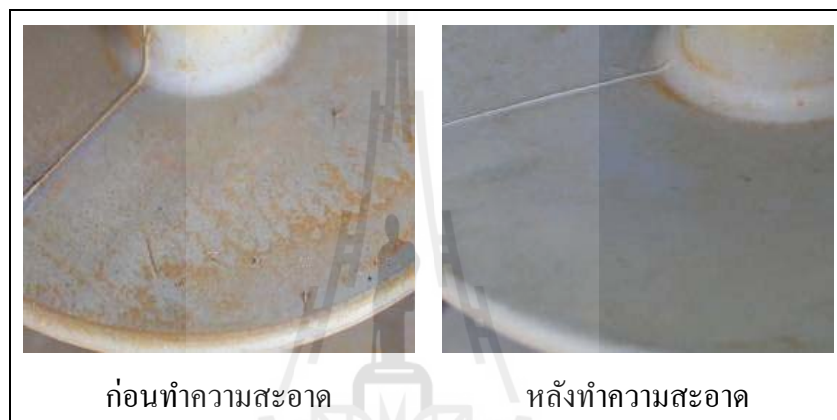
(ฉ) ร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟบริเวณรอยตะเข็บของตัวยางซิลิโคน

รูปที่ 6.5 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวยางซิลิโคนสำหรับรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 (ต่อ)





(ก) คราบสกปรกบริเวณตัวถังซิลิโคน



(ข) คราบสกปรกบริเวณปีกยางซิลิโคน



(ค) ร่องผิวเสื่อมสภาพจากวับไฟบริเวณรอยตะเข็บของตัวถังซิลิโคน

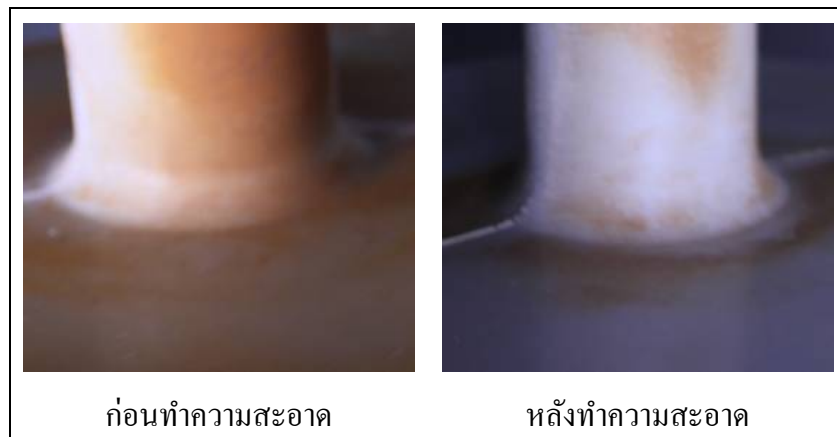
รูปที่ 6.6 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวยางซิลิโคนสำหรับหุ้มลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 จากการทดสอบในน้ำเปล่า



(ง) รูเจาะทะลุบนปีกยางซิลิโคน

รูปที่ 6.6 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวของซิลิโคนสำหรับหุ้มลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 จากการทดสอบในน้ำเปล่า (ต่อ)

จากรูปที่ 6.6 เมื่อยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 ถูกทดสอบเร่งการเสื่อมอายุจำนวน 30,000 cycle จากการทดสอบในน้ำเปล่า ได้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ขึ้นคือ เกิดคราบสกปรกบนพื้นผิวของยางซิลิโคนของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ได้รับการทดสอบทั้งหมด ซึ่งคราบสกปรกที่อยู่บริเวณตัวของยางซิลิโคนมีความสกปรกมากกว่าคราบสกปรกที่อยู่บริเวณบนปีกและได้ปีกของยางซิลิโคน เกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟขึ้นตามรอบตะเข็บของปีกยางซิลิโคน ตามรอยตะเข็บของยางซิลิโคน และตามตัวของยางซิลิโคนด้วย โดยส่วนใหญ่ร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟเกิดขึ้นบริเวณใกล้ ๆ กับขั้วต่อลงดินมากที่สุด นอกจากนี้ มียางซิลิโคนบางตัวเกิดรูเจาะทะลุบนปีกของยางซิลิโคนอีกด้วย



ก่อนทำความสะอาด

หลังทำความสะอาด

(ก) คราบสกปรกบริเวณตัวยางซีลีโคน



ก่อนทำความสะอาด

หลังทำความสะอาด

(ข) คราบสกปรกบริเวณปีกยางซีลีโคน

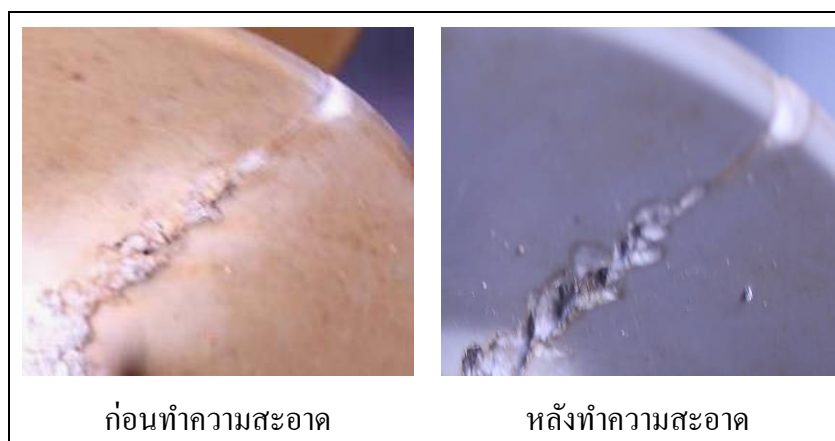


ก่อนทำความสะอาด

หลังทำความสะอาด

(ค) ร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟบริเวณรอยตะเข็บของตัวยางซีลีโคน

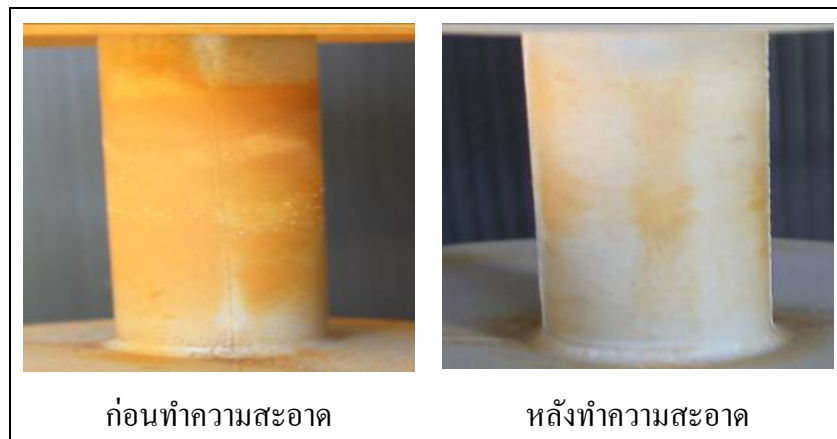
รูปที่ 6.7 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวยางซีลีโคนสำหรับรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2



(ง) ร่องผิวเสื่อมสภาพจากวابلไฟบริเวณรอยตะเข็บบนปีกยางซิลิโคน

รูปที่ 6.7 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวของซิลิโคนสำหรับหุ้มลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2 (ต่อ)

จากรูปที่ 6.7 เมื่อยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2 ถูกทดสอบเร่งการเสื่อมอายุจำนวน 30,000 cycle ได้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ขึ้นคือ เกิดคราบสกปรกบนพื้นผิวของยางซิลิโคนของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ได้รับการทดสอบทั้งหมด ซึ่งคราบสกปรกที่เกิดขึ้นนั้น เกิดขึ้นทั้งบริเวณตัวยางซิลิโคน บนปีกและใต้ปีกของยางซิลิโคน นอกจากนี้พบว่าเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวابلไฟขึ้นตามรอยตะเข็บของปีกยางซิลิโคน และตัวยางซิลิโคน โดยที่ร่องผิวเสื่อมสภาพจากวابلไฟพบได้มากที่สุดเป็นขั้วต่อลงดิน ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวابلไฟรุนแรงที่สุด



ก่อนทำความสะอาด

หลังทำความสะอาด

(ก) คราบสกปรกบริเวณตัวถังซิลิโคน



ก่อนทำความสะอาด

หลังทำความสะอาด

(ข) คราบสกปรกบริเวณปีกยางซิลิโคน



ก่อนทำความสะอาด

หลังทำความสะอาด

(ค) ร่องผิวเสื่อมสภาพจากควาไฟฟ้าบริเวณรอยตะเข็บของตัวถังซิลิโคน

รูปที่ 6.8 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวของซิลิโคนสำหรับหับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์  
ระบบ 36 kV



(ง) ร่องผิวเชื่อมสภาพจากวับไฟบริเวณตัวยางซิลิโคน

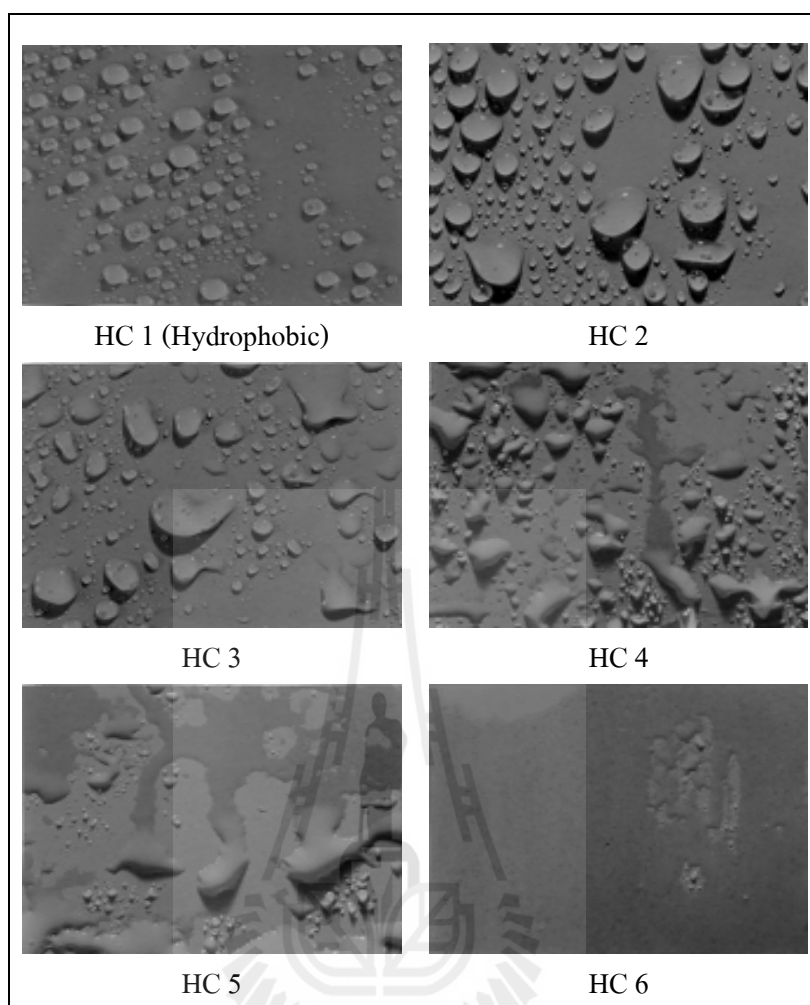
รูปที่ 6.8 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวยางซิลิโคนสำหรับรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ ระบบ 36 kV (ต่อ)

จากรูปที่ 6.8 เมื่อยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 36 kV ถูกทดสอบเร่งการเสื่อมอายุจำนวน 30,000 cycle ได้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ขึ้นคือ เกิดคราบสกปรกบนพื้นผิวของยางซิลิโคนของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ได้รับการทดสอบทั้งหมด ซึ่งคราบสกปรกที่อยู่บริเวณตัวของยางซิลิโคนมีความสกปรกมากกว่าคราบสกปรกที่อยู่บริเวณบนปีกและใต้ปีกของยางซิลิโคน นอกจากนี้พบว่าเกิดร่องผิวเชื่อมสภาพจากวับไฟขึ้นบริเวณตัวของยางซิลิโคนซึ่งใกล้เคียงกับข้อต่อลงดินทุกตัวที่ได้รับการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ

จากการวิเคราะห์ด้วยการสังเกต ความเสียหายต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเป็นผลจากการที่ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ได้รับความเครียดทางไฟฟ้า ส่งผลให้ยางซิลิโคนที่ใช้เป็นโครงหุ้มฉนวนของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ มีความทนทานต่อการเป็นฉนวนลดลง ทำให้บริเวณบางแห่งเกิดความเสียหาย ส่งผลให้การเป็นฉนวนของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ลดลง

## 6.2.2 คุณสมบัติหยดน้ำลื่น

คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่น (hydrophobic surface property) ของยางซิลิโคนเกิดจากการเรียงตัวกันอย่างใกล้ชิดของกลุ่มเมทิล ซึ่งในสภาวะปกติจะเรียงตัวแบบซี่ออกที่ผิวด้านบน จึงทำให้ผิวของยางซิลิโคนเป็นผิวแบบหยดน้ำลื่น ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติหยดน้ำลื่น คือเวลาสภาพแวดล้อม และผลจากการเกิดดีสชาร์จบางส่วน ในการทดสอบคุณสมบัติหยดน้ำลื่น ทำได้โดยการพ่นละอองน้ำไปยังพื้นผิวของชิ้นงานที่ต้องการทดสอบ การจำแนกประเภทของคุณสมบัติหยดน้ำลื่นสามารถจำแนกออกเป็น 7 ประเภทแสดงได้ในรูปที่ 6.9

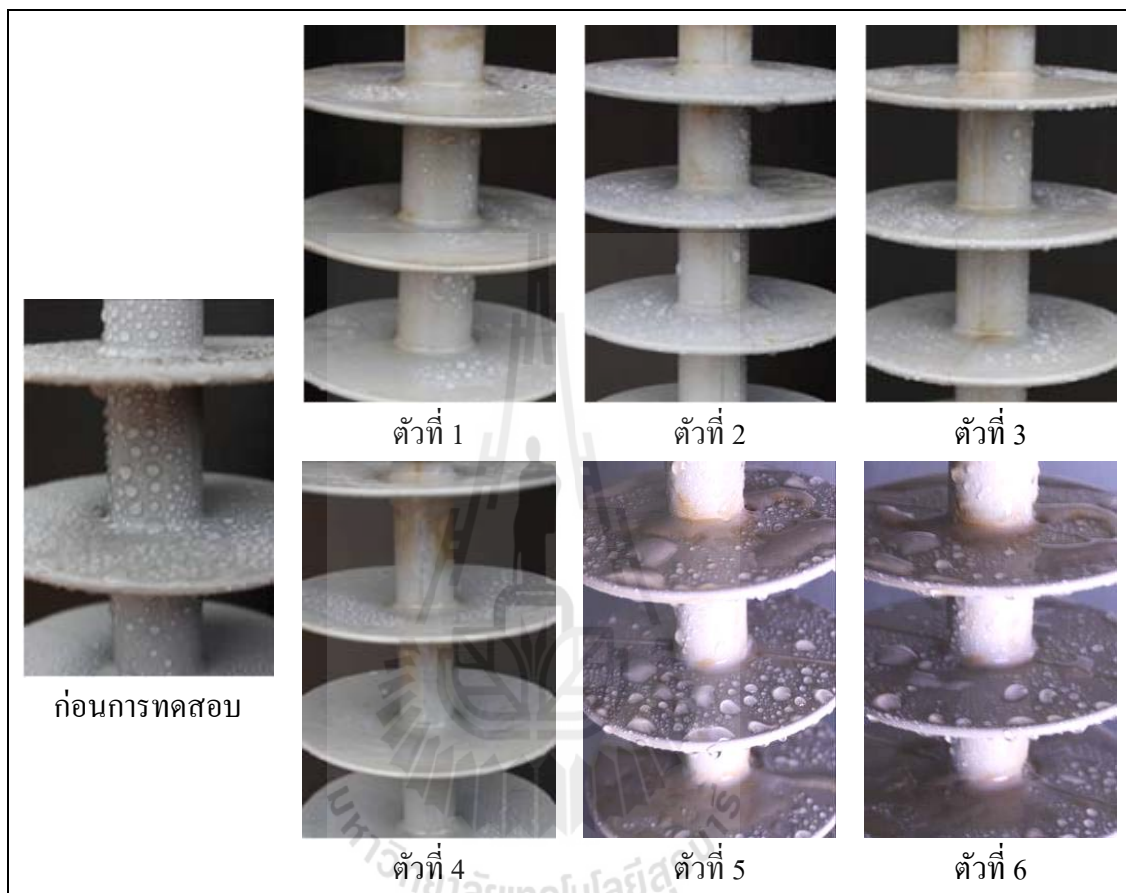


รูปที่ 6.9 ลักษณะตัวอย่างโดยทั่วไปของพื้นผิว HC1-HC6 (หมายเหตุ ระดับ CH7 มีลักษณะเป็นฟิล์มน้ำ)

จากรูปที่ 6.9 การจำแนกประเภทของคุณสมบัติหยดน้ำสามารถจำแนกออกเป็น 7 ประเภทตามมาตรฐาน STIR โดยระดับต่ำสุด HC1 คือ พื้นผิวที่มีความไม่ชอบน้ำอย่างสมบูรณ์ (hydrophobic) ไปจนถึงระดับ HC7 คือ พื้นผิวสามารถเปียกน้ำได้ง่าย โดยข้อกำหนดสถานะของมาตรฐาน STIR มีรายละเอียดดังนี้ดังนี้

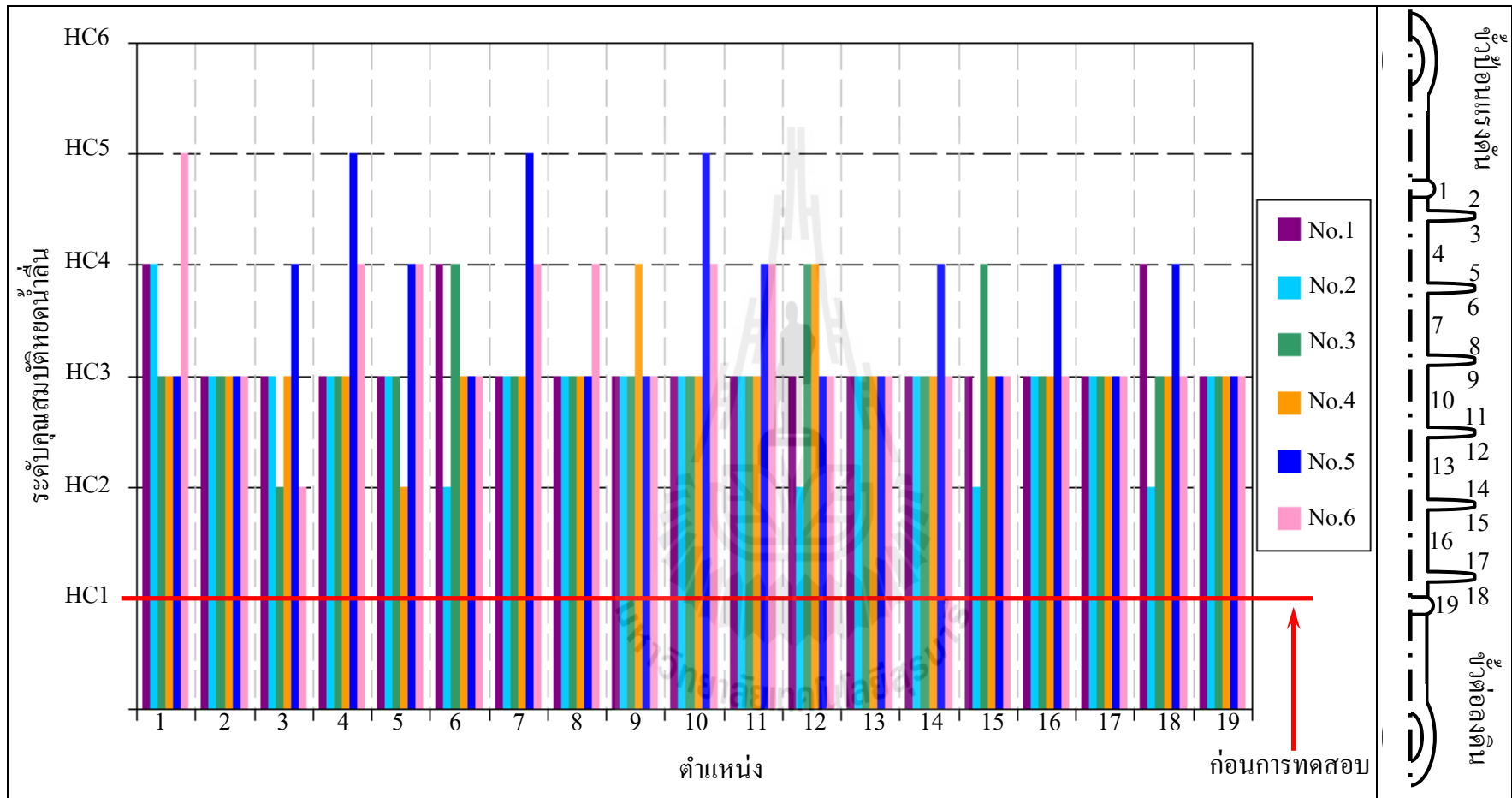
|                          |                               |
|--------------------------|-------------------------------|
| พื้นที่ทดสอบ             | 50-100 cm <sup>2</sup>        |
| ระยะห่างของละอองน้ำ      | 25 ± 10 cm จากพื้นที่ทดสอบ    |
| ลักษณะการพ่นละอองน้ำ     | 1-2 ครั้ง/s                   |
| ระยะเวลาในการพ่นละอองน้ำ | 20-30 s                       |
| เวลาในการจำแนกประเภท     | ภายใน 10 s หลังจากพ่นละอองน้ำ |

หลังจากที่ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์สำหรับระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 ได้รับการทดสอบ  
 เร่งการเสื่อมอายุจำนวน 30,000 cycle การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติหยดน้ำลื่นบนพื้นผิวของซิลิโคน  
 โดยเปรียบเทียบกับตัวอย่างซิลิโคนก่อนการทดสอบแสดงได้ในรูปที่ 6.10



รูปที่ 6.10 คุณสมบัติหยดน้ำลื่นของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์  
 ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1

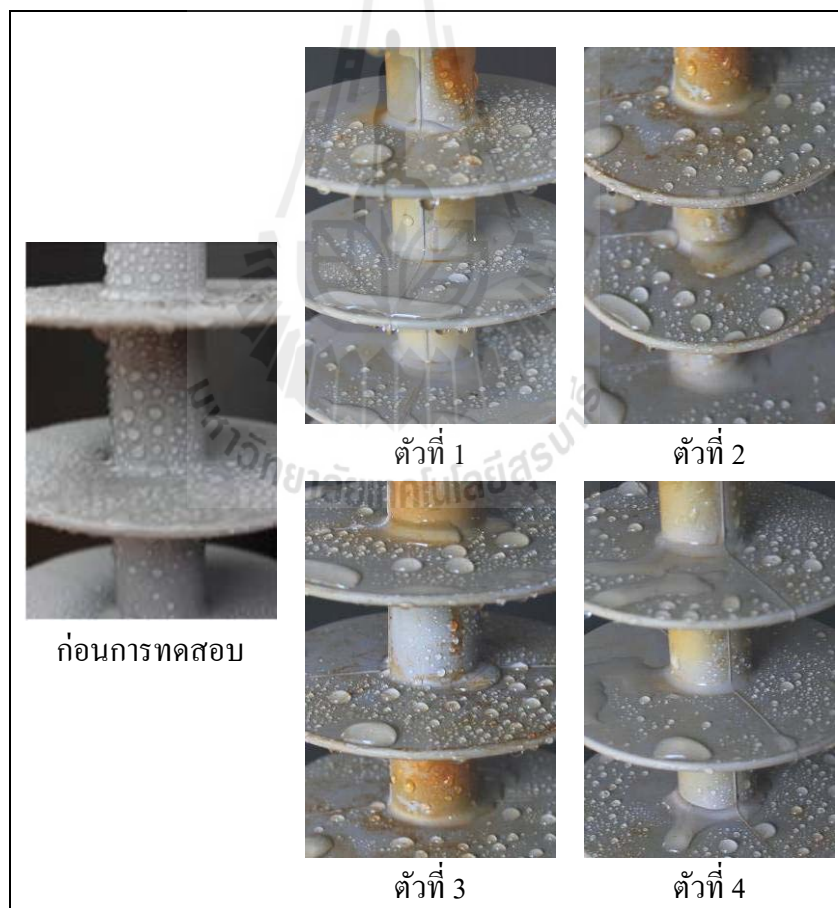




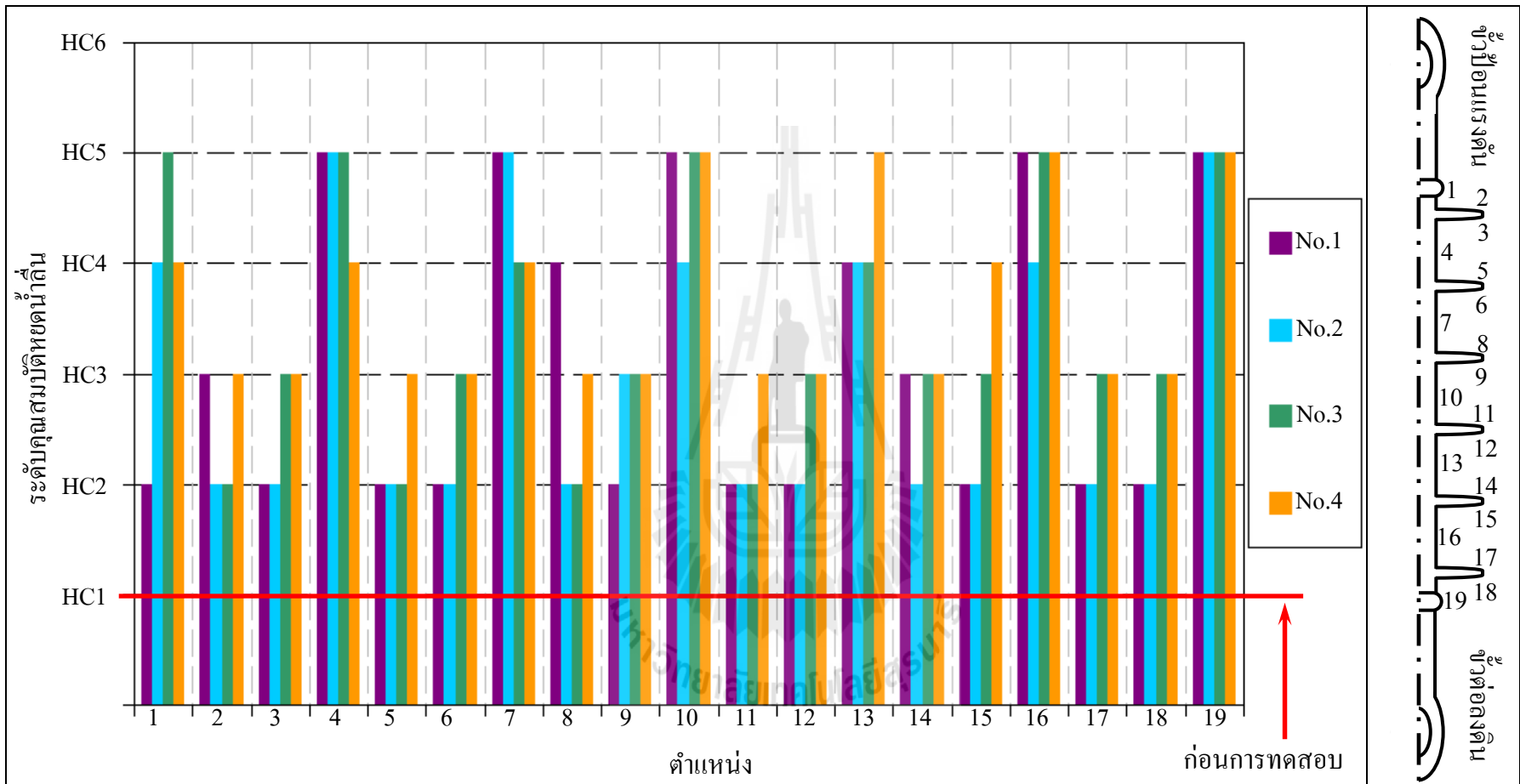
รูปที่ 6.11 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติหยดน้ำลื่นของผิวยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1  
 หลังการทดสอบวงล้อจุ่มน้ำเกลือ (HC1 : หยดน้ำลื่นจากผิว HC6 : फिल्मน้ำเกาะผิว)

เมื่อลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ถูกทดสอบเร่งการเสื่อมอายุทั้งหมด 30,000 cycle และนำยางซิลิโคนที่ได้รับการทดสอบมาเปรียบเทียบกับยางซิลิโคนที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ความแตกต่างระหว่างคุณสมบัติหยดน้ำดึ้นนั้น มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยระดับการเกิดคุณสมบัติหยดน้ำดึ้นของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 แสดงในรูปที่ 6.11

จากรูปที่ 6.11 เมื่อยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 ได้รับการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุครบ 30,000 cycle ได้มีการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติหยดน้ำดึ้นขึ้น เมื่อวิเคราะห์คุณสมบัติหยดน้ำดึ้นของแต่ละตำแหน่ง สังเกตได้ว่า ตำแหน่งส่วนใหญ่ของยางซิลิโคนมีระดับคุณสมบัติหยดน้ำดึ้นอยู่ที่ HC3 โดยมีเพียงส่วนน้อยที่มีระดับคุณสมบัติหยดน้ำดึ้นเป็นระดับอื่น



รูปที่ 6.12 คุณสมบัติหยดน้ำดึ้นของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 จากการทดสอบในน้ำเปล่า



รูปที่ 6.13 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติหยดน้ำสิ้นของผิวยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 หลังการทดสอบวงล่อจุ่มน้ำที่เกิดจากการทดสอบในน้ำเปล่า (HC1 : หยดน้ำสิ้นจากผิว HC6 : ฟิล์มน้ำเกาะผิว)

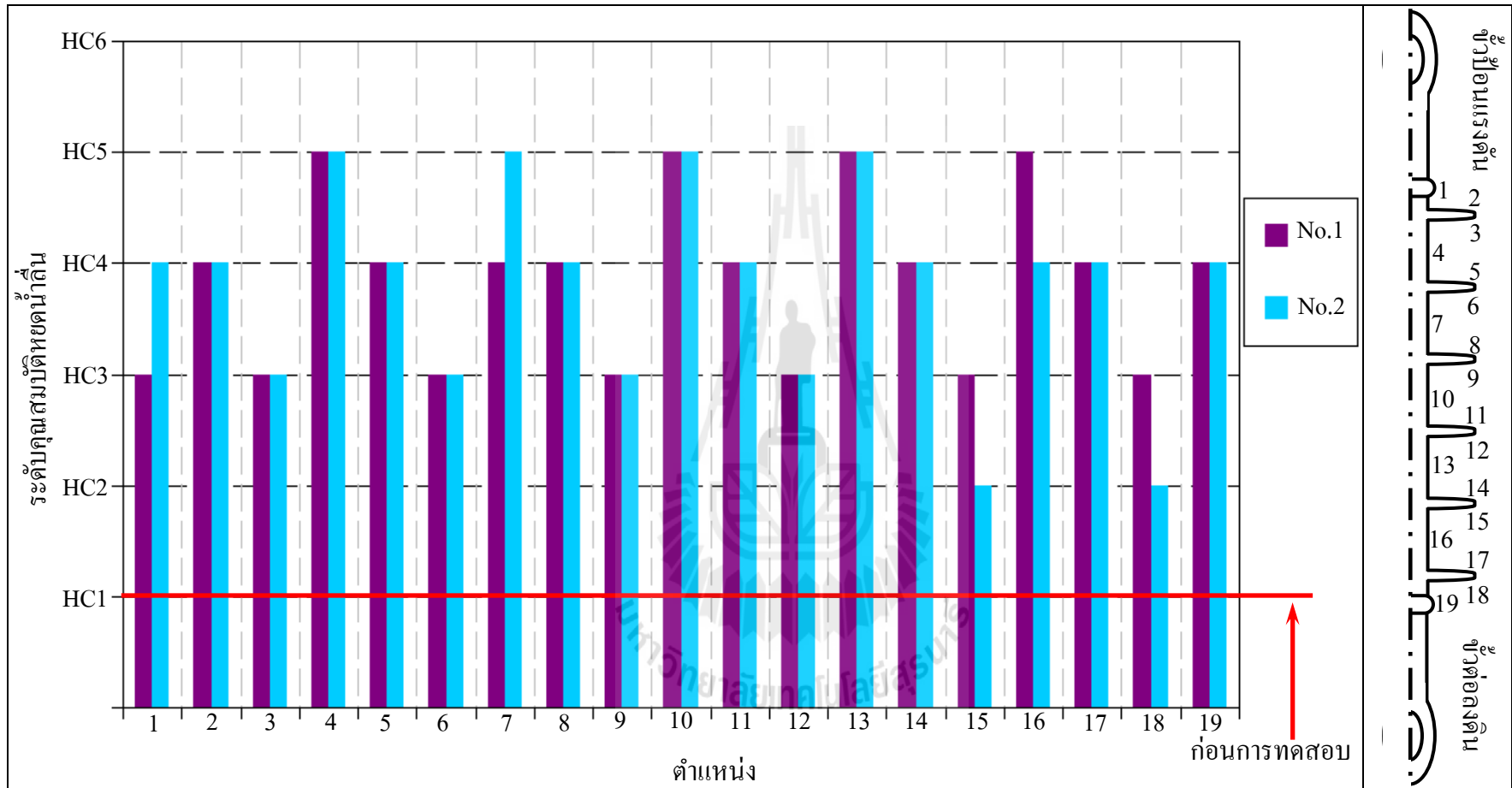
หลังจากที่ถูกด้วยจนวนพอลิเมอร์สำหรับระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 ได้รับการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุจำนวน 30,000 cycle จากการทดสอบในน้ำเปล่า การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติหยดน้ำลื่นบนพื้นผิวของซิลิโคน โดยเปรียบเทียบกับตัวอย่างของซิลิโคน ก่อนการทดสอบแสดงได้ในรูปที่ 6.12

จากรูปที่ 6.13 เมื่อของซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยจนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 ได้รับการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุครบ 30,000 cycle จากการทดสอบด้วยน้ำเปล่า ได้มีการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติหยดน้ำลื่นขึ้น จากการวิเคราะห์คุณสมบัติหยดน้ำลื่นของแต่ละตำแหน่ง สังเกตได้ว่า บริเวณบนปีกและใต้ปีกของของซิลิโคนมีคุณสมบัติหยดน้ำลื่นอยู่ในระดับ HC2 ถึง HC3 ซึ่งแตกต่างจากบริเวณตัวของซิลิโคนที่มีระดับคุณสมบัติหยดน้ำลื่นที่สูงกว่าคือ อยู่ในระดับ HC4 ถึง HC5

หลังจากที่ถูกด้วยจนวนพอลิเมอร์สำหรับระบบ 24 kV ชนิดที่ 2 ได้รับการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุจำนวน 30,000 cycle การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติหยดน้ำลื่นบนพื้นผิวของซิลิโคน โดยเปรียบเทียบกับตัวอย่างของซิลิโคนก่อนการทดสอบแสดงได้ในรูปที่ 6.14



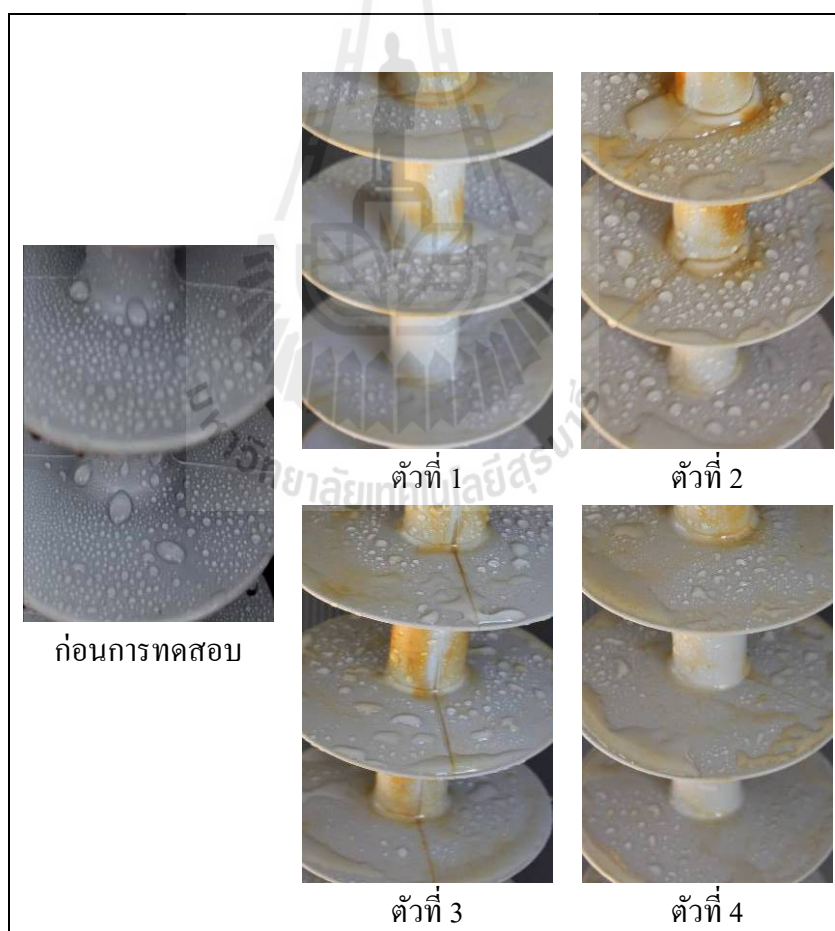
รูปที่ 6.14 คุณสมบัติหยดน้ำลื่นของของซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยจนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2



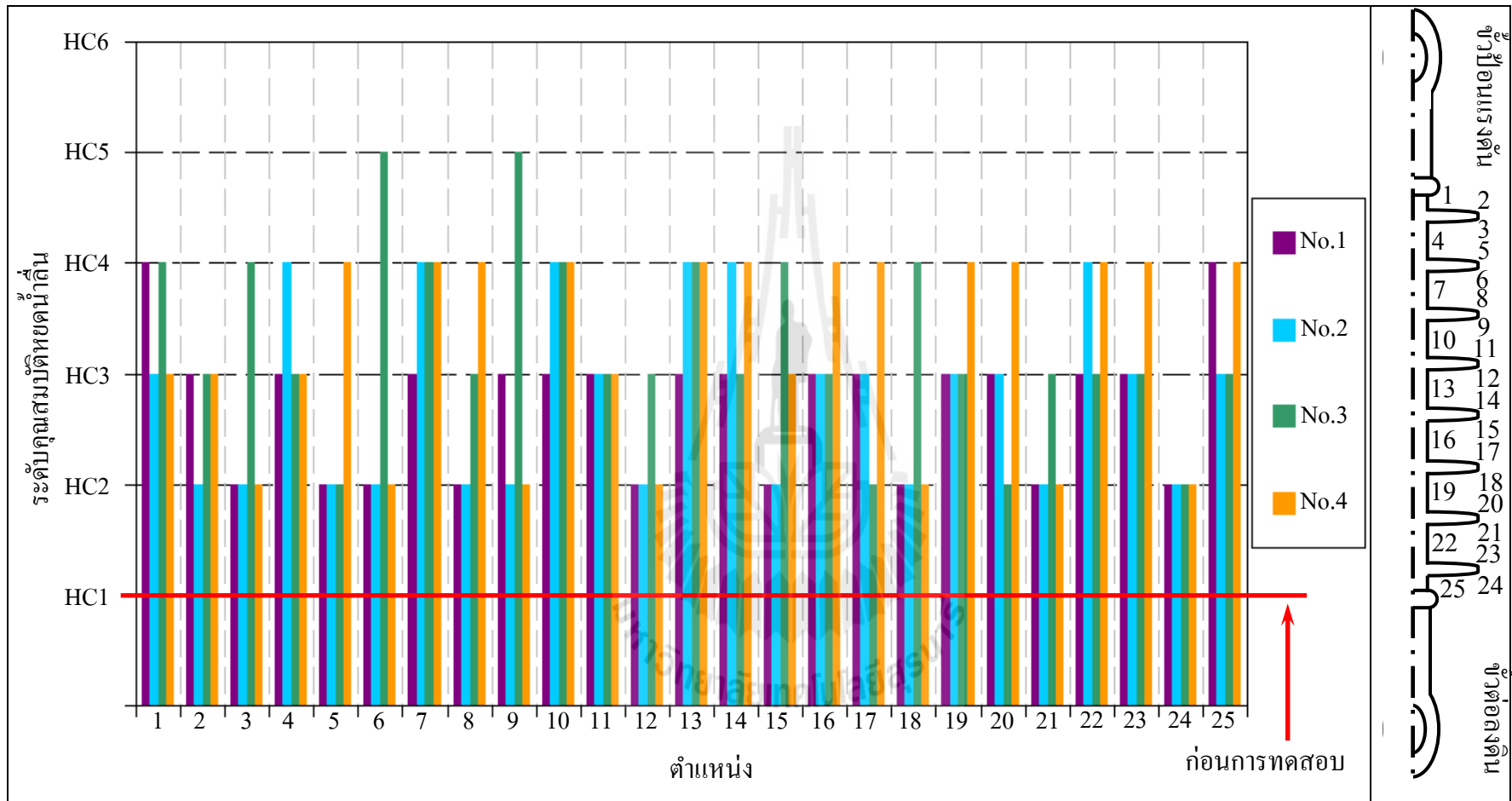
รูปที่ 6.15 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติหยดน้ำดื่มของฝายยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2 หลังการทดสอบวงล้อจุ่มน้ำเกลือ (HC1 : หยดน้ำดื่มจากฝาย HC6 : ฟิล์มน้ำเกาะฝาย)

จากรูปที่ 6.15 เมื่อยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2 ได้รับการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุครบ 30,000 cycle ได้มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติหยดน้ำขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับยางซิลิโคนที่ยังไม่ผ่านการใช้งานมาก่อน เมื่อนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติหยดน้ำขึ้นในแต่ละตำแหน่ง พบว่า ระดับคุณสมบัติหยดน้ำขึ้นที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วง HC3 ถึง HC5 และสังเกตได้ว่า บริเวณตัวยางซิลิโคนมีระดับคุณสมบัติหยดน้ำขึ้นที่สูงกว่าบริเวณบนปีกและใต้ปีกยางซิลิโคน ซึ่งบริเวณของตัวยางซิลิโคนส่วนใหญ่มีระดับการเกิดคุณสมบัติหยดน้ำขึ้นช่วง HC4 ถึง HC5 ซึ่งมีระดับมากกว่าบริเวณบนปีกและใต้ปีกที่อยู่ในช่วง HC3 ถึง HC4

หลังจากที่ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์สำหรับระบบ 36 kV ได้รับการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุจำนวน 30,000 cycle การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติหยดน้ำขึ้นบนพื้นผิวของซิลิโคน โดยเปรียบเทียบกับตัวอย่างยางซิลิโคนก่อนการทดสอบแสดงได้ในรูปที่ 6.16



รูปที่ 6.16 คุณสมบัติหยดน้ำขึ้นของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 36 kV



รูปที่ 6.17 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติหยดน้ำของผิวยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 36 kV  
 หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือ (HC1 : หยดน้ำจืดจากผิว, HC6 : ฟิล์มน้ำเกาะผิว)

จากรูปที่ 6.17 เมื่อขางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 36 kV ถูกทดสอบเร่งการเสื่อมอายุครบ 30,000 cycle ได้มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติหยดน้ำล้นบนพื้นผิวขึ้นเมื่อขางซิลิโคนที่ได้รับการทดสอบเปรียบเทียบกับขางซิลิโคนที่ยังไม่ผ่านการใช้งานและนำขางซิลิโคนมาวิเคราะห์ในแต่ละตำแหน่ง พบว่า ในแต่ละตำแหน่งมีระดับคุณสมบัติหยดน้ำล้นที่ใกล้เคียงกันทั้งบริเวณบนปีก ใต้ปีก และตัวขางซิลิโคนคือ อยู่ในช่วง HC2 ถึง HC4

จากการวิเคราะห์ด้วยคุณสมบัติหยดน้ำล้น การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติหยดน้ำล้นเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยมีความร้อนเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาเหล่านี้ เมื่อพื้นผิวขางซิลิโคนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและไฮโดรไลซิสขึ้น คุณสมบัติหยดน้ำล้นที่เคยมีอยู่บนพื้นผิวขางซิลิโคนได้เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งความเสียหายจากการเกิดคุณสมบัติหยดน้ำล้น เป็นจุดเริ่มต้นของความเสียหายต่าง ๆ ของขางซิลิโคนที่จะเกิดขึ้นตามมา

