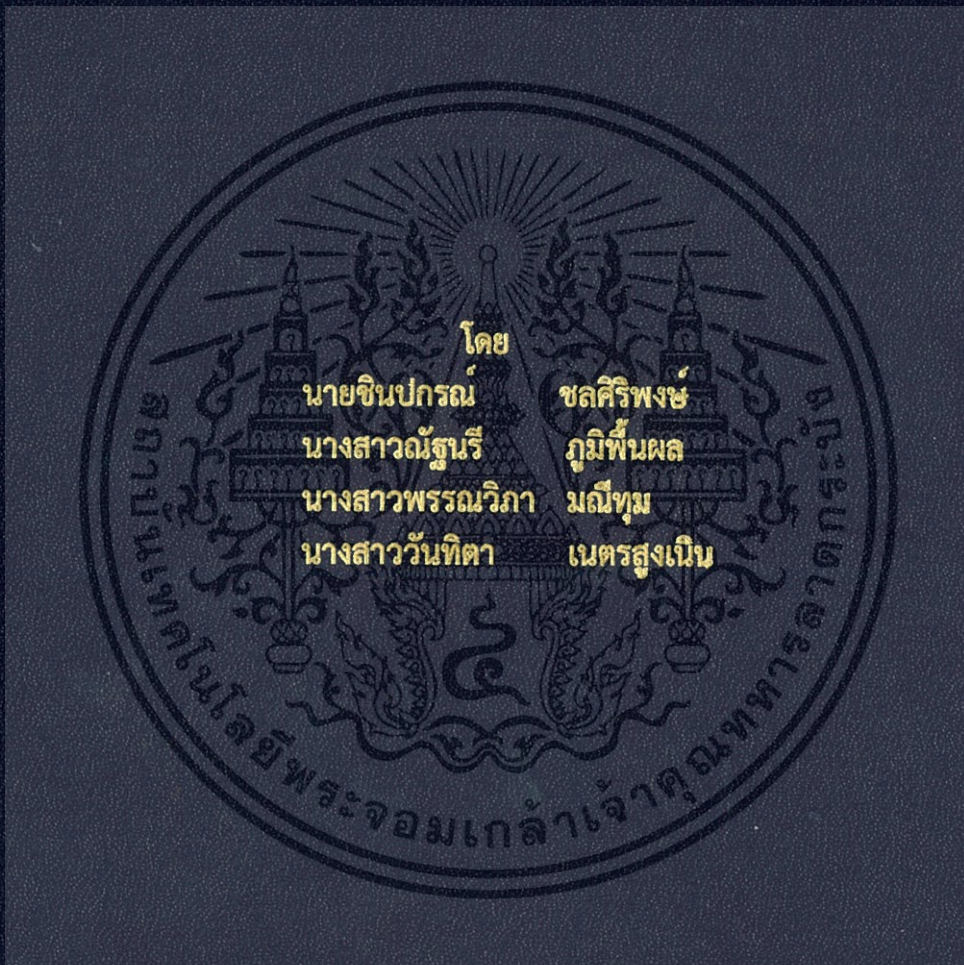


การวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวิธีวัดกระแสโพลาริเซชันและ
ดีโพลาริเซชัน

ANALYSIS OF GENERATOR INSULATION BY POLARISATION AND DEPOLARISATION
CURRENT MEASUREMENT



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวิธีวัดกระแสโพลาริเซชันและ
ดีโพลาริเซชัน

ANALYSIS OF GENERATOR INSULATION BY POLARISATION AND
DEPOLARISATION CURRENT MEASUREMENT



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANALYSIS OF GENERATOR INSULATION BY POLARISATION AND
DEPOLARISATION CURRENT MEASUREMENT



A PAPER SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2559

การวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวิธีวัดกระแสโพลาริเซชันและ
ดีโพลาริเซชัน

ANALYSIS OF GENERATOR INSULATION BY POLARISATION AND
DEPOLARISATION CURRENT MEASUREMENT



โดย

นายชินปกรณ ชลศิริพงษ์
นางสาวณัฐนรี ภูมิพินผล
นางสาวพรรณวิภา มณีทุม
นางสาววันทิตา เนตรสูงเนิน

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช
ดร.ภพ จันท์เจริญสุข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การวิเคราะห์ห้นวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวิธีวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและ
ดีโพลาริซ์เซชัน

ผู้จัดทำ

- 
1. นายชินปกรณ์ ชลศิริพงษ์
 2. นางสาวณัฐนรี ภูมิพื้นผล
 3. นางสาวพรรณวิภา มณีทุม
 4. นางสาววันทิตา เนตรสูงเนิน

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร.ภพ จันท์เจริญสุข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวิธีวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและ ดีโพลาริซ์เซชัน