### 6.2.3 ระดับความเปรอะเปื้อน

ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์เมื่อได้รับสิ่งเปรอะเปื้อนต่าง ๆ เช่น ฝุ่น เกลือ เป็นต้น ซึ่งเมื่อสิ่งปนเปื้อนเหล่านั้นเกาะบนพื้นผิวของขางซิลิโคนและเปียกน้ำ ส่งผลให้ความต้านทานที่ผิวของขางซิลิโคนลดลงและส่งผลต่อการเกิดวาทไฟตามผิวของขางซิลิโคนในที่สุด

เมื่อลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ถูกติดตั้งอยู่ภายนอกอาคาร สิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ ที่อยู่ในแต่ละสภาพแวดล้อมเป็นสาเหตุสำคัญต่อการเกิดวาทไฟตามผิว ส่งผลให้คุณสมบัติความเป็นฉนวนของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ลดลง การเกิดวาทไฟตามผิวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของสิ่งปนเปื้อนที่เกาะบริเวณพื้นผิวของขางซิลิโคน การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของเกลือหรือ SDD (salt deposit density) เป็นวิธีในการวิเคราะห์หาความสกปรกหรือสิ่งปนเปื้อนที่อยู่บนพื้นผิวของขางซิลิโคน โดยอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC Publ. 60507 โดยมีขั้นตอนการวัดความเปรอะเปื้อนของขางซิลิโคน ดังนี้

- 1) นำขางซิลิโคนที่ได้รับการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ โดยระวังไม่ให้มีการสัมผัสผิวของขางซิลิโคน หรือสัมผัสให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้
- 2) ใช้ถ้วยตวงเพื่อตวงน้ำกลั่นปริมาณ 300 cm<sup>3</sup> แล้วนำน้ำกลั่นไปลงในน้ำกลั่น จากนั้นนำมาทำความสะอาดขางซิลิโคน โดยที่ในการทำความสะอาด สะอาดต้องสวมถุงมือด้วย
- 3) บีบน้ำออกจากสำลีก่อนนำไปเช็ดขางซิลิโคน นำกระดาษไปจุ่มแล้วขยำนน้ำ แล้วบีบน้ำออกอีกครั้ง ก่อนนำไปเช็ดขางซิลิโคนต่อ ทำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนขางซิลิโคนสะอาดไม่มีสิ่งปนเปื้อนเหลืออยู่บนผิวฉนวนขางซิลิโคน (ยกเว้นส่วนที่เป็นโลหะไม่ต้องเช็ดทำความสะอาด)
- 4) คนน้ำให้สิ่งเจอปนละลายก่อน นำมิเตอร์วัดค่าความนำไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำและจดบันทึก



เมื่อวัดค่าความนำไฟฟ้าได้แล้ว นำค่าที่ได้มาคำนวณโดยสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\sigma_{20} = \sigma_0 [1 - b(\theta - 20)] \quad (6.1)$$

- เมื่อ  $\theta$  คือ อุณหภูมิของสารละลาย ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $\sigma_0$  คือ ค่าความนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ  $\theta$   $^{\circ}\text{C}$  (S/m)  
 $\sigma_{20}$  คือ ค่าความนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ  $20$   $^{\circ}\text{C}$  (S/m)  
 $b$  คือ ค่าคงที่ ณ อุณหภูมิที่วัดได้ในขณะนั้น สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6.2)

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

และสามารถคำนวณ SDD ได้จากสมการ (6.3) และ (6.4)

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

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

- เมื่อ  $S_a$  คือ ความเข้มข้นของน้ำเกลือ ( $\text{mg}/\text{cm}^3$ )  
 $\text{SDD}$  คือ Salt deposit density ( $\text{mg}/\text{cm}^3$ )  
 $V$  คือ ปริมาณของสารละลายใช้ทำความสะอาด ( $\text{cm}^3$ )  
 $A$  คือ พื้นที่ผิวของชิ้นงานที่ทดสอบ ( $\text{cm}^2$ )

โดยที่พื้นที่ผิวของยางซิลิโคนชนิดต่าง ๆ แสดงได้ในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 พื้นที่ผิวของยางซีลโคนประเภทต่าง ๆ

| ชนิดของยางซีลโคน     | พื้นที่ผิว (cm <sup>2</sup> ) |
|----------------------|-------------------------------|
| ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 | 785.45                        |
| ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2 | 785.45                        |
| ระบบ 36 kV           | 930.97                        |

จากสมการข้างต้นสามารถคำนวณค่า SDD โดยแสดงในตารางที่ 6.6

ตารางที่ 6.2 ค่า SDD ของยางซีลโคน

| ยางซีลโคน                                    |          | อุณหภูมิ<br>(°C) | ค่าความนำไฟฟ้า<br>(μS/cm) | SDD<br>(mg/cm <sup>3</sup> ) |
|--|----------|------------------|---------------------------|------------------------------|
| ระบบ 24 kV<br>ชนิดที่ 1                      | ตัวที่ 1 | 25.4             | 442.60                    | 0.075                        |
|  | ตัวที่ 2 | 25.4             | 260.40                    | 0.043                        |
|  | ตัวที่ 3 | 25.4             | 460.80                    | 0.078                        |
|  | ตัวที่ 4 | 25.4             | 297.00                    | 0.050                        |
|  | ตัวที่ 5 | 28.9             | 135.04                    | 0.021                        |
|  | ตัวที่ 6 | 28.9             | 116.62                    | 0.018                        |
| ระบบ 24 kV<br>ชนิดที่ 1<br>(ทดสอบในน้ำเปล่า) | ตัวที่ 1 | 26.3             | 382.80                    | -                            |
|  | ตัวที่ 2 | 26.3             | 411.80                    | -                            |
|  | ตัวที่ 3 | 26.3             | 402.00                    | -                            |
|  | ตัวที่ 4 | 26.3             | 398.60                    | -                            |
| ระบบ 24 kV<br>ชนิดที่ 2                      | ตัวที่ 1 | 28.9             | 154.04                    | 0.023                        |
|  | ตัวที่ 2 | 28.9             | 101.94                    | 0.015                        |
| ระบบ 36 kV                                   | ตัวที่ 1 | 24.0             | 335.80                    | 0.053                        |
|  | ตัวที่ 2 | 24.0             | 340.20                    | 0.054                        |
|  | ตัวที่ 3 | 24.0             | 316.40                    | 0.050                        |
|  | ตัวที่ 4 | 24.0             | 346.20                    | 0.055                        |

หมายเหตุ



การทดสอบชุดที่ 1

การทดสอบชุดที่ 3



การทดสอบชุดที่ 2

การทดสอบชุดที่ 4

จากตารางที่ 6.2 พบว่า ยางซิลิโคนที่ได้รับการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุมีค่าความเปราะเป็อนในแต่ละชุดการทดสอบที่ใกล้เคียงกัน โดยในการทดสอบได้ทดสอบทั้งหมด 4 ชุด แบ่งเป็น ชุดที่ 1 ประกอบด้วย ยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 ตัวที่ 1 ถึง ตัวที่ 4 ชุดที่ 2 ประกอบด้วยยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 จากการทดสอบในน้ำเปล่าตัวที่ 1 ถึง ตัวที่ 4 ชุดที่ 3 ประกอบด้วยยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 ตัวที่ 5 กับตัวที่ 6 และยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2 ตัวที่ 1 กับตัวที่ 2 และชุดที่ 4 ประกอบด้วยยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 36 kV ตัวที่ 1 ถึงตัวที่ 4 ซึ่งในแต่ละชุดของการทดสอบได้ทดสอบเร่งการเสื่อมอายุในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน นั่นคือชุดที่ 1 ทดสอบช่วงเดือนมีนาคมถึงเดือนพฤษภาคม (ฤดูร้อน) ชุดที่ 2 ช่วงเดือนเมษายนถึงเดือนกรกฎาคม (ฤดูร้อนย่างเข้าฤดูฝน) ของปีถัดไป ชุดที่ 3 ช่วงเดือนกรกฎาคมถึงเดือนกันยายน (ฤดูฝน) ต่อจากการทดสอบชุดที่ 1 และชุดที่ 4 ช่วงเดือนตุลาคมถึงเดือนธันวาคม (ฤดูหนาว) ต่อจากการทดสอบชุดที่ 3 เห็นได้ว่าสภาพอากาศและความชื้นในบรรยากาศมีผลต่อปริมาณการเปราะเป็อนของสิ่งสกปรก ซึ่งเมื่อเทียบกับยางซิลิโคนที่ใช้สำหรับระบบส่งจ่ายที่เท่ากันของชุดที่ 1 สูงที่สุด ตามด้วยชุดที่ 3 และชุดที่ 4 ซึ่งเป็นชุดการทดสอบที่มีปริมาณการเปราะเป็อนที่น้อยที่สุด ส่วนการทดสอบในชุดที่ 2 นั้น เนื่องจากการทดสอบในน้ำเปล่า จึงไม่สามารถคำนวณค่า SDD ออกมาได้

จากการวิเคราะห์การสะสมของคราบสกปรกด้วยวิธี salt deposit density การสะสมของคราบสกปรกเกิดจากการสัมผัสกับสิ่งปนเป็อน เช่น น้ำ อากาศ เป็นต้น สิ่งเหล่านี้มีส่วนก่อให้เกิดการสะสมของคราบสกปรกบนพื้นผิวยางซิลิโคน เมื่อมีการสะสมของคราบสกปรกมากขึ้น ก่อให้เกิดอันตรายต่อลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ได้ในที่สุด

#### 6.2.4 การวัดความแข็งด้วยวิธี Shore

ความแข็ง (hardness) คือ คุณสมบัติของวัสดุที่สามารถต้านทานหรือทนต่อการเสีयरูป โดยปกติเกิดจากการทำให้เป็นรอยจากการกด อย่างไรก็ตามความแข็งอาจรวมถึงความต้านทานต่อการตัด การขีด การขีด และการตัดอีกด้วย

การวัดความแข็ง วิธีโดยปกติเพื่อหาค่าความแข็งคือ การวัดจากความลึกหรือพื้นที่ของรอยกดที่เหลือทิ้งไว้จากหัวกดและเวลาที่เจาะจง ซึ่งการทดสอบความแข็งส่วนใหญ่ เป็นการวัดแรงที่กระทำเทียบกับรอยกดที่เกิดขึ้นจากแรงที่กระทำนั้นด้วยกระบวนการเคลื่อนหัวกดลงบนวัสดุ ซึ่งเป็นการทดสอบความแข็งแบบรอยกด โดยการกดพื้นผิววัสดุด้วยวัสดุต่าง ๆ ขนาดและคุณภาพของผลการทดสอบจะใช้เป็นตัวบ่งบอกค่าความแข็งของวัสดุ

การทดสอบความแข็งแบบ shore (shore hardness test) เป็นการวัดความแข็งของวัสดุที่มีความยืดหยุ่น ทดสอบโดยการปล่อยหัวคั้นปลายเพชรกดด้วยน้ำหนักของตัวเองและจาก

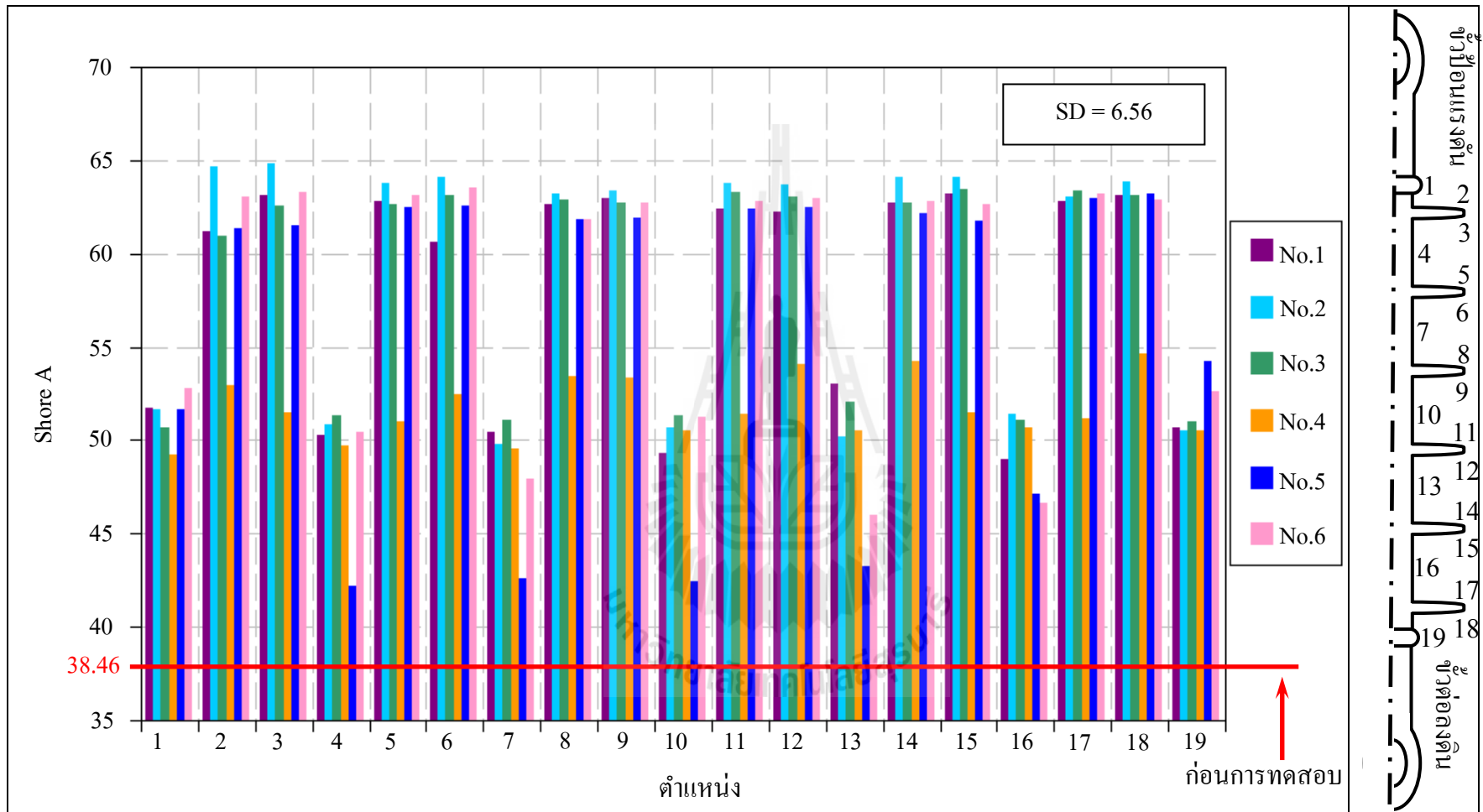
ความสูงที่ทราบค่า ซึ่งค่าความแข็งขึ้นอยู่กับความสูงที่กระดอนกลับของหัวค้อน ความสูงของการกระดอนมากส่งผลให้วัสดุมีความแข็งมาก ความสูงกระดอนน้อย ความแข็งจะน้อย

การทดสอบแบบ shore durometer ใช้หัวกดชุบแข็ง หัวกดจะถูกติดตั้งตรงกลางของฐานกดและมีระยะยึดตัว 2.5 mm จากผิวของฐาน ตำแหน่งและระยะยึดตัวเต็มที่เข็มชี้แสดงค่าศูนย์ เมื่อหัวกดถูกกดจนกระทั่งแนบติดกับผิวหน้าฐานกด ตัวบ่งชี้แสดงค่า 100 ดังนั้น ทุก ๆ จุดของ Shore มีค่าเท่ากับระยะกด 0.0025 mm ลักษณะเครื่องทดสอบความแข็งแบบ Shore แสดงได้ดังรูปที่ 6.18

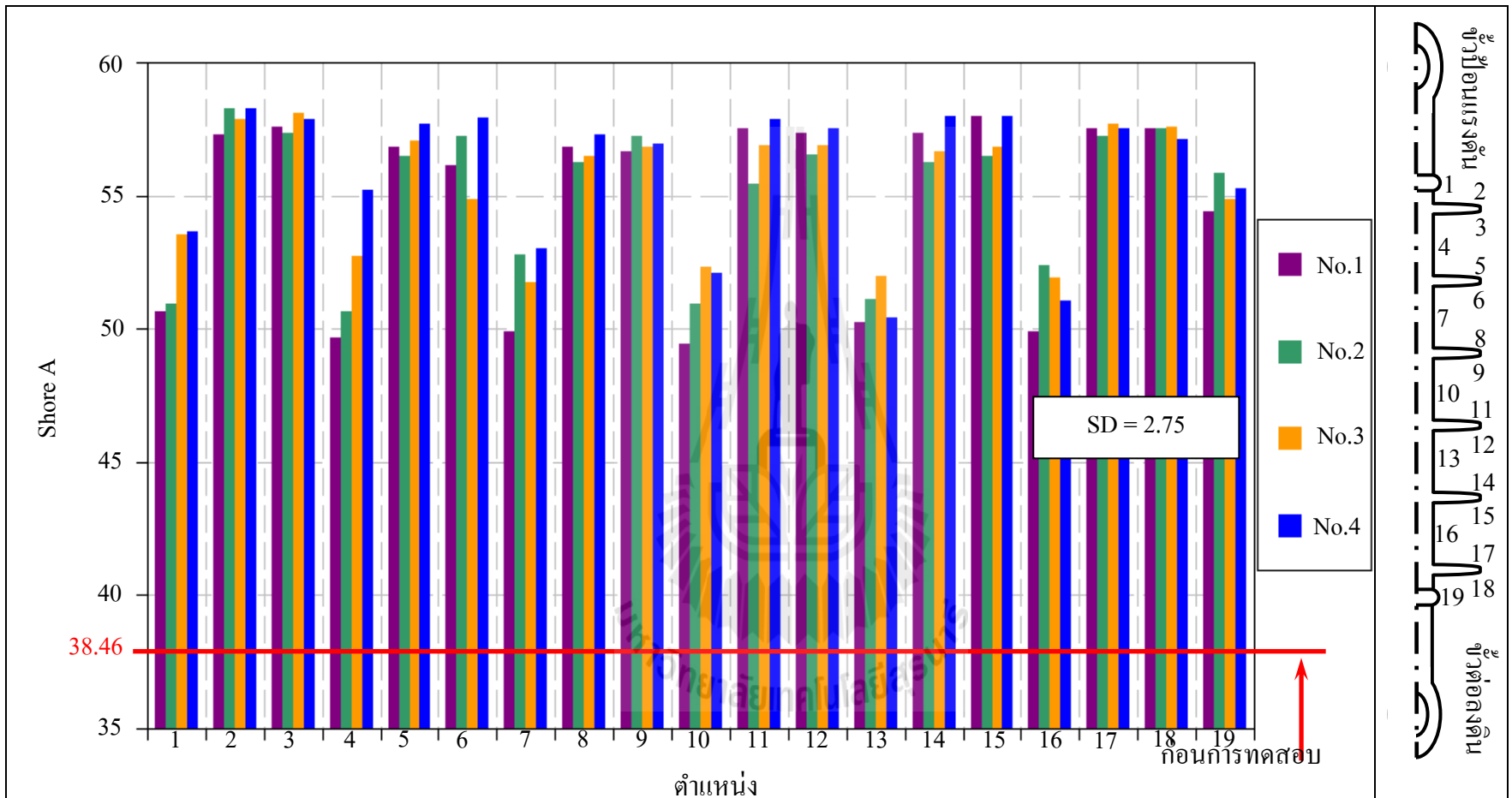


รูปที่ 6.18 เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Shore Durotech Model. 202

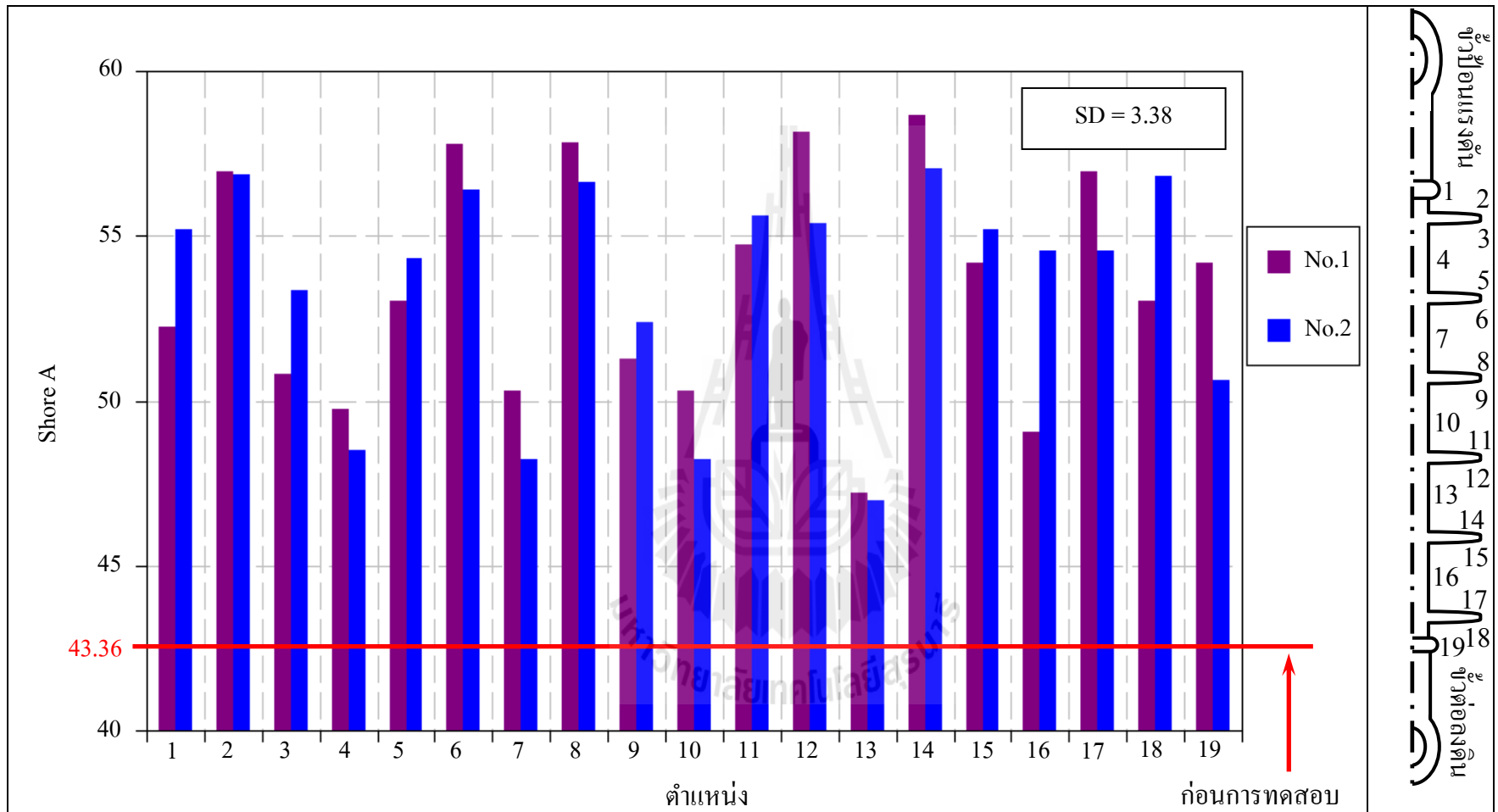
หลังจากที่ยางซิลิโคนได้รับการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุครบ 30,000 cycle ผลจากการเกิดโคโรนาดีสซาร์จและอาร์กแถบแห้งที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ ทำให้เกิดการย่อยสลายทางความร้อนของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน เกิดการเสื่อมอายุของออกซิเจนอิสระและนำไปสู่การแตกตัวของออกซิเจน และปฏิกิริยาออกซิเดชันของเมทิลนำไปสู่การแตกตัวที่เพิ่มขึ้น ทำให้พื้นผิวของยางซิลิโคนเกิดการขาดความยืดหยุ่นบนพื้นผิวได้



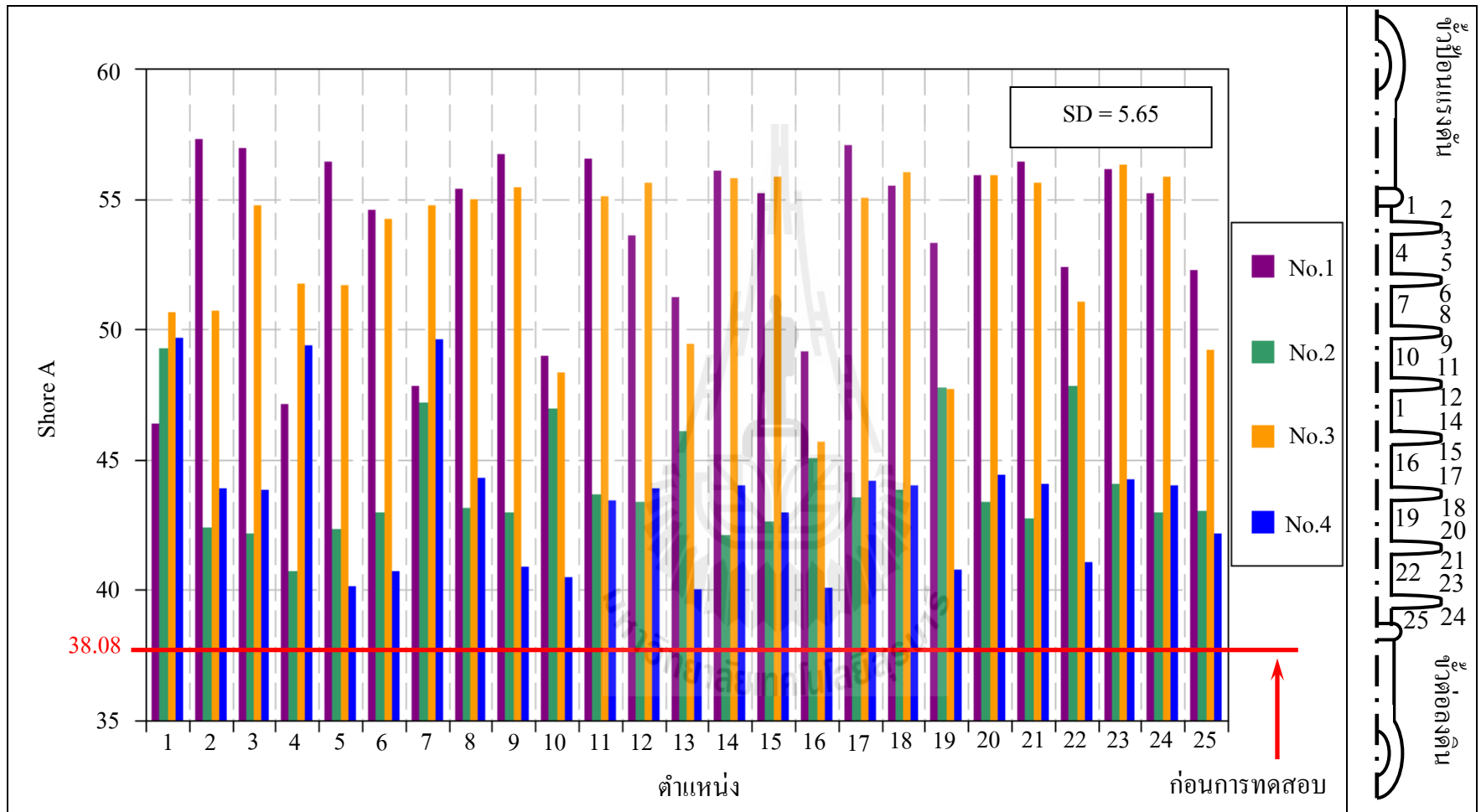
รูปที่ 6.19 ค่าความแข็งเฉลี่ยของผิวยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือ



รูปที่ 6.20 ค่าความแข็งเฉลี่ยของผิวยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1  
จากการทดสอบในน้ำเปล่าหลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือ



รูปที่ 6.21 ค่าความแข็งเฉลี่ยของพียวงซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2 หลังการทดสอบวงล้อจุ่มน้ำเกลือ



รูปที่ 6.22 ค่าความแข็งเฉลี่ยของผิวยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 36 kV หลังการทดสอบวงล้อมจุ่มน้ำเกลือ



จากรูปที่ 6.19 รูปที่ 6.20 รูปที่ 6.21 และรูปที่ 6.22 เป็นการวัดค่าเฉลี่ยความแข็งของพื้นผิวยางซีลิกอนที่ได้จากการทดสอบแรงการเสื่อมอายุโดยใช้ shore durometer วัดค่าความแข็งเฉลี่ยในแต่ละตำแหน่งของยางซีลิกอน

จากรูปที่ 6.19 แสดงให้เห็นถึงค่าความแข็งเฉลี่ยของยางซีลิกอนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 ซึ่งเป็นตารางการเปรียบเทียบความแข็งของยางซีลิกอนระหว่างยางซีลิกอนจากการทดสอบแรงการเสื่อมอายุทั้ง 6 ตัว กับยางซีลิกอนที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน เห็นได้ว่าหลังจากที่ยางซีลิกอนผ่านการทดสอบแรงการเสื่อมอายุ ค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับยางซีลิกอนที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ซึ่งค่าความแข็งของยางซีลิกอนที่ยังไม่ผ่านการทดสอบมีความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 38.46 จากการสังเกตพบว่า บริเวณบนปีกและใต้ปีกของยางซีลิกอนที่ผ่านการทดสอบโดยส่วนใหญ่มีความแข็งมากกว่าบริเวณตัวยางซีลิกอน ความแข็งของบนปีกและใต้ปีกที่วัดได้โดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 51-64 และความแข็งบริเวณตัวยางซีลิกอนที่วัดได้โดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 42-52

จากรูปที่ 6.20 แสดงให้เห็นถึงค่าความแข็งเฉลี่ยของยางซีลิกอนสำหรับลูกถ้วยระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 จากการทดสอบในน้ำเปล่า ซึ่งเป็นตารางการเปรียบเทียบความแข็งของยางซีลิกอนระหว่างยางซีลิกอนจากการทดสอบแรงการเสื่อมอายุทั้ง 4 ตัว กับยางซีลิกอนที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน เห็นได้ว่าหลังจากที่ยางซีลิกอนผ่านการทดสอบแรงการเสื่อมอายุ ค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับยางซีลิกอนที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ซึ่งค่าความแข็งของยางซีลิกอนที่ยังไม่ผ่านการทดสอบมีความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 38.46 จากการสังเกตพบว่า บริเวณบนปีกและใต้ปีกของยางซีลิกอนที่ผ่านการทดสอบโดยส่วนใหญ่มีความแข็งมากกว่าบริเวณตัวยางซีลิกอน ความแข็งของบนปีกและใต้ปีกที่วัดได้โดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 54-59 และความแข็งบริเวณตัวยางซีลิกอนที่วัดได้โดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 49-52

จากรูปที่ 6.21 เป็นการเปรียบเทียบความแข็งเฉลี่ยของยางซีลิกอนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2 เมื่อยางซีลิกอนได้รับการทดสอบแรงการเสื่อมอายุ พบว่าความแข็งของยางซีลิกอนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับความแข็งของยางซีลิกอนที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน นอกจากนี้พบว่า บริเวณบนปีกและใต้ปีกของฉนวนยางซีลิกอนมีความแข็งมากกว่าบริเวณตัวของยางซีลิกอนด้วย ยางซีลิกอนที่ยังไม่ผ่านการใช้งานมีความแข็งเฉลี่ยที่ 43.36 ความแข็งบริเวณบนปีกและใต้ปีกของยางซีลิกอนที่วัดได้โดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 50-58 และความแข็งบริเวณตัวยางซีลิกอนที่วัดได้โดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 46-55

จากรูปที่ 6.22 เป็นการเปรียบเทียบความแข็งเฉลี่ยของยางซีลิกอนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 36 kV เมื่อยางซีลิกอนได้รับการทดสอบแรงการเสื่อมอายุ พบว่าความแข็งของยางซีลิกอนหลังจากการทดสอบมีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับยางซีลิกอนที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน

นอกจากนี้พบว่าบริเวณบนปีกและใต้ปีกของยางซิลิโคนมีความแข็งมากกว่าบริเวณด้วยยางซิลิโคน ด้วยความแข็งของยางซิลิโคนที่ยังไม่ผ่านการใช้งานมีความแข็งเฉลี่ยที่ 38.08 ความแข็งบริเวณบนปีกและใต้ปีกของยางซิลิโคนที่วัดได้โดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 40-57 และความแข็งบริเวณด้วยยางซิลิโคนที่วัดได้โดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 39-53 ซึ่งความแข็งที่วัดได้จากตารางที่ 6.10 มีความสอดคล้องกับความแข็งจากตารางที่ 6.7 ตารางที่ 6.8 และตารางที่ 6.9

จากการวิเคราะห์ด้วยการวัดความแข็งของยางซิลิโคน ความแข็งที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากสภาวะเสียดสีคุณสมบัติหยดน้ำลื่นบนพื้นผิวยางซิลิโคน โดยการเกิดดีสชาร์จทางไฟฟ้า ซึ่งความร้อนจากการเกิดดีสชาร์จทางไฟฟ้าเป็นสาเหตุสำคัญต่อการแตกตัวของออกซิเจน รวมไปถึงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเมทิล ทำให้เกิดการแตกตัวที่เพิ่มขึ้น และนำไปสู่โครงสร้างเชื่อมขวาง และส่งผลต่อความยืดหยุ่นของพื้นผิวยางซิลิโคน

#### 6.2.5 การวัดความขรุขระ

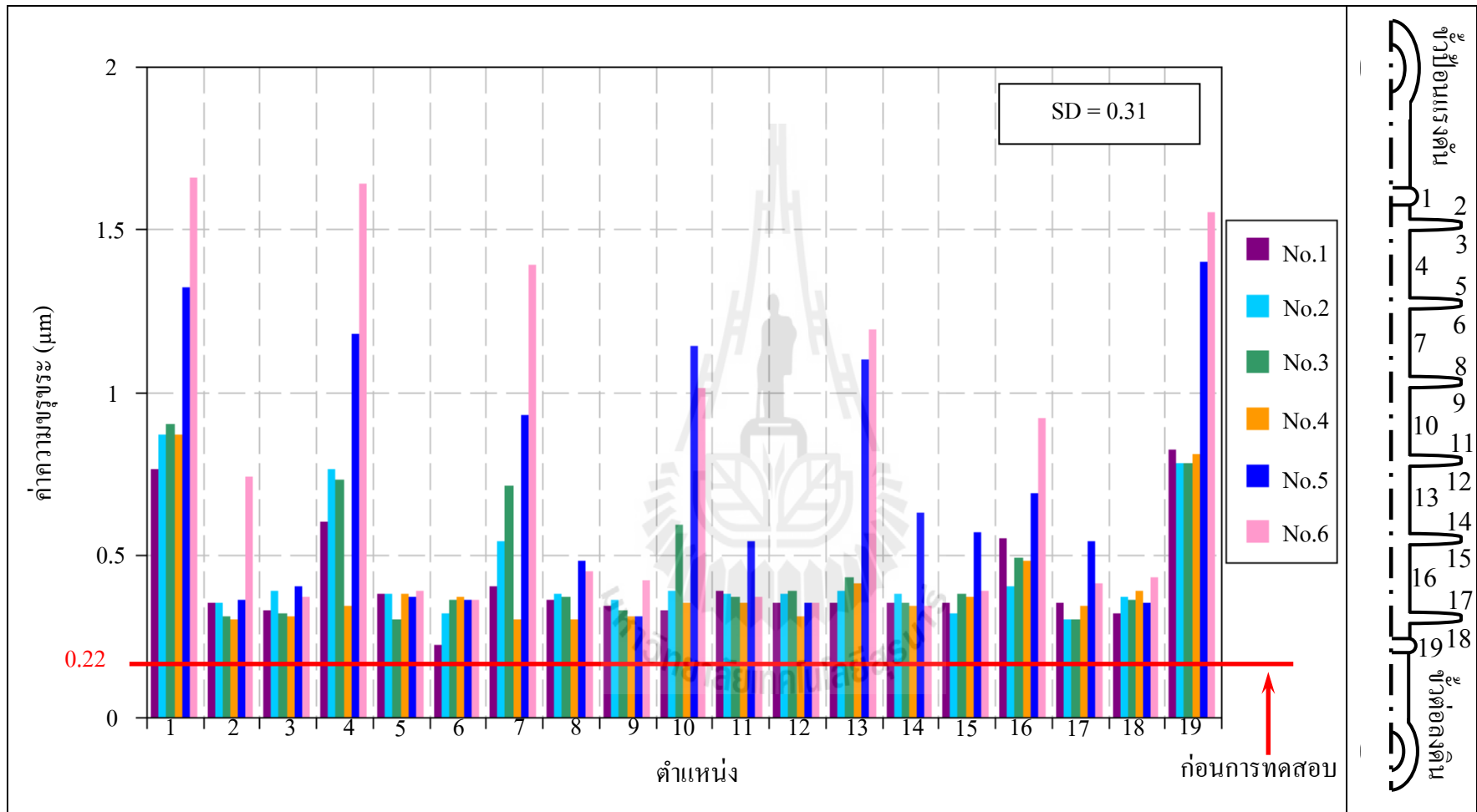
ความขรุขระ (surface roughness) เป็นคุณสมบัติของชิ้นงานที่ไม่ขึ้นกับชนิดของวัสดุ ในการพิจารณาพื้นผิววัสดุจะดูจากปริมาณความกว้าง กับปริมาณความสูงเทียบกับระนาบอ้างอิง ผิวของชิ้นงานถูกกำหนดด้วยความเบี่ยงเบนด้านบนของพื้นผิวเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่สมบูรณ์ ถ้าค่าความเบี่ยงเบนนี้มีมาก แสดงว่าผิวชิ้นงานจะมีความขรุขระ ถ้ามีความเบี่ยงเบนน้อย แสดงว่าชิ้นงานมีความเรียบ วัสดุที่มีความขรุขระแสดงว่าความถี่สูง มีความยาวคลื่นสั้น วัสดุที่มีความขรุขระต่างกันจะมีปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อมต่างกัน วัสดุที่มีพื้นผิวหยาบมักจะรับแรงเสียดทานมากและสึกหรอเร็ว มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงกว่าพื้นผิวเรียบ ความขรุขระมักส่งผลต่อสมบัติเชิงกล โดยที่ความไม่เรียบนั้นอาจจะทำให้เกิดการก่อตัวของการแตก หรือการกัดกร่อน

วิธีการวัดความขรุขระมีหลายวิธีด้วยกัน เช่น การตรวจสอบความขรุขระของวัสดุ โดยคู่ด้วยตาเปล่า หรือใช้นิ้วสัมผัสเปรียบเทียบกับความขรุขระมาตรฐาน ซึ่งการตรวจสอบด้วยวิธีเหล่านี้มีความผิดพลาดสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากผู้ตรวจสอบ สำหรับการวัดที่ต้องการความถูกต้องที่สูงขึ้นสามารถใช้เครื่องมือทดสอบความหยาบ (roughness tester) ซึ่งประกอบด้วย หัววัดที่ต่อกับตัวแปลงสัญญาณลากไปบนผิวของชิ้นงาน ซึ่งสัญญาณเชิงกลจะถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า และถูกคำนวณเป็นค่าความขรุขระออกมา เครื่องมือทดสอบความขรุขระที่ใช้แสดงได้ใน รูปที่ 6.23

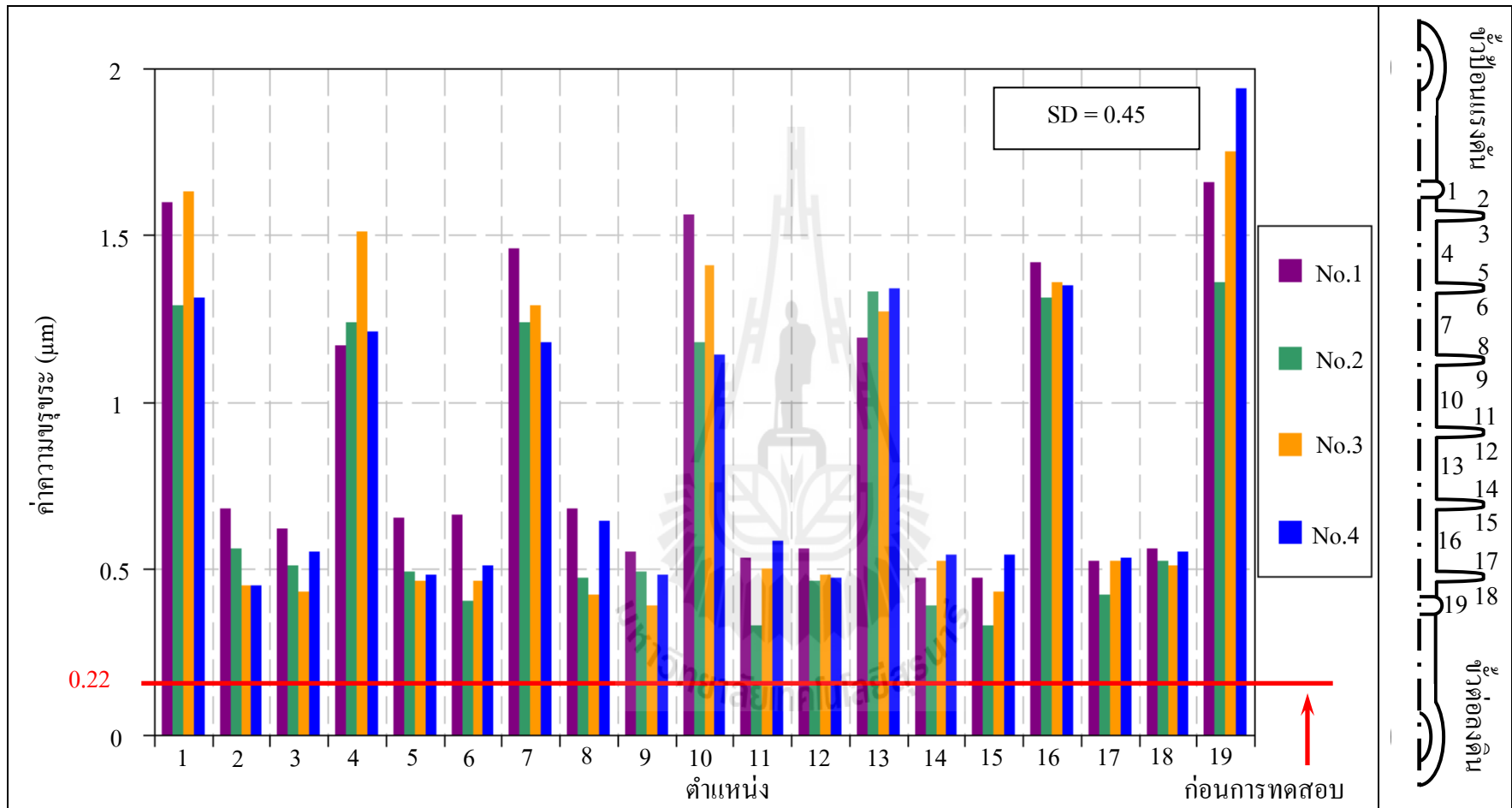


รูปที่ 6.23 เครื่องมือทดสอบวัดความขรุขระ Mitutoyo SV-400

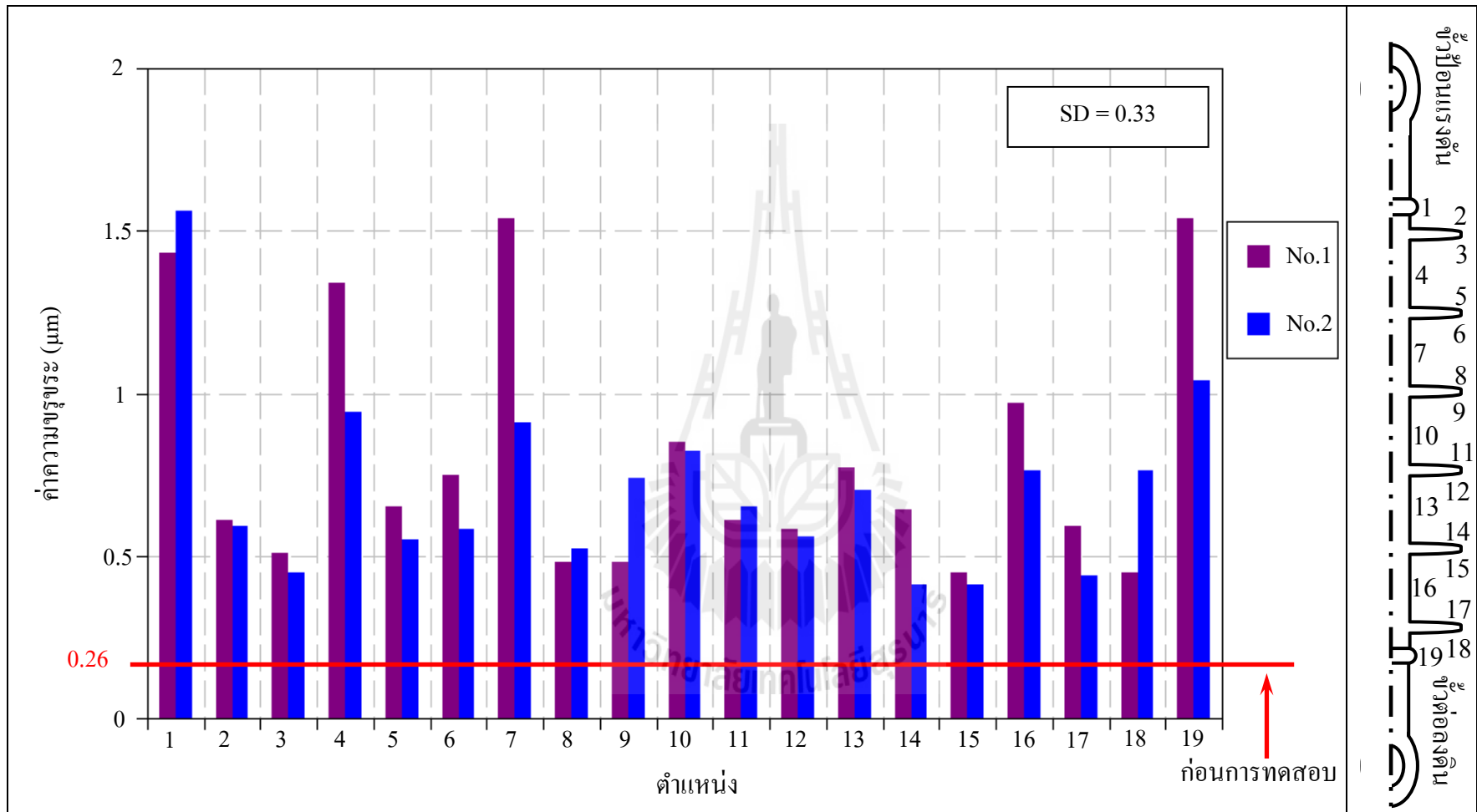
ยางซิลิโคนได้รับการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุครบ 30,000 cycle เมื่อได้รับความเครียดทางไฟฟ้า และการเกิดดีสชาร์จบนพื้นผิวเป็นเวลานาน พื้นผิวของยางซิลิโคนเริ่มมีการเสื่อมสภาพ ส่งผลต่อคุณสมบัติความเป็นฉนวนลดลง ซึ่งทำให้ผิวของยางซิลิโคนเกิดการสึกกร่อนขึ้น ร่องรอยต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นทำให้พื้นผิวของยางซิลิโคนเกิดความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิว ทำให้เกิดความขรุขระขึ้น โดยที่ความขรุขระเฉลี่ยของยางซิลิโคนแสดงได้ในรูปที่ 6.24 รูปที่ 6.25 รูปที่ 6.26 และรูปที่ 6.27



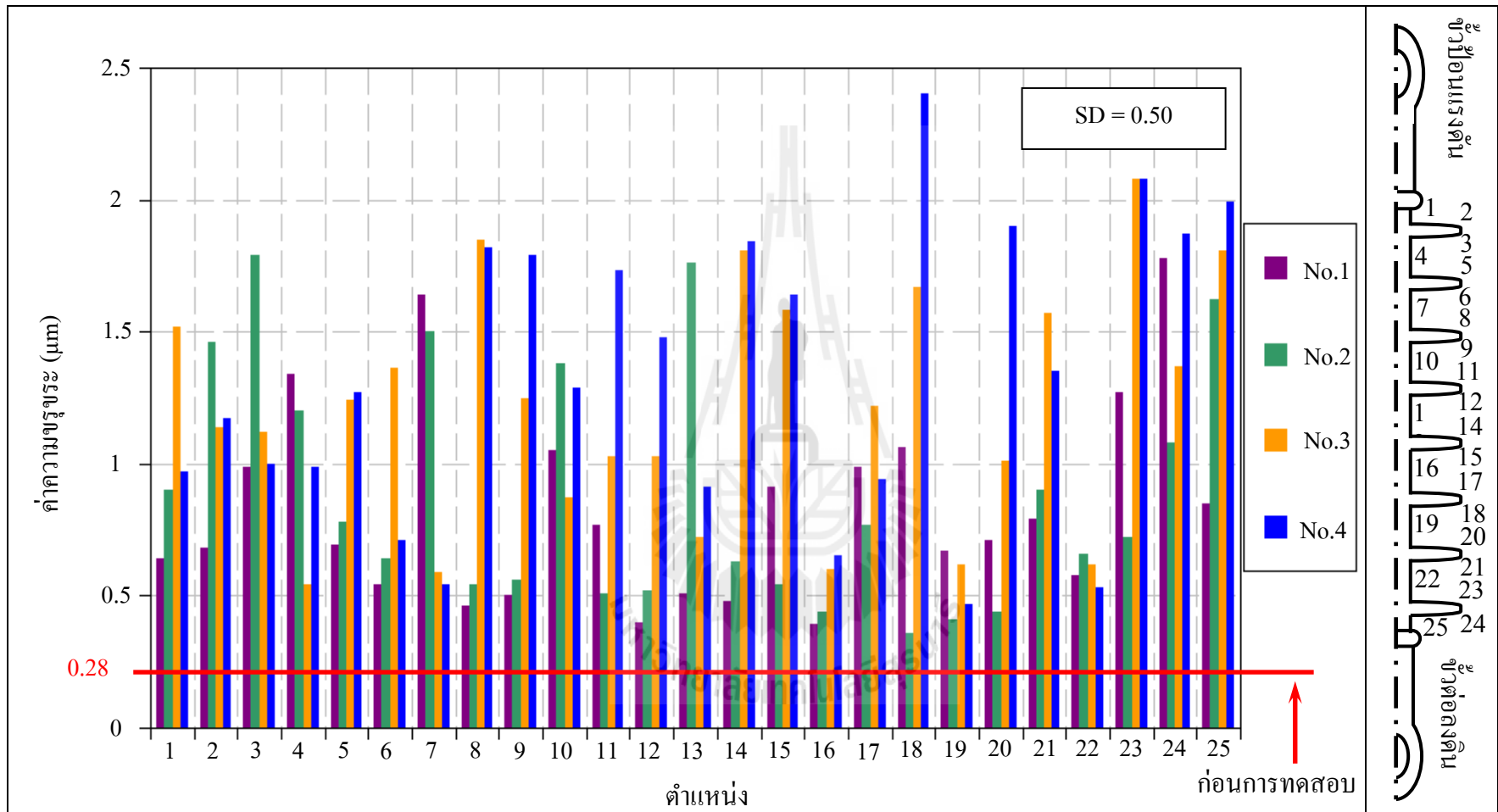
รูปที่ 6.24 ความขรุขระเฉลี่ยของผิวขางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 หลังการทดสอบวงล้อจุ่มน้ำเกลือ



รูปที่ 6.25 ความขรุขระเฉลี่ยของผิวยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1  
จากการทดสอบในน้ำเปล่า หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือ



รูปที่ 6.26 ความขรุขระเฉลี่ยของผิวขางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2 หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือ



รูปที่ 6.27 ความขรุขระเฉลี่ยของผิวยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 36 kV หลังการทดสอบวงล้อจุ่มน้ำเกลือ

จากรูปที่ 6.24 เมื่อยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 ถูกทดสอบเร่งการเสื่อมอายุครบ 30,000 cycle พบว่า เกิดความขรุขระของยางซิลิโคนมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับยางซิลิโคนที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ค่าความขรุขระของยางซิลิโคนที่ยังไม่ผ่านการใช้งานวัดความขรุขระได้ 0.22  $\mu\text{m}$  ซึ่งมีความขรุขระน้อยกว่ายางซิลิโคนที่ผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ

นอกจากนี้พบว่า ยางซิลิโคนบริเวณตัวฉนวนมีความขรุขระมากกว่ายางซิลิโคนบริเวณบนปีกและใต้ปีกของยางซิลิโคน ซึ่งบริเวณตัวยางซิลิโคน วัดความขรุขระได้โดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0.6-1.6  $\mu\text{m}$  บริเวณปีกและใต้ปีกของยางซิลิโคนวัดความขรุขระได้โดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0.3-0.7  $\mu\text{m}$

จากรูปที่ 6.25 เมื่อยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 ซึ่งเป็นชนิดเดียวกันกับยางซิลิโคนที่ถูกทดสอบในตารางที่ 6.11 จากการทดสอบในน้ำเปล่าพบว่า บริเวณตัวฉนวนมีความขรุขระมากกว่ายางซิลิโคนบริเวณปีกบนและใต้ปีกของยางซิลิโคน ซึ่งบริเวณตัวยางซิลิโคนวัดความขรุขระได้โดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 1.2-1.6  $\mu\text{m}$  บริเวณปีกและใต้ปีกของยางซิลิโคนวัดความขรุขระได้โดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0.4-0.6  $\mu\text{m}$

จากรูปที่ 6.26 เมื่อยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2 ถูกทดสอบเร่งการเสื่อมอายุครบ 30,000 cycle พบว่าความขรุขระของยางซิลิโคนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับยางซิลิโคนที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ซึ่งยางซิลิโคนที่ยังไม่ผ่านการใช้งานวัดค่าความขรุขระได้ 0.26  $\mu\text{m}$  นอกจากนี้พบว่า บริเวณตัวยางซิลิโคนโดยส่วนใหญ่มีความขรุขระมากกว่าบริเวณบนปีกและใต้ปีกของยางซิลิโคน มีเพียงบางตำแหน่งของปีกของซิลิโคนที่มีค่าความขรุขระมากกว่าบริเวณตัวยางซิลิโคนคือ บริเวณที่เกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากภาวะไฟที่ส่งผลให้ความขรุขระบริเวณนั้นหยาบเป็นพิเศษ ซึ่งความขรุขระของตัวยางซิลิโคนที่วัดได้โดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0.7-1.5  $\mu\text{m}$  บริเวณบนปีกและใต้ปีกของยางซิลิโคนวัดค่าความขรุขระได้โดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0.4-0.7  $\mu\text{m}$

จากรูปที่ 6.27 เมื่อยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 36 kV ถูกทดสอบเร่งการเสื่อมอายุครบ 30,000 cycle พบว่าความขรุขระมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับยางซิลิโคนที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ซึ่งยางซิลิโคนที่ยังไม่ผ่านการใช้งานนี้วัดความขรุขระได้ 0.28  $\mu\text{m}$  นอกจากนี้พบว่า บริเวณส่วนใหญ่ของตัวยางซิลิโคนโดยส่วนใหญ่มีความขรุขระมากกว่าบริเวณบนปีกและใต้ปีกของยางซิลิโคน โดยมีเพียงบางตำแหน่งเท่านั้นที่มีค่าความขรุขระมากกว่าบริเวณตัวยางซิลิโคน คือ บริเวณที่มีการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากภาวะไฟ ซึ่งผลให้บริเวณนั้นเกิดความขรุขระมากเป็นพิเศษ ความขรุขระของบริเวณตัวยางซิลิโคนที่วัดได้ อยู่ในช่วง 0.7-1.5  $\mu\text{m}$  ค่าความขรุขระบริเวณบนปีกและใต้ปีกของยางซิลิโคนที่วัดได้ อยู่ในช่วง 0.4-0.4  $\mu\text{m}$



จากการวิเคราะห์ด้วยการวัดความขรุขระของพื้นผิวของซิลิโคน ความขรุขระของซิลิโคน เป็นผลพวงจากการเกิดการสูญเสียคุณสมบัติหยดน้ำเนื่องจากการดัดสารจทางไฟฟ้าซึ่งมีโคโรนาดีสารจเป็นปัจจัยสำคัญต่อการกัดกร่อนพื้นผิวของซิลิโคน โดยเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนพื้นผิวของซิลิโคนที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมขวางของ Si – O ทำให้พื้นผิวของซิลิโคนมีความขรุขระ

### 6.3 การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของยางซิลิโคน

การเปรียบเทียบโครงสร้างทางเคมีของยางซิลิโคน ที่เสื่อมอายุโดยการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ จะใช้เครื่องมือวิเคราะห์แบบฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (fourier transforms infrared spectroscopy: FTIR) แสดงในรูปที่ 6.28 การหลักทำงานและวิธีการใช้งานของเครื่อง FTIR อธิบายดังนี้



รูปที่ 6.28 เครื่องวิเคราะห์ spectrometer

#### 6.3.1 เครื่องมือวิเคราะห์แบบฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

ฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปีหรือ FTIR เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาโครงสร้างและพันธะทั้งสารประกอบอินทรีย์ และสารประกอบอนินทรีย์วิธีนี้ใช้ศึกษาตัวอย่างได้ทั้งของแข็ง ของเหลว และแก๊สโดยการวิเคราะห์โครงสร้างสารจะอาศัยการดูดกลืนที่แตกต่างกันของแต่ละโมเลกุล ซึ่ง โมเลกุลแต่ละชนิดจะมีการดูดกลืนช่วงคลื่นอินฟราเรดที่แตกต่างกัน ช่วงคลื่นอินฟราเรดที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของยางซิลิโคนแสดงในตารางที่ 6.3 การวิเคราะห์ทางเคมี

ด้วยวิธี FTIR เป็นที่นิยมเพราะเหมาะกับชิ้นงานที่ต้องการการแยกสูง สามารถวิเคราะห์ปริมาณน้อย ๆ ได้ มีการสแกนตัวอย่างที่รวดเร็ว และยังสามารถศึกษาสเปกตรัมแบบสะท้อนได้

รังสีอินฟราเรดที่ใช้ในการวิเคราะห์ถูกแบ่งออกเป็น 3 ช่วงคือ การใช้แสงอินฟราเรดระดับสูง ซึ่งเป็นการใช้ช่วงคลื่นที่  $14,000-4,000\text{ cm}^{-1}$  เพื่อใช้หาการเปลี่ยนแปลงของ Harmonic และ Overtone การใช้แสงอินฟราเรดระดับกลาง จะใช้ช่วงคลื่นที่  $4,000-400\text{ cm}^{-1}$  เพื่อใช้หาโครงสร้างของวัสดุต่าง ๆ และการใช้แสงอินฟราเรดระดับต่ำ จะใช้ช่วงคลื่นที่  $400-10\text{ cm}^{-1}$  เพื่อใช้หาขอบเขตและพื้นที่ของคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของยางซิลิโคนที่ใช้ในการทดสอบเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ช่วงกลางอินฟราเรด ที่มีช่วงของเลขคลื่นตั้งแต่  $4000$  ถึง  $200\text{ cm}^{-1}$  โดยเทคนิคสเปกตรัมแบบสะท้อนช่วงกลางอินฟราเรดเป็นเทคนิคที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์พื้นผิวของยางซิลิโคน เป็นการสะท้อนรังสีชนผิวตัวอย่างทำมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ถ้าผิวตัวอย่างมีการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดความเข้มการสะท้อนจะน้อยลง บริเวณความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนรังสีมากจะเกิดการสะท้อนน้อย วิธีการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับด้านวัสดุศาสตร์ เช่น พอลิเมอร์ช่วยในการจำแนกชนิดของพอลิเมอร์ และในด้านอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เนื่องจากเทคนิคนี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างไม่แพงและรวมไปถึงชนิดของตัวอย่าง สามารถวิเคราะห์วัสดุได้เกือบทุกชนิด

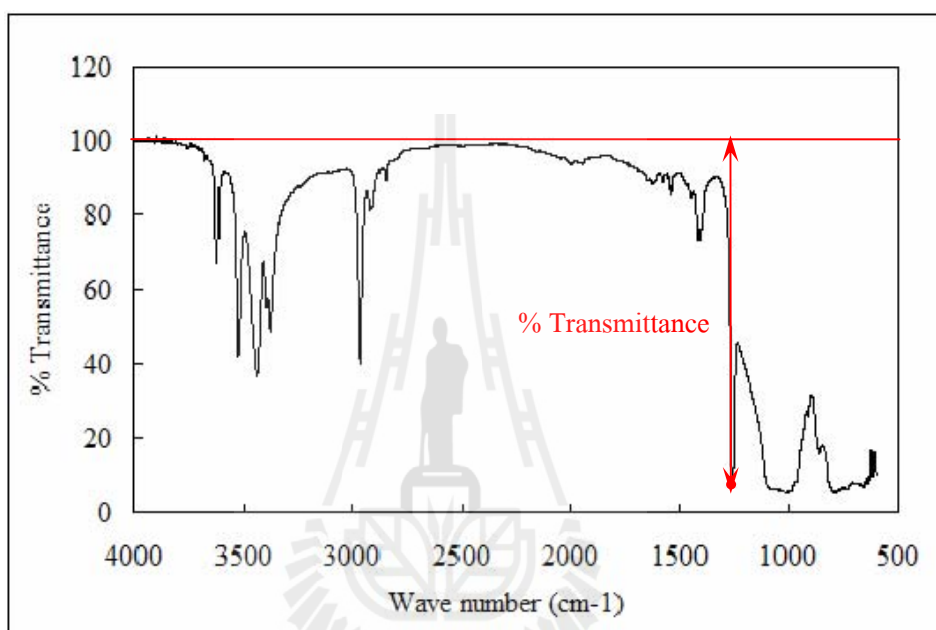
ตารางที่ 6.3 ช่วงคลื่นอินฟราเรดของยางซิลิโคน

| หมู่ธาตุ           | ช่วงคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ ) | รายละเอียด   |
|--------------------|--------------------------------|--|
| OH                 | 3,600-3,200                    | เป็นการสั่น โมเลกุลแบบสมมาตร เป็นพันธะไฮโดรเจนที่อยู่ในสารเติมแต่ง ATH |
| C-H in Methyl      | 3,300-2,850                    | เป็นการสั่น โมเลกุลแบบสมมาตร แสดงปริมาณโมเลกุลของสารอินทรีย์           |
| Si-CH <sub>3</sub> | 1,270-1,255                    | ความผิดปกติของสายโซ่ข้าง   |
| Si-O-Si            | 1,110-1,000                    | ปริมาณของสายโซ่หลัก  |

### 6.3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของยางซิลิโคนจากการเร่งการเสื่อมอายุ

การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของยางซิลิโคนสามารถวิเคราะห์ได้จาก %Transmittance โดยใช้เลขคลื่นในช่วง  $4,000-600\text{ cm}^{-1}$  ในการวิเคราะห์โครงสร้าง ซึ่งในงานวิจัย

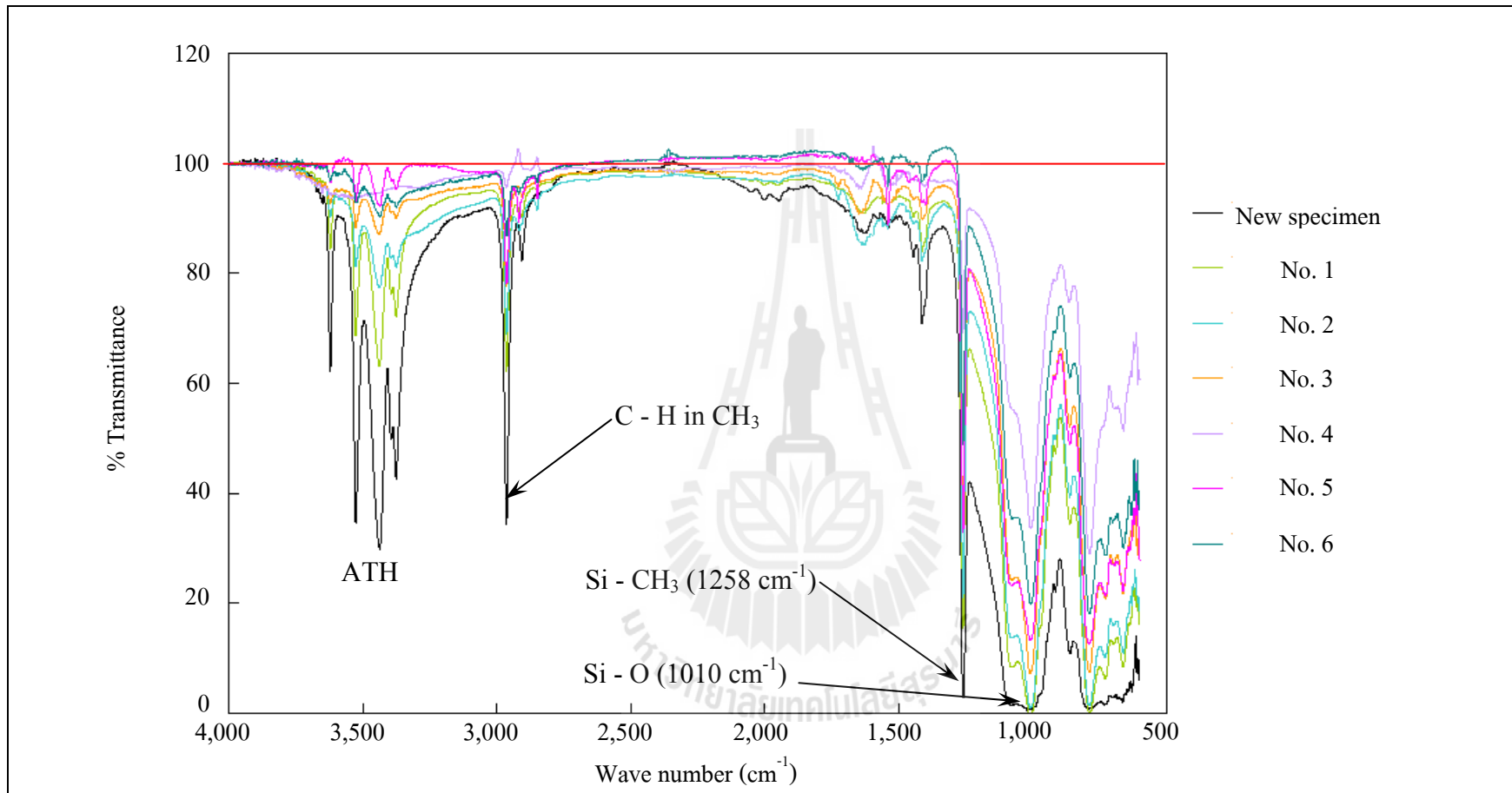
นี้ทำการวิเคราะห์หมู่ Si - CH<sub>3</sub> ที่เลขคลื่น 1,258 cm<sup>-1</sup> และหมู่ Si - O ที่เลขคลื่น 1,010 cm<sup>-1</sup> โดยที่ การวิเคราะห์ในแต่ละเลขคลื่นทำได้โดยการวัดความต่างของ %Transmittance ของเลขคลื่นที่ต้องการทราบ เทียบกับ %Transmittance ที่เลขคลื่น 4,000 cm<sup>-1</sup> ซึ่งเป็นเลขคลื่นที่สูงที่สุดของคลื่น ในช่วงกลางอินฟราเรด วิธีการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีจาก %Transmittance แสดงได้ในรูป ที่ 6.29



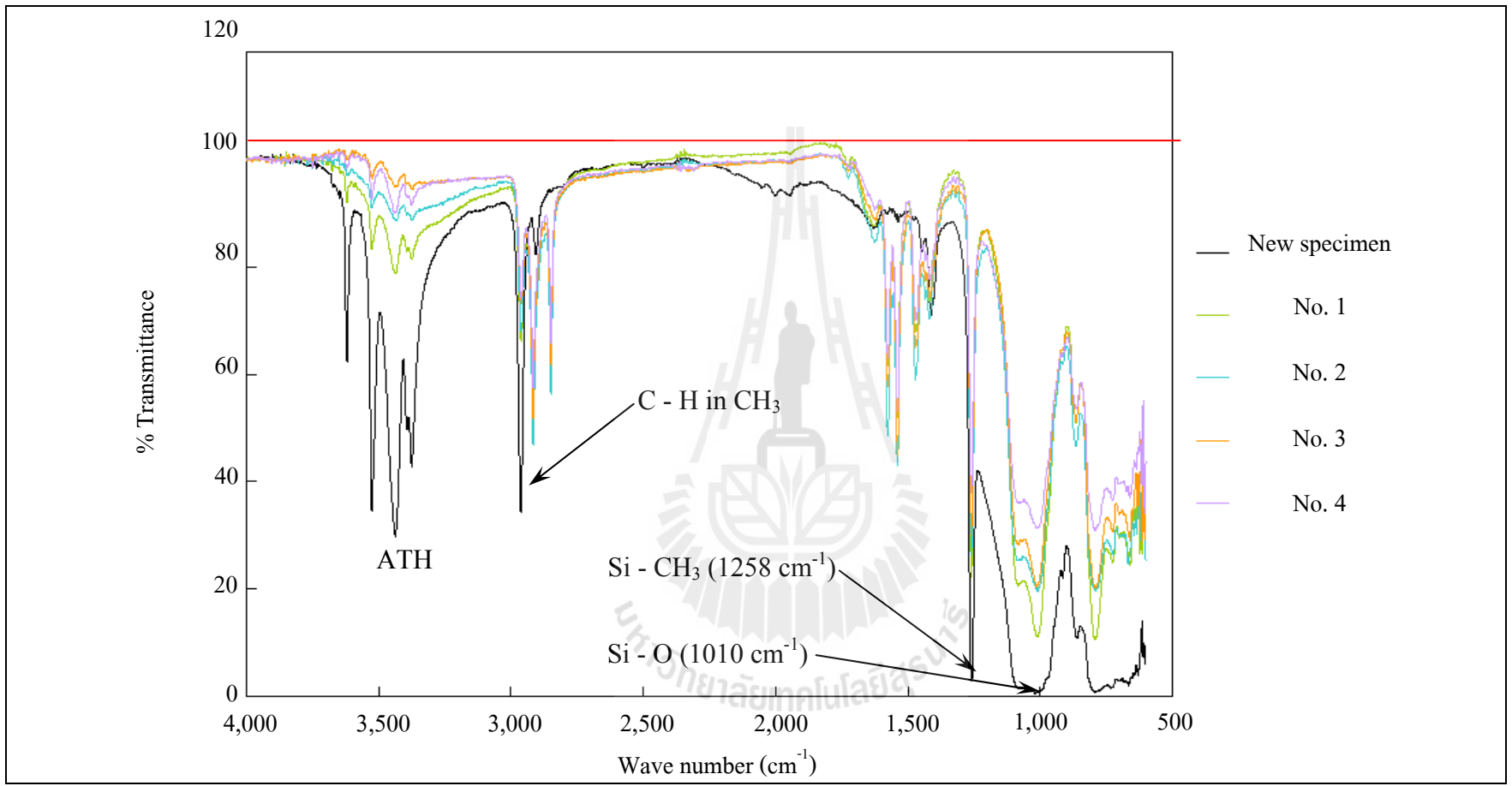
รูปที่ 6.29 วิธีการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีจาก %Transmittance

จากรูปที่ 6.29 เป็นวิธีการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีโดยหาจากผลต่างของค่า %Transmittance ณ เลขคลื่นที่ต้องการทราบ เทียบกับ %Transmittance ที่เลขคลื่น 4,000 cm<sup>-1</sup> ซึ่งเป็นเลขคลื่นที่สูงที่สุดของช่วงกลางอินฟราเรด โดยในงานวิจัยนี้ วิเคราะห์หมู่ Si - CH<sub>3</sub> ที่เลขคลื่น 1,258 cm<sup>-1</sup> และ Si - O ที่เลขคลื่น 1,010 cm<sup>-1</sup>

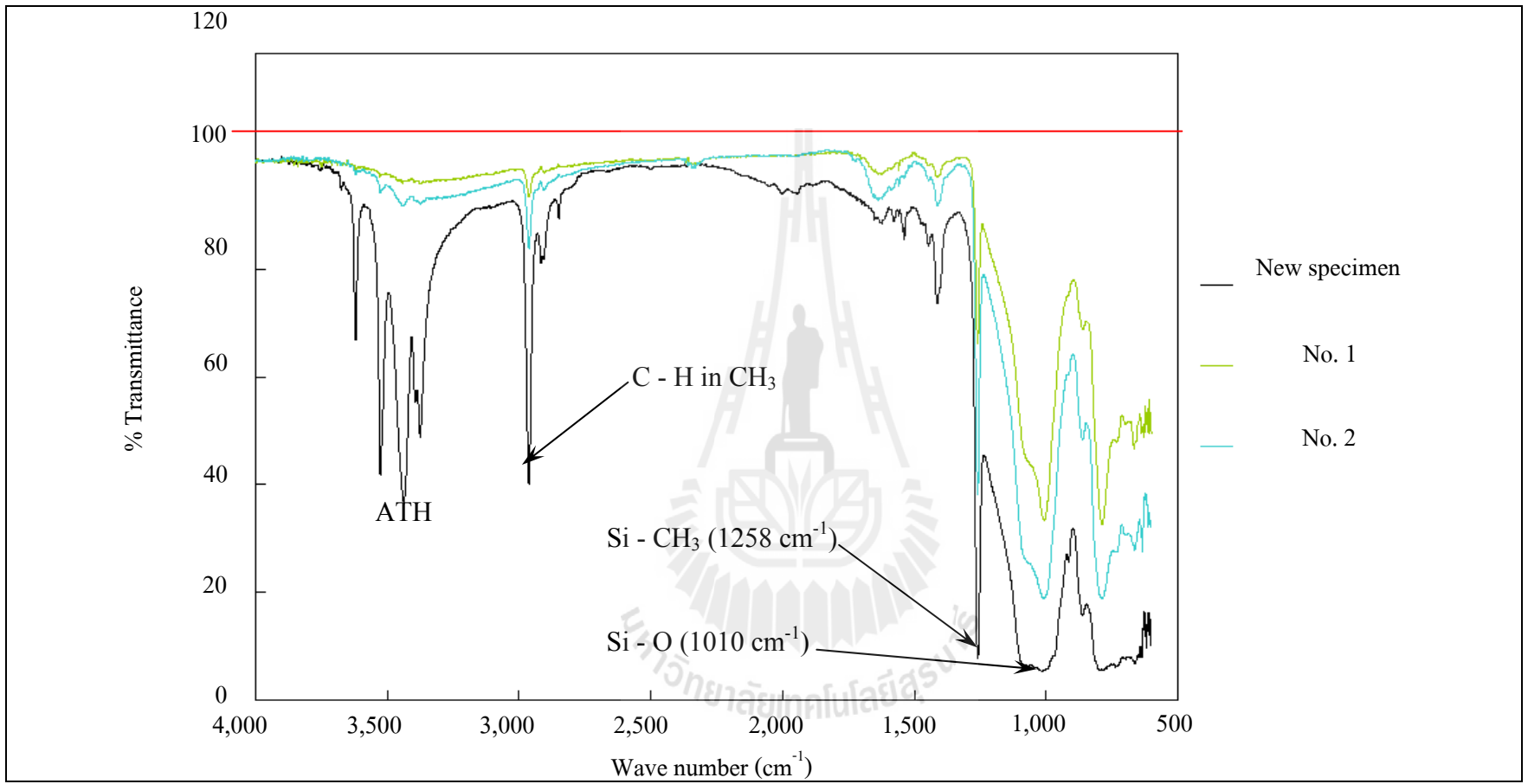
การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของยางซิลิโคนจากการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2 และระบบ 36 kV ด้วย เครื่อง FTIR แสดงได้ในรูปที่ 6.30 รูปที่ 6.31 รูปที่ 6.32 และรูปที่ 6.33 ตามลำดับ



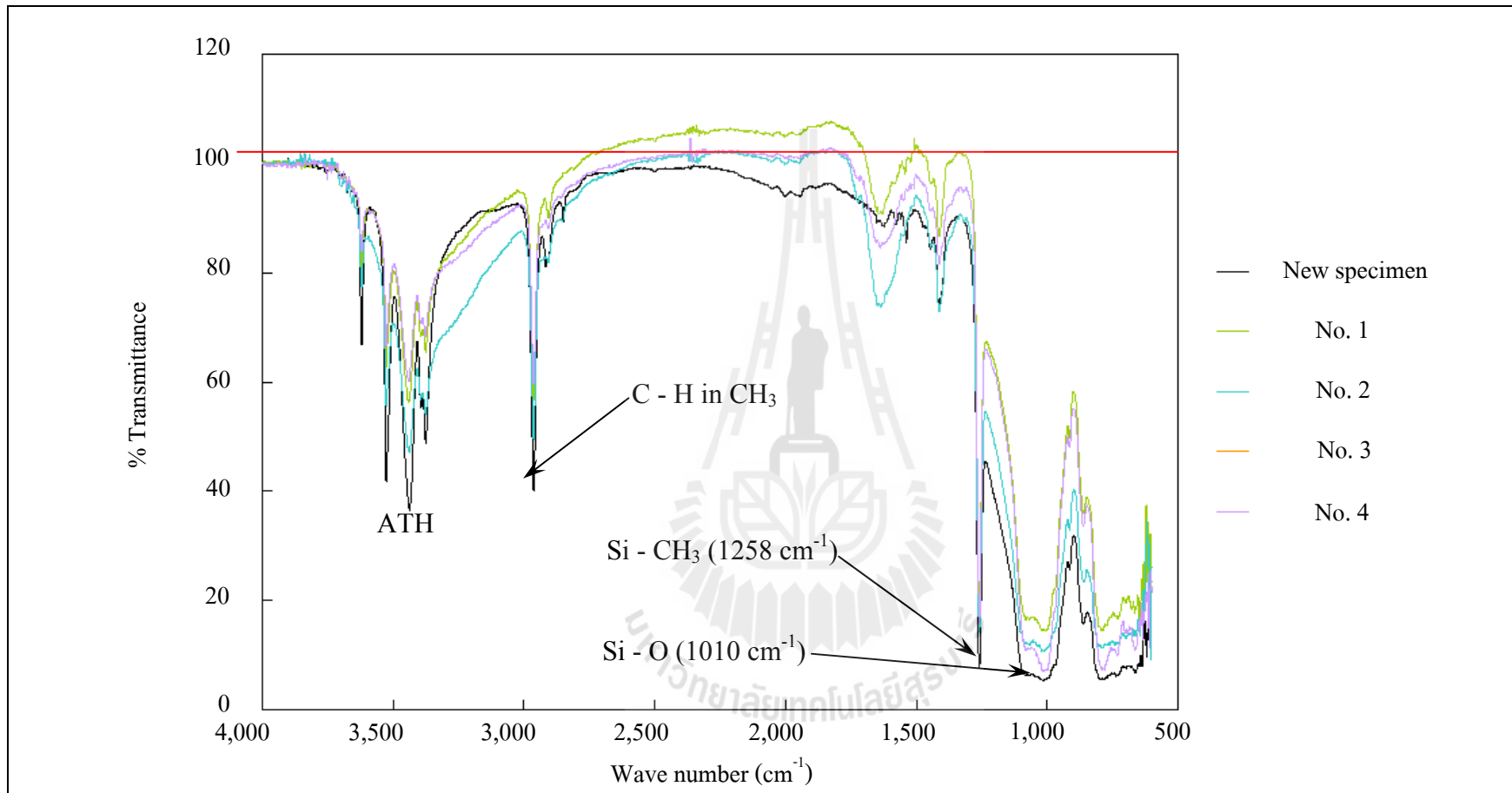
รูปที่ 6.30 การเปลี่ยนแปลงของพันธะเคมีในโครงสร้างยางซิลิโคนของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์สำหรับระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือ



รูปที่ 6.31 การเปลี่ยนแปลงของพันธะเคมีในโครงสร้างยางซิลิโคนของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์สำหรับระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 หลังการทดสอบวงล่อจุ่มน้ำเกลือ จากการทดสอบในน้ำเปล่า



รูปที่ 6.32 การเปลี่ยนแปลงของพันธะเคมีในโครงสร้างยางซิลิโคนของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์สำหรับระบบ 24 kV ชนิดที่ 2 หลังการทดสอบวงดื้อจุ่มน้ำเกลือ



รูปที่ 6.33 การเปลี่ยนแปลงของพันธะเคมีในโครงสร้างยางซิลิโคนของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์สำหรับระบบ 36 kV หลังการทดสอบวงล้อจุ่มน้ำเกลือ

จากรูป การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของยางซิลิโคนที่ผ่านการเร่งการเสื่อมอายุ จากการตรวจสอบด้วยเครื่อง FTIR เห็นได้ว่า ปริมาณของหมู่ข้างเคียงและสายโซ่หลักมีปริมาณลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับยางซิลิโคนที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ซึ่งเป็นผลมาจากการดีสซาร์จทางไฟฟ้า ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของยางซิลิโคน นอกจากนี้พบว่า สารเติมแต่ง ATH เพิ่มขึ้นคุณสมบัติของยางซิลิโคนมีปริมาณลดลง และเมทิลที่เป็นส่วนประกอบมูลฐานของพอลิไดเมทิลไซโลเซนมีปริมาณที่ลดลงด้วยเช่นกัน การลดลงของ  $\text{Si-CH}_3$  ในยางซิลิโคนแสดงได้ในรูปที่ 6.34 รูปที่ 6.35 รูปที่ 6.36 และรูปที่ 6.37 การลดลงของ  $\text{Si-O}$  ในยางซิลิโคนแสดงได้ในรูปที่ 6.38 รูปที่ 6.39 รูปที่ 6.40 และรูปที่ 6.41 ตามลำดับ

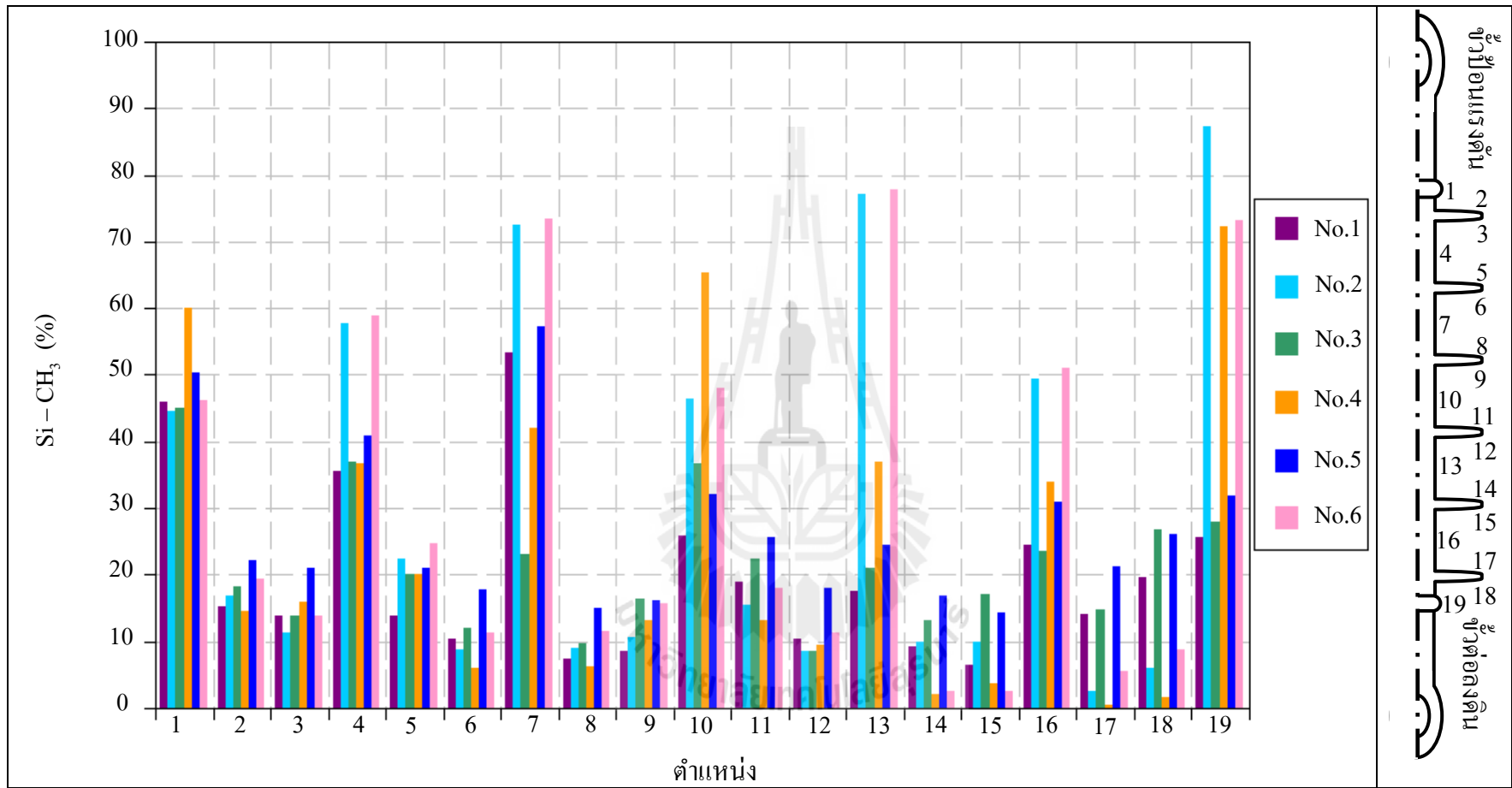
จากรูปที่ 6.34 รูปที่ 6.35 รูปที่ 6.36 และรูปที่ 6.37 สังเกตได้ว่าการลดลงของหมู่ข้างเคียงโดยเฉพาะอย่างยิ่ง บริเวณตัวฉนวนยางซิลิโคนมีเปอร์เซ็นต์การลดลงที่สูงกว่าบริเวณบนปีกและใต้ปีกของยางซิลิโคน ซึ่งจากทั้ง 3 ตารางข้างต้น มีลักษณะการลดลงของหมู่ข้างเคียงในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน

จากรูปที่ 6.38 รูปที่ 6.39 รูปที่ 6.40 และรูปที่ 6.41 พบว่าเกิดการลดลงของ  $\text{Si-O}$  ในยางซิลิโคนอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน มีเพียงบางตำแหน่งที่มีการลดลงของ  $\text{Si-O}$  ที่สูงซึ่งเป็นบริเวณที่มีการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟที่รุนแรง จากทั้ง 3 ตารางข้างต้น เห็นได้ชัดว่าการลดลงของ  $\text{Si-O}$  มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน

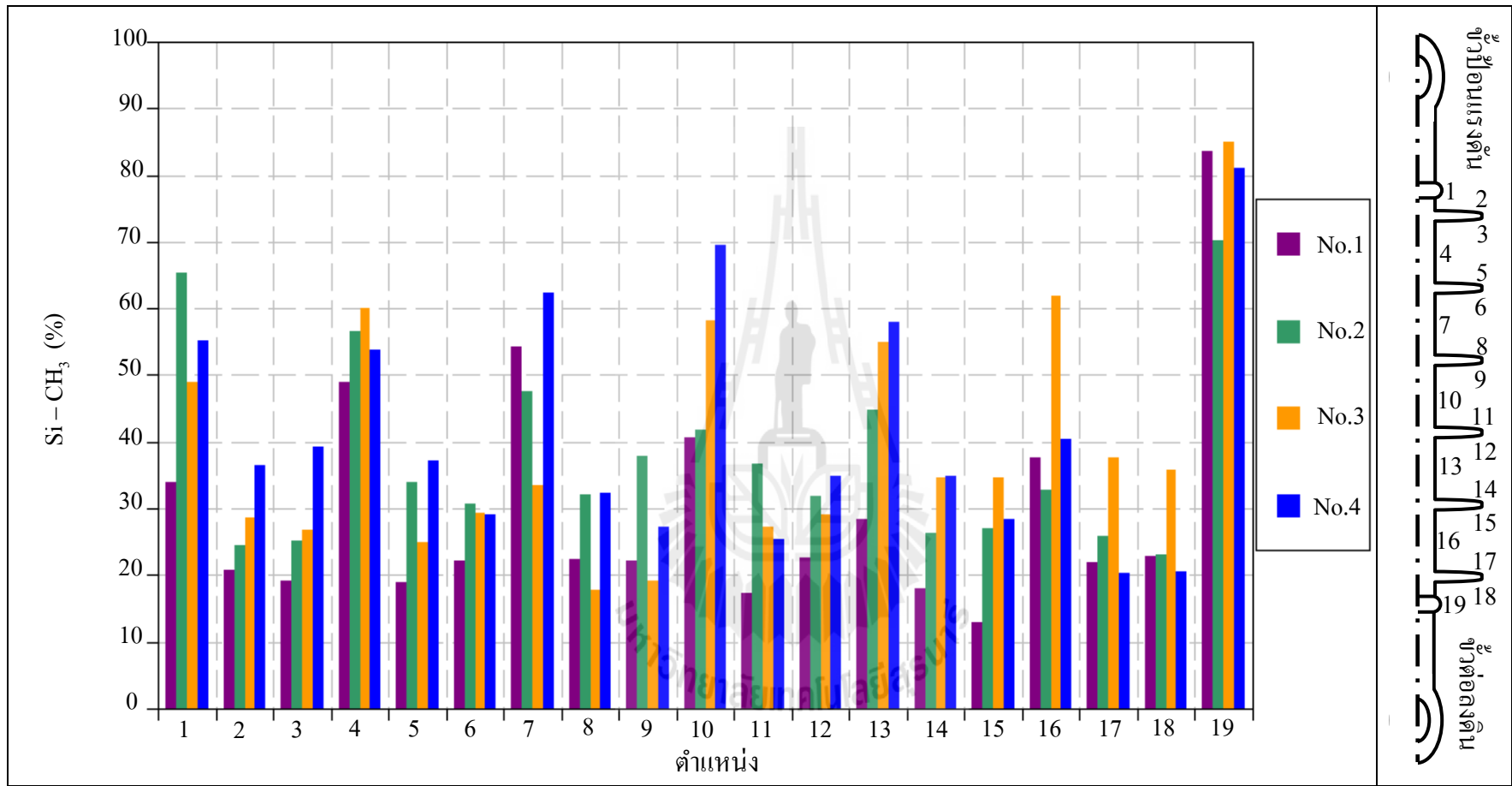
เมื่อทราบถึงปริมาณการเปลี่ยนแปลงของ  $\text{Si-CH}_3$  และ  $\text{Si-O}$  แล้ว สามารถสรุปเป็นอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงพันธะทางเคมีของ  $\text{Si-CH}_3/\text{Si-O}$  ได้โดยแสดงดังรูปที่ 6.42 รูปที่ 6.43 รูปที่ 6.44 และรูปที่ 6.45

เมื่อถูกด้วยฉนวนพอลิเมอร์ได้รับการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ ความร้อนที่เกิดจากการเกิดดีสซาร์จทางไฟฟ้านี้ มีพลังงานที่สูงพอต่อการแตกตัวของพันธะ  $\text{Si-CH}_3$  และ  $\text{Si-O}$  เมื่อเกิดการแตกตัวจะเกิดเป็นอนุมูลอิสระขึ้น ส่งผลให้ไฮดรอกไซด์ไอออนและน้ำสามารถเข้ามาแทนที่อนุมูลอิสระที่เกิดจากการแตกตัวนี้ได้ ส่งผลให้จากเดิมยางซิลิโคนมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำให้กลายเป็นมีคุณสมบัติชอบน้ำได้ เมื่อ  $\text{Si-CH}_3$  มีปริมาณลดลงและ  $\text{Si-O}$  มีปริมาณเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของยางซิลิโคน ทำให้เกิดการสูญเสียคุณสมบัติหยดน้ำล้นยางซิลิโคนมีความแข็งมากขึ้นและเกิดความขรุขระเพิ่มมากขึ้น และส่งผลต่อความทนทานของ ลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์อีกด้วย

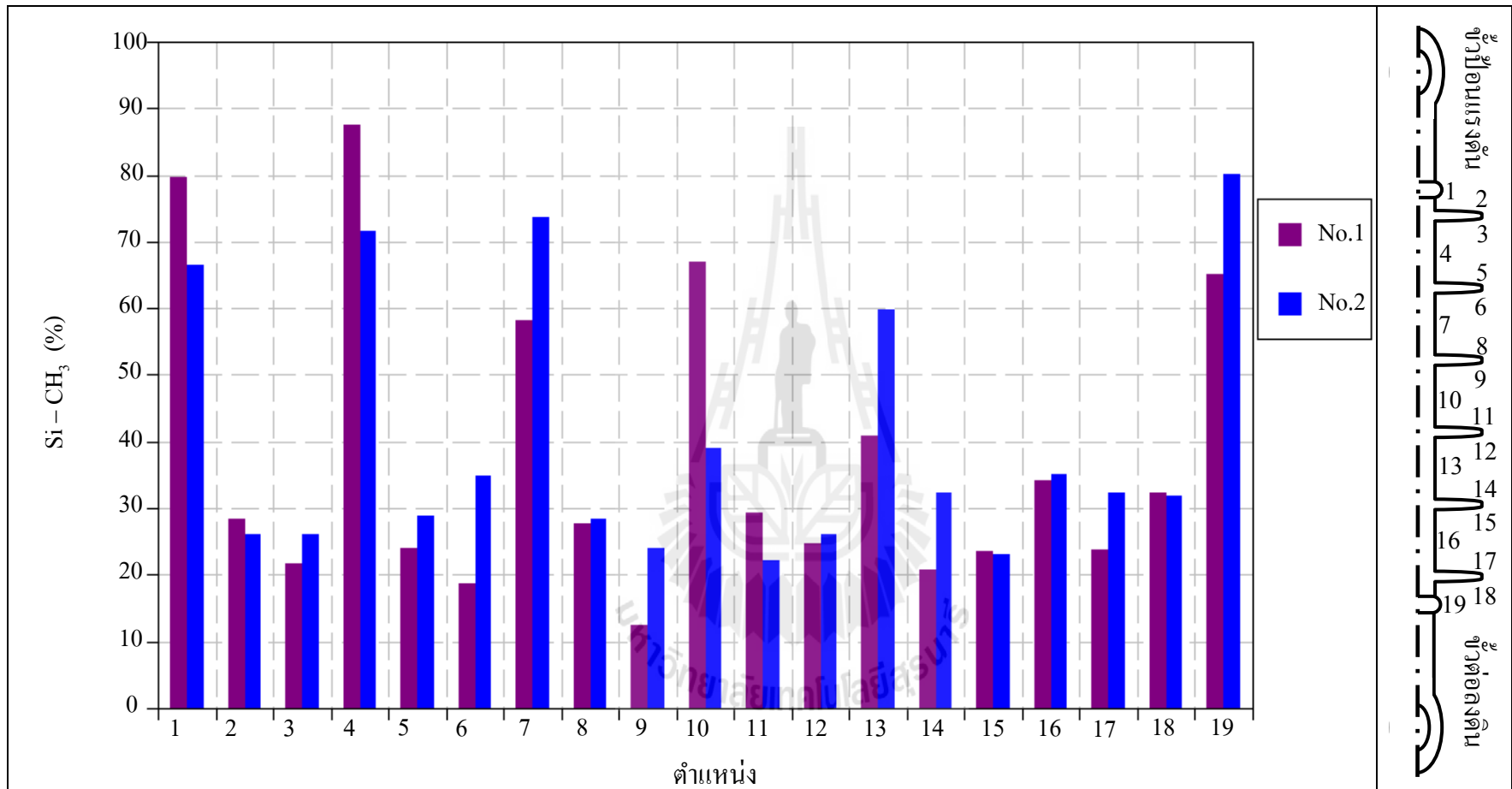




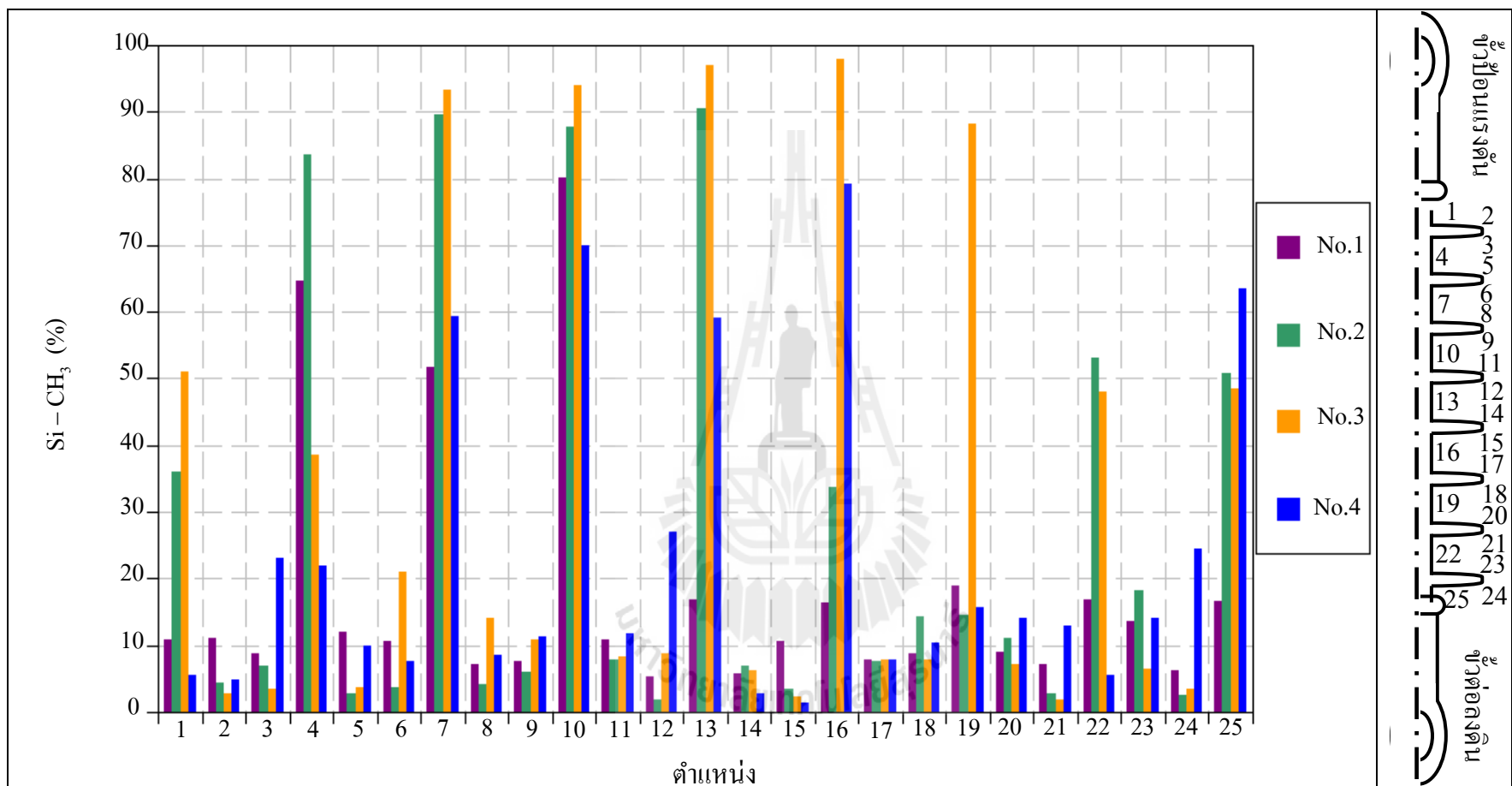
รูปที่ 6.34 การลดลงของ Si-CH<sub>3</sub> ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือ (ก่อนการทดสอบให้ Si-CH<sub>3</sub> มีการลดลงเป็น 0 %)



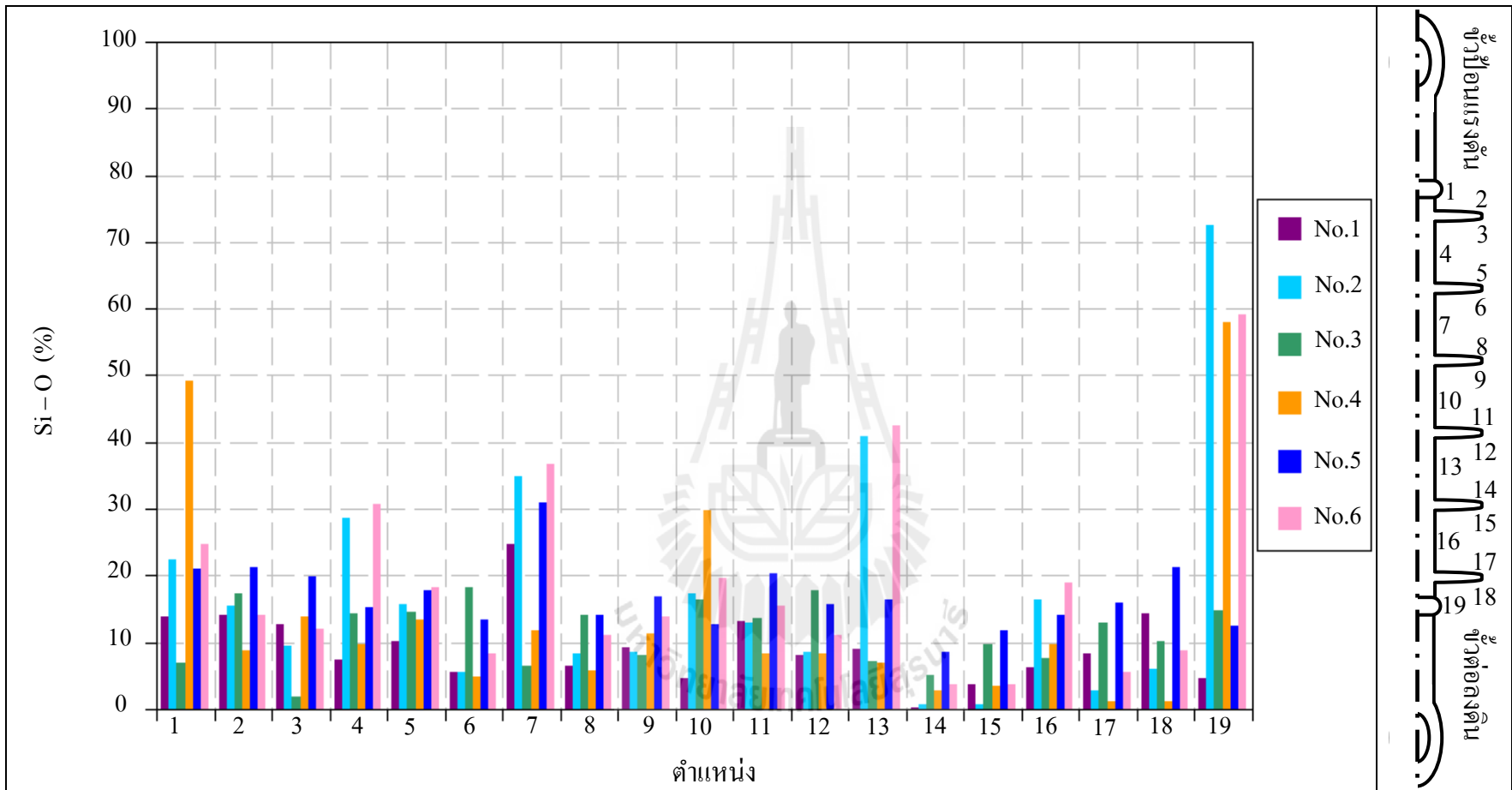
รูปที่ 6.35 การลดลงของ Si-CH<sub>3</sub> ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 หลังการทดสอบวงล้อยู่มน้ำเกลือ จากการทดสอบในน้ำเปล่า (ก่อนการทดสอบให้ Si-CH<sub>3</sub> มีการลดลงเป็น 0 %)



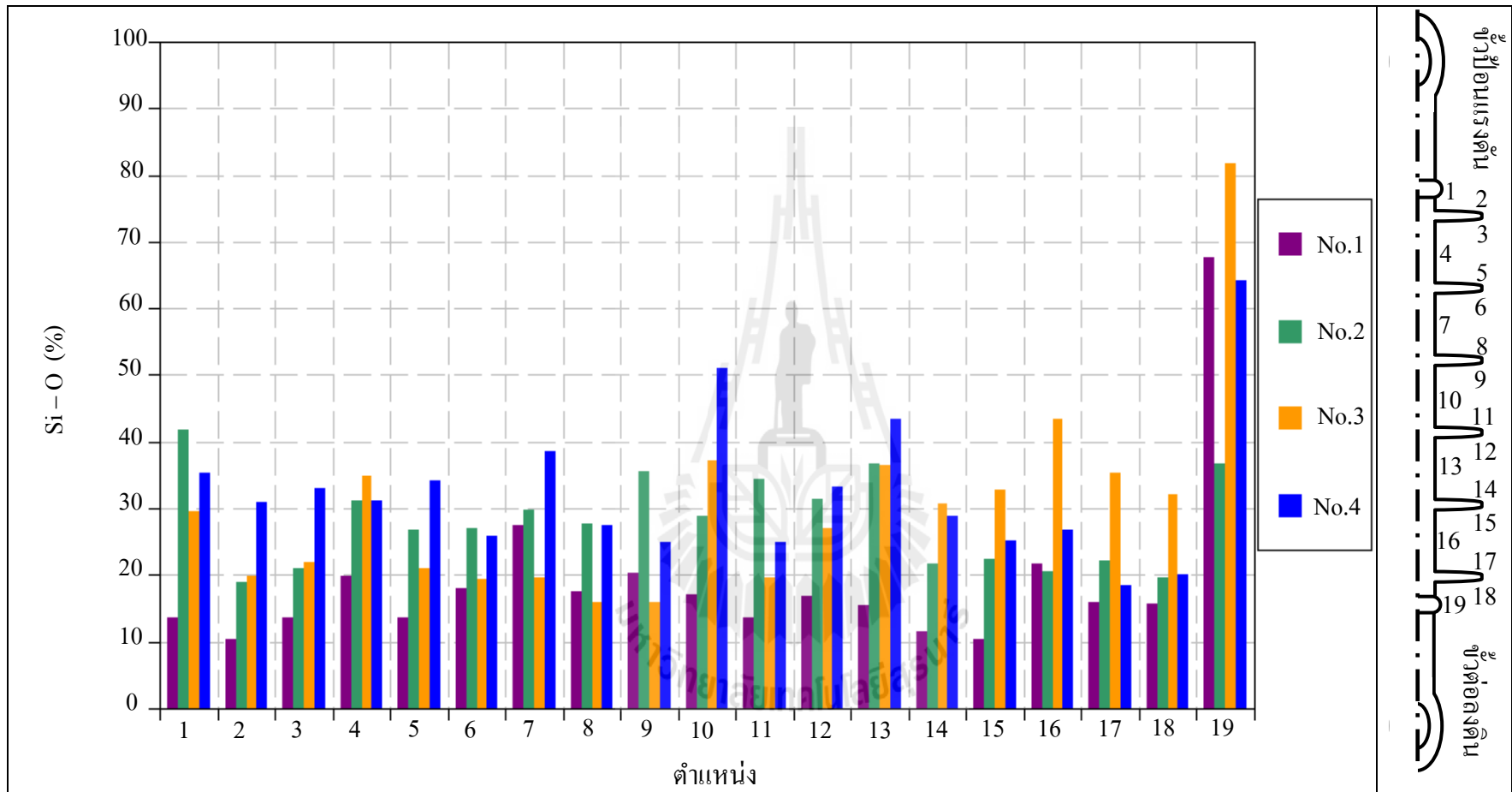
รูปที่ 6.36 การลดลงของ Si-CH<sub>3</sub> ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2 หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือ (ก่อนการทดสอบให้ Si-CH<sub>3</sub> มีการลดลงเป็น 0 %)



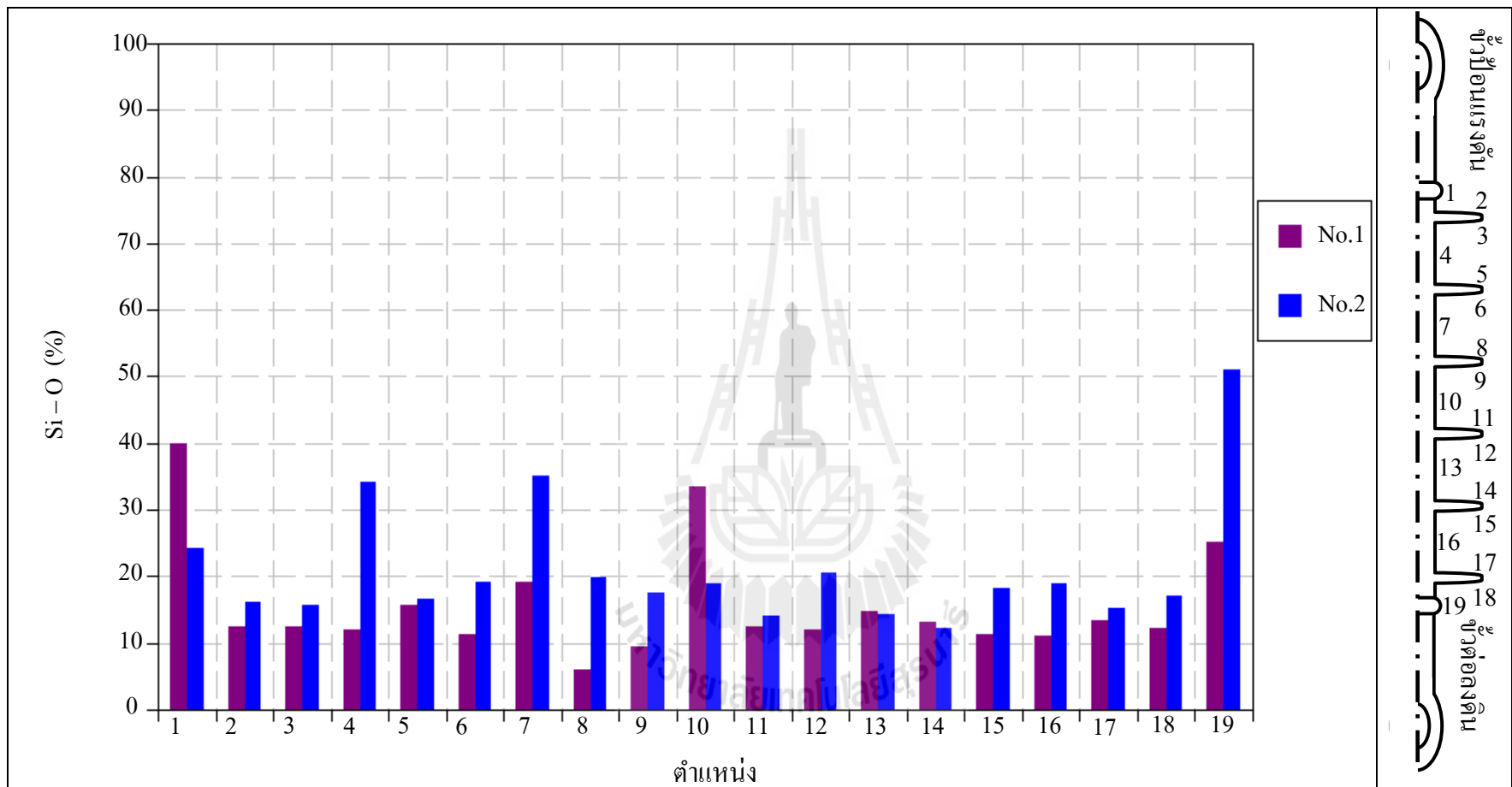
รูปที่ 6.37 การลดลงของ Si-CH<sub>3</sub> ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 36 kV หลังการทดสอบวงล้อจุ่มน้ำเกลือ (ก่อนการทดสอบให้ Si-CH<sub>3</sub> มีการลดลงเป็น 0 %)



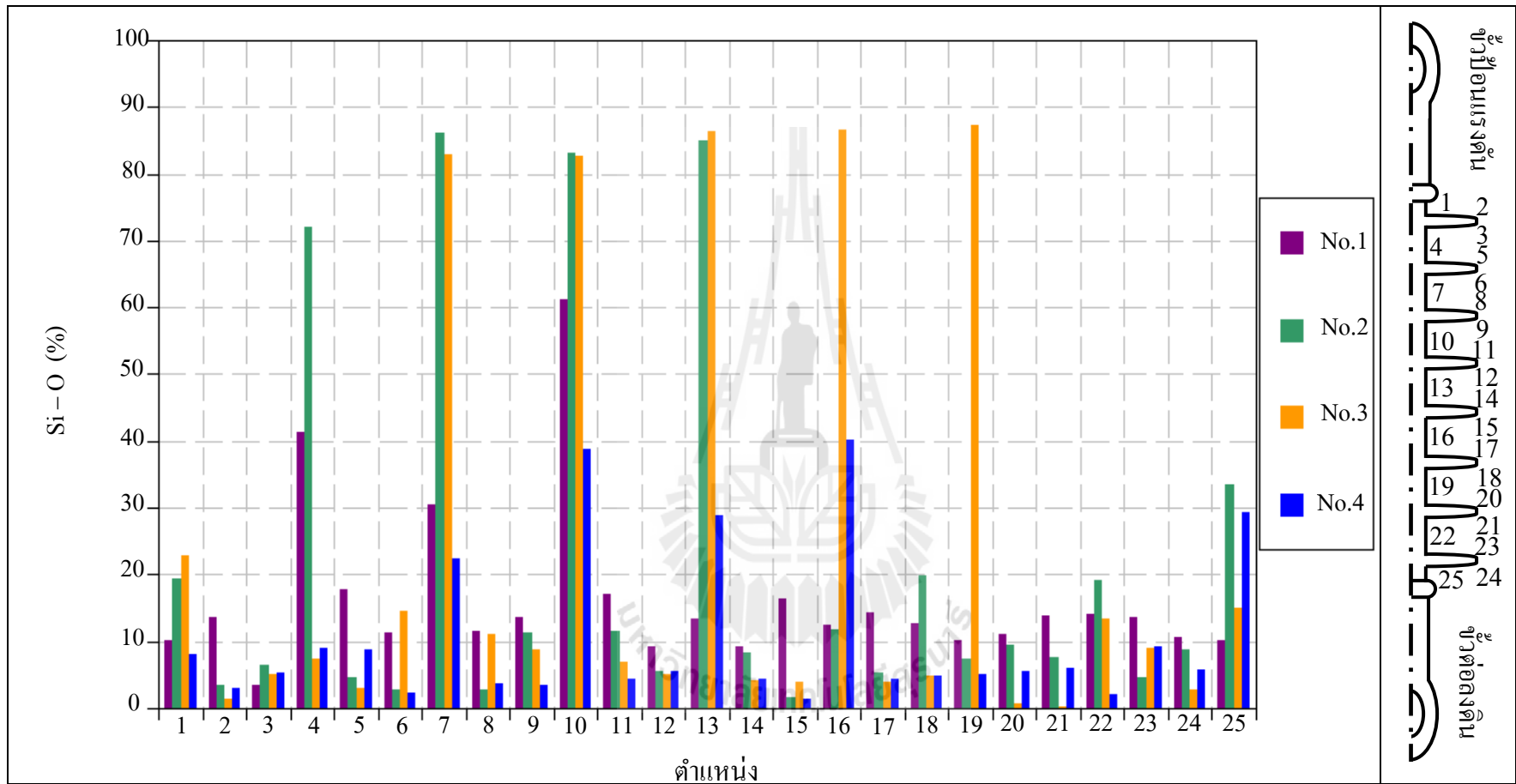
รูปที่ 6.38 การลดลงของ Si-O ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1  
 หลังการทดสอบวงลื้อจุ่มน้ำเกลือ(ก่อนการทดสอบให้ Si-O มีการลดลงเป็น 0 %)



รูปที่ 6.39 การลดลงของ Si-O ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 หลังการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือจากการทดสอบในน้ำเปล่า (ก่อนการทดสอบให้ Si-O มีการลดลงเป็น 0 %)

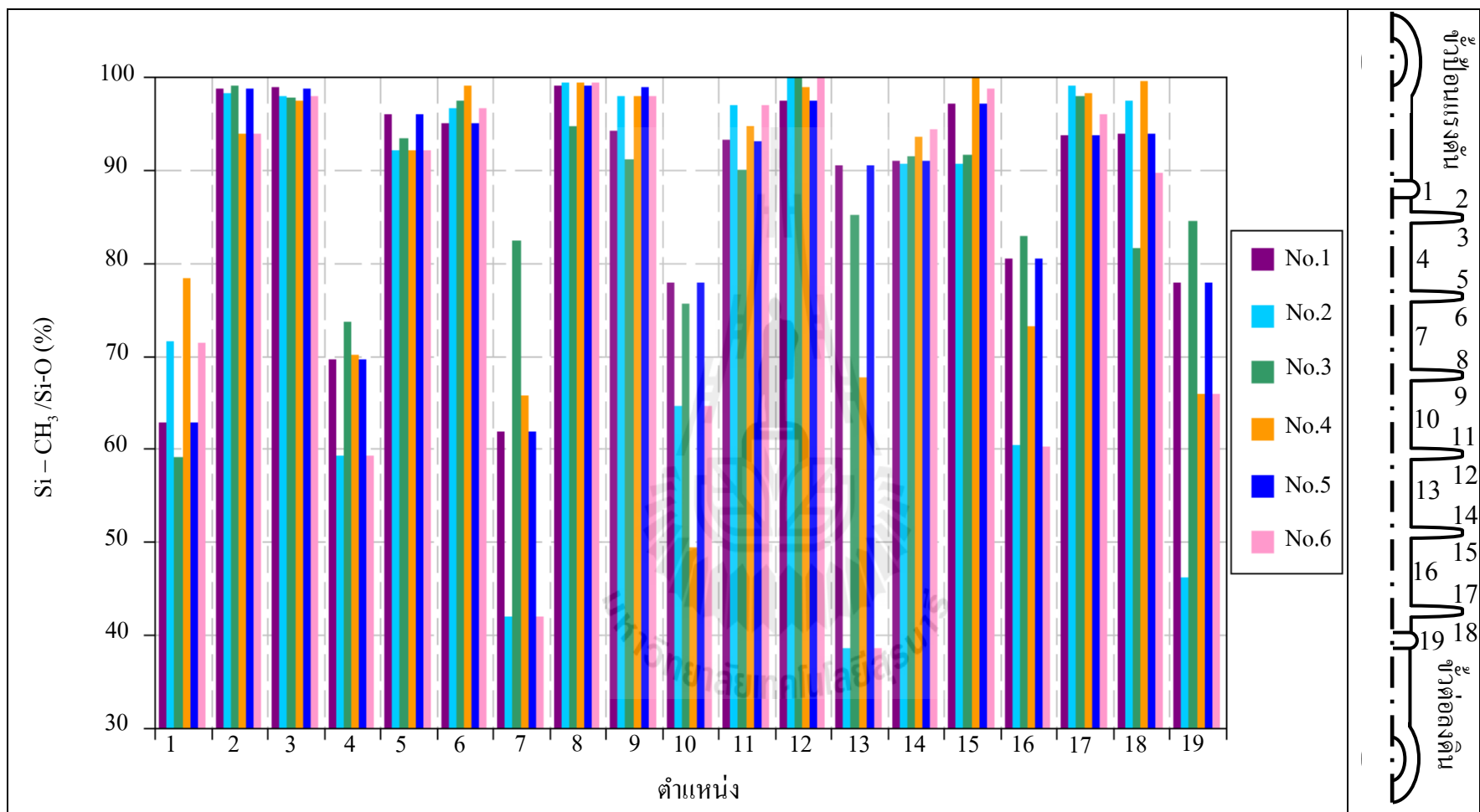


รูปที่ 6.40 การลดลงของ Si-O ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2  
 หลังการทดสอบวงล้อจุ่มน้ำเกลือก่อนการทดสอบให้ Si-O มีการลดลงเป็น 0 %)

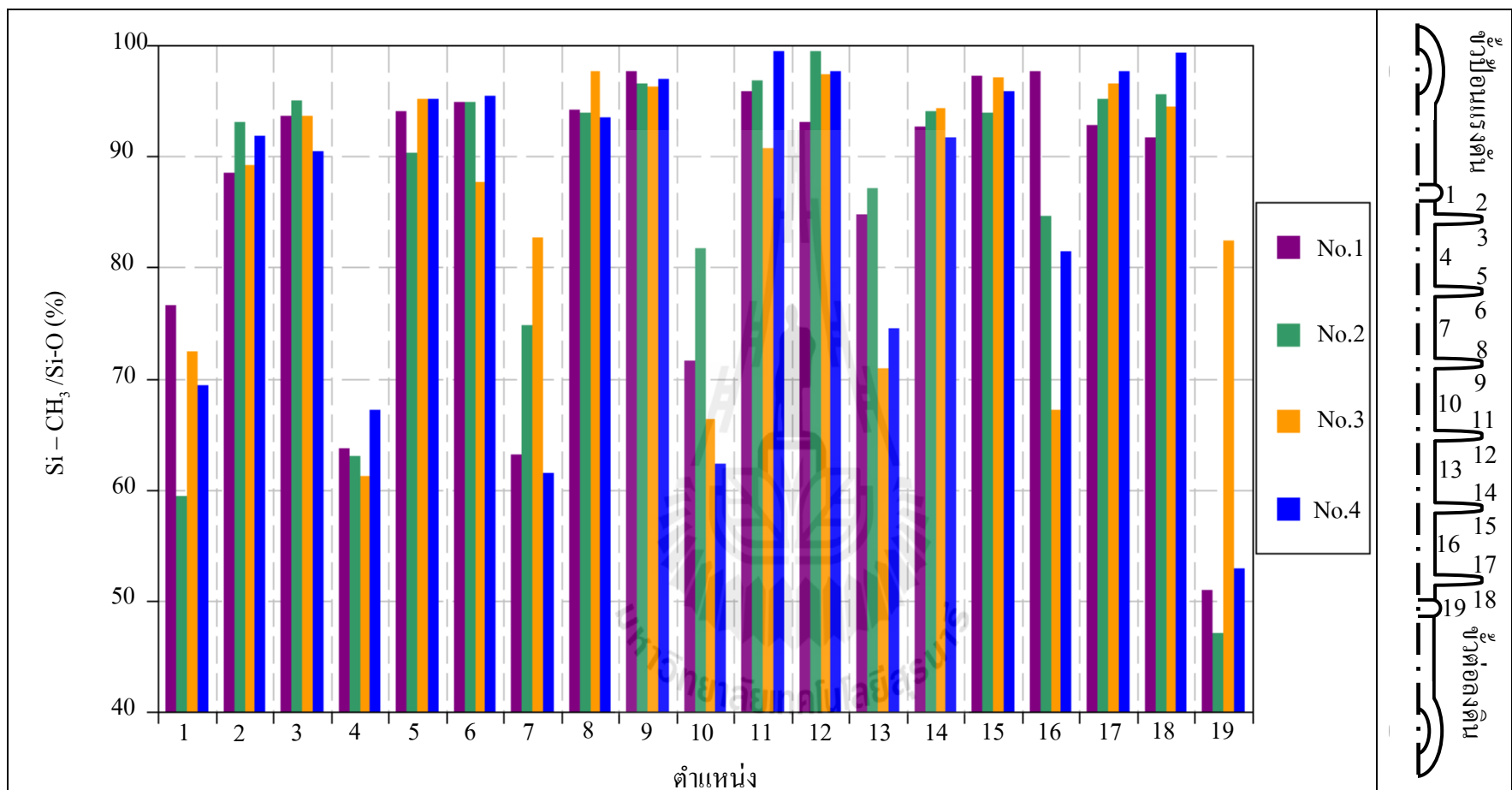


รูปที่ 6.41 การลดลงของ Si-O ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 36 kV หลังการทดสอบวงลัดจุ่มน้ำเกลือ (ก่อนการทดสอบให้ Si-O มีการลดลงเป็น 0 %)

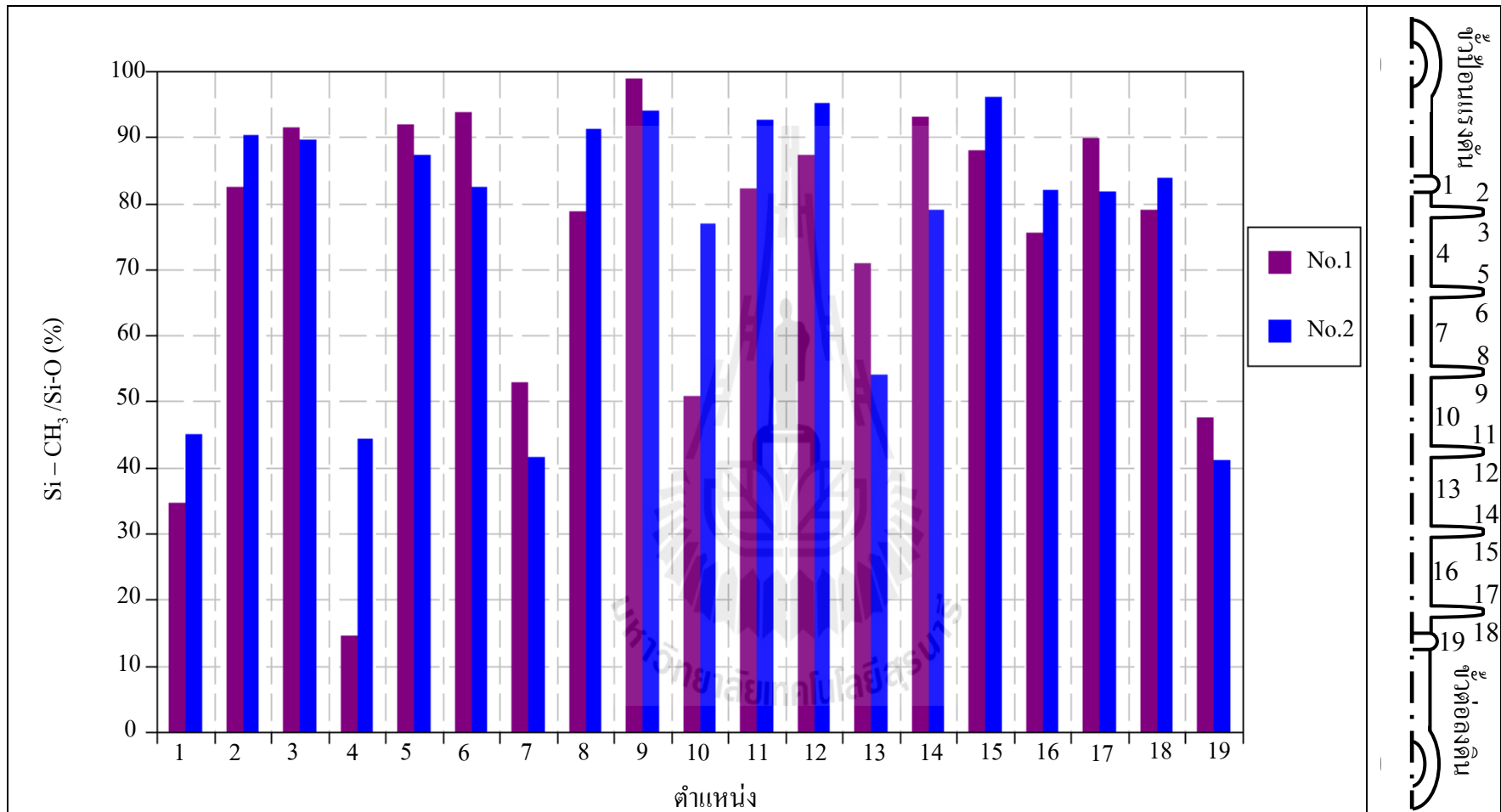




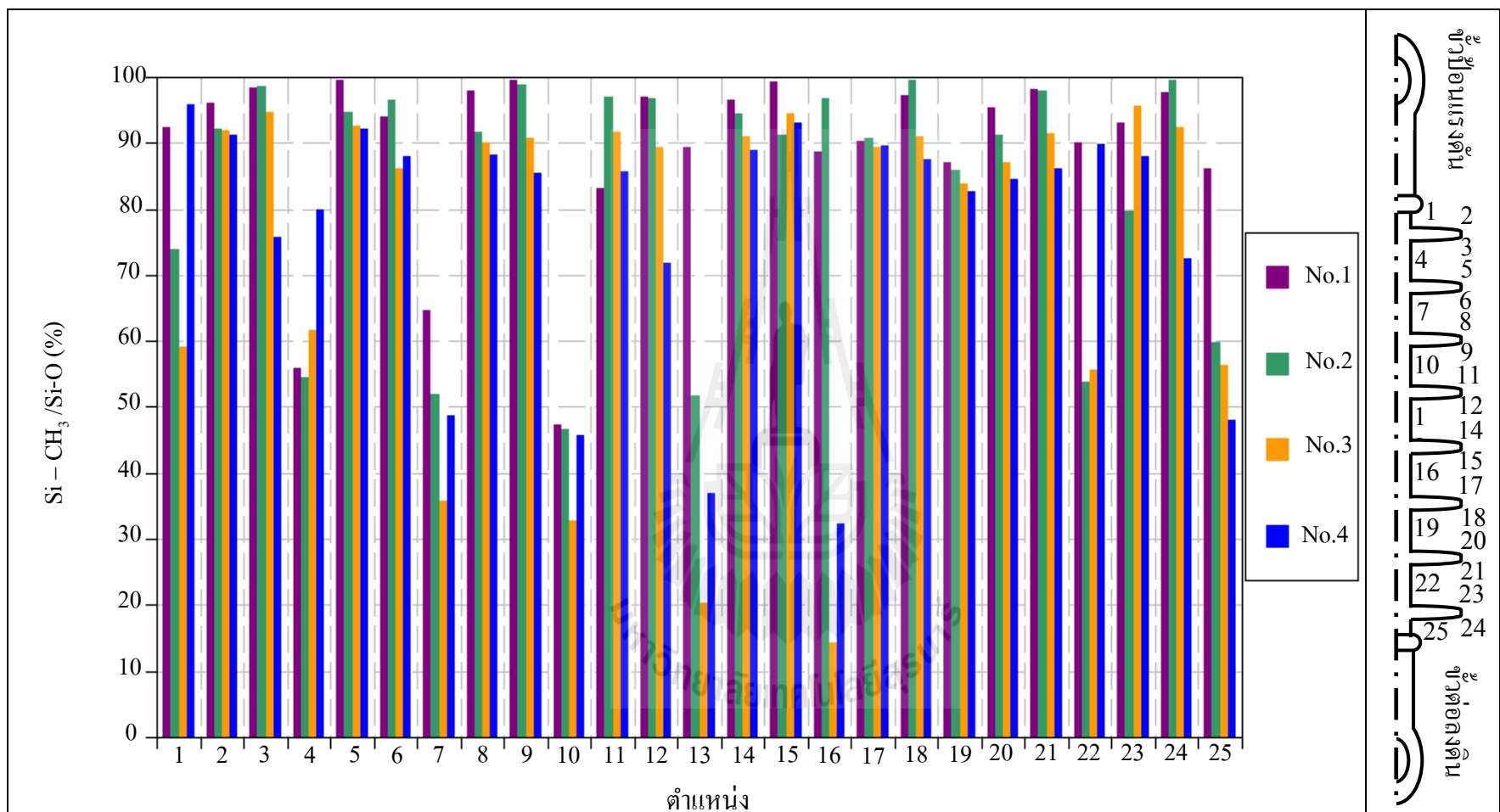
รูปที่ 6.42 อัตราส่วนของ Si-CH<sub>3</sub>/Si-O ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 หลังจากการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือ



รูปที่ 6.43 อัตราส่วนของ Si-CH<sub>3</sub>/Si-O ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 หลังจากการทดสอบวงล้อจุ่มน้ำเกิดจากการทดสอบในน้ำเปล่า



รูปที่ 6.44 อัตราส่วนของ Si-CH<sub>3</sub>/Si-O ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2 หลังจากการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือ



รูปที่ 6.45 อัตราส่วนของ Si-CH<sub>3</sub>/Si-O ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 36 kV หลังจากการทดสอบวงล้อยุ่มน้ำเกลือ

## 6.4 การวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์

### อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

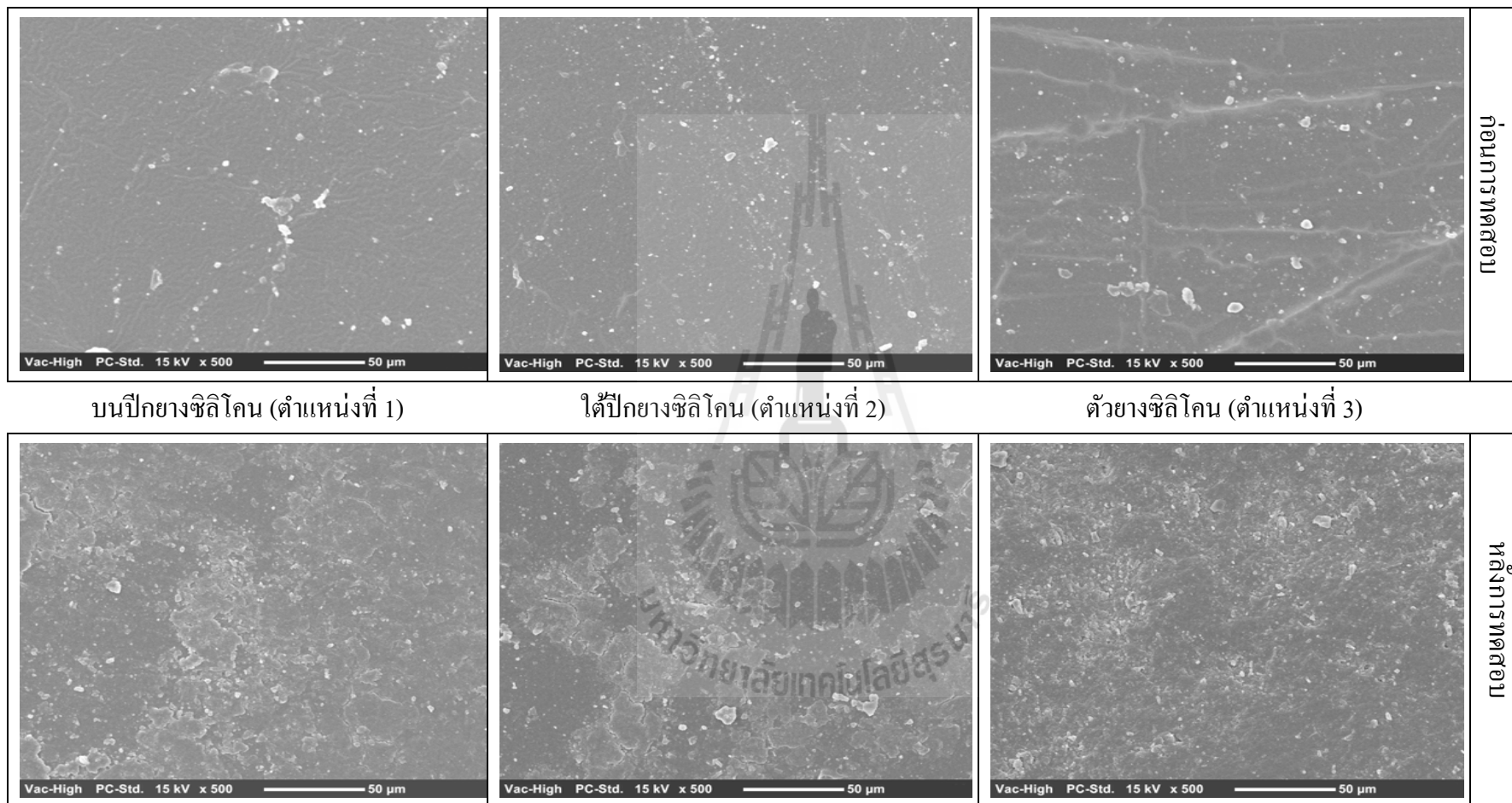
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy หรือ SEM) ใช้ศึกษาสมบัติเชิงกายภาพที่ผิวของของแข็ง เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนฉายหรือกราดส่องไปบนพื้นผิวของตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบ ข้อมูลที่ได้มีลักษณะเป็นภาพขยายของพื้นผิวที่สามารถมองเห็นได้ด้วยการบันทึกเป็นภาพนิ่ง 3 มิติ

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงได้ในรูปที่ 6.46 ซึ่งเป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่น JCM 5000 การทำงานภายในประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวมรังสี(condenser lens) เพื่อให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสด้วยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ และถูกนำไปสร้างเป็นภาพส่งไปยังจอภาพต่อไป

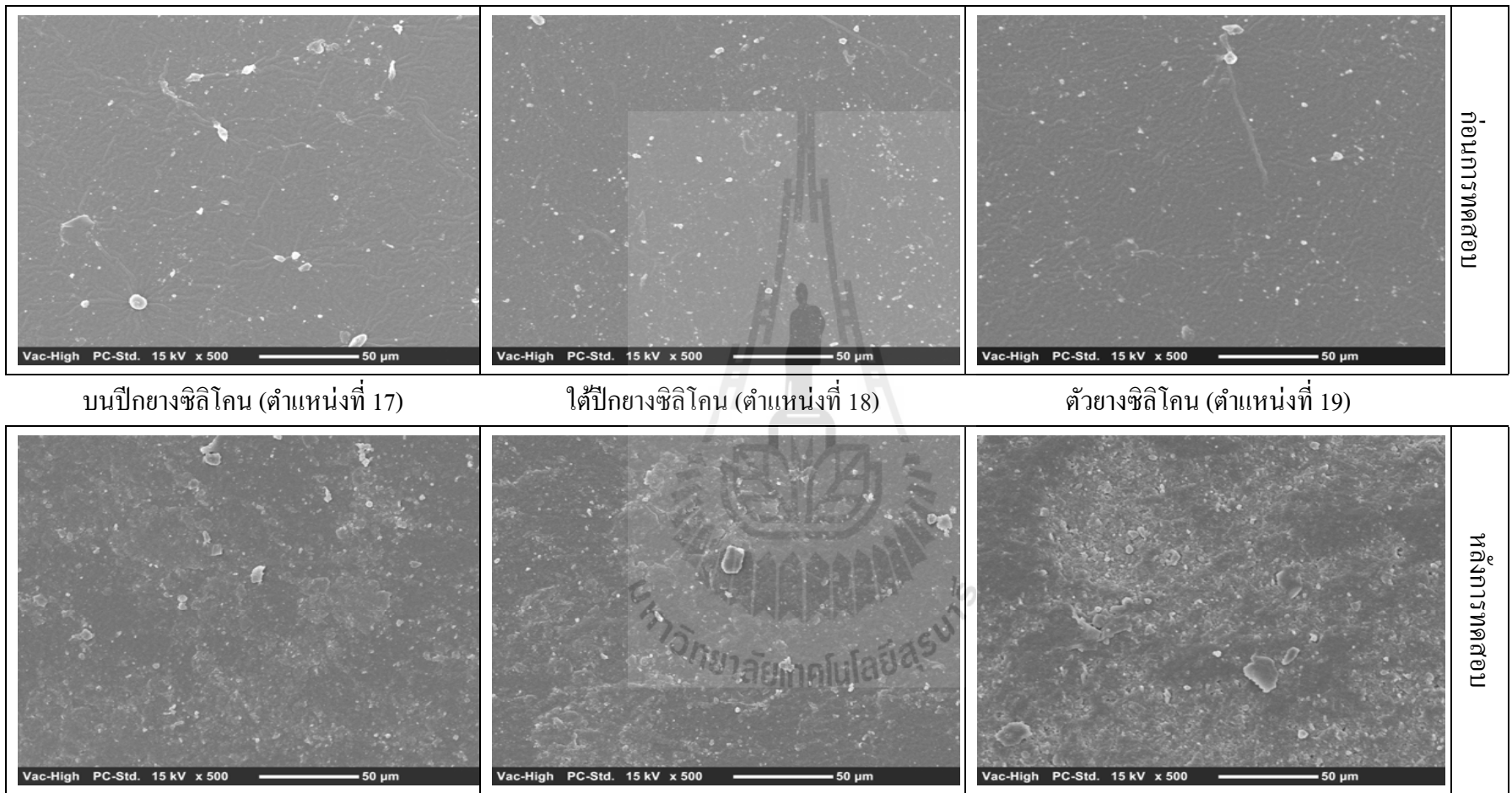


รูปที่ 6.46 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Neoscope JCM-5000

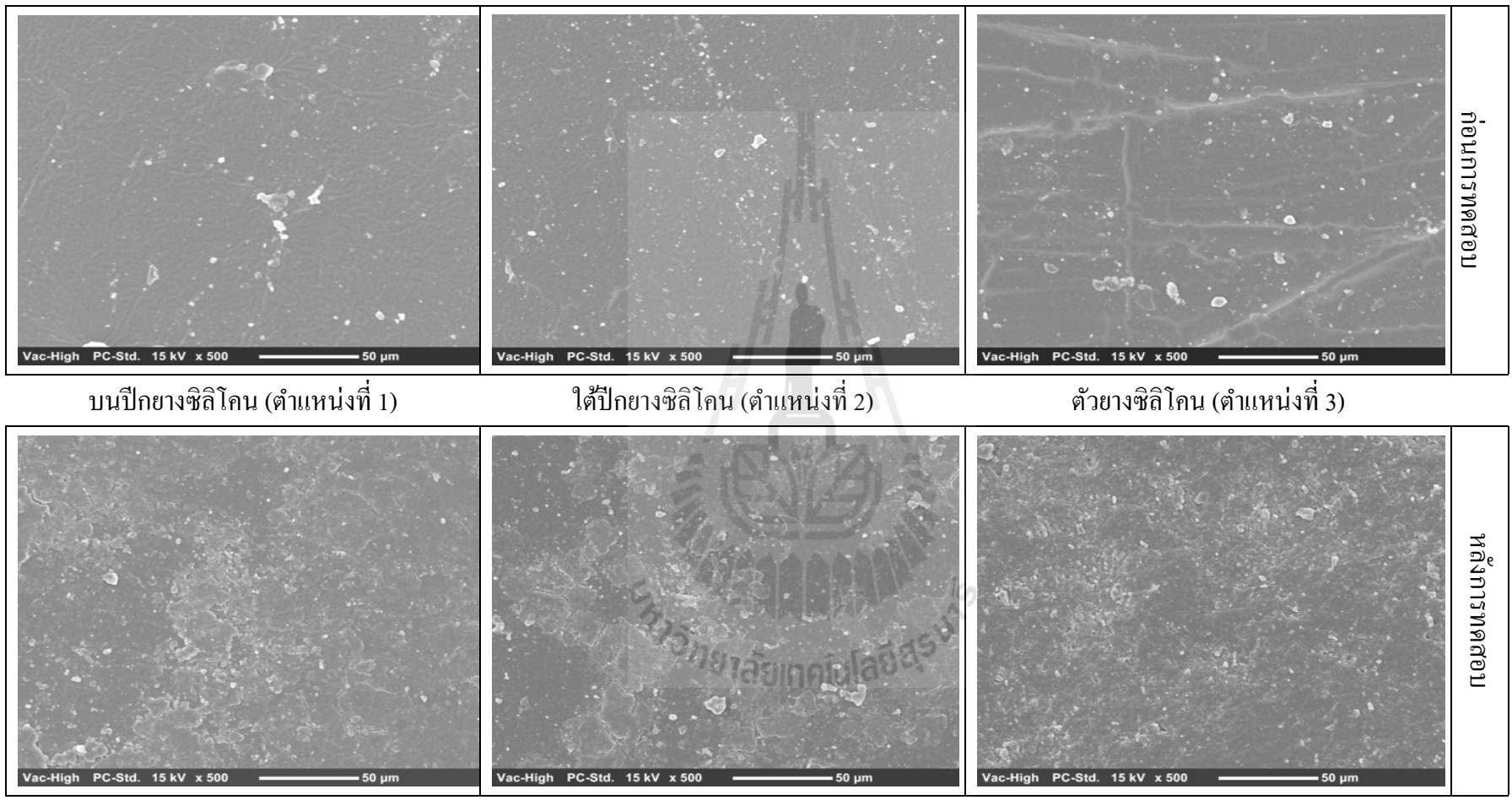
ผลจากการตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพของยางซีลิกอน จากการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของยางซีลิกอนทั้ง 4 การทดสอบแสดงในรูปที่ 6.47 ถึงรูปที่ 6.54 ตามลำดับ



รูปที่ 6.47 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้านซ้ายป้อนแรงดันของยางชลิโคนสำหรับลูกถ้วย  
 จนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 ที่แรงดัน 15 kV กำลังขยาย 500 เท่า

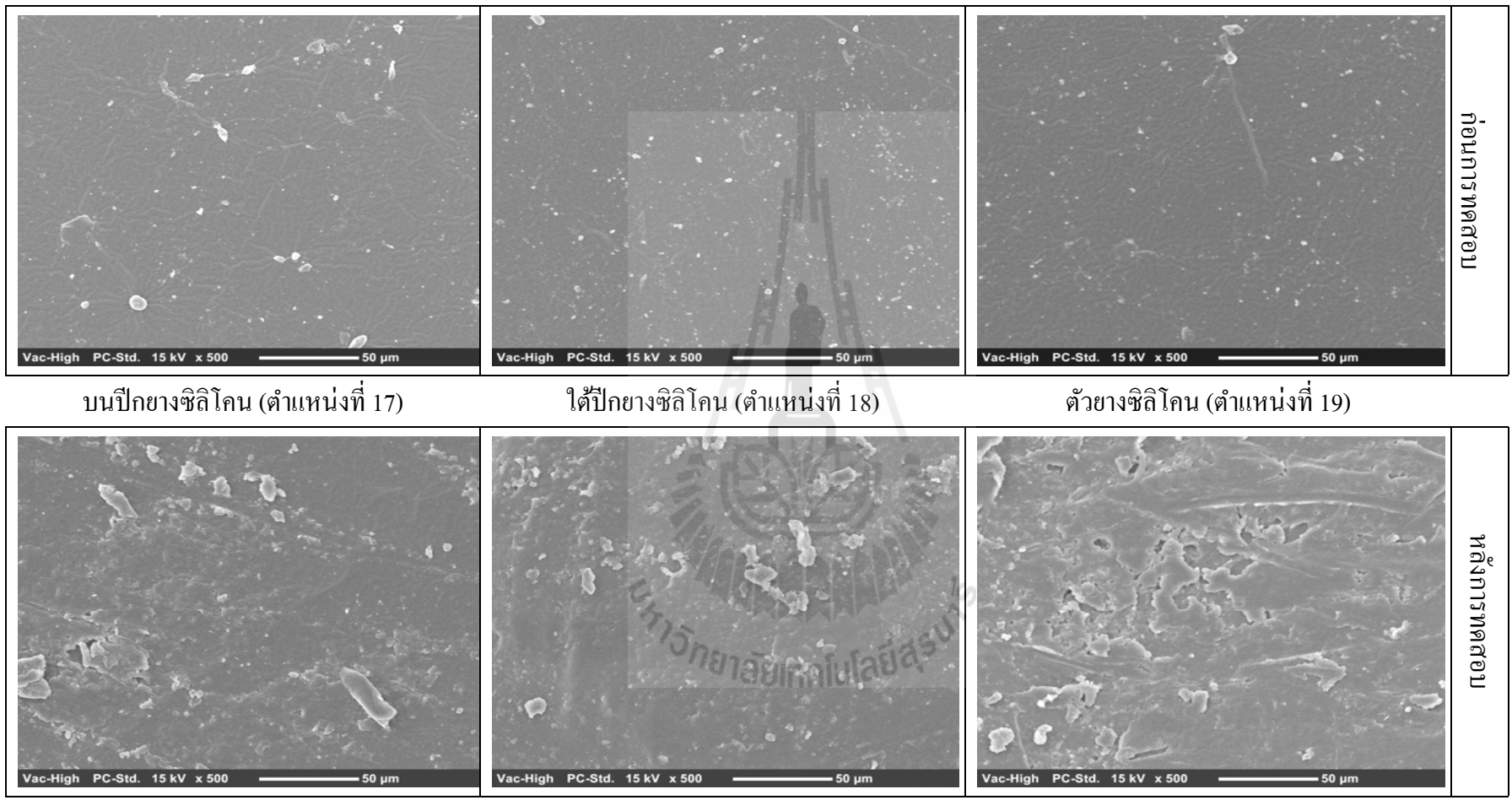


รูปที่ 6.48 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้านข้างต่อลงดินของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วย  
 จนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 ที่แรงดัน 15 kV กำลังขยาย 500 เท่า

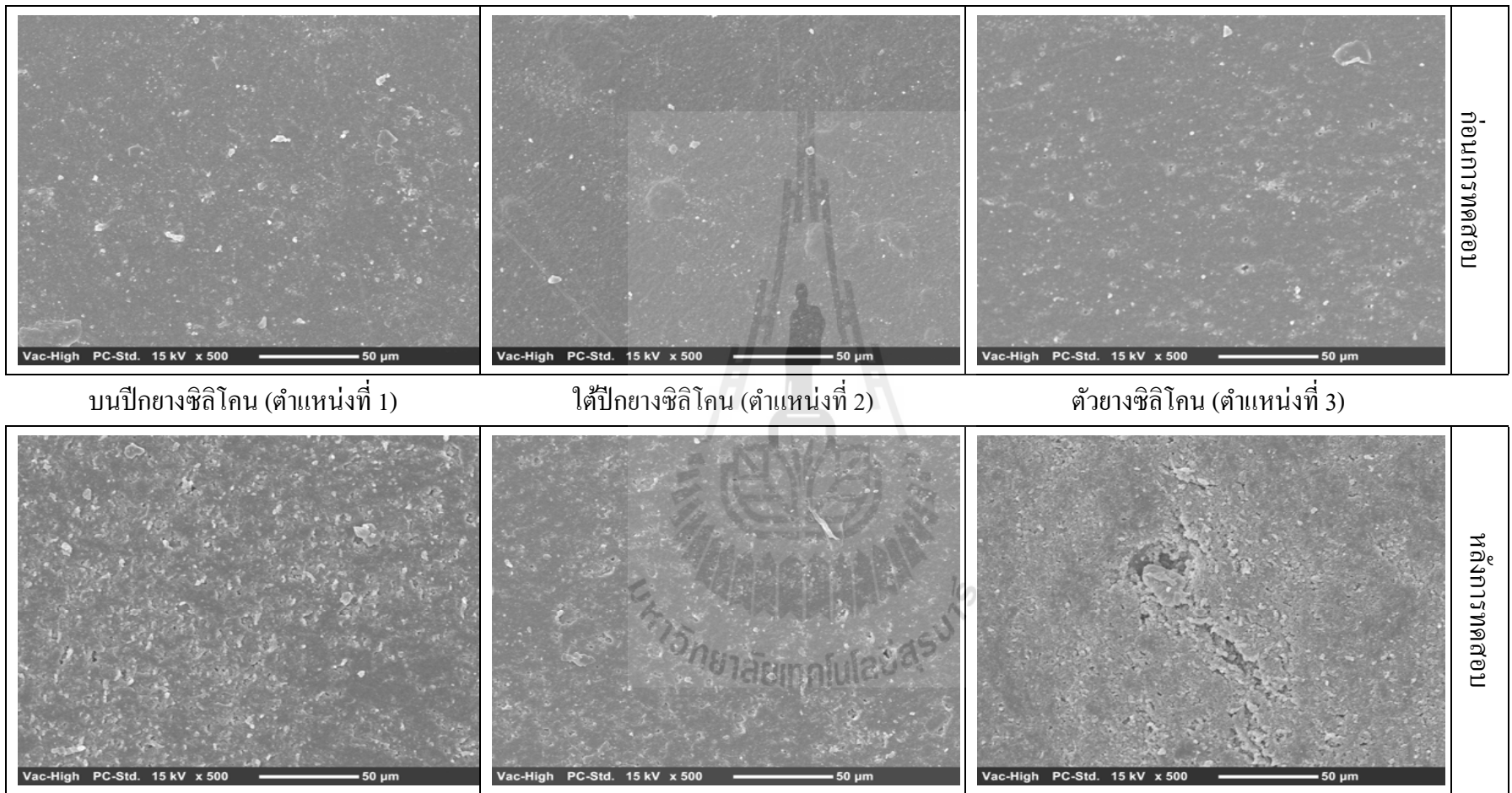


รูปที่ 6.49 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้านซ้ายป้อนแรงดันของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วย  
 จนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 ที่แรงดัน 15 kV กำลังขยาย 500 เท่า

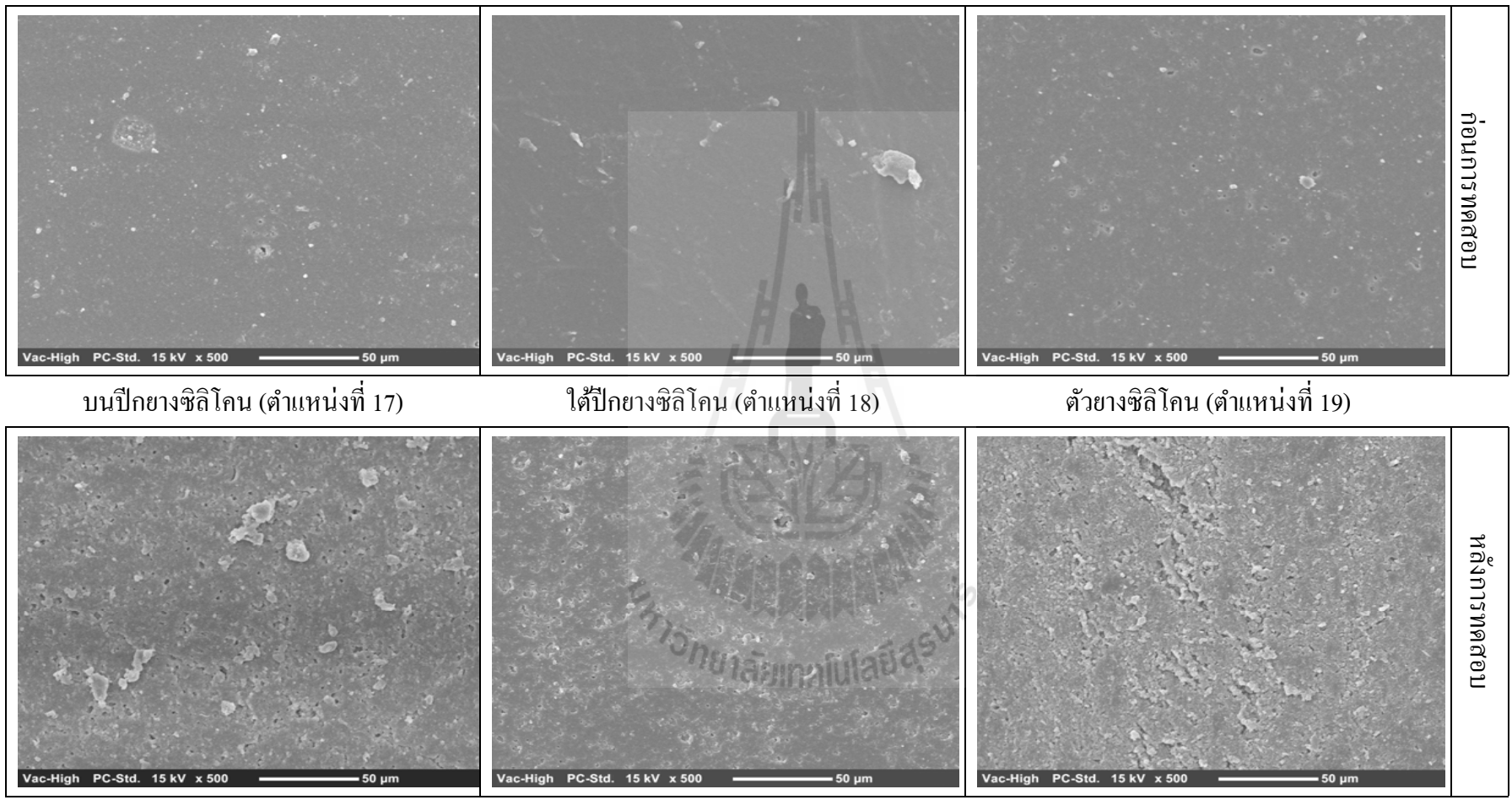




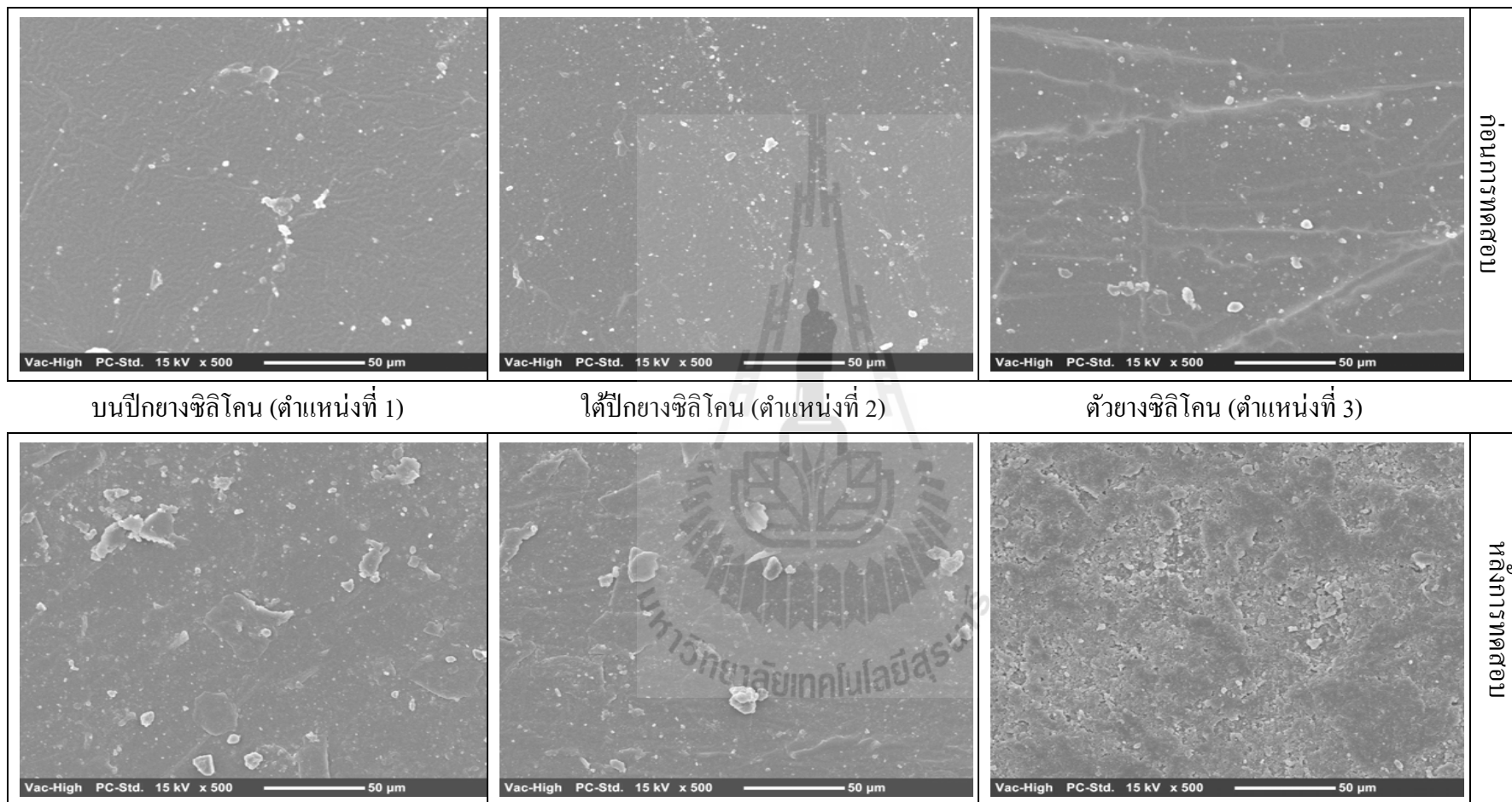
รูปที่ 6.50 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้านข้างต่อลงดินของใยเซลลูโลสสำหรับลูกถ้วย  
 ฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 จากการทดสอบในน้ำเปล่าที่แรงดัน 15 kV กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 6.51 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้านหัวป้อนแรงดันของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วย  
ฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2 ที่แรงดัน 15 kV กำลังขยาย 500 เท่า

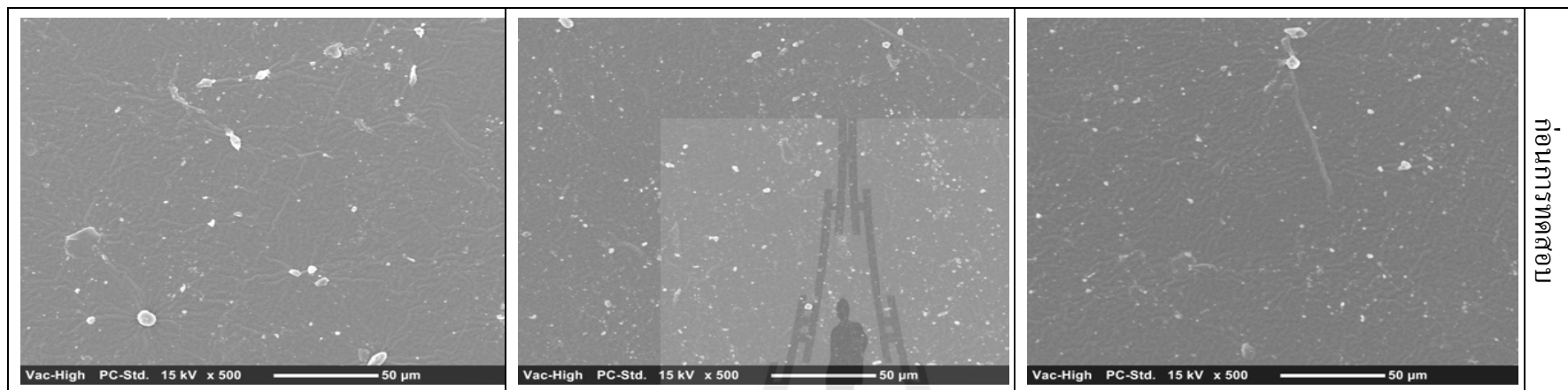


รูปที่ 6.52 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้านขั้วต่อลงดินของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วย  
 ฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2 แรงดัน 15 kV กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 6.53 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้านซ้ายป้อนแรงดันของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วย

ฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 36 kV ที่แรงดัน 15 kV กำลังขยาย 500 เท่า

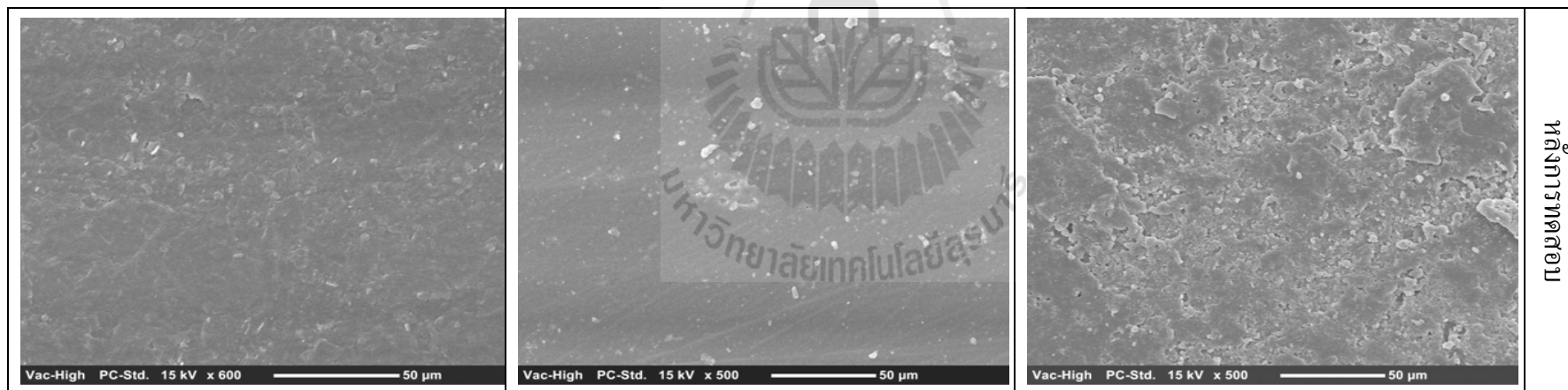


ก่อนการทดสอบ

บนปีกยางชลิโคน (ตำแหน่งที่ 17)

ใต้ปีกยางชลิโคน (ตำแหน่งที่ 18)

ตัวยางชลิโคน (ตำแหน่งที่ 19)



หลังการทดสอบ

รูปที่ 6.54 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้านซ้ายต่อลงดินของยางชลิโคนสำหรับลูกถ้วย  
 ฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 36 kV แรงดัน 15 kV กำลังขยาย 500 เท่า

จากรูปที่ 6.47 ถึงรูปที่ 6.54 แสดงถึงการเปรียบเทียบพื้นผิวของซิลิโคนระหว่างก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบของยางซิลิโคนทั้ง 4 ชุดการทดสอบ โดยแต่ละชุดการทดสอบแสดงการเปรียบเทียบพื้นผิวที่อยู่บริเวณข้อป้อนแรงดันและพื้นผิวบริเวณจุดต่อกราวด์ ซึ่งในแต่ละบริเวณที่นำมาเปรียบเทียบแจกแจงการเปรียบเทียบออกเป็น 3 ตำแหน่งคือ พื้นผิวของซิลิโคนบริเวณบนปีก พื้นผิวของซิลิโคนบริเวณใต้ปีก และพื้นผิวของซิลิโคนบริเวณตัวยางซิลิโคน จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพบนพื้นผิวของยางซิลิโคนที่ผ่านการทดสอบและเปรียบเทียบกับพื้นผิวของซิลิโคนที่ยังไม่ผ่านการใช้งานพบว่า โครงสร้างทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไปของยางซิลิโคนที่ผ่านการทดสอบทั้ง 4 ชุดการทดสอบ มีลักษณะที่คล้ายคลึงกันคือ พื้นผิวของซิลิโคนทั้ง 4 ชุดการทดสอบเกิดการสึกกร่อนบนพื้นผิวของซิลิโคนเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวของซิลิโคนที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน เห็นได้ว่า บริเวณบนปีกของยางซิลิโคนและบริเวณใต้ปีกของยางซิลิโคน มีการสึกกร่อนของพื้นผิวน้อยกว่าบริเวณพื้นผิวของตัวยางซิลิโคน นอกจากนี้พบว่า พื้นผิวของตัวยางซิลิโคนบริเวณจุดต่อกราวด์เป็นบริเวณที่มีการสึกกร่อนมากที่สุด ซึ่งบริเวณนี้เป็นบริเวณที่ยางซิลิโคนได้รับความเสียหายมากที่สุด

จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นถึงการสึกกร่อนของพื้นผิวของซิลิโคน ร่องรอยการสึกกร่อนต่าง ๆ เหล่านี้เป็นร่องรอยที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า การสึกกร่อนของพื้นผิวเป็นการยืนยันผลการวิเคราะห์ความขรุขระของยางซิลิโคน ซึ่งความขรุขระเป็นผลพวงมาจากการสูญเสียคุณสมบัติหยดน้ำลื่นจากการดีสซาร์จทางไฟฟ้า โดยเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันบนพื้นผิวของยางซิลิโคนที่เกิดจากการเชื่อมขวางของ Si-O ทำให้ผิวของซิลิโคนเกิดการสึกกร่อน

## 6.5 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 6 ได้กล่าวถึงกระบวนการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ โครงสร้างทางเคมีและโครงสร้างทางกายภาพของยางซิลิโคนเพื่อยืนยันความถูกต้องจากการเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน ซึ่งสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ โครงสร้างทางเคมีและโครงสร้างทางกายภาพได้ดังนี้

เมื่อยางซิลิโคนได้รับการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุพบว่าเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากควาบไฟ รอยเจาะทะลุ การสูญเสียของคุณสมบัติหยดน้ำลื่น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเหล่านี้เป็นผลจากการที่ยางซิลิโคนได้รับความเครียดทางไฟฟ้า ความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่เกิดจากการเกิดดีสซาร์จทางไฟฟ้าเป็นเวลานาน นอกจากนี้ความสกปรกที่อยู่บนพื้นผิวของยางซิลิโคนจะมีค่ามากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศที่ยางซิลิโคนได้รับด้วย

โครงสร้างทางเคมีของยางซิลิโคน ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR โดยให้ผลการวิเคราะห์ออกมาให้รูปของกราฟ ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของยางซิลิโคนที่ผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ สามารถสรุปได้ว่า เมื่อยางซิลิโคนได้รับความเครียดทางไฟฟ้า ความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเล็ต จากการดิสชาร์จทางไฟฟ้าเป็นเวลานาน เป็นสาเหตุให้ยางซิลิโคนเกิดการเสื่อมอายุ ความร้อนที่ได้รับจากการดิสชาร์จทำให้โครงสร้างทางเคมีของยางซิลิโคนเกิดการเปลี่ยนแปลง ส่งผลต่อการลดลงของ Si-CH<sub>3</sub> และ Si-O ที่อยู่ในยางซิลิโคน ซึ่งการลดลงของพันธะทั้งสองนี้เป็นสาเหตุสำคัญต่อเกิดเสื่อมอายุของยางซิลิโคน

โครงสร้างทางกายภาพของยางซิลิโคน ทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ใช้ทำการตรวจสอบพื้นผิวทางกายภาพของยางซิลิโคน ซึ่งสรุปได้ว่า ยางซิลิโคนที่ได้รับความเครียดทางไฟฟ้า ความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเล็ต เป็นระยะเวลาานาน จะปรากฏการสึกกร่อนของพื้นผิวยางซิลิโคน ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนเป็นสาเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพตามมาได้



## บทที่ 7

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 7.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เกี่ยวข้องกับการสร้างชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ และการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซีลิกอนจากการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของชุดทดสอบที่ได้สร้างขึ้น เพื่อสามารถประเมินผลที่ตามมาจากผลกระทบของความเครียดทางไฟฟ้า และผลจากการดีสชาร์จทางไฟฟ้าที่ส่งผลต่อการเสื่อมอายุของยางซีลิกอน การดำเนินการวิจัยวิทยานิพนธ์ดังกล่าวนี้ ได้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ โดยสามารถสรุปผลการดำเนินการวิจัยและพัฒนาทางวิศวกรรมเป็นข้อสรุปได้ ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 ได้นำเสนอความสำคัญและที่มาของปัญหา โดยกล่าวถึงความสำคัญของการเสื่อมอายุของยางซีลิกอนที่เกิดปัญหาจากสภาพแวดล้อมและความเครียดทางไฟฟ้า จึงจำเป็นต้องมีการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซีลิกอนขึ้น เพื่อป้องกันการเกิดการเสื่อมอายุของยางซีลิกอน ดังนั้น จึงมีนักวิจัยหลาย ๆ ท่าน ได้ทำการศึกษาผลกระทบต่าง ๆ ที่มีต่อยางซีลิกอน ซึ่งได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2

บทที่ 3 เป็นการนำเสนอทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้องกับยางซีลิกอน โดยกล่าวถึงวิวัฒนาการของยางซีลิกอนตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โครงสร้างส่วนสำคัญต่าง ๆ ของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ โครงสร้างที่สำคัญของยางซีลิกอน รวมไปถึงกลไกการเสื่อมอายุของยางซีลิกอน เพื่อให้เข้าใจถึงโครงสร้างของยางซีลิกอนอย่างละเอียด นอกจากนี้ยังนำเสนอ ปัจจัยต่างๆ และปฏิกิริยาเคมีที่มีผลต่อการเสื่อมอายุของยางซีลิกอน ทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่มีผลต่อการเสื่อมอายุของยางซีลิกอน นอกจากนี้ ความเสียหายที่เกิดจากคุณสมบัติหยดน้ำ ลื่นเป็นตัวอย่างสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของซีลิกอน

บทที่ 4 เป็นการนำเสนอการสร้างชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซีลิกอน โดยอธิบายถึงการออกแบบชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุก่อนที่จะลงมือสร้าง ส่วนประกอบหลักที่ต้องใช้ในการสร้างชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ การออกแบบโครงสร้างเหล็กสำหรับฐานส่วนล่าง โครงสร้างเหล็กส่วนบน และถังสำหรับบรรจุน้ำเกลือ โดยมีจุดมุ่งหมายของการออกให้มีความแข็งแรงทนทาน และสามารถรองรับการทดสอบของยางซีลิกอนสำหรับลูกถ้วยฉนวน



ที่ใช้ในระบบส่งจ่ายและจำหน่ายได้ถึง 36 kV นอกจากนี้ ได้อธิบายการสร้างชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุขึ้นจากที่ได้ออกแบบไว้ และอธิบายถึงส่วนประกอบต่าง ๆ ที่ต้องใช้ในการติดตั้งชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ และการสร้างโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุวัดแรงดันกระแสสลับด้วย เพื่อให้เข้าใจถึงการสร้างชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนได้โดยละเอียด

บทที่ 5 เป็นการนำเสนอการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน ได้อธิบายถึงมาตรฐาน IEC Publ. 62217 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบยางซิลิโคน นอกจากนี้ ได้อธิบายถึงการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบยางซิลิโคน รวมไปถึงวิธีการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ ซึ่งในการทดสอบนี้ใช้ยางซิลิโคนในการทดสอบทั้งหมด 3 ชนิด คือ ยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนในระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 ยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนในระบบ 24 kV ชนิดที่ 2 และยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนในระบบ 36 kV ซึ่งแรงดันที่ใช้ทดสอบอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC Publ. 62217 ยกเว้นยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนในระบบ 36 kV ให้เป็นการทดสอบที่สภาพการใช้งานจริงเพียงชนิดเดียว เพื่อนำผลจากการทดสอบที่แรงดันทดสอบเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่แรงดันใช้งานจริง

บทที่ 6 ได้นำเสนอผลการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ โครงสร้างทางเคมี และโครงสร้างทางกายภาพของยางซิลิโคน โดยเปรียบเทียบผลการตรวจสอบของยางซิลิโคนที่ผ่านการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุกับยางซิลิโคนที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ซึ่งการตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพ เป็นการสังเกตการเกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแฉกเพิ่มขึ้นในระหว่างการทดสอบ การตรวจสอบด้วยสายตาถึงการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟ รูเจาะทะลุของปีกยางซิลิโคน และคราบสกปรกที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของซิลิโคนหลังจากเร่งการเสื่อมอายุ การลดลงของคุณสมบัติหยดน้ำดันทันโดยอ้างอิงจากคู่มือ STRI การคำนวณค่าความเปราะเปื้อนบนพื้นผิวของยางซิลิโคนโดยอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC Publ. 60507 ซึ่งพบว่าสภาพอากาศมีผลต่อความเปราะเปื้อนที่เกาะบนพื้นผิวของซิลิโคน ความแข็งที่เพิ่มขึ้นของพื้นผิวของซิลิโคนโดยใช้วิธีความแข็งวัดแบบ Shore ด้วยเครื่องมือ Shore durometer และการเพิ่มขึ้นของความขรุขระโดยวัดความขรุขระด้วยเครื่องมือวัดความขรุขระ นอกจากนี้การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วยเครื่อง FTIR เพื่อหาโครงสร้างพันธะเคมีเปลี่ยนแปลงของยางซิลิโคนหลังเร่งการเสื่อมอายุ พบว่า ปริมาณพันธะของ Si - CH<sub>3</sub> และ Si - O ลดลงอันเนื่องมาจากความเครียดทางไฟฟ้า ความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเล็ต ที่เกิดจากการดีสชาร์จ การตรวจสอบทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดแสดงให้เห็นพื้นผิวของยางซิลิโคนที่สึกกร่อน ซึ่งเกิดจากการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเมื่อยางซิลิโคนได้รับความเครียดทางไฟฟ้า ความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเล็ต จากการดีสชาร์จเป็นระยะเวลาอันส่งผลให้เกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟ และการสึกกร่อนของยางซิลิโคน

จากบทสรุปทั้ง 6 บทที่กล่าวข้างต้น สามารถยืนยันได้ว่า การเสื่อมอายุของยางซิลิโคนได้รับผลกระทบจากความเครียดทางสนามไฟฟ้า ความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเล็ต จากการทดสอบจริง ซึ่งผลจากการทดสอบลูกถ้วยฉนวนทั้ง 3 ชนิด มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน ทำให้ผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจ และสามารถยืนยันได้ด้วยการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีและโครงสร้างทางกายภาพของยางซิลิโคน

จากการดำเนินการทดสอบงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมา มีข้อเสนอแนะในการดำเนินการวิจัยวิทยานิพนธ์ดังนี้

1) ในการจ่ายแรงดันให้กับชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน ควรใช้เครื่องปรับแรงดันด้วยระบบดิจิทัลแทนที่ระบบควบคุมด้วยมนุษย์ เพื่อความถูกต้องและแม่นยำในการจ่ายแรงดันให้แก่ยางซิลิโคน

2) ควรทำการทดสอบให้ห้องที่ไม่มีผลกระทบจากอุณหภูมิภายนอก เช่น ห้องแอร์ เป็นต้น เนื่องจากว่าในการทดสอบแต่ละครั้งใช้ระยะเวลาในระดับอุณหภูมิไม่มีความสม่ำเสมอ ส่งผลต่อความความชื้นในอากาศ และปริมาณฝุ่นที่กระจายมีผลต่อความเปราะเปื้อนที่เกาะบนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ ทำให้ค่าความเปราะเปื้อนที่ได้ไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินการวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมาและผลที่ได้ให้เกิดแนวคิดและข้อเสนอแนะในการดำเนินการวิจัยต่อไปในอนาคต ดังต่อไปนี้

1) สามารถนำการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนไปใช้กับอุปกรณ์ในระบบส่งจ่ายและจำหน่ายชนิดอื่น ๆ เพื่อหาความคงทนของเนื้อสารได้

2) ควรศึกษาและวิจัยการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนในสภาวะอื่น ๆ เช่นการศึกษาเร่งการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนในความเข้มข้นของน้ำเกลือที่แตกต่างกัน การศึกษาการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนในความเครียดทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน เป็นต้น

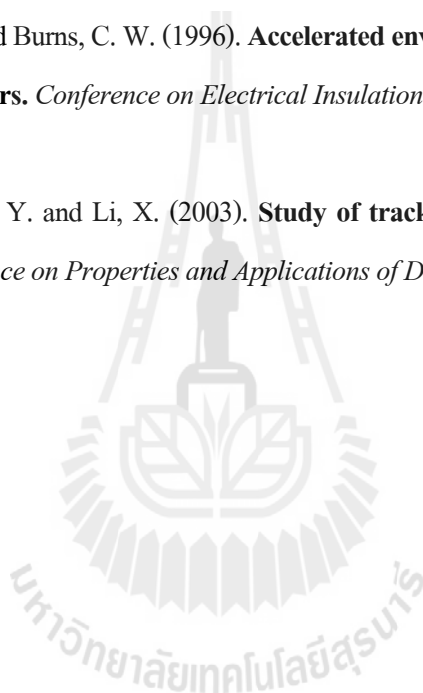
3) ควรศึกษาและวิจัยการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนในสภาวะการใช้งานจริงเปรียบเทียบกับสภาวะการทดสอบต่าง ๆ เพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้ ว่ามีความแตกต่างหรือเหมือนกันอย่างไร

## รายการอ้างอิง

- แม่น้ำ อมรสิทธิ์. (2534). **หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ.**
- สำราญ สังข์สะอาด. (2547). **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง (ฉบับปรับปรุง).**
- Amin, M. (2007). **Aging investigation of polymeric insulators. Doctoral thesis,** University of Engineering and Technology.
- Burnham, J., **Guideline for visual identification of damaged polymer insulators.**
- De Oliveira, S. M. and de Turreil, C. H. (1900). **Aging of distribution composite insulators under environmental and electrical stress. IEEE Transaction on Electrical and Insulation.** Vol. 5, No. 2, pp. 1074-7077.
- Frost, N. E., McGrath, P. B. and Burns, C. W. (2000). **Accelerated aging of insulators under acid rain conditions. IEEE International Symposium on Electrical Insulation.** pp. 197-200.
- Gorur, R. S., Montesinos, J., Varadadesikan, L. Simmos, S. and Shah, M. (1997). **A laboratory test for tracking and erosion resistance of HV outdoor insulation. Conference on Dielectric and Electrical insulation.** Vol. 4, No. 6, pp. 767-774.
- Han-Goo, C., Se-Won, H., Un-Yong, L., Suk-Su, K. and Kee-Joe, L. (2000). **Multi-aging test technology for estimating longtime performance of polymer insulators. Conference on Properties and Applications of Dielectric Phenomena.** Vol. 1, pp. 375-378.
- Hillborg, H. C. (2001). **Loss and recovery of Hydrophobicity of polydimethylsiloxane after exposure to electrical discharges.** Royal Institute of Technology.
- IEC 60507. (1991). **Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on a. c. system.**
- IEC 62217. (2002). **Polymeric insulators for indoor and outdoor use with a nominal voltage > 1000 V.** Ed. 1.0, Committed Draft.
- ISO 686. (1985). **Plastic and ebonite-Determination of indentation hardness by means of a durometer (shore hardness).**
- James, F. H. (1993). **History and bibliography of polymeric insulators for outdoor application. IEEE Transaction on Power Delivery.** Vol. 8, No. 1, pp. 376-385.

- Kamyar Fateh-Alavi, (2004). **Stabilizers in crosslinked polydimethylsiloxane**. Doctoral thesis, Stockholm University.
- Khan, Y. Z., Al-Arainy, A. A., Malik, N. H. and Qureshi, M. I. (2006). **Effect of thermo-electrical stresses and ultra-violet radiation on polymeric insulators**. King Saud University.
- Koshiro, Y., Nakagima, I. and Umeda, I. (1998). **Effect on the electrical properties of fillers in silicone rubber for outdoor insulation**. *Conference on Electrical Insulation material*. pp. 465-468.
- Kumagai, S. and Yoshimura, N. (2003). **Tracking and erosion resistance stability of highly filled silicone and alloy materials against electrical and environmental stress**. *IEEE Transmission and distribution*. Vol. 150, No. 4, pp. 392-398.
- Kumagai, S. and Yoshimura, N. (2004) **Polydimethylsiloxane and aluminatrihydrate system subject to dry-band discharges or high temperature part II: electrical stress**. *IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation*. Vol. 11, No. 4, pp. 701.707.
- Laurea, T. D. (2010/2011). **Tracking wheel test for DC polymeric insulators**.
- Marungsri, B., Watanabe, S., Gautum, B. K., Shinokubo, H., Matsuoka, R. and Kumagai, S. (2004) **Effect of test conditions on ageing deterioration of silicone rubber housing material for outdoor polymer insulators**. *Conference on Solid Dielectric*. Vol. 1, pp. 324-327.
- Marungsri, B., Shinokubo, H., Matsuoka, R. and Kumagai, S. (2006). **Effect of specimen configuration on deterioration of silicone rubber for polymer insulators in salt fog ageing test**. *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*. Vol. 13, No. 1, pp. 129-138.
- Marungsri, B. (2006). **Fundamental investigation on salt fog ageing test of silicone rubber housing materials for outdoor polymer insulators**. Doctoral thesis, Chubu University.
- McGrath, P. B. Crudele, F. D. and Burns, C. W. (2002). **Accelerated aging of polymer insulators**. *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. pp. 379-382.
- Muncivi, A., Saekar, P. and Haddad, A. (2009). **Tracking wheel test facilities**. *Conference on Universities Power Engineering*. pp. 1-5.

- Sampe, T., Hirayama, T. Ito, M. Kubota, T., Matsumoto, T., Yaeguchi, M., Marungsri, B., Shinikubo, H., Matsuoka, R., Zhou, J. G. and Zhang, Y. (2004). **Fundamental investigation results of diagnostic technique for deteriorated polymer insulators.** *Conference on Electrical Insulation*. pp. 288-291.
- STRI Guide. (1992). **Hydrophobicity classification guide.**
- Vas, J. V., Venkatesulu, B. and Thomas, M. J. (2010). **Tracking and erosion resistance of silicone rubber nanocomposites under positive and negative dc voltages.** *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. pp. 1-4.
- Xu, G., McGrath, P. B. and Burns, C. W. (1996). **Accelerated environmental and electrical aging of polymer insulators.** *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. Vol. 1, pp. 404-407.
- Yin, Y., Liang, X., Zhou, Y. and Li, X. (2003). **Study of tracking wheel test method under DC voltage.** *Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*. pp. 439-442.

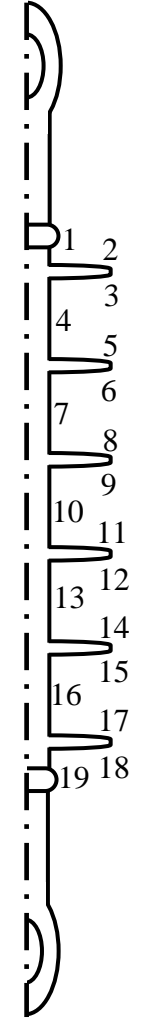




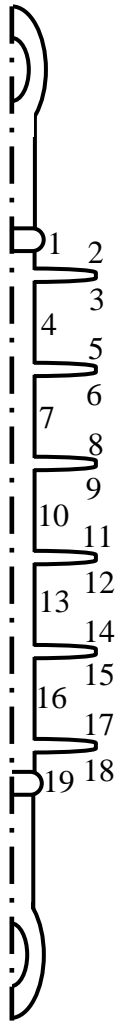
ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบ

ตารางที่ ก.1 คุณสมบัติหยดน้ำลื่นของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์  
ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1

| ตำแหน่ง | ระดับคุณสมบัติหยดน้ำลื่น |              |          |          |          |          |          | ตำแหน่ง<br>ข้อป้อนแรงดัน   |
|---------|--------------------------|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|--|
|         | ก่อนทดสอบ                | หลังการทดสอบ |          |          |          |          |          |  |
|         |                          | ตัวที่ 1     | ตัวที่ 2 | ตัวที่ 3 | ตัวที่ 4 | ตัวที่ 5 | ตัวที่ 6 |  |
| 1       | HC 1                     | HC 4         | HC 4     | HC 3     | HC 3     | HC 3     | HC 5     |  |
| 2       | HC 1                     | HC 3         | HC 3     | HC 3     | HC 3     | HC 3     | HC 3     |  |
| 3       | HC 1                     | HC 3         | HC 3     | HC 2     | HC 3     | HC 4     | HC 2     |  |
| 4       | HC 1                     | HC 3         | HC 3     | HC 3     | HC 3     | HC 5     | HC 4     |  |
| 5       | HC 1                     | HC 3         | HC 3     | HC 3     | HC 2     | HC 4     | HC 4     |  |
| 6       | HC 1                     | HC 4         | HC 2     | HC 4     | HC 3     | HC 3     | HC 3     |  |
| 7       | HC 1                     | HC 3         | HC 3     | HC 3     | HC 3     | HC 5     | HC 4     |  |
| 8       | HC 1                     | HC 3         | HC 3     | HC 3     | HC 3     | HC 3     | HC 4     |  |
| 9       | HC 1                     | HC 3         | HC 3     | HC 3     | HC 4     | HC 3     | HC 3     |  |
| 10      | HC 1                     | HC 3         | HC 3     | HC 3     | HC 3     | HC 5     | HC 4     |  |
| 11      | HC 1                     | HC 3         | HC 3     | HC 3     | HC 3     | HC 4     | HC 4     |  |
| 12      | HC 1                     | HC 3         | HC 2     | HC 4     | HC 4     | HC 3     | HC 3     |  |
| 13      | HC 1                     | HC 3         | HC 3     | HC 3     | HC 3     | HC 3     | HC 3     |  |
| 14      | HC 1                     | HC 3         | HC 3     | HC 3     | HC 3     | HC 4     | HC 3     |  |
| 15      | HC 1                     | HC 3         | HC 2     | HC 4     | HC 3     | HC 3     | HC 3     |  |
| 16      | HC 1                     | HC 3         | HC 3     | HC 3     | HC 3     | HC 4     | HC 3     |  |
| 17      | HC 1                     | HC 3         | HC 3     | HC 3     | HC 3     | HC 3     | HC 3     |  |
| 18      | HC 1                     | HC 4         | HC 2     | HC 3     | HC 3     | HC 4     | HC 3     |  |
| 19      | HC 1                     | HC 3         | HC 3     | HC 3     | HC 3     | HC 3     | HC 3     |  |

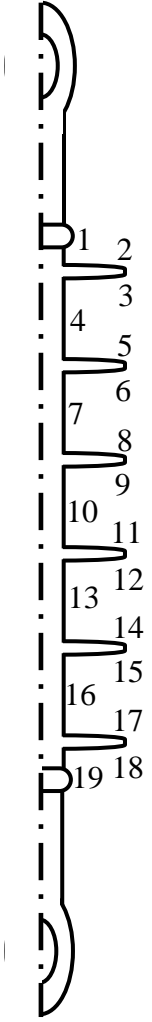
ตารางที่ ก.2 คุณสมบัติหยดน้ำลื่นของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์  
ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 จากการทดสอบในน้ำเปล่า

| ตำแหน่ง | ระดับคุณสมบัติหยดน้ำลื่น |                |          |          |          | ตำแหน่ง<br>ขั้วป้อนแรงดัน  |
|---------|--------------------------|----------------|----------|----------|----------|--|
|         | ก่อนการทดสอบ             | ขั้วป้อนแรงดัน |          |          |          |  |
|         |                          | ตัวที่ 1       | ตัวที่ 2 | ตัวที่ 3 | ตัวที่ 4 |  |
| 1       | HC 1                     | HC 2           | HC 4     | HC 5     | HC 4     |  |
| 2       | HC 1                     | HC 3           | HC 2     | HC 2     | HC 3     |  |
| 3       | HC 1                     | HC 2           | HC 2     | HC 3     | HC 3     |  |
| 4       | HC 1                     | HC 5           | HC 5     | HC 5     | HC 4     |  |
| 5       | HC 1                     | HC 2           | HC 2     | HC 2     | HC 3     |  |
| 6       | HC 1                     | HC 2           | HC 2     | HC 3     | HC 3     |  |
| 7       | HC 1                     | HC 5           | HC 5     | HC 4     | HC 4     |  |
| 8       | HC 1                     | HC 4           | HC 2     | HC 2     | HC 3     |  |
| 9       | HC 1                     | HC 2           | HC 3     | HC 3     | HC 3     |  |
| 10      | HC 1                     | HC 5           | HC 4     | HC 5     | HC 5     |  |
| 11      | HC 1                     | HC 2           | HC 2     | HC 2     | HC 3     |  |
| 12      | HC 1                     | HC 2           | HC 2     | HC 3     | HC 3     |  |
| 13      | HC 1                     | HC 4           | HC 4     | HC 4     | HC 5     |  |
| 14      | HC 1                     | HC 3           | HC 2     | HC 3     | HC 3     |  |
| 15      | HC 1                     | HC 2           | HC 2     | HC 3     | HC 4     |  |
| 16      | HC 1                     | HC 5           | HC 4     | HC 5     | HC 5     |  |
| 17      | HC 1                     | HC 2           | HC 2     | HC 3     | HC 3     |  |
| 18      | HC 1                     | HC 2           | HC 2     | HC 3     | HC 3     |  |
| 19      | HC 1                     | HC 5           | HC 5     | HC 5     | HC 5     |  |

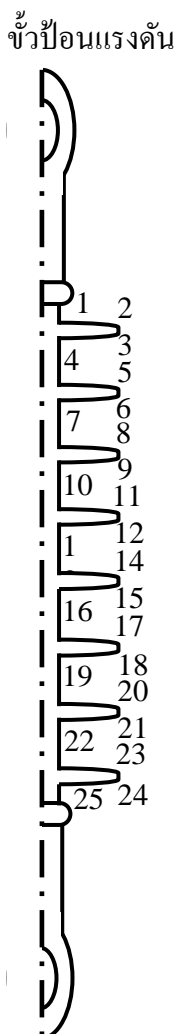
ขั้วต่อลงดิน



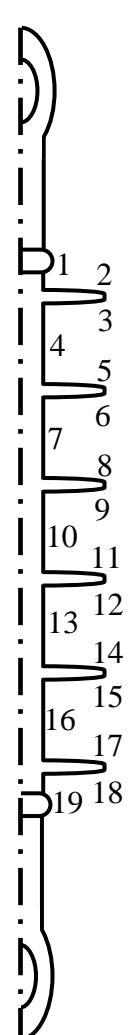
ตารางที่ ก.3 คุณสมบัติหยดน้ำลื่นของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์  
ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2

| ตำแหน่ง | ระดับคุณสมบัติหยดน้ำลื่น |              |          | ตำแหน่ง<br>ข้อป้อนแรงดัน   |
|---------|--------------------------|--------------|----------|--|
|         | ก่อนการทดสอบ             | หลังการทดสอบ |          |  |
|         |                          | ตัวที่ 1     | ตัวที่ 2 |  |
| 1       | HC 1                     | HC 3         | HC 4     |  |
| 2       | HC 1                     | HC 4         | HC 4     |  |
| 3       | HC 1                     | HC 3         | HC 3     |  |
| 4       | HC 1                     | HC 5         | HC 5     |  |
| 5       | HC 1                     | HC 4         | HC 4     |  |
| 6       | HC 1                     | HC 3         | HC 3     |  |
| 7       | HC 1                     | HC 4         | HC 5     |  |
| 8       | HC 1                     | HC 4         | HC 4     |  |
| 9       | HC 1                     | HC 3         | HC 3     |  |
| 10      | HC 1                     | HC 5         | HC 5     |  |
| 11      | HC 1                     | HC 4         | HC 4     |  |
| 12      | HC 1                     | HC 3         | HC 3     |  |
| 13      | HC 1                     | HC 5         | HC 5     |  |
| 14      | HC 1                     | HC 4         | HC 4     |  |
| 15      | HC 1                     | HC 3         | HC 2     |  |
| 16      | HC 1                     | HC 5         | HC 4     |  |
| 17      | HC 1                     | HC 4         | HC 4     |  |
| 18      | HC 1                     | HC 3         | HC 2     |  |
| 19      | HC 1                     | HC 4         | HC 4     |  |

ตารางที่ ก.4 คุณสมบัติหยดน้ำลื่นของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 36 kV

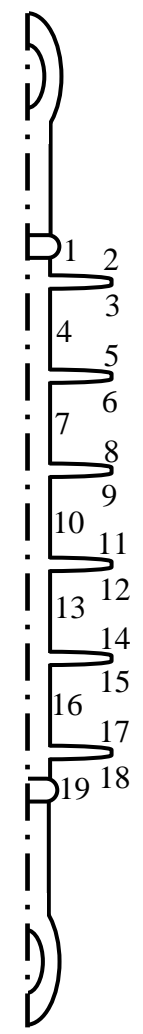
| ตำแหน่ง | ระดับคุณสมบัติหยดน้ำลื่น |                |          |          |          | ตำแหน่ง  |
|---------|--------------------------|----------------|----------|----------|----------|--|
|         | ก่อนการทดสอบ             | ขั้วป้อนแรงดัน |          |          |          |  |
|         |                          | ตัวที่ 1       | ตัวที่ 2 | ตัวที่ 3 | ตัวที่ 4 |  |
| 1       | HC 1                     | HC 4           | HC 3     | HC 4     | HC 3     |  |
| 2       | HC 1                     | HC 3           | HC 2     | HC 3     | HC 3     |  |
| 3       | HC 1                     | HC 2           | HC 2     | HC 4     | HC 2     |  |
| 4       | HC 1                     | HC 3           | HC 4     | HC 3     | HC 3     |  |
| 5       | HC 1                     | HC 2           | HC 2     | HC 2     | HC 4     |  |
| 6       | HC 1                     | HC 2           | HC 2     | HC 5     | HC 2     |  |
| 7       | HC 1                     | HC 3           | HC 4     | HC 4     | HC 4     |  |
| 8       | HC 1                     | HC 2           | HC 2     | HC 3     | HC 4     |  |
| 9       | HC 1                     | HC 3           | HC 2     | HC 5     | HC 2     |  |
| 10      | HC 1                     | HC 3           | HC 4     | HC 4     | HC 4     |  |
| 11      | HC 1                     | HC 3           | HC 3     | HC 3     | HC 3     |  |
| 12      | HC 1                     | HC 2           | HC 2     | HC 3     | HC 2     |  |
| 13      | HC 1                     | HC 3           | HC 4     | HC 4     | HC 4     |  |
| 14      | HC 1                     | HC 3           | HC 4     | HC 3     | HC 4     |  |
| 15      | HC 1                     | HC 2           | HC 2     | HC 4     | HC 3     |  |
| 16      | HC 1                     | HC 3           | HC 3     | HC 3     | HC 4     |  |
| 17      | HC 1                     | HC 3           | HC 3     | HC 2     | HC 4     |  |
| 18      | HC 1                     | HC 2           | HC 2     | HC 4     | HC 2     |  |
| 19      | HC 1                     | HC 3           | HC 3     | HC 3     | HC 4     |  |
| 20      | HC 1                     | HC 3           | HC 3     | HC 2     | HC 4     |  |
| 21      | HC 1                     | HC 2           | HC 2     | HC 3     | HC 2     |  |
| 22      | HC 1                     | HC 3           | HC 4     | HC 3     | HC 4     |  |
| 23      | HC 1                     | HC 3           | HC 3     | HC 3     | HC 4     |  |
| 24      | HC 1                     | HC 2           | HC 2     | HC 2     | HC 2     |  |
| 25      | HC 1                     | HC 4           | HC 3     | HC 3     | HC 4     |  |

ตารางที่ ก.5 ค่าความแข็งเฉลี่ยของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV  
ชนิดที่ 1

| ตำแหน่ง | ค่าความแข็ง (Shore A) |              |             |             |             |             |             | ตำแหน่ง<br>ข้อป้อนแรงดัน   |
|---------|-----------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|
|         | ก่อนทดสอบ             | หลังการทดสอบ |             |             |             |             |             |  |
|         |                       | ตัวที่<br>1  | ตัวที่<br>2 | ตัวที่<br>3 | ตัวที่<br>4 | ตัวที่<br>5 | ตัวที่<br>6 |  |
| 1       | 38.46                 | 51.70        | 51.68       | 50.72       | 49.20       | 51.68       | 52.80       |  |
| 2       | 38.46                 | 61.20        | 64.64       | 60.96       | 52.96       | 61.36       | 63.04       |  |
| 3       | 38.46                 | 63.12        | 64.80       | 62.56       | 51.52       | 61.52       | 63.28       |  |
| 4       | 38.46                 | 50.24        | 50.88       | 51.36       | 49.68       | 42.16       | 50.40       |  |
| 5       | 38.46                 | 62.80        | 63.76       | 62.64       | 51.04       | 62.48       | 63.12       |  |
| 6       | 38.46                 | 60.64        | 64.08       | 63.12       | 52.48       | 62.56       | 63.52       |  |
| 7       | 38.46                 | 50.40        | 49.76       | 51.12       | 49.52       | 42.56       | 47.92       |  |
| 8       | 38.46                 | 62.64        | 63.20       | 62.88       | 53.44       | 61.84       | 61.84       |  |
| 9       | 38.46                 | 62.96        | 63.36       | 62.72       | 53.36       | 61.92       | 62.72       |  |
| 10      | 38.46                 | 49.28        | 50.72       | 51.36       | 50.48       | 42.40       | 51.28       |  |
| 11      | 38.46                 | 62.40        | 63.76       | 63.28       | 51.44       | 62.40       | 62.80       |  |
| 12      | 38.46                 | 62.24        | 63.68       | 63.04       | 54.08       | 62.48       | 62.96       |  |
| 13      | 38.46                 | 53.04        | 50.16       | 52.08       | 50.56       | 43.28       | 46.00       |  |
| 14      | 38.46                 | 62.72        | 64.08       | 62.72       | 54.24       | 62.16       | 62.80       |  |
| 15      | 38.46                 | 63.20        | 64.08       | 63.44       | 51.52       | 61.76       | 62.64       |  |
| 16      | 38.46                 | 48.96        | 51.44       | 51.12       | 50.72       | 47.12       | 46.64       |  |
| 17      | 38.46                 | 62.80        | 63.08       | 63.36       | 51.20       | 62.96       | 63.20       |  |
| 18      | 38.46                 | 63.12        | 63.84       | 63.12       | 54.64       | 63.20       | 62.88       |  |
| 19      | 38.46                 | 50.72        | 50.56       | 51.04       | 50.56       | 54.24       | 52.64       |  |

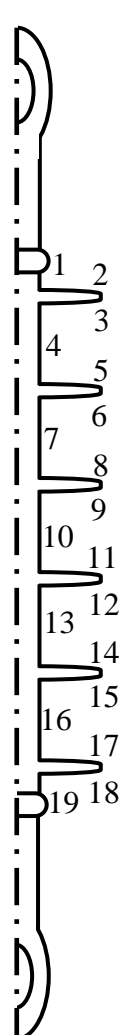
ข้อต่อลงดิน

ตารางที่ ก.6 ค่าความแข็งเฉลี่ยของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV  
ชนิดที่ 1 จากการทดสอบในน้ำเปล่า

| ตำแหน่ง | ค่าความแข็ง (Shore A) |              |          |          |          | ตำแหน่ง<br>ขั้วป้อนแรงดัน  |
|---------|-----------------------|--------------|----------|----------|----------|--|
|         | ก่อนการทดสอบ          | หลังการทดสอบ |          |          |          |  |
|         |                       | ตัวที่ 1     | ตัวที่ 2 | ตัวที่ 3 | ตัวที่ 4 |  |
| 1       | 38.46                 | 50.64        | 50.96    | 53.52    | 53.66    |  |
| 2       | 38.46                 | 57.28        | 58.24    | 57.84    | 58.24    |  |
| 3       | 38.46                 | 57.60        | 57.36    | 58.08    | 57.84    |  |
| 4       | 38.46                 | 49.68        | 50.64    | 52.72    | 55.20    |  |
| 5       | 38.46                 | 56.80        | 56.48    | 57.04    | 57.68    |  |
| 6       | 38.46                 | 56.16        | 57.20    | 54.88    | 57.92    |  |
| 7       | 38.46                 | 49.92        | 52.80    | 51.76    | 53.04    |  |
| 8       | 38.46                 | 56.80        | 56.24    | 56.48    | 57.28    |  |
| 9       | 38.46                 | 56.64        | 57.20    | 56.80    | 56.96    |  |
| 10      | 38.46                 | 49.44        | 50.96    | 52.32    | 52.08    |  |
| 11      | 38.46                 | 57.52        | 55.44    | 56.88    | 57.84    |  |
| 12      | 38.46                 | 57.36        | 56.56    | 56.88    | 57.52    |  |
| 13      | 38.46                 | 50.24        | 51.12    | 52.00    | 50.4     |  |
| 14      | 38.46                 | 57.36        | 56.24    | 56.64    | 58.00    |  |
| 15      | 38.46                 | 58.00        | 56.48    | 56.80    | 58.00    |  |
| 16      | 38.46                 | 49.92        | 52.40    | 51.92    | 51.04    |  |
| 17      | 38.46                 | 57.52        | 57.20    | 57.68    | 57.52    |  |
| 18      | 38.46                 | 57.52        | 57.52    | 57.60    | 57.12    |  |
| 19      | 38.46                 | 54.40        | 55.84    | 54.88    | 55.28    |  |

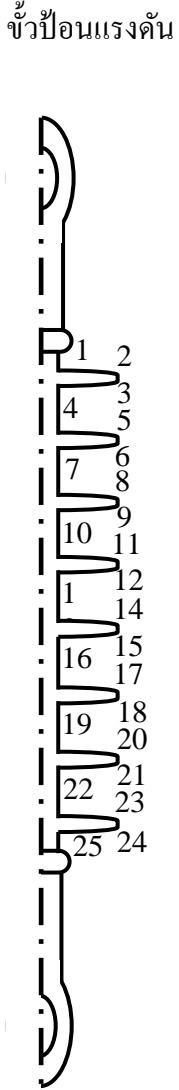
ขั้วต่อลงดิน

ตารางที่ ก.7 ค่าความแข็งเฉลี่ยของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 24 kV  
ชนิดที่ 2

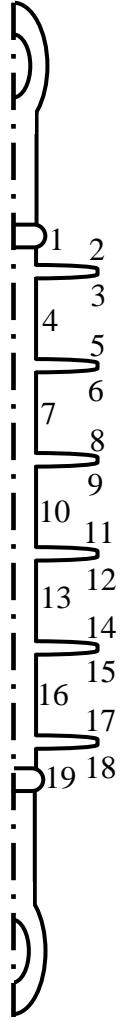
| ตำแหน่ง | ค่าความแข็ง (Shore A) |              |          | ตำแหน่ง<br>ข้อป้อนแรงดัน   |
|---------|-----------------------|--------------|----------|--|
|         | ก่อนการทดสอบ          | หลังการทดสอบ |          |  |
|         |                       | ตัวที่ 1     | ตัวที่ 2 |  |
| 1       | 43.36                 | 52.24        | 55.20    |  |
| 2       | 43.36                 | 56.96        | 56.88    |  |
| 3       | 43.36                 | 50.80        | 53.36    |  |
| 4       | 43.36                 | 49.76        | 48.48    |  |
| 5       | 43.36                 | 53.04        | 54.32    |  |
| 6       | 43.36                 | 57.76        | 56.40    |  |
| 7       | 43.36                 | 50.32        | 48.24    |  |
| 8       | 43.36                 | 57.84        | 56.64    |  |
| 9       | 43.36                 | 51.28        | 52.40    |  |
| 10      | 43.36                 | 50.32        | 48.24    |  |
| 11      | 43.36                 | 54.72        | 55.60    |  |
| 12      | 43.36                 | 58.16        | 55.36    |  |
| 13      | 43.36                 | 47.20        | 46.96    |  |
| 14      | 43.36                 | 58.64        | 57.04    |  |
| 15      | 43.36                 | 54.16        | 55.20    |  |
| 16      | 43.36                 | 49.04        | 54.56    |  |
| 17      | 43.36                 | 56.96        | 54.56    |  |
| 18      | 43.36                 | 53.04        | 56.80    |  |
| 19      | 43.36                 | 54.16        | 50.64    |  |

ข้อต่อลงดิน

ตารางที่ ก.8 ค่าความแข็งเฉลี่ยของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 36 kV

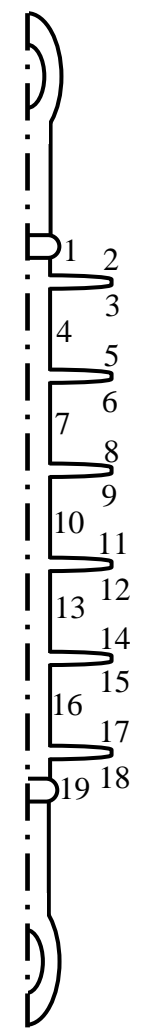
| ตำแหน่ง | ค่าความแข็ง (Shore A) |              |          |          |          | ตำแหน่ง  |
|---------|-----------------------|--------------|----------|----------|----------|--|
|         | ก่อนการทดสอบ          | หลังการทดสอบ |          |          |          |  |
|         |                       | ตัวที่ 1     | ตัวที่ 2 | ตัวที่ 3 | ตัวที่ 4 |  |
| 1       | 38.08                 | 46.40        | 49.28    | 50.64    | 49.68    |  |
| 2       | 38.08                 | 57.28        | 42.40    | 50.72    | 43.92    |  |
| 3       | 38.08                 | 56.96        | 42.16    | 54.72    | 43.84    |  |
| 4       | 38.08                 | 47.12        | 40.72    | 51.72    | 49.36    |  |
| 5       | 38.08                 | 56.40        | 42.32    | 51.68    | 40.16    |  |
| 6       | 38.08                 | 54.56        | 42.96    | 54.24    | 40.72    |  |
| 7       | 38.08                 | 47.84        | 47.20    | 54.72    | 49.60    |  |
| 8       | 38.08                 | 55.36        | 43.12    | 54.96    | 44.32    |  |
| 9       | 38.08                 | 56.72        | 42.96    | 55.44    | 40.88    |  |
| 10      | 38.08                 | 48.96        | 46.96    | 48.32    | 40.48    |  |
| 11      | 38.08                 | 56.56        | 43.68    | 55.12    | 43.44    |  |
| 12      | 38.08                 | 53.60        | 43.36    | 55.60    | 43.92    |  |
| 13      | 38.08                 | 51.20        | 46.08    | 49.44    | 40.00    |  |
| 14      | 38.08                 | 56.08        | 42.08    | 55.76    | 44.00    |  |
| 15      | 38.08                 | 55.20        | 42.64    | 55.84    | 42.96    |  |
| 16      | 38.08                 | 49.12        | 45.04    | 45.68    | 40.08    |  |
| 17      | 38.08                 | 57.04        | 43.52    | 55.04    | 44.16    |  |
| 18      | 38.08                 | 55.52        | 43.84    | 56.00    | 44.00    |  |
| 19      | 38.08                 | 53.28        | 47.76    | 47.68    | 40.80    |  |
| 20      | 38.08                 | 55.92        | 43.36    | 55.92    | 44.40    |  |
| 21      | 38.08                 | 56.40        | 42.72    | 55.60    | 44.08    |  |
| 22      | 38.08                 | 52.40        | 47.84    | 51.04    | 41.04    |  |
| 23      | 38.08                 | 56.16        | 44.08    | 56.32    | 44.24    |  |
| 24      | 38.08                 | 55.20        | 42.96    | 55.84    | 44.00    |  |
| 25      | 38.08                 | 52.24        | 43.04    | 49.20    | 42.16    |  |

ตารางที่ ก.9 ความขรุขระเฉลี่ยของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์  
ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1

| ตำแหน่ง | ความขรุขระ ( $\mu\text{m}$ ) |              |             |             |             |             |             | ตำแหน่ง<br>ข้อป้อนแรงดัน   |
|---------|------------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|
|         | ก่อนทดสอบ                    | หลังการทดสอบ |             |             |             |             |             |  |
|         |                              | ตัวที่<br>1  | ตัวที่<br>2 | ตัวที่<br>3 | ตัวที่<br>4 | ตัวที่<br>5 | ตัวที่<br>6 |  |
| 1       | 0.22                         | 0.76         | 0.87        | 0.90        | 0.87        | 1.32        | 1.66        |  |
| 2       | 0.22                         | 0.35         | 0.35        | 0.31        | 0.30        | 0.36        | 0.74        |  |
| 3       | 0.22                         | 0.33         | 0.39        | 0.32        | 0.31        | 0.40        | 0.37        |  |
| 4       | 0.22                         | 0.60         | 0.76        | 0.73        | 0.34        | 1.18        | 1.64        |  |
| 5       | 0.22                         | 0.38         | 0.38        | 0.30        | 0.38        | 0.37        | 0.39        |  |
| 6       | 0.22                         | 0.22         | 0.32        | 0.36        | 0.37        | 0.36        | 0.36        |  |
| 7       | 0.22                         | 0.40         | 0.54        | 0.71        | 0.30        | 0.93        | 1.39        |  |
| 8       | 0.22                         | 0.36         | 0.38        | 0.37        | 0.30        | 0.48        | 0.45        |  |
| 9       | 0.22                         | 0.34         | 0.36        | 0.33        | 0.31        | 0.31        | 0.42        |  |
| 10      | 0.22                         | 0.33         | 0.39        | 0.59        | 0.35        | 1.14        | 1.01        |  |
| 11      | 0.22                         | 0.39         | 0.38        | 0.37        | 0.35        | 0.54        | 0.37        |  |
| 12      | 0.22                         | 0.35         | 0.38        | 0.39        | 0.31        | 0.35        | 0.35        |  |
| 13      | 0.22                         | 0.35         | 0.39        | 0.43        | 0.41        | 1.10        | 1.19        |  |
| 14      | 0.22                         | 0.35         | 0.38        | 0.35        | 0.34        | 0.63        | 0.34        |  |
| 15      | 0.22                         | 0.35         | 0.32        | 0.38        | 0.37        | 0.57        | 0.39        |  |
| 16      | 0.22                         | 0.55         | 0.40        | 0.49        | 0.48        | 0.69        | 0.92        |  |
| 17      | 0.22                         | 0.35         | 0.30        | 0.30        | 0.34        | 0.54        | 0.41        |  |
| 18      | 0.22                         | 0.32         | 0.37        | 0.36        | 0.39        | 0.35        | 0.43        |  |
| 19      | 0.22                         | 0.82         | 0.78        | 0.78        | 0.81        | 1.40        | 1.55        |  |

ข้อต่อลงดิน

ตารางที่ ก.10 ความขรุขระเฉลี่ยของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์  
ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 จากการทดสอบในน้ำเปล่า

| ตำแหน่ง | ค่าความแข็ง (Shore A) |              |          |          |          | ตำแหน่ง<br>ขั้วป้อนแรงดัน  |
|---------|-----------------------|--------------|----------|----------|----------|--|
|         | ก่อนการทดสอบ          | หลังการทดสอบ |          |          |          |  |
|         |                       | ตัวที่ 1     | ตัวที่ 2 | ตัวที่ 3 | ตัวที่ 4 |  |
| 1       | 0.22                  | 1.60         | 1.29     | 1.63     | 1.31     |  |
| 2       | 0.22                  | 0.68         | 0.56     | 0.45     | 0.45     |  |
| 3       | 0.22                  | 0.62         | 0.51     | 0.43     | 0.55     |  |
| 4       | 0.22                  | 1.17         | 1.24     | 1.51     | 1.21     |  |
| 5       | 0.22                  | 0.65         | 0.49     | 0.46     | 0.48     |  |
| 6       | 0.22                  | 0.66         | 0.40     | 0.46     | 0.51     |  |
| 7       | 0.22                  | 1.46         | 1.24     | 1.29     | 1.18     |  |
| 8       | 0.22                  | 0.68         | 0.47     | 0.42     | 0.64     |  |
| 9       | 0.22                  | 0.55         | 0.49     | 0.39     | 0.48     |  |
| 10      | 0.22                  | 1.56         | 1.18     | 1.41     | 1.14     |  |
| 11      | 0.22                  | 0.53         | 0.33     | 0.50     | 0.58     |  |
| 12      | 0.22                  | 0.56         | 0.46     | 0.48     | 0.47     |  |
| 13      | 0.22                  | 1.19         | 1.33     | 1.27     | 1.34     |  |
| 14      | 0.22                  | 0.47         | 0.39     | 0.52     | 0.54     |  |
| 15      | 0.22                  | 0.47         | 0.33     | 0.43     | 0.54     |  |
| 16      | 0.22                  | 1.42         | 1.31     | 1.36     | 1.35     |  |
| 17      | 0.22                  | 0.52         | 0.42     | 0.52     | 0.53     |  |
| 18      | 0.22                  | 0.56         | 0.52     | 0.51     | 0.55     |  |
| 19      | 0.22                  | 1.66         | 1.36     | 1.75     | 1.94     |  |

ขั้วต่อลงดิน

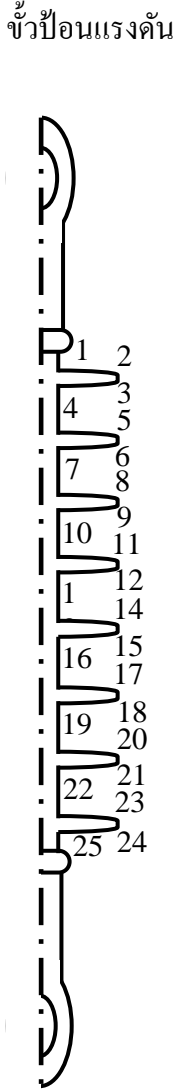


ตารางที่ ก.11 ความขรุขระเฉลี่ยของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์  
ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2

| ตำแหน่ง | ความขรุขระ ( $\mu\text{m}$ ) |              |          | ตำแหน่ง<br>ข้อป้อนแรงดัน |
|---------|------------------------------|--------------|----------|--------------------------|
|         | ก่อนการทดสอบ                 | หลังการทดสอบ |          |                          |
|         |                              | ตัวที่ 1     | ตัวที่ 2 |                          |
| 1       | 0.26                         | 1.43         | 1.56     |                          |
| 2       | 0.26                         | 0.61         | 0.59     |                          |
| 3       | 0.26                         | 0.51         | 0.45     |                          |
| 4       | 0.26                         | 1.34         | 0.94     |                          |
| 5       | 0.26                         | 0.65         | 0.55     |                          |
| 6       | 0.26                         | 0.75         | 0.58     |                          |
| 7       | 0.26                         | 1.54         | 0.91     |                          |
| 8       | 0.26                         | 0.48         | 0.52     |                          |
| 9       | 0.26                         | 0.48         | 0.74     |                          |
| 10      | 0.26                         | 0.85         | 0.82     |                          |
| 11      | 0.26                         | 0.61         | 0.65     |                          |
| 12      | 0.26                         | 0.58         | 0.56     |                          |
| 13      | 0.26                         | 0.77         | 0.70     |                          |
| 14      | 0.26                         | 0.64         | 0.41     |                          |
| 15      | 0.26                         | 0.45         | 0.41     |                          |
| 16      | 0.26                         | 0.97         | 0.76     |                          |
| 17      | 0.26                         | 0.59         | 0.44     |                          |
| 18      | 0.26                         | 0.45         | 0.76     |                          |
| 19      | 0.26                         | 1.54         | 1.04     |                          |

ข้อต่อลงดิน

ตารางที่ ก.12 ความขรุขระเฉลี่ยของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 36 kV

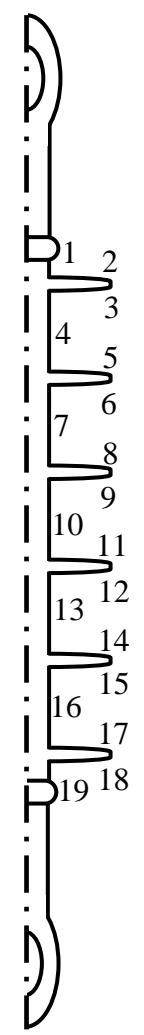
| ตำแหน่ง | ความขรุขระ ( $\mu\text{m}$ ) |                |          |          |          | ตำแหน่ง  |
|---------|------------------------------|----------------|----------|----------|----------|--|
|         | ก่อนการทดสอบ                 | ขั้วป้อนแรงดัน |          |          |          |  |
|         |                              | ตัวที่ 1       | ตัวที่ 2 | ตัวที่ 3 | ตัวที่ 4 |  |
| 1       | 0.28                         | 0.64           | 0.90     | 1.52     | 0.97     |  |
| 2       | 0.28                         | 0.68           | 1.46     | 1.14     | 1.17     |  |
| 3       | 0.28                         | 0.99           | 1.79     | 1.12     | 1.00     |  |
| 4       | 0.28                         | 1.34           | 1.20     | 0.54     | 0.99     |  |
| 5       | 0.28                         | 0.69           | 0.78     | 1.24     | 1.27     |  |
| 6       | 0.28                         | 0.54           | 0.64     | 1.36     | 0.71     |  |
| 7       | 0.28                         | 1.64           | 1.50     | 0.59     | 0.54     |  |
| 8       | 0.28                         | 0.46           | 0.54     | 1.85     | 1.82     |  |
| 9       | 0.28                         | 0.50           | 0.56     | 1.25     | 1.79     |  |
| 10      | 0.28                         | 1.05           | 1.38     | 0.87     | 1.29     |  |
| 11      | 0.28                         | 0.77           | 0.51     | 1.03     | 1.73     |  |
| 12      | 0.28                         | 0.40           | 0.52     | 1.03     | 1.48     |  |
| 13      | 0.28                         | 0.51           | 1.76     | 0.72     | 0.91     |  |
| 14      | 0.28                         | 0.48           | 0.63     | 1.81     | 1.84     |  |
| 15      | 0.28                         | 0.91           | 0.54     | 1.58     | 1.64     |  |
| 16      | 0.28                         | 0.39           | 0.44     | 0.60     | 0.65     |  |
| 17      | 0.28                         | 0.99           | 0.77     | 1.22     | 0.94     |  |
| 18      | 0.28                         | 1.06           | 0.36     | 1.67     | 2.40     |  |
| 19      | 0.28                         | 0.67           | 0.41     | 0.62     | 0.47     |  |
| 20      | 0.28                         | 0.71           | 0.44     | 1.01     | 1.90     |  |
| 21      | 0.28                         | 0.79           | 0.90     | 1.57     | 1.35     |  |
| 22      | 0.28                         | 0.58           | 0.66     | 0.62     | 0.53     |  |
| 23      | 0.28                         | 1.27           | 0.72     | 2.08     | 2.08     |  |
| 24      | 0.28                         | 1.78           | 1.08     | 1.37     | 1.87     |  |
| 25      | 0.28                         | 0.85           | 1.62     | 1.81     | 1.99     |  |

ตารางที่ ก.13 การลดลงของ Si-CH<sub>3</sub> ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์  
ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1

| ตำแหน่ง | Si - CH <sub>3</sub> ที่ลดลง (%) |              |             |             |             |             |             | ตำแหน่ง<br>ข้อป้อนแรงดัน |
|---------|----------------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------------------|
|         | ก่อนทดสอบ                        | หลังการทดสอบ |             |             |             |             |             |                          |
|         |                                  | ตัวที่<br>1  | ตัวที่<br>2 | ตัวที่<br>3 | ตัวที่<br>4 | ตัวที่<br>5 | ตัวที่<br>6 |                          |
| 1       | 100                              | 45.94        | 44.53       | 45.07       | 60.15       | 50.44       | 46.22       |                          |
| 2       | 100                              | 15.21        | 16.88       | 18.18       | 14.45       | 22.24       | 19.37       |                          |
| 3       | 100                              | 13.76        | 11.23       | 13.86       | 16.03       | 20.93       | 13.89       |                          |
| 4       | 100                              | 35.60        | 57.69       | 36.89       | 36.74       | 40.96       | 58.94       |                          |
| 5       | 100                              | 13.86        | 22.39       | 20.19       | 20.13       | 21.00       | 24.67       |                          |
| 6       | 100                              | 10.33        | 8.69        | 11.96       | 5.89        | 17.76       | 11.36       |                          |
| 7       | 100                              | 53.40        | 72.62       | 23.08       | 41.92       | 57.26       | 73.49       |                          |
| 8       | 100                              | 7.32         | 8.90        | 9.79        | 6.25        | 15.02       | 11.62       |                          |
| 9       | 100                              | 8.50         | 10.52       | 16.31       | 13.05       | 16.09       | 15.63       |                          |
| 10      | 100                              | 25.80        | 46.53       | 36.82       | 65.34       | 32.02       | 48.14       |                          |
| 11      | 100                              | 19.04        | 15.58       | 22.30       | 13.13       | 25.75       | 18.10       |                          |
| 12      | 100                              | 10.43        | 8.55        | 8.51        | 9.38        | 17.91       | 11.28       |                          |
| 13      | 100                              | 17.59        | 77.20       | 21.10       | 37.04       | 24.44       | 77.86       |                          |
| 14      | 100                              | 9.32         | 9.95        | 13.27       | 2.14        | 16.91       | 2.63        |                          |
| 15      | 100                              | 6.52         | 9.94        | 17.20       | 3.70        | 14.31       | 2.58        |                          |
| 16      | 100                              | 24.58        | 49.50       | 23.57       | 34.00       | 30.89       | 51.04       |                          |
| 17      | 100                              | 14.12        | 2.60        | 14.72       | 0.45        | 21.26       | 5.44        |                          |
| 18      | 100                              | 19.52        | 5.97        | 26.85       | 1.66        | 26.20       | 8.77        |                          |
| 19      | 100                              | 25.67        | 87.26       | 28.06       | 72.24       | 31.87       | 73.13       |                          |

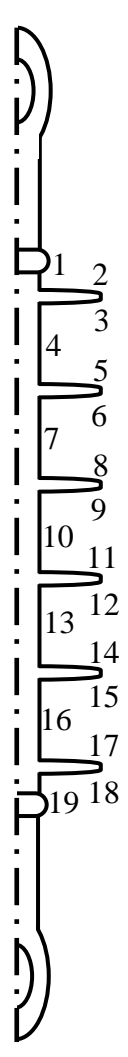
ข้อต่อลงดิน

ตารางที่ ก.14 การลดลงของ Si-CH<sub>3</sub> ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์  
ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 จากการทดสอบในน้ำเปล่า

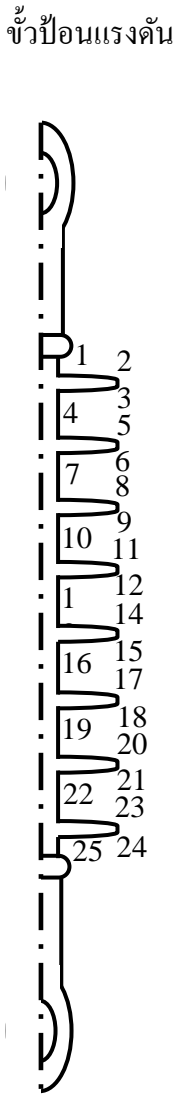
| ตำแหน่ง | Si - CH <sub>3</sub> ที่ลดลง (%) |              |          |          |          | ตำแหน่ง<br>ขั้วป้อนแรงดัน  |
|---------|----------------------------------|--------------|----------|----------|----------|--|
|         | ก่อนการทดสอบ                     | หลังการทดสอบ |          |          |          |  |
|         |                                  | ตัวที่ 1     | ตัวที่ 2 | ตัวที่ 3 | ตัวที่ 4 |  |
| 1       | 100                              | 33.92        | 65.40    | 49.06    | 55.21    |  |
| 2       | 100                              | 20.72        | 24.57    | 28.58    | 36.57    |  |
| 3       | 100                              | 19.09        | 25.08    | 26.89    | 39.33    |  |
| 4       | 100                              | 48.87        | 56.68    | 60.15    | 53.72    |  |
| 5       | 100                              | 18.83        | 33.84    | 24.83    | 37.26    |  |
| 6       | 100                              | 22.08        | 30.73    | 29.34    | 29.18    |  |
| 7       | 100                              | 54.18        | 47.46    | 33.60    | 62.27    |  |
| 8       | 100                              | 22.32        | 32.10    | 17.85    | 32.29    |  |
| 9       | 100                              | 22.15        | 37.79    | 19.07    | 27.25    |  |
| 10      | 100                              | 40.56        | 41.76    | 58.27    | 69.58    |  |
| 11      | 100                              | 17.21        | 36.76    | 27.18    | 25.40    |  |
| 12      | 100                              | 22.54        | 31.76    | 28.99    | 34.94    |  |
| 13      | 100                              | 28.32        | 44.80    | 55.02    | 57.91    |  |
| 14      | 100                              | 18.04        | 26.36    | 34.56    | 34.83    |  |
| 15      | 100                              | 12.84        | 27.00    | 34.70    | 28.32    |  |
| 16      | 100                              | 37.56        | 32.78    | 61.93    | 40.35    |  |
| 17      | 100                              | 21.97        | 25.88    | 37.53    | 20.32    |  |
| 18      | 100                              | 22.79        | 23.19    | 35.79    | 20.60    |  |
| 19      | 100                              | 83.50        | 70.25    | 84.91    | 81.14    |  |

ขั้วต่อลงดิน

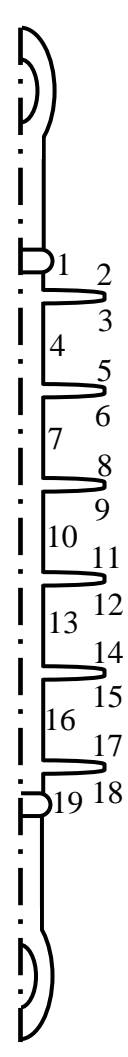
ตารางที่ ก.15 การลดลงของ Si-CH<sub>3</sub> ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์  
ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2

| ตำแหน่ง | Si - CH <sub>3</sub> ที่ลดลง (%) |              |          | ตำแหน่ง<br>ข้อป้อนแรงดัน   |
|---------|----------------------------------|--------------|----------|--|
|         | ก่อนการทดสอบ                     | หลังการทดสอบ |          |  |
|         |                                  | ตัวที่ 1     | ตัวที่ 2 |  |
| 1       | 100                              | 79.66        | 66.50    |  |
| 2       | 100                              | 28.51        | 26.01    |  |
| 3       | 100                              | 21.74        | 26.00    |  |
| 4       | 100                              | 87.48        | 71.50    |  |
| 5       | 100                              | 24.13        | 28.77    |  |
| 6       | 100                              | 18.64        | 34.77    |  |
| 7       | 100                              | 58.17        | 73.59    |  |
| 8       | 100                              | 27.65        | 28.47    |  |
| 9       | 100                              | 12.36        | 24.11    |  |
| 10      | 100                              | 66.86        | 38.95    |  |
| 11      | 100                              | 29.41        | 22.09    |  |
| 12      | 100                              | 24.67        | 26.07    |  |
| 13      | 100                              | 40.90        | 59.90    |  |
| 14      | 100                              | 20.88        | 32.22    |  |
| 15      | 100                              | 23.50        | 23.17    |  |
| 16      | 100                              | 34.24        | 35.02    |  |
| 17      | 100                              | 23.79        | 32.26    |  |
| 18      | 100                              | 32.32        | 31.83    |  |
| 19      | 100                              | 65.16        | 80.24    |  |

ตารางที่ ก.16 การลดลงของ Si - CH<sub>3</sub> ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 36 kV

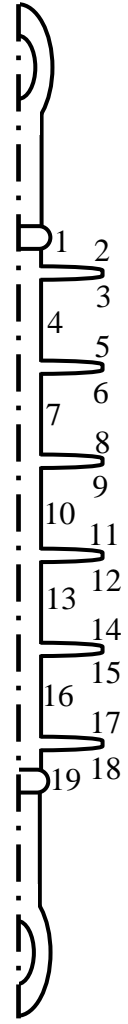
| ตำแหน่ง | Si - CH <sub>3</sub> ที่ลดลง (%) |                |          |          |          | ตำแหน่ง  |
|---------|----------------------------------|----------------|----------|----------|----------|--|
|         | ก่อนการทดสอบ                     | ขั้วป้อนแรงดัน |          |          |          |  |
|         |                                  | ตัวที่ 1       | ตัวที่ 2 | ตัวที่ 3 | ตัวที่ 4 |  |
| 1       | 100                              | 10.91          | 36.09    | 50.99    | 5.43     |  |
| 2       | 100                              | 11.05          | 4.38     | 2.77     | 4.82     |  |
| 3       | 100                              | 8.78           | 6.89     | 3.36     | 22.98    |  |
| 4       | 100                              | 64.78          | 83.70    | 38.55    | 21.92    |  |
| 5       | 100                              | 11.99          | 2.87     | 3.64     | 9.87     |  |
| 6       | 100                              | 10.56          | 3.78     | 20.91    | 7.58     |  |
| 7       | 100                              | 51.63          | 89.57    | 93.39    | 59.29    |  |
| 8       | 100                              | 7.06           | 4.19     | 14.13    | 8.63     |  |
| 9       | 100                              | 7.64           | 5.91     | 10.94    | 11.25    |  |
| 10      | 100                              | 80.20          | 87.66    | 93.88    | 69.96    |  |
| 11      | 100                              | 10.76          | 7.84     | 8.29     | 11.87    |  |
| 12      | 100                              | 5.42           | 1.80     | 8.83     | 27.02    |  |
| 13      | 100                              | 16.79          | 90.44    | 97.03    | 59.22    |  |
| 14      | 100                              | 5.85           | 6.90     | 6.25     | 2.87     |  |
| 15      | 100                              | 10.68          | 3.53     | 2.39     | 1.40     |  |
| 16      | 100                              | 16.50          | 33.80    | 97.93    | 79.29    |  |
| 17      | 100                              | 7.77           | 7.61     | 7.75     | 7.78     |  |
| 18      | 100                              | 8.86           | 14.28    | 7.95     | 10.38    |  |
| 19      | 100                              | 18.93          | 14.55    | 88.21    | 15.71    |  |
| 20      | 100                              | 8.98           | 11.19    | 7.20     | 14.17    |  |
| 21      | 100                              | 7.14           | 2.69     | 1.89     | 12.92    |  |
| 22      | 100                              | 16.76          | 53.19    | 48.07    | 5.53     |  |
| 23      | 100                              | 13.67          | 18.31    | 6.39     | 14.11    |  |
| 24      | 100                              | 6.16           | 2.61     | 3.53     | 24.51    |  |
| 25      | 100                              | 16.68          | 50.82    | 48.52    | 63.45    |  |

ตารางที่ ก.17 การลดลงของ Si-O ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์  
ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1

| ตำแหน่ง | Si - O ที่ลดลง (%) |              |             |             |             |             |             | ตำแหน่ง<br>ขั้วป้อนแรงดัน  |
|---------|--------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|
|         | ก่อนทดสอบ          | หลังการทดสอบ |             |             |             |             |             |  |
|         |                    | ตัวที่<br>1  | ตัวที่<br>2 | ตัวที่<br>3 | ตัวที่<br>4 | ตัวที่<br>5 | ตัวที่<br>6 |  |
| 1       | 100                | 13.87        | 22.41       | 7.00        | 49.12       | 21.02       | 24.74       |  |
| 2       | 100                | 14.10        | 15.40       | 17.37       | 8.79        | 21.23       | 14.02       |  |
| 3       | 100                | 12.71        | 9.38        | 1.87        | 13.79       | 19.96       | 12.09       |  |
| 4       | 100                | 7.45         | 28.66       | 14.26       | 9.69        | 15.13       | 30.75       |  |
| 5       | 100                | 10.25        | 15.75       | 14.51       | 13.30       | 17.70       | 18.21       |  |
| 6       | 100                | 5.62         | 5.45        | 18.14       | 4.91        | 13.43       | 8.20        |  |
| 7       | 100                | 24.68        | 34.80       | 6.55        | 11.68       | 30.91       | 36.77       |  |
| 8       | 100                | 6.39         | 8.35        | 14.15       | 5.68        | 14.17       | 11.09       |  |
| 9       | 100                | 9.25         | 8.63        | 8.14        | 11.22       | 16.78       | 13.85       |  |
| 10      | 100                | 4.69         | 17.26       | 16.40       | 29.83       | 12.63       | 19.72       |  |
| 11      | 100                | 13.07        | 12.88       | 13.63       | 8.21        | 20.27       | 15.48       |  |
| 12      | 100                | 8.02         | 8.44        | 17.67       | 8.38        | 15.70       | 11.17       |  |
| 13      | 100                | 8.93         | 40.80       | 7.25        | 6.93        | 16.50       | 42.53       |  |
| 14      | 100                | 0.24         | 0.66        | 5.17        | 2.77        | 8.57        | 3.60        |  |
| 15      | 100                | 3.78         | 0.69        | 9.63        | 3.56        | 11.80       | 3.60        |  |
| 16      | 100                | 6.33         | 16.33       | 7.71        | 9.72        | 14.14       | 18.84       |  |
| 17      | 100                | 8.41         | 2.82        | 12.89       | 1.14        | 16.01       | 5.64        |  |
| 18      | 100                | 14.23        | 6.04        | 10.26       | 1.25        | 21.35       | 8.84        |  |
| 19      | 100                | 4.59         | 72.44       | 14.83       | 57.89       | 12.53       | 59.20       |  |

ขั้วต่อลงดิน

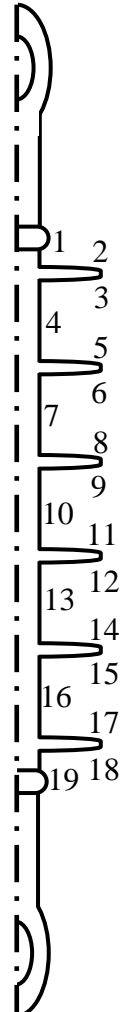
ตารางที่ ก.18 การลดลงของ Si-O ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์  
ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 จากการทดสอบในน้ำเปล่า

| ตำแหน่ง | Si - CH <sub>3</sub> ที่ลดลง (%) |              |          |          |          | ตำแหน่ง<br>ขั้วป้อนแรงดัน  |
|---------|----------------------------------|--------------|----------|----------|----------|--|
|         | ก่อนการทดสอบ                     | หลังการทดสอบ |          |          |          |  |
|         |                                  | ตัวที่ 1     | ตัวที่ 2 | ตัวที่ 3 | ตัวที่ 4 |  |
| 1       | 100                              | 13.68        | 41.79    | 29.66    | 35.38    |  |
| 2       | 100                              | 10.39        | 18.97    | 19.87    | 30.90    |  |
| 3       | 100                              | 13.52        | 21.12    | 21.88    | 32.95    |  |
| 4       | 100                              | 19.76        | 31.28    | 34.90    | 31.09    |  |
| 5       | 100                              | 13.63        | 26.72    | 20.95    | 34.10    |  |
| 6       | 100                              | 17.93        | 27.02    | 19.42    | 25.78    |  |
| 7       | 100                              | 27.44        | 29.72    | 19.69    | 38.64    |  |
| 8       | 100                              | 17.57        | 27.70    | 15.86    | 27.55    |  |
| 9       | 100                              | 20.32        | 35.59    | 15.88    | 24.99    |  |
| 10      | 100                              | 17.00        | 28.78    | 37.08    | 51.14    |  |
| 11      | 100                              | 13.68        | 34.49    | 19.73    | 25.00    |  |
| 12      | 100                              | 16.77        | 31.35    | 27.10    | 33.33    |  |
| 13      | 100                              | 15.49        | 36.65    | 36.57    | 43.50    |  |
| 14      | 100                              | 11.51        | 21.73    | 30.63    | 28.94    |  |
| 15      | 100                              | 10.41        | 22.30    | 32.76    | 25.19    |  |
| 16      | 100                              | 21.68        | 20.52    | 43.37    | 26.81    |  |
| 17      | 100                              | 15.94        | 22.13    | 35.25    | 18.43    |  |
| 18      | 100                              | 15.75        | 19.61    | 32.05    | 20.03    |  |
| 19      | 100                              | 67.65        | 36.73    | 81.68    | 64.30    |  |

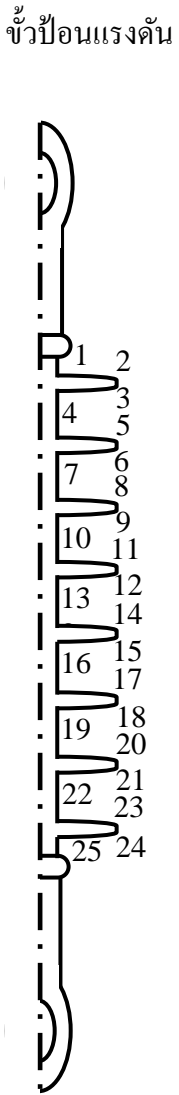
ขั้วต่อลงดิน



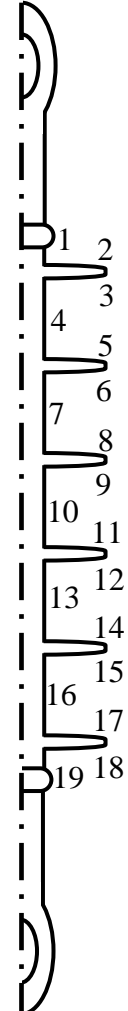
ตารางที่ ก.19 การลดลงของ Si-O ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์  
ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2

| ตำแหน่ง | Si - O ที่ลดลง (%) |              |          | ตำแหน่ง<br>ข้อป้อนแรงดัน   |
|---------|--------------------|--------------|----------|--|
|         | ก่อนการทดสอบ       | หลังการทดสอบ |          |  |
|         |                    | ตัวที่ 1     | ตัวที่ 2 |  |
| 1       | 100                | 40.00        | 24.14    |  |
| 2       | 100                | 12.51        | 16.20    |  |
| 3       | 100                | 12.51        | 15.64    |  |
| 4       | 100                | 11.91        | 34.19    |  |
| 5       | 100                | 15.65        | 16.64    |  |
| 6       | 100                | 11.42        | 19.27    |  |
| 7       | 100                | 19.27        | 35.21    |  |
| 8       | 100                | 6.02         | 19.81    |  |
| 9       | 100                | 9.38         | 17.58    |  |
| 10      | 100                | 33.50        | 18.83    |  |
| 11      | 100                | 12.39        | 14.11    |  |
| 12      | 100                | 11.94        | 20.63    |  |
| 13      | 100                | 14.83        | 14.35    |  |
| 14      | 100                | 13.14        | 12.32    |  |
| 15      | 100                | 11.29        | 18.16    |  |
| 16      | 100                | 11.13        | 19.04    |  |
| 17      | 100                | 13.45        | 15.35    |  |
| 18      | 100                | 12.35        | 17.05    |  |
| 19      | 100                | 25.06        | 50.93    |  |

ตารางที่ ก.20 การลดลงของ Si - O ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 36 kV

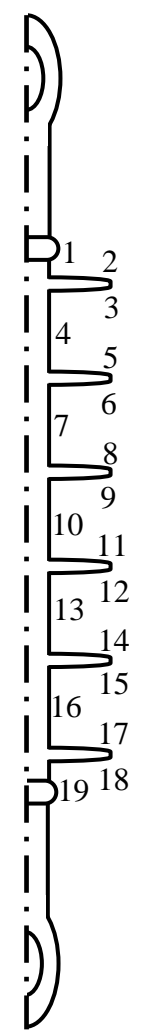
| ตำแหน่ง | Si - O ที่ลดลง (%) |                |          |          |          | ตำแหน่ง  |
|---------|--------------------|----------------|----------|----------|----------|--|
|         | ก่อนการทดสอบ       | ขั้วป้อนแรงดัน |          |          |          |  |
|         |                    | ตัวที่ 1       | ตัวที่ 2 | ตัวที่ 3 | ตัวที่ 4 |  |
| 1       | 100                | 10.25          | 19.34    | 22.89    | 8.15     |  |
| 2       | 100                | 13.74          | 3.47     | 1.49     | 2.91     |  |
| 3       | 100                | 3.48           | 6.38     | 4.97     | 5.34     |  |
| 4       | 100                | 41.26          | 72.14    | 7.38     | 9.09     |  |
| 5       | 100                | 17.74          | 4.55     | 3.09     | 8.88     |  |
| 6       | 100                | 11.39          | 2.83     | 14.61    | 2.25     |  |
| 7       | 100                | 30.37          | 86.17    | 82.86    | 22.37    |  |
| 8       | 100                | 11.62          | 2.71     | 11.17    | 3.71     |  |
| 9       | 100                | 13.59          | 11.34    | 8.73     | 3.36     |  |
| 10      | 100                | 61.10          | 83.16    | 82.70    | 38.81    |  |
| 11      | 100                | 16.98          | 11.52    | 6.85     | 4.30     |  |
| 12      | 100                | 9.34           | 5.62     | 5.19     | 5.58     |  |
| 13      | 100                | 13.44          | 84.99    | 86.35    | 28.87    |  |
| 14      | 100                | 9.28           | 8.26     | 4.08     | 4.28     |  |
| 15      | 100                | 16.37          | 1.64     | 3.91     | 1.30     |  |
| 16      | 100                | 12.43          | 11.67    | 86.51    | 40.21    |  |
| 17      | 100                | 14.33          | 5.27     | 3.99     | 4.34     |  |
| 18      | 100                | 12.68          | 19.85    | 4.93     | 4.74     |  |
| 19      | 100                | 10.26          | 7.36     | 87.32    | 5.01     |  |
| 20      | 100                | 11.14          | 9.37     | 0.70     | 5.46     |  |
| 21      | 100                | 13.84          | 7.60     | 0.26     | 5.96     |  |
| 22      | 100                | 14.09          | 19.07    | 13.33    | 2.12     |  |
| 23      | 100                | 13.67          | 4.60     | 8.92     | 9.15     |  |
| 24      | 100                | 10.67          | 8.87     | 2.74     | 5.75     |  |
| 25      | 100                | 10.10          | 33.55    | 14.96    | 29.24    |  |

ตารางที่ ก.21 อัตราส่วนของ Si-CH<sub>3</sub>/Si-O ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์  
ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1

| ตำแหน่ง | Si-CH <sub>3</sub> /Si-O |              |             |             |             |             |             | ตำแหน่ง<br>ขั้วป้อนแรงดัน  |
|---------|--------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|
|         | ก่อนทดสอบ                | หลังการทดสอบ |             |             |             |             |             |  |
|         |                          | ตัวที่<br>1  | ตัวที่<br>2 | ตัวที่<br>3 | ตัวที่<br>4 | ตัวที่<br>5 | ตัวที่<br>6 |  |
| 1       | 100                      | 62.77        | 71.49       | 59.06       | 78.31       | 62.75       | 71.46       |  |
| 2       | 100                      | 98.71        | 98.25       | 99.02       | 93.78       | 98.71       | 93.78       |  |
| 3       | 100                      | 98.79        | 97.96       | 97.74       | 97.39       | 98.78       | 97.95       |  |
| 4       | 100                      | 69.58        | 59.30       | 73.60       | 70.05       | 69.56       | 59.29       |  |
| 5       | 100                      | 95.97        | 92.11       | 93.35       | 92.11       | 95.98       | 92.10       |  |
| 6       | 100                      | 95.00        | 96.56       | 97.40       | 98.96       | 95.00       | 96.56       |  |
| 7       | 100                      | 61.87        | 41.98       | 82.31       | 65.76       | 61.85       | 41.92       |  |
| 8       | 100                      | 99.01        | 99.39       | 94.64       | 99.39       | 99.00       | 99.39       |  |
| 9       | 100                      | 94.21        | 97.93       | 91.10       | 97.93       | 98.92       | 97.93       |  |
| 10      | 100                      | 77.84        | 64.62       | 75.57       | 49.40       | 77.82       | 64.60       |  |
| 11      | 100                      | 93.13        | 96.89       | 89.95       | 94.63       | 93.12       | 96.90       |  |
| 12      | 100                      | 97.38        | 99.87       | 99.85       | 98.91       | 97.37       | 99.86       |  |
| 13      | 100                      | 90.48        | 38.52       | 85.06       | 67.65       | 90.48       | 38.51       |  |
| 14      | 100                      | 90.88        | 90.64       | 91.44       | 93.61       | 90.87       | 94.39       |  |
| 15      | 100                      | 97.15        | 90.68       | 91.62       | 99.85       | 97.15       | 98.65       |  |
| 16      | 100                      | 80.51        | 60.35       | 82.81       | 73.09       | 80.49       | 60.31       |  |
| 17      | 100                      | 93.76        | 99.03       | 97.89       | 98.19       | 93.75       | 95.96       |  |
| 18      | 100                      | 93.82        | 97.44       | 81.50       | 99.59       | 93.82       | 89.72       |  |
| 19      | 100                      | 77.89        | 46.22       | 84.46       | 65.93       | 77.88       | 65.86       |  |

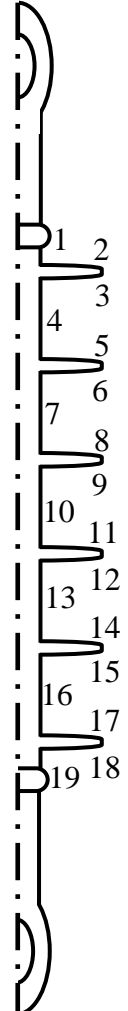
ขั้วต่อลงดิน

ตารางที่ ก.22 อัตราส่วนของ Si-CH<sub>3</sub>/Si-O ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์  
ระบบ 24 kV ชนิดที่ 1 จากการทดสอบในน้ำเปล่า

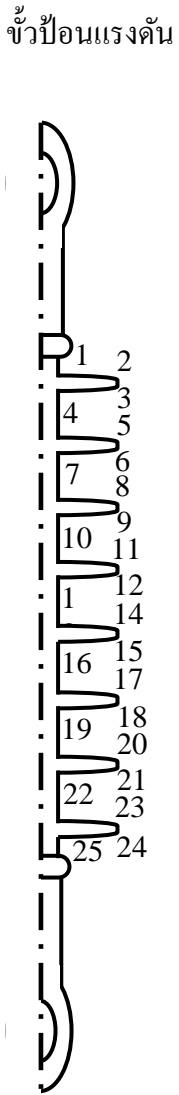
| ตำแหน่ง | Si-CH <sub>3</sub> /Si-O |              |          |          |          | ตำแหน่ง<br>ขั้วป้อนแรงดัน  |
|---------|--------------------------|--------------|----------|----------|----------|--|
|         | ก่อนการทดสอบ             | หลังการทดสอบ |          |          |          |  |
|         |                          | ตัวที่ 1     | ตัวที่ 2 | ตัวที่ 3 | ตัวที่ 4 |  |
| 1       | 100                      | 76.54        | 59.44    | 72.41    | 69.31    |  |
| 2       | 100                      | 88.46        | 93.08    | 89.13    | 91.79    |  |
| 3       | 100                      | 93.56        | 94.98    | 93.58    | 90.48    |  |
| 4       | 100                      | 63.72        | 63.03    | 61.21    | 67.16    |  |
| 5       | 100                      | 93.98        | 90.28    | 95.09    | 95.21    |  |
| 6       | 100                      | 94.93        | 94.91    | 87.68    | 95.40    |  |
| 7       | 100                      | 63.15        | 74.76    | 82.67    | 61.48    |  |
| 8       | 100                      | 94.23        | 93.92    | 97.63    | 93.45    |  |
| 9       | 100                      | 97.69        | 96.58    | 96.21    | 96.98    |  |
| 10      | 100                      | 71.61        | 81.77    | 66.32    | 62.26    |  |
| 11      | 100                      | 95.90        | 96.85    | 90.72    | 99.47    |  |
| 12      | 100                      | 93.05        | 99.40    | 97.40    | 97.58    |  |
| 13      | 100                      | 84.81        | 87.13    | 70.90    | 74.50    |  |
| 14      | 100                      | 92.62        | 94.07    | 94.33    | 91.71    |  |
| 15      | 100                      | 97.28        | 93.94    | 97.11    | 95.82    |  |
| 16      | 100                      | 97.71        | 84.57    | 67.22    | 81.49    |  |
| 17      | 100                      | 92.83        | 95.18    | 96.47    | 97.68    |  |
| 18      | 100                      | 91.64        | 95.54    | 94.48    | 99.29    |  |
| 19      | 100                      | 51.01        | 47.02    | 82.37    | 52.82    |  |

ขั้วต่อลงดิน

ตารางที่ ก.23 อัตราส่วนของ Si-CH<sub>3</sub>/Si-O ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์  
ระบบ 24 kV ชนิดที่ 2

| ตำแหน่ง | Si-CH <sub>3</sub> /Si-O |              |          | ตำแหน่ง<br>ข้อป้อนแรงดัน   |
|---------|--------------------------|--------------|----------|--|
|         | ก่อนการทดสอบ             | หลังการทดสอบ |          |  |
|         |                          | ตัวที่ 1     | ตัวที่ 2 |  |
| 1       | 100                      | 34.63        | 45.11    |  |
| 2       | 100                      | 82.46        | 90.19    |  |
| 3       | 100                      | 91.37        | 89.60    |  |
| 4       | 100                      | 14.52        | 44.24    |  |
| 5       | 100                      | 91.88        | 87.28    |  |
| 6       | 100                      | 93.82        | 82.53    |  |
| 7       | 100                      | 52.93        | 41.64    |  |
| 8       | 100                      | 78.64        | 91.11    |  |
| 9       | 100                      | 98.79        | 94.05    |  |
| 10      | 100                      | 50.90        | 76.83    |  |
| 11      | 100                      | 82.30        | 92.65    |  |
| 12      | 100                      | 87.38        | 95.14    |  |
| 13      | 100                      | 70.88        | 54.14    |  |
| 14      | 100                      | 93.04        | 78.96    |  |
| 15      | 100                      | 88.09        | 95.98    |  |
| 16      | 100                      | 75.58        | 81.98    |  |
| 17      | 100                      | 89.94        | 81.71    |  |
| 18      | 100                      | 78.87        | 83.94    |  |
| 19      | 100                      | 47.49        | 41.13    |  |

ตารางที่ ก.24 อัตราส่วน Si-CH<sub>3</sub>/Si-O ในยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ระบบ 36 kV

| ตำแหน่ง | Si-CH <sub>3</sub> /Si-O |                |          |          |          | ตำแหน่ง  |
|---------|--------------------------|----------------|----------|----------|----------|--|
|         | ก่อนการทดสอบ             | ขั้วป้อนแรงดัน |          |          |          |  |
|         |                          | ตัวที่ 1       | ตัวที่ 2 | ตัวที่ 3 | ตัวที่ 4 |  |
| 1       | 100                      | 92.37          | 73.79    | 59.15    | 95.81    |  |
| 2       | 100                      | 95.96          | 92.18    | 91.85    | 91.23    |  |
| 3       | 100                      | 98.40          | 98.70    | 94.63    | 75.72    |  |
| 4       | 100                      | 55.79          | 54.44    | 61.74    | 79.93    |  |
| 5       | 100                      | 99.56          | 94.69    | 92.53    | 92.05    |  |
| 6       | 100                      | 93.92          | 96.46    | 86.19    | 87.98    |  |
| 7       | 100                      | 64.65          | 51.86    | 35.72    | 48.80    |  |
| 8       | 100                      | 97.85          | 91.64    | 89.96    | 88.31    |  |
| 9       | 100                      | 99.46          | 98.75    | 90.81    | 85.46    |  |
| 10      | 100                      | 47.37          | 46.72    | 32.90    | 45.68    |  |
| 11      | 100                      | 83.03          | 96.93    | 91.62    | 85.70    |  |
| 12      | 100                      | 97.08          | 96.83    | 89.49    | 71.93    |  |
| 13      | 100                      | 89.46          | 51.68    | 20.28    | 36.87    |  |
| 14      | 100                      | 96.58          | 94.43    | 90.96    | 88.95    |  |
| 15      | 100                      | 99.39          | 91.28    | 94.53    | 92.97    |  |
| 16      | 100                      | 88.73          | 96.74    | 14.29    | 32.24    |  |
| 17      | 100                      | 90.20          | 90.76    | 89.42    | 89.71    |  |
| 18      | 100                      | 97.13          | 99.53    | 91.10    | 87.55    |  |
| 19      | 100                      | 87.05          | 85.83    | 83.88    | 82.57    |  |
| 20      | 100                      | 95.33          | 91.18    | 86.97    | 84.46    |  |
| 21      | 100                      | 98.10          | 98.00    | 91.53    | 86.17    |  |
| 22      | 100                      | 90.17          | 53.82    | 55.76    | 89.82    |  |
| 23      | 100                      | 93.05          | 79.68    | 95.64    | 87.98    |  |
| 24      | 100                      | 97.76          | 99.44    | 92.31    | 72.56    |  |
| 25      | 100                      | 86.24          | 59.87    | 56.34    | 48.07    |  |



## Annex A (normative)

### Wheel test

#### A.1 Test specimens

Two test insulators of identical design with a creepage distance between 500 mm and 800 mm shall be taken from the production line. If such insulators cannot be taken from the production line, special test specimens shall be made from other insulators so that the creepage distance falls between the given values. These special test specimens shall be fitted with standard production end fittings.

Up to two pairs of test specimens can be tested simultaneously on one wheel. It is recommended not to mix widely differing materials on the same wheel.

#### A.2 Procedure

The test specimens shall be cleaned with de-ionized water before starting the test. The test specimens are mounted on the wheel as shown in Figure A.1 below. They go through four positions in one cycle. Each test specimen remains stationary for about 40 s in each of the four positions. The 90° rotation from one position to the next takes about 8 s. In the first part of the cycle the insulator is dipped into a saline solution. The second part of the test cycle permits the excess saline solution to drip off the specimen ensuring that the light wetting of the surface gives rise to sparking across dry bands that will form during the third part of the cycle. In that part the specimen is submitted to a power frequency voltage. In the last part of the cycle the surface of the specimen that had been heated by the dry band sparking is allowed to cool.

The test voltage is supplied by a test transformer. When loaded with a resistive current of 250 mA on the high voltage side the test circuit shall exhibit a maximum drop of 5 % in its output voltage.

The salt solution shall be replaced weekly. Weekly interruptions of the test for inspection purposes, each of these not exceeding 1 h are permissible. Interruption periods will not be counted in the test duration. One longer interruption up to 60 h is allowed. An additional testing time of three times the duration of the interruption period shall be added. The final test report shall include details of all interruptions.

#### A.3 Test conditions

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| Electrical stress:                | The power frequency test voltage in kV is determined by dividing the actual creepage distance in millimetres by 28,6. |
| NaCl content of de-ionized water: | 1,40 kg/m <sup>3</sup> ± 0,06 kg/m <sup>3</sup>   |
| Ambient temperature:              | 20 °C ± 5 K   |
| Test duration:                    | 30 000 cycles   |

#### A.4 Acceptance criteria

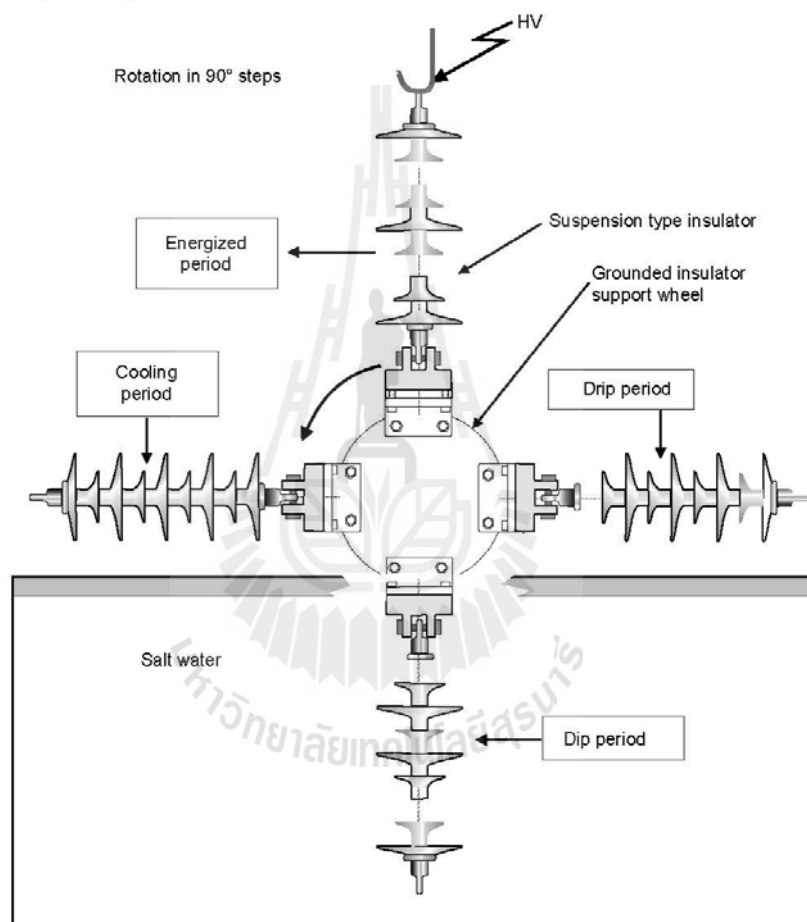
The test specimens of identical design shall be assessed together. Pairs of test specimens of different design shall be assessed separately. The numbers of flashovers and trip-outs shall be recorded and noted in the test report.



62217 © IEC:2005(E)

The test is regarded as passed, if on both test specimens:

- no tracking occurs, (a megohmmeter shall be applied along any suspect path, using 1 kV DC or higher. The probes shall be between 5 mm to 10 mm apart. A resistance of less than 2 M $\Omega$  shall constitute failure);
- for composite insulators: erosion depth is less than 3 mm and does not reach the core, if applicable;
- for resin insulators: erosion depth is less than 3 mm;
- no shed, housing or interface is punctured.



IEC 1980/05

**Figure A.1 – Test arrangement of the tracking wheel test**



ภาคผนวก ค  
บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

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

## Ageing Deterioration of Silicone Rubber Polymer Insulator under Salt Water Dip Wheel Test

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

**Abstract** This paper presents the experimental results of silicone rubber polymer insulators for 22 kV systems under salt water dip wheel test based on IEC 62217. Straight shed silicone rubber polymer insulators having leakage distance 685 mm were tested continuously 30,000 cycles. One test cycle includes 4 positions, energized, de-energized, salt water dip and de-energized, respectively. For one test cycle, each test specimen remains stationary for about 40 second in each position and takes 8 second for rotate to next position. By visual observation, sever surface erosion was observed on the trunk near the energized end of tested specimen. Puncture was observed on the upper shed near the energized end. In addition, decreasing in hydrophobicity and increasing in hardness were measured on tested specimen comparing with new specimen. Furthermore, chemical analysis by ATR-FTIR was conducted in order to elucidate the chemical change of tested specimens comparing with new specimen.

**Keywords** ageing of silicone rubber, salt water dip wheel test, silicone rubber polymer insulator

### I. INTRODUCTION

RECENTLY, silicone rubber polymer insulator has been widely used in power transmission and distribution on over the world [1]. Polymer insulators have advantages of low cost, light weight, high mechanical strength, low surface tension energy and good electrical strength when comparing with the conventional type insulators [2]. Typical molecular structure of silicone rubber is polydimethylsiloxane (PDMS) which consists of an inorganic backbone of alternating silicone and oxygen atoms and methyl groups attached to the silicone rubber [3]. Filler are used to reinforce the silicone rubber and can improve tensile strength, modulus, tear strength and abrasion resistance of the silicone rubber. In addition, coupling agents provide a chemical bond between the filler and the polymer matrix which can greatly improve the electrical properties, modulus and tensile strengths [4].

Due to silicone rubber polymer insulators made from polymeric materials, the environment conditions are major problems to ageing for silicone rubber such as salt fog, humidity, dust, rain and UV etc.[5]. Dry band arcing and corona discharge due to surface contamination affect tracking, erosion and loss of hydrophobicity to surface

J. Grasaesom, S. Thong-om and W. Payakcho are graduate student in Suaranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, THAILAND.

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

silicone rubber polymer insulator [6], [7].

For study ageing of silicone rubber, many researchers have been studied the various services problems for polymer insulators. Tracking wheel test was adopted to use as the test method for ageing evaluation of silicone rubber insulator [8]. The measurement system and computer controls were incorporated with the tracking wheel test [5].

This paper reports salt water dip wheel test results of silicone rubber polymer insulator for 22 kV distribution systems.

### II. TEST ARRANGEMENTS

#### A. Specimen

Straight shed polymer insulators made were of HTV silicone rubber with ATH (Alumina trihydrate) was used in this experimental. Four pieces of the specimen were tested together under test conditions based on IEC 62217 [9]. Configuration and dimension of the specimen are illustrated in Fig. 1.

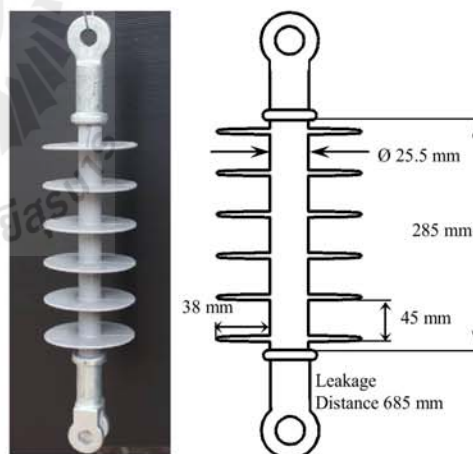


Fig. 1 Specimen.

#### B. Test Method

Test methods for salt water dip wheel test were based on IEC 62217 [9]. Test was conducted continuously for 30,000 cycles. One test cycle takes time 192 second and includes 4 test positions, energized, de-energized, salt water dip and

de-energized, respectively. For each position, test specimen remains stationary for about 40 second and takes 8 second for rotate to the next position. Salt water was re-newed every week and re-newing time must less than 1 hour. Test arrangement for dip wheel test is shown in Fig. 2 and the specimen arrangement during test is shown in Fig. 3.

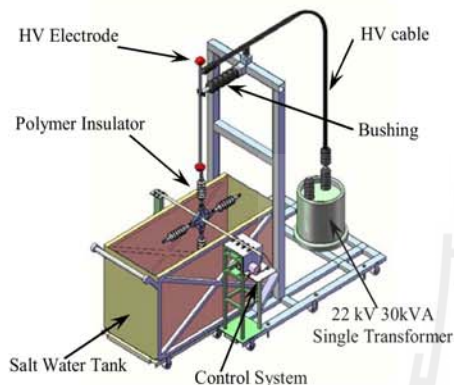


Fig. 2 Test arrangement for dip wheel test.

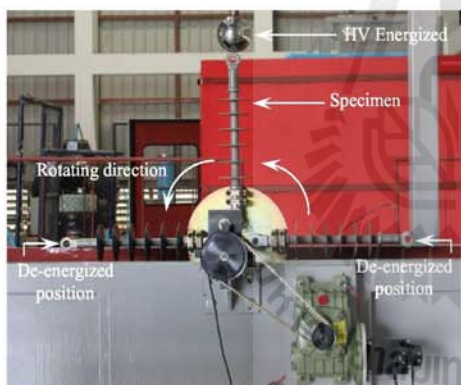


Fig. 3 Specimen arrangement during dip wheel test.

**C. Test Condition**

Test conditions were based on IEC 62217 and condition were illustrated in Table I. Test voltage was generated from 22 kV, 30 kVA distribution transformer.

| TABLE I<br>TEST CONDITION            |  |
|--------------------------------------|--|
| Voltage stress                       | 35 V/mm (AC voltage)                           |
| NaCl content of de-ionized water     | 1.4 kg/m <sup>3</sup> ± 0.06 kg/m <sup>3</sup> |
| Test duration (1 cycle = 192 second) | 30,000 cycles                                  |

**III. EXPERIMENTAL RESULT AND DISCUSSION**

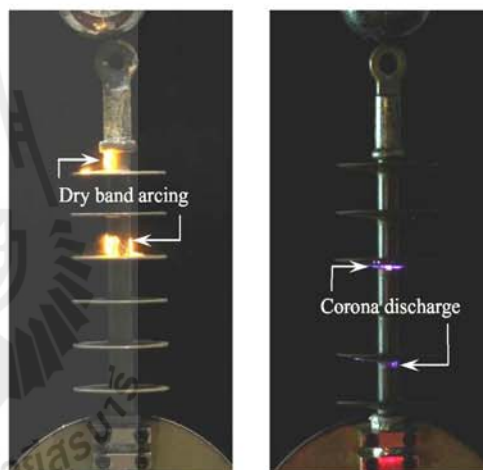
The insulators were tested continuously for 30,000 cycles. Then, tested specimens were analyzed by physical and chemical methods such as visual observation, loss of

hydrophobicity, surface contamination degree, hardness measurement and ATR-FTIR in order to evaluate degree of surface erosion.

**A. Visual observation**

Visual observation was conducted in order to inspect any ageing on the surface of tested specimen. During the test, dry band arc and corona discharge occurred and were obviously observed on the trunk surface during energized position. Visible discharge activities during test are shown in Fig. 4.

As illustrated in Fig. 4 (a), yellow color of light for dry band arcing was observed. The evaporating of water caused dry band arcing on the surface of the polymer insulators. Occurring of such arcing caused tracking on the surface [10]-[12]. Corona discharge was also observed on under surface of shed. Occurring of corona discharges may be generated by high electric field stress on the tip of water droplet.



(a) Dry band arcing (b) Corona discharge  
Fig. 4 Visible discharge activities during dip wheel test.

After 30,000 test cycles, significant changing on the specimen surface was observed on tested specimen. Many types of surface ageing, such as erosion and tracking etc., were observed.

As show in Fig. 5 (a) and Fig. 5 (b), dirt was observed on both shed and trunk surfaces of tested specimens.

As shown in Fig. 5 (c) and Fig. 5 (d), severe surface tracking was observed on parting line of trunk surface near both energized and ground ends. The occurring of surface tracking on such portion may caused by high electric field stress.

As shown in Fig. 5 (e), surface tracking, also, was observed on parting line of shed surface near energized end



Fig. 5 Surface damage of tested specimens.

comparing with other shed surface portion. This occurring may caused by higher electric field stress.

Surface tracking along parting line in high electric field stress portion may caused by remaining water droplet during high voltage energized

As shown in Fig. 5 (f), punched of shed near energized end was observed. The puncture was observed on the parting line of shed. Occurring of such surface damage may caused by high power electric discharge [13]. The results show that imperfect of parting line can caused seriously surface damage of polymer insulator under contamination condition.

**B. Contamination Degree**

Contamination degree is an indicator for contamination level on the tested insulators. Contamination degree is determined by measuring the salt deposit density (*SDD*) based on IEC 60507. The formulas for *SDD* calculation are as follows.

$$S_a = (5.7 \cdot 20)^{1.03} \tag{1}$$

$$SDD = \frac{S_a \times V}{A} \tag{2}$$

where:

20 is the volume conductivity at temperature of 20°C (S/m)

*S<sub>a</sub>* is salinity (kg/m<sup>3</sup>)

*SDD* is the salt deposit density (kg/m<sup>2</sup>)

*V* is the volume of the suspension (m<sup>3</sup>)

*A* is the area of the cleaned surface (m<sup>2</sup>) [14].

*SDD* measurement results are illustrated in Table II. No significant different in *SDD* was obtained.

TABLE II  
SDD AFTER 30,000 TEST CYCLES

| SDD, mg/cm <sup>2</sup> |       |       |       |
|-------------------------|-------|-------|-------|
| No. 1                   | No. 2 | No. 3 | No. 4 |
| 0.076                   | 0.044 | 0.079 | 0.050 |

*C. Hydrophobicity*

In study, hydrophobicity is evaluated by water spray method based on STRI guide, as shown in Fig. 6 [15]. In order to comparisons hydrophobicity of the tested specimens with the new specimen, HC level for hydrophobicity was evaluated, as shown in Fig. 7 and the results of HC level are shown in Table III.

After 30,000 test cycles, decreasing in hydrophobicity for tested specimens was evaluated comparing with the new specimen. Significant HC level can be seen. HC3 is almost hydrophobic level for all tested specimens. The loss of hydrophobicity may be caused by electrical and environmental stresses during test cycle such as UV radiation and heat etc. [11].

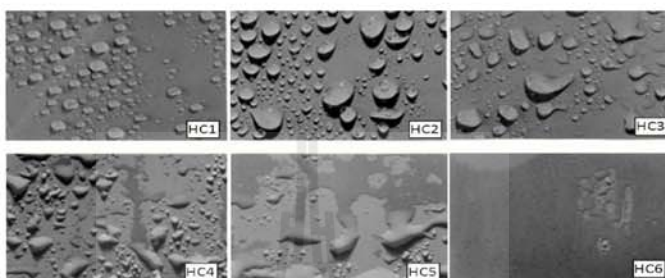


Fig. 6 Characteristics of the sample surface HC1-HC6 [15].

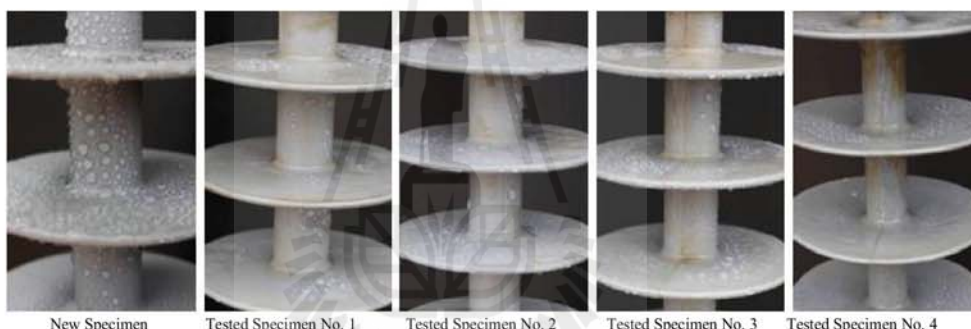


Fig. 7 Comparisons of hydrophobicity.

TABLE III  
HYDROPHOBICITY AFTER 30,000 TEST CYCLES

| Position | Specimen |       |       |       |       | Position |
|----------|----------|-------|-------|-------|-------|----------|
|          | New      | No. 1 | No. 2 | No. 3 | No. 4 |          |
| 1        | HC 1     | HC 4  | HC 4  | HC 3  | HC 3  |          |
| 2        | HC 1     | HC 3  | HC 3  | HC 3  | HC 3  |          |
| 3        | HC 1     | HC 3  | HC 3  | HC 2  | HC 3  |          |
| 4        | HC 1     | HC 3  | HC 3  | HC 3  | HC 3  |          |
| 5        | HC 1     | HC 3  | HC 3  | HC 3  | HC 2  |          |
| 6        | HC 1     | HC 4  | HC 2  | HC 4  | HC 3  |          |
| 7        | HC 1     | HC 3  | HC 3  | HC 3  | HC 3  |          |
| 8        | HC 1     | HC 3  | HC 3  | HC 3  | HC 3  |          |
| 9        | HC 1     | HC 3  | HC 3  | HC 3  | HC 4  |          |
| 10       | HC 1     | HC 3  | HC 3  | HC 3  | HC 3  |          |
| 11       | HC 1     | HC 3  | HC 3  | HC 3  | HC 3  |          |
| 12       | HC 1     | HC 3  | HC 2  | HC 4  | HC 4  |          |
| 13       | HC 1     | HC 3  | HC 3  | HC 3  | HC 3  |          |
| 14       | HC 1     | HC 3  | HC 3  | HC 3  | HC 3  |          |
| 15       | HC 1     | HC 3  | HC 2  | HC 4  | HC 3  |          |
| 16       | HC 1     | HC 3  | HC 3  | HC 3  | HC 3  |          |
| 17       | HC 1     | HC 3  | HC 3  | HC 3  | HC 3  |          |
| 18       | HC 1     | HC 4  | HC 2  | HC 3  | HC 3  |          |
| 19       | HC 1     | HC 3  | HC 3  | HC 3  | HC 3  |          |

D. ATR-FTIR Analysis

ATR-FTIR (attenuated total reflection fourier transform infrared spectroscopy) is chemical analysis for the chemical bonds inspection. In this study, side chins (Si-CH<sub>3</sub>) at wave number 1258 cm<sup>-1</sup> and back bonds (Si-O) at wave number 1010 cm<sup>-1</sup> were analyzed. The changing in Si-CH<sub>3</sub> bonds were damaged by oxidation and crosslinking. The changing in Si-O bonds was damaged by scission and hydrolysis.

After 30,000 test cycles, ATR – FTIR analysis was conducted on 19 positions of specimen surface for chemical bond inspection. The example of ATR –FTIR spectrum on position 2 of tested specimen surface is illustrated in Fig. 7. ATR – FTIR analysis results for all position of all tested specimens are illustrated in Table III. Significant reduction in Si-CH<sub>3</sub> and Si-O bonds of tested specimens was obtained comparing with new specimen.

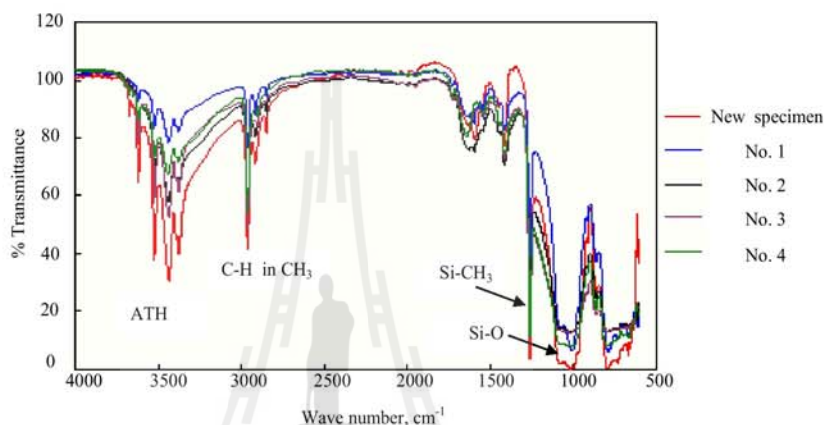


Fig. 8 ATR- FTIR spectrum of tested specimen at position 2.

TABLE III  
TRANSMITTANCE AFTER 30,000 TEST CYCLES

| Position | Transmittance of Si-CH <sub>3</sub> (1258 cm <sup>-1</sup> ), %<br>Specimen |       |       |       | Transmittance of Si-O (1010 cm <sup>-1</sup> ), %<br>Specimen |              |       |       | Position |
|----------|---|-------|-------|-------|---|--------------|-------|-------|----------|
|          | New Specimen  | No. 1 | No. 2 | No. 3 | No. 4   | New Specimen | No. 1 | No. 2 |          |
| 1        | 65.41   | 32.91 | 24.77 | -     | 28.55   | 5.97         | 4.72  | -     |          |
| 2        | 21.61   | 13.4  | 19.27 | 8.11  | 4.15  | 10.03        | 9.48  | 4.48  |          |
| 3        | 21.62   | 12.45 | 5.55  | 8.33  | 4.15  | 7.88         | 2.94  | 3.08  |          |
| 4        | 48.51   | 23.12 | 19.65 | 81.38 | 19.95   | 0.66         | 3.54  | 53.12 |          |
| 5        | 33.23   | 19.08 | 11.51 | 5.34  | 4.25  | 6.68         | 7.29  | 1.78  |          |
| 6        | 53.95   | 9.42  | 4.76  | 12.99 | 17.82   | 6.21         | 3.04  | 3.99  |          |
| 7        | 43.38   | 21.68 | 34.22 | 70.0  | 12.68   | 1.09         | 7.34  | 33.92 |          |
| 8        | 59.07   | 13.1  | 11.39 | 8.56  | 27.09   | 7.1          | 8.37  | 2.34  |          |
| 9        | 76.01   | 13.94 | 5.88  | 19.37 | 51.08   | 8.25         | 4.21  | 5.79  |          |
| 10       | 12.81   | 24.36 | 15.22 | 68.57 | 2.74  | 0.51         | 9.38  | 33.9  |          |
| 11       | 10.81   | 13.93 | 14.24 | 6.88  | 7.86  | 9.97         | 9.28  | 4.06  |          |
| 12       | 62.19   | 17.72 | 31.13 | 11.42 | 17.75   | 5.7          | 5.93  | 7.96  |          |
| 13       | 26.91   | 19.21 | 11.7  | 77.61 | 6.94  | 1.13         | 3.41  | 53.81 |          |
| 14       | 5.36  | 13.1  | 11.33 | 5.93  | 4.09  | 6.6          | 9.49  | 2.06  |          |
| 15       | 60.94   | 13.65 | 16.61 | 26.35 | 18.2  | 7.44         | 9.6   | 2.51  |          |
| 16       | 76.29   | 14.69 | 8.47  | 69.93 | 4.09  | 0.33         | 2.13  | 38.35 |          |
| 17       | 5.76  | 11.67 | 23.33 | 0.62  | 3.83  | 8.03         | 5.51  | 3.04  |          |
| 18       | 10.99   | 13.8  | 15.04 | 8.7   | 2.53  | 7.3          | 9.3   | 4.9   |          |
| 19       | 76.29   | 70.46 | 80.33 | -     | 49.4  | 46.87        | 62.57 | -     |          |



### E. Hardness Measurement Results

After 30,000 test cycles dip wheel test, hardness was measured on tested specimen surface comparing with new specimen surface. Measurement method is based on the ISO 868-Shore hardness [16]. Increasing in hardness indicate that oxidation crosslink of polydimethylsiloxane was occurred. Increasing in hardness was obtained from the measurement results, as show in Fig. 9. Increasing of hardness confirmed the chemical reaction in silicone rubber.

### IV. CONCLUSION

Silicone rubber polymer insulators were tested under salt water dip wheel test and were subjected to electric field at ac 35 V/mm for 30,000 test cycles. Surface tracking and shed puncture were observed on the specimen surface after 30,000 test cycles. Dry band arc discharge and corona discharge caused surface damaging of the tested specimen. In addition, decreasing of hydrophobicity was measured on tested specimen surface when comparing with the new specimen. UV and heat from the dry band arc discharges

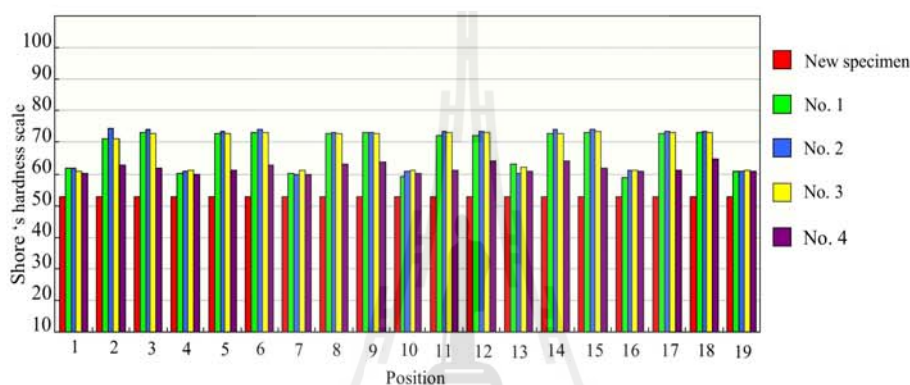


Fig. 9 Hardness of specimen surface after 30,000 test cycles.

and corona discharges caused loss of hydrophobicity. SDD of tested specimens in range 0.4-0.7 mg/cm<sup>2</sup> was measured. The pollutions caused dirt on the specimen surface.

ATR-FTIR analysis results showed the chemical change of side chain (Si-CH<sub>3</sub>) and backbone (Si-O). The observation results were confirmed by chemical analysis results. Furthermore, hardness measurement results show that the tested specimen harder than the new specimen.

### ACKNOWLEDGMENT

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

### REFERENCES

- [1] R. Hackam, "Outdoor HV Composite Polymeric Insulators", *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 6, pp. 262-269, 1999.
- [2] Y. Z. Khan, A. A. Al-Arainy, N. H. Malik and M. I. Qureshi, "Effect of Thermo-Electrical Stresses and Ultra-Violet Radiation on Polymeric Insulators", Final Research Report No. EE-18/26/27, King Saud University, Saudi Arabia, 2006.
- [3] Y. Ono, "Silicone- Fields of Application and Technological Trends", Shin-Etsu Chemical Co. Ltd., Japan, 2003.
- [4] B. Marungsri, "Fundamental Investigation on Salt Fog Ageing Test of Silicone Rubber Housing Materials for Outdoor Polymer Insulators", Doctoral Thesis, Chubu University, 2006.
- [5] A. Muncivi, P. Sarkar and A. Haddae, "Tracking Wheel Test Facilities", in *Conference Record of IEEE International Conference on Communications*, pp. 1-5, 2009.
- [6] G. Xu, P. B. Mcgrath and C. W. Burns, "Accelerated Environmental and Electrical Aging of Polymer Insulators", *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, San Francisco, pp. 404-407, 1996.
- [7] C. Hillborg, "Loss and Recovery of Hydrophobicity of Polydimethylsiloxane after Exposure to Electrical Discharges", Doctoral Thesis, Department of Polymer Technology, Royal Institute of Technology, 2001.
- [8] Y. Yu, L. Xidong, Z. Yuanxiang and L. Xuesong, "Study of Tracking Wheel Test Method under DC Voltage", *International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Vol. 1, No. 1, pp. 439-442, 2003.
- [9] IEC 62217 Ed. 1.0, Committed Draft, Sep. 2002.
- [10] I. J. S. Lopes, S. H. Jayaram and E. A. Cherney, "A Method for Detecting the Transition from Corona from Water Droplets to Dry-Band Arcing on Silicone Rubber Insulators", *IEEE Trans. on DEL.*, Vol. 6, pp. 964-971, 2002.
- [11] N. Yoshimura and S. Kumagai, "Electrical Environmental Aging of Silicone Rubber Used in Outdoor Insulation", *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 6, pp. 632-650, 1999.
- [12] B. Marungsri, H. Shinokubo and R. Matsuoka, "Effect of Specimen Configuration on Deterioration of Silicone Rubber for Polymer Insulators in Salt Fog Ageing Test", *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 13, pp. 129-138, 2006.
- [13] J. Burnham, "Guideline for Visual Identification of Damage Polymer Insulators" France, 1998.
- [14] IEC 60507 Ed. 2 b: 1991, "Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on AC systems".
- [15] STRI Guide, "Hydrophobicity Classification Guide", 92/1, 1992.
- [16] ISO 868, "Plastics and ebonite - Determination of indentation hardness by means of a durometer (Shore hardness)".



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



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



**Worawit Payakcho** was born in Phra Nakhon Si Ayutthaya, Thailand, in 1986. He received his B.Eng. in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, in 2007. He is currently a graduated student in school of Electrical Engineering, institute of Engineering at same the University. His interesting areas High voltage Technology applications, High Voltage Insulation Technology and Power System Technology.



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

# Comparison of Ageing Deterioration of Silicone Rubber Outdoor Polymer Insulator under Salt Water Dip Wheel Test

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

**Abstract**—This paper presents the experimental results on ageing deterioration of silicone rubber outdoor polymer insulator under salt water dip wheel test based on IEC 62217. In order to comparison effect of chemical contents, silicone rubber outdoor polymer insulators having same configuration and leakage distant from two manufactures were tested together continuously 30,000 test cycles. Many discharge activities were observed in during the test. After 30,000 test cycles, in spite of same configuration, differences in degree of surface aging were observed. Physical analysis such as decreasing in hydrophobicity and increasing in hardness measurement were measured on two-type tested specimen surface in order to confirm degree of surface ageing. Furthermore, chemical analysis by ATR-FTIR to diagnose the chemical change of tested specimen surface was conducted to confirm the physical analysis results.

**Keywords**—ageing of silicone rubber, salt water dip wheel test, silicone rubber polymer insulator

## I INTRODUCTION

SILICONE rubber or polydimethylsiloxane (PDMS) has been widely used to produced housing material for insulators in high voltage outdoor insulation system. Silicone rubbers have advantages of low cost, light weight, high mechanical strength, low surface tension energy and good electrical strength comparing with porcelain and glass insulators. Due to silicone rubber or PDMS having organic nature, environmental conditions are important factor for structural changing in PDMS material. In addition, electrical stress is mainly caused discharge activities to polymer insulator surface such as dry band arc and corona discharge etc. Resulting, polymer insulator surface was damaged by environmental and electrical conditions. Physical change (such as tracking) and chemical change (such as loss of hydrophobicity) were affected to ageing on polymer insulator surface [1-5].

Yu et al. [6] studied about the properties of tracking wheel test method under DC voltages such as positive DC voltage and negative DC voltage. The result of tested under DC

voltage compared with the result of tested under AC voltage.

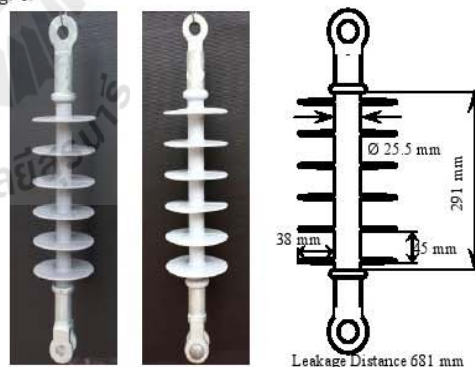
Muncivi et al. [7] used the software and hardware computer control were studied the tracking of the silicone rubber polymer insulators. The testing of silicone rubber polymer insulators were tested 181 cycles base on BS EN 62217:2006.

This paper reports the experimental study on ageing deterioration of silicone rubber outdoor polymer insulator for 22 kV distribution systems under salt water dip wheel test.

## II TEST ARRANGEMENTS

### A. Specimen

Straight shed polymer insulators made of HTV silicone rubber with ATH (Alumina trihydrate) were used in this experimental. This type of polymer insulator is used for 22 kV distribution systems. However, amounts of chemical contents of housing material are different due to different manufactures. All specimens having same configuration and dimension were tested together under test conditions based on IEC 62217 [8]. Configuration and dimension of the specimen are illustrated in Fig. 1.



(a) Type-A (b) Type-B (c) Dimension  
Leakage Distance 681 mm  
Fig. 1 Specimen

### B. Test Method

Test methods for salt water dip wheel test were based on IEC 62217 [9]. Cyclic test was conducted continuously for 30,000 cycles. One test cycle takes 192 second and includes 4 test positions, energized, de-energized, salt water dip and de-energized, respectively. At each position, specimen remains stationary for 40 second and takes 8 second for rotate to the next position. Salt water was re-newed every week with re-

J. Grasaesom, S. Thong-om and W. Payakcho are graduate student in Suvaranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand.

A.Oonsivilai is with Center of Excellence in Electric Energy, Smart Materials, and Health Science, Postharvest Technology Research Center, School of Electrical Engineering, Suvaranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000 Thailand.

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

newing time less than 1 hour. Test arrangement for dip wheel test is shown in Fig. 2 and the specimen arrangement during test is shown in Fig. 3.

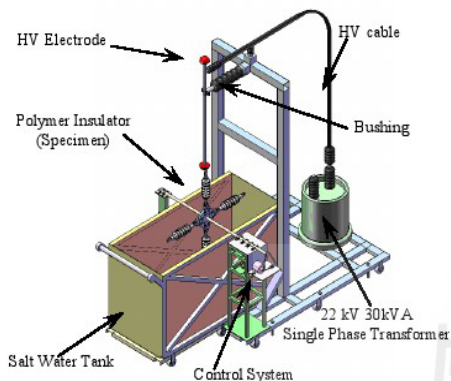


Fig. 2 Test arrangement for salt water dip wheel test



Fig. 3 Specimen arrangement during salt water dip wheel test

*A. Visual observation*

During test, visual observation was used to observe the physical changing of silicone rubber polymer insulators surface. Many discharge activities were observed during the test, dry band arc and corona discharge were often observed on the trunk surface.

As shown in Fig. 4, visible discharge activities during the test were often observed on the trunk surface for all specimens. Yellow light paths indicate dry band arcing and purple light spot indicate corona discharges. These phenomena caused reduction of hydrophobic and ageing deterioration on surface of silicone rubber polymer insulators [9-12]

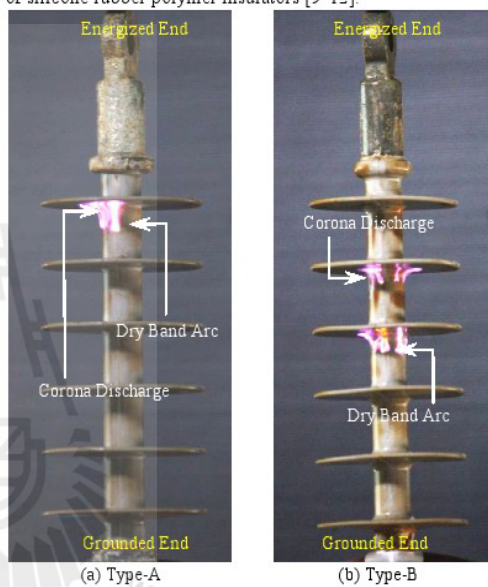


Fig. 4 Visible discharge activities during salt water dip wheel test.

*C. Test Condition*

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

| TABLE I<br>TEST CONDITIONS           |  |
|--------------------------------------|--|
| Voltage stress                       | 35 V/mm (AC voltage)                           |
| NaCl content of de-ionized water     | 1.4 kg/m <sup>3</sup> ± 0.06 kg/m <sup>3</sup> |
| Test duration (1 cycle = 192 second) | 30,000 cycles                                  |

III. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSIONS

Degree of physical damaged was inspected by visual observation, reduction of hydrophobicity, surface contamination degree and hardness after 30,000 test cycles. In addition, any chemical changing of specimen surface was analyzed by using ATR-FTIR. The chemical analysis results were used to confirm the physical changing.

After 30,000 test cycles, significant changing on the specimen surface was observed on all tested specimen. Many types of surface ageing, such as erosion and tracking etc., were observed.

As shown in Fig. 5 (a), dirt was observed on both shed and trunk surfaces of tested specimen.

As shown in Fig. 5 (b), slightly surface tracking was observed on parting line of trunk surface near the energized end.

As shown in Fig 5 (c) and Fig. 5 (d), severely tracking was observed on the parting line of trunk surface near the grounded end. The occurrence of surface tracking on such position may due to higher electric field stress. Electrical discharges may cause surface damaged [13].

As shown in Fig. 6 (a), dirt was observed on both shed and trunk surface of type-B specimen same as type-A specimen

As shown in Fig. 6 (b) and Fig. (c), slightly surface tracking was observed on both shed and trunk surface near the energized end. As shown in Fig. 6 (d), punched of trunk near

ground end was observed. The puncture was observed on the parting line of trunk.

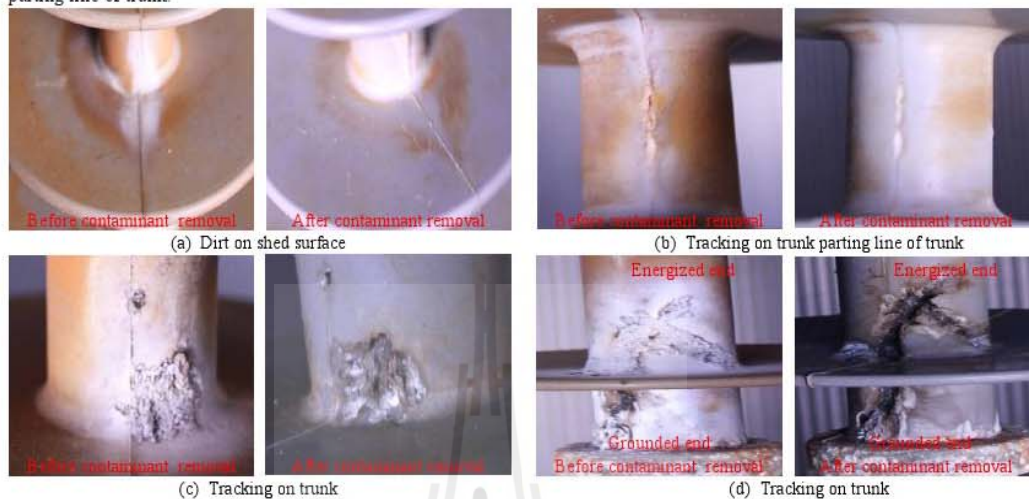


Fig. 5 Surface damaged of Type-A specimen



Fig. 6 Surface damaged of Type-B specimens

**B. Contamination Degree**

Under contamination condition, contamination layer causes leakage current along the specimen surface and leakage current causes dry band. Finally, higher electric field stress over dry band causes dry band arcing. Dry band arcs cause tracking on the insulator surface. Therefore, salt deposit density (*SDD*) is used to identify the contamination level along the insulators surface. The formulas for *SDD* calculation are as follows.

$$S_a = (5.7\sigma_{20})^{1.03} \quad (1)$$

$$SDD = \frac{S_a \times V}{A} \quad (2)$$

where:

- $\sigma_{20}$  is the volume conductivity at temperature of 20°C (S/m)
- $S_a$  is salinity (kg/m<sup>3</sup>)
- SDD* is the salt deposit density (kg/m<sup>2</sup>)
- V* is the volume of the suspension (m<sup>3</sup>)
- A* is the area of the cleaned surface (m<sup>2</sup>) [14,15].

TABLE II  
SDD AFTER 30,000 TEST CYCLES

| Type-A Specimen         |        | Type-B Specimen |        |
|-------------------------|--------|-----------------|--------|
| SDD, mg/cm <sup>2</sup> |        |                 |        |
| No. 1                   | 0.0205 | No. 1           | 0.0228 |
| No. 2                   | 0.0178 | No. 2           | 0.0149 |

As illustrated in Table II, no significant different in SDD was obtained. This may due to tested specimen having same configuration and dimension.

C. Hydrophobicity

By products from discharge activities such as heat and UV

can cause reduction of hydrophobicity of polymer insulator surface. STRI classification guide as shown in Fig. 7, is used to specified the level of hydrophobicity for the specimens [16,17]. HC level for tested specimen was evaluated. The evaluation results are shown in Fig. 8 and are shown in Table III.

After 30,000 test cycles, reduction of hydrophobicity level on all specimens was obtained when comparing with the new specimen. As illustrated in Table III, largest reduction of hydrophobicity (HC5) was measured on trunk surface of all specimens. For shed surface, reduction of hydrophobicity level at HC3 was measured.

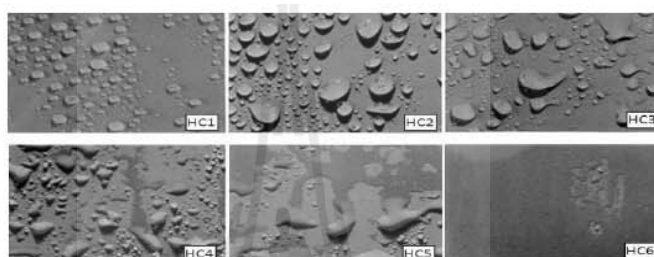


Fig. 7 Classification of hydrophobicity (HC1-HC6)[15]

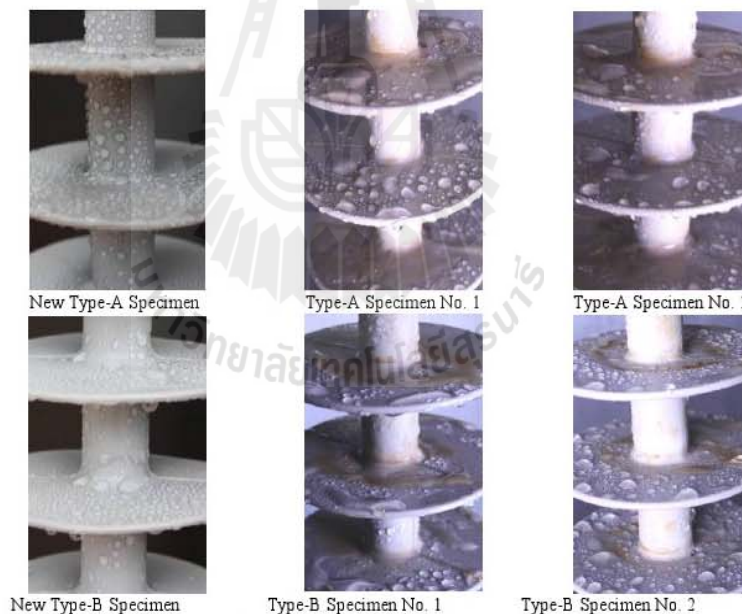


Fig. 8 Comparison of reduction of hydrophobicity

TABLE III  
REDUCTION OF HYDROPHOBICITY AFTER 30,000 TEST CYCLES

| Position | Specimen |        |       |     |        |       | Position<br>Energized end |
|----------|----------|--------|-------|-----|--------|-------|---------------------------|
|          | New      | Type-A |       | New | Type-B |       |                           |
|          |          | No. 1  | No. 2 |     | No. 1  | No. 2 |                           |
| 1        |          | HC3    | HC5   |     | HC3    | HC4   |                           |
| 2        |          | HC3    | HC3   |     | HC4    | HC4   |                           |
| 3        |          | HC4    | HC2   |     | HC3    | HC3   |                           |
| 4        |          | HC5    | HC4   |     | HC5    | HC5   |                           |
| 5        |          | HC4    | HC4   |     | HC4    | HC4   |                           |
| 6        |          | HC3    | HC3   |     | HC3    | HC3   |                           |
| 7        |          | HC5    | HC4   |     | HC4    | HC5   |                           |
| 8        |          | HC3    | HC4   |     | HC4    | HC4   |                           |
| 9        |          | HC3    | HC3   |     | HC3    | HC3   |                           |
| 10       | HCI      | HC5    | HC4   | HCI | HC5    | HC5   |                           |
| 11       |          | HC4    | HC4   |     | HC4    | HC4   |                           |
| 12       |          | HC3    | HC3   |     | HC3    | HC3   |                           |
| 13       |          | HC3    | HC3   |     | HC5    | HC5   |                           |
| 14       |          | HC4    | HC3   |     | HC4    | HC4   |                           |
| 15       |          | HC3    | HC3   |     | HC3    | HC2   |                           |
| 16       |          | HC4    | HC3   |     | HC5    | HC4   |                           |
| 17       |          | HC3    | HC3   |     | HC4    | HC4   |                           |
| 18       |          | HC4    | HC3   |     | HC3    | HC2   |                           |
| 19       |          | HC3    | HC3   |     | HC4    | HC4   |                           |

D. ATR-FTIR Analysis

ATR-FTIR (attenuated total reflection Fourier transform infrared spectroscopy) is chemical analysis technique for the chemical bonds changing inspection. Side chains bond (Si-CH<sub>3</sub>) at wave number 1258 cm<sup>-1</sup> and back bond (Si-O) at wave number 1010 cm<sup>-1</sup> of silicone rubber surface were analyzed. Reduction of Si-CH<sub>3</sub> indicates side chain scission. Reduction of Si-O spectrum indicates back bond scission. An example of ATR-FTIR spectrum of trunk surface at position 10 of tested

surface comparing with the new specimen surface is illustrated in Fig. 9. After 30,000 test cycles, decreasing of side chain and back bond spectrums were obtained for both types of tested specimens when comparing with the new specimen. Mostly changing of side chain and back bone bonds were measured on trunk surface when comparing with shed surface. ATR-FTIR analysis results for all position of all-type specimens are illustrated in Table IV and Table V.

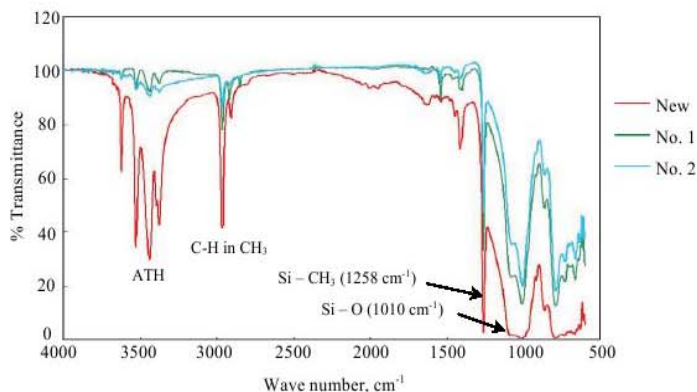


Fig. 9 ATR- FTIR spectrum of Type-A specimen at position 10

TABLE IV  
TRANSMITTANCE OF Si-CH<sub>3</sub> BOND AFTER 30,000 TEST CYCLES


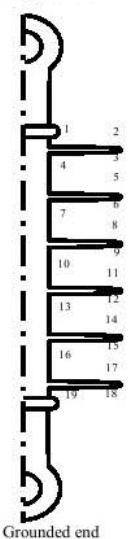
| Position | Transmittance of Si-CH <sub>3</sub> (1258 cm <sup>-1</sup> ), % |                 |       |     |                 |       | Position<br>Energized end  |
|----------|---|-----------------|-------|-----|-----------------|-------|--|
|          | New   | Type-A Specimen |       | New | Type-B Specimen |       |  |
|          |   | No. 1           | No. 2 |     | No. 1           | No. 2 |  |
| 1        |   | 49.60           | 53.86 |     | 22.20           | 36.38 |  |
| 2        | ↑   | 77.79           | 80.70 | ↑   | 77.65           | 80.36 |  |
| 3        |   | 79.11           | 86.18 |     | 84.99           | 80.37 |  |
| 4        |   | 59.08           | 41.07 |     | 13.60           | 30.96 |  |
| 5        |   | 79.03           | 75.34 |     | 82.39           | 77.35 |  |
| 6        |   | 82.25           | 88.65 |     | 88.35           | 70.83 |  |
| 7        |   | 42.75           | 26.59 |     | 45.43           | 67.78 |  |
| 8        |   | 85.02           | 88.44 |     | 78.56           | 77.67 |  |
| 9        | ↓   | 83.93           | 84.41 | ↓   | 95.17           | 82.42 |  |
| 10       |   | 68.07           | 51.91 |     | 36.00           | 66.30 |  |
| 11       |   | 74.26           | 81.95 |     | 76.66           | 84.61 |  |
| 12       |   | 82.16           | 88.78 |     | 81.81           | 80.28 |  |
| 13       |   | 75.60           | 22.14 |     | 64.19           | 43.66 |  |
| 14       |   | 83.18           | 97.42 |     | 85.93           | 73.61 |  |
| 15       |   | 85.75           | 97.43 |     | 83.07           | 83.43 |  |
| 16       |   | 69.19           | 49.02 |     | 71.42           | 70.57 |  |
| 17       |   | 78.77           | 94.55 |     | 82.76           | 75.57 |  |
| 18       |   | 73.83           | 91.29 |     | 73.49           | 70.04 |  |
| 19       | ↓   | 68.18           | 26.95 | ↓   | 37.83           | 21.46 |  |

TABLE V  
TRANSMITTANCE OF Si-O BOND AFTER 30,000 TEST CYCLES

| Position | Transmittance of Si-O (1010 cm <sup>-1</sup> ), % |                 |       |     |                 |       | Position<br>Energized end   |
|----------|---|-----------------|-------|-----|-----------------|-------|---|
|          | New   | Type-A Specimen |       | New | Type-B Specimen |       |   |
|          |   | No. 1           | No. 2 |     | No. 1           | No. 2 |   |
| 1        |   | 79.01           | 75.33 |     | 63.70           | 80.40 |  |
| 2        | ↑   | 78.81           | 86.04 | ↑   | 92.73           | 88.83 |   |
| 3        |   | 80.09           | 87.98 |     | 92.74           | 89.42 |   |
| 4        |   | 84.90           | 69.26 |     | 93.37           | 69.76 |   |
| 5        |   | 82.33           | 81.80 |     | 89.90           | 88.35 |   |
| 6        |   | 86.58           | 91.80 |     | 93.88           | 85.56 |   |
| 7        |   | 69.10           | 63.31 |     | 85.57           | 68.68 |   |
| 8        |   | 85.87           | 88.98 |     | 99.61           | 84.99 |   |
| 9        | ↓   | 83.24           | 86.19 | ↓   | 96.05           | 87.37 |   |
| 10       |   | 87.43           | 80.33 |     | 70.49           | 86.04 |   |
| 11       |   | 79.74           | 84.57 |     | 92.87           | 91.04 |   |
| 12       |   | 84.37           | 88.89 |     | 93.34           | 84.12 |   |
| 13       |   | 83.54           | 57.47 |     | 90.28           | 80.18 |   |
| 14       |   | 91.51           | 96.44 |     | 92.07           | 92.94 |   |
| 15       |   | 88.26           | 96.41 |     | 94.02           | 86.74 |   |
| 16       |   | 85.93           | 81.23 |     | 94.20           | 85.82 |   |
| 17       |   | 84.02           | 94.35 |     | 91.73           | 89.73 |   |
| 18       |   | 78.69           | 91.22 |     | 92.90           | 87.93 |   |
| 19       | ↓   | 87.52           | 40.87 | ↓   | 79.43           | 52.01 |   |



**E. Hardness Measurement Results**

In this study, hardness was measured based on ISO 686-Shore hardness [18] by using Shore durometer. Measurement results of hardness are shown in Table VI. As shown in Table VI, increasing in hardness of all tested specimens was obtained when comparing with new

specimen. Increasing in surface hardness indicate the occurrence of oxidation crosslink of polydimethylsiloxane matrix. More increasing in hardness was measured on specimen type-A when comparing specimen type-B. In addition, increasing of surface hardness confirmed the chemical reaction in the specimen surface.

TABLE VI  
HARDNESS OF SPECIMEN AFTER 30,000 TEST CYCLES

| Position | Shore 's hardness scale |       |       |                 |       |       | Position Energized end |
|----------|-------------------------|-------|-------|-----------------|-------|-------|------------------------|
|          | Type-A Specimen         |       |       | Type-B Specimen |       |       |                        |
|          | New                     | No. 1 | No. 2 | New             | No. 1 | No. 2 |                        |
| 1        |                         | 51.68 | 52.80 |                 | 52.24 | 55.20 |                        |
| 2        | ↑<br>38.08<br>↓         | 61.36 | 63.04 | ↑<br>43.36<br>↓ | 56.96 | 56.88 |                        |
| 3        |                         | 51.52 | 63.28 |                 | 50.80 | 53.36 |                        |
| 4        |                         | 42.16 | 50.40 |                 | 49.76 | 48.48 |                        |
| 5        |                         | 53.48 | 63.12 |                 | 53.04 | 54.32 |                        |
| 6        |                         | 62.56 | 63.52 |                 | 57.76 | 56.40 |                        |
| 7        |                         | 42.56 | 47.92 |                 | 50.32 | 48.24 |                        |
| 8        |                         | 61.84 | 61.84 |                 | 57.84 | 56.64 |                        |
| 9        |                         | 61.92 | 62.72 |                 | 51.28 | 52.40 |                        |
| 10       |                         | 42.40 | 51.28 |                 | 50.32 | 48.24 |                        |
| 11       |                         | 62.40 | 62.80 |                 | 54.72 | 55.60 |                        |
| 12       |                         | 62.48 | 62.96 |                 | 58.16 | 55.36 |                        |
| 13       |                         | 43.28 | 46.00 |                 | 74.2  | 46.96 |                        |
| 14       |                         | 62.16 | 62.80 |                 | 58.64 | 57.04 |                        |
| 15       |                         | 61.76 | 62.64 |                 | 54.16 | 55.20 |                        |
| 16       |                         | 47.12 | 46.64 |                 | 49.04 | 54.56 |                        |
| 17       |                         | 62.96 | 63.20 |                 | 56.96 | 54.56 |                        |
| 18       |                         | 63.20 | 62.88 |                 | 53.04 | 56.80 |                        |
| 19       |                         | 54.24 | 52.64 |                 | 54.16 | 50.64 |                        |

**IV. CONCLUSION**

Silicone rubber polymer insulators having same configurations and dimensions from two manufacturers were tested under salt water dip wheel test for 30,000 cycles and were subjected to electric field at 35 V ac /mm. Surface tracking and trunk puncture were observed on both type specimen surfaces after 30,000 test cycles. However, severely tracking was observed on specimen type-A comparing with specimen type- B. Physical analysis results and chemical analysis results confirmed the experimental results as well.

**ACKNOWLEDGMENT**

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

**REFERENCES**

[1] M. G. Danikas, "Polymer Outdoor Insulators", Department of Electrical and Computer Engineering, Democritus University of Thrace, Vol. 40, No. 1, pp. 3-10, 1999.

[2] J. Grasaesom, S. Thong-om, W. Payakcho and B. Marungsri, " Ageing Deterioration of Silicone Rubber Polymer Insulator under Salt Water Dip Wheel Test", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Issue 80, August 2011, pp. 211-217.

[3] S. Thong-om, W. Payakcho, J. Grasaesom and B. Marungsri, " Study of Ageing Deterioration of Silicone Rubber Housing Material for Outdoor Polymer Insulators", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Issue 80, August 2011, pp. 533-539.

[4] S. Kumagai, B. Marungsri, H. Shinokubo, R. Matsuoka and N. Yoshimura, "Comparison of Leakage Current and Aging of Silicone Rubbers and Porcelain in both Field and Salt-fog Tests", *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 13, pp. 1286-1302, 2006.

[5] W. Payakcho, J. Grasaesom, S. Thong-om and B. Marungsri, " Artificial Accelerated Ageing Test of Silicone Rubber Housing Material for Lightning Arrester", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Issue 80, August 2011, pp. 650-655.

[6] Y. Yu, L. Xidong, Z. Yuanxiang and L. Xuesong, "Study of Tracking Wheel Test Method under DC Voltage", *International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Vol. 1, No. 1, pp. 439-442, 2003.

[7] A. Muncivi, P. Sarkar and A. Haddae, "Tracking Wheel Test Facilities", in *Conference Record of IEEE International Conference on Communications*, pp. 1-5, 2009.

[8] IEC 62217 Ed. 1.0, Committed Draft, Sep. 2002.

- [9] M. Amin and M. Salman, "Aging of Polymer Insulators (An Overview)", Department of Electrical Engineering, University of Engineering and Technology, 2006.
- [10] N. Yoshimura and S. Kumagai, "Electrical Environmental Aging of Silicone Rubber Used in Outdoor Insulation", *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 6, pp. 632-650, 1999.
- [11] B. Marungsri, H. Shinokubo and R. Matsuoka, "Effect of Specimen Configuration on Deterioration of Silicone Rubber for Polymer Insulators in Salt Fog Ageing Test", *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 13, pp. 129-138, 2006.
- [12] I. J. S. Lopes, S. H. Jayaram and E. A. Chemy, "A Method for Detecting the Transition from Corona from Water Droplets to Dry-Band Arcing on Silicone Rubber Insulators", *IEEE Trans. on DEI*, Vol. 6, pp. 964-971, 2002.
- [13] J. Burnham, "Guideline for Visual Identification of Damage Polymer Insulators" France, 1998.
- [14] M. A. Salam, N. Mohammad, Z. Nadir and A. A. Magrashi, "Measurement of Conductivity and Equivalent Salt Deposit Density of Contaminated Glass Plate", *TENCON 2004, 2004 IEEE Region 10 Conference*, Vol. 3, pp.268-270, 2004.
- [15] IEC 60507 Ed. 2 b: 1991, "Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on AC systems".
- [16] H. Gao, Z. Jia, Y. Moa, Z. Guan and L. Wang, "Effect of Hydrophobicity on Electric Field Distribution and Discharges along Various Wetted Hydrophobic Surfaces", *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 15, pp. 435-443, 2008.
- [17] STRI Guide, "Hydrophobicity Classification Guide", 92/1, 1992.
- [18] ISO 868, "Plastics and ebonite – Determination of indentation hardness by means of a durometer (Shore hardness)".



**Anant Oonsivilai**, was born in Khon Kaen Province, Thailand, in 1963. He received his B.Eng from Khon Khan University, and M.Eng. from King Mongkut Institute of Technology North Bangkok, Thailand and Ph.D. From Dalhousie University, Canada, all in Electrical Engineering, in 1986, 1992 and 2000, respectively. Dr. Oonsivilai is currently an Assistant Professor in school of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand.



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

high voltage insulation technologies and electrical power system.



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

insulation technology and power system technology.



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



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

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

## ประวัติผู้เขียน

นางสาวเจนจิรา กระแส โสม เกิดเมื่อวันที่ 15 กรกฎาคม พ.ศ. 2529 ที่อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา เริ่มศึกษาระดับอนุบาลที่โรงเรียนอนุบาลบวร อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนสุخانารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและสำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนสุรนารีวิทยา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2546 ในภายหลังได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมาและสำเร็จการศึกษาในปี 2550 จากนั้นจึงได้ศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ในกลุ่มวิจัยไฟฟ้ากำลังและพลังงาน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยระหว่างศึกษาระดับปริญญาโท มีประสบการณ์สอนเป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ได้แก่ (1) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า (2) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 (3) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 2 และ (3) ปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง 2 โดยมีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะที่ได้ศึกษาดังปรากฏในภาคผนวก ค. ทั้งนี้ผู้วิจัยมีความสนใจทางด้านระบบไฟฟ้ากำลัง และวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