นายชินปกรณ์ ชลศิริพงษ์
นางสาวณัฐนรี ภูมิพื้นผล
นางสาวพรรณวิภา มณีทุม
นางสาววันทิตา เนตรสูงเนิน
รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา
ดร.ภพ จันท์เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพิกัด 13.8 kV ที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 30 ปี ด้วยวิธีการวิเคราะห์กระแสโพลาริซ์และกระแสดีโพลาริซ์ ในการศึกษา จะจำลองกรณีศึกษาคุณสมบัติของฉนวนสเตเตอร์ทั้งสิ้น 6 กรณี คือ กรณีที่ฉนวนสเตเตอร์เสื่อม เนื่องจากความร้อน กรณีเสื่อมเนื่องจากผลของการเกิด PD กรณีเสื่อมเนื่องจากผลของการเกิดรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้างของชั้นทดสอบ กรณีเสื่อมเนื่องจากเกิดโพรงอากาศภายในเนื้อฉนวน กรณีเสื่อมเนื่องจากเกิดโพรงน้ำมันภายในเนื้อฉนวน กรณีเสื่อมเนื่องจากเกิดโพรงน้ำภายในเนื้อฉนวน ผลการวัดกระแสโพลาริซ์และกระแสดีโพลาริซ์ และค่าแฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริก รวมทั้งค่ากระแสการนำไฟฟ้าของฉนวนสเตเตอร์ก่อนและหลังการจำลองกรณีศึกษาการเสื่อมสภาพจะถูกวิเคราะห์ รวมทั้งผลของการมีและไม่มีคาร์ตริงในวงจร PDC จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วย จากการทดลองพบว่าวงจรที่ต่อคาร์ตริงจะมีค่ากระแสโพลาริซ์เซชันและกระแสดีโพลาริซ์เซชันต่ำกว่าวงจรวัดที่ไม่ต่อคาร์ตริง เนื่องจากการคาร์ตริงจะกำจัดผลของกระแสรั่วไหลตามผิวฉนวน และพบว่าหลังจากการจำลองการเสื่อมสภาพเนื่องจากรอยเสียดสี โพรงน้ำมันฉนวน และโพรงน้ำ ค่ากระแสโพลาริซ์เซชันและกระแสดีโพลาริซ์เซชันรวมทั้งแฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกจะสูงกว่าฉนวนเดิม ในกรณีของการจำลองการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โพรงอากาศ และ PD ค่ากระแสโพลาริซ์เซชันและกระแสดีโพลาริซ์เซชันรวมทั้งแฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกจะต่ำกว่าฉนวนเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANALYSIS OF GENERATOR INSULATION BY POLARISATION AND DEPOLARISATION CURRENT MEASUREMENT

Mr.Chinpakorn	Cholsiripong	
Ms.Natnaree	Phumpunpeon	
Ms.Punwipa	Maneethum	
Ms.Wanthita	Netsungnoen	
Assoc.Prof.Dr.techn.Norasage	Pattanadech	Advisor
Dr.Phop Chancharoensook		Advisor

ABSTRACT

The project investigates the insulation characteristic of the stator bar rated 13.8 kV which has been operated for 30 years by analysis the polarization and depolarization current (PDC). The PDC of the original insulation sample was measured compared with the simulated degraded insulation sample. The 6 case studies of the degraded insulation were comprised of thermal degraded insulation, water cavity in the insulation, oil cavity in the insulation, air cavity in the insulation, outer corona protection failure insulation and the insulation with partial discharge existence. The test results ,PDC, dielectric dissipation factor including the conduction current. The original bar and the simulated degraded insulation bar were analyzed. Besides the effect of guard ring in the PDC measurement was examined from the test result, it was found that the PDC obtained from PDC measurement with guard ring was lower than that of the PDC acquired from PDC measurement without guard ring. This was due to the guard ring can get rid of leakage current. The outer corona protection failure insulation, the oil cavity in the insulation and the water cavity in the insulation provided the higher PDC and higher dielectric dissipation factor than these of original one. However the thermal degraded insulation, the air cavity in the insulation and insulation with partial discharge existence provided the lower PDC and lower dielectric dissipation factor than these of the original one.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้คงไม่สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีหากปราศจากความช่วยเหลือของอาจารย์ที่ปรึกษาทั้งสองท่าน รศ.ดร. นรเศรษฐ พัฒนเดช และ ดร.ภพ จันท์เจริญสุข ผู้คอยให้คำปรึกษารวมทั้งชี้แนะแนวทางให้ความรู้เกี่ยวกับโครงงานและให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ขอขอบคุณ คุณ พัชรี ทองอินตะ และคุณเพทาย นิมสนอง ผู้คอยให้คำชี้แนะตลอดจนให้ความรู้และแบ่งปันประสบการณ์อันดีเกี่ยวกับการ ศึกษาฉนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและวิธีการทดสอบ PDC รวมไปถึง คุณ ปุณยวีร์ ฉายศิริ ที่คอยกรุณาตรวจแก้ไขปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆ ท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับกลุ่มข้าพเจ้าตลอดการศึกษาในระดับปริญญาตรี

ขอขอบคุณ คุณ วรชัย สวัสดิมงคล ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและกระแสดีโพลาริซ์เซชันจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ และขอขอบคุณพี่ๆ เจ้าหน้าที่บริษัท ทีไอเอส เอ็นจิเนียริ่ง แอนด์ เซอร์วิส ทุกท่าน ที่ได้ให้ความร่วมมือและถ่ายทอดความรู้ทางด้านเทคนิคของเครื่องวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและกระแสดีโพลาริซ์เซชันเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณ ธเนศ วอทอง และพี่ๆเจ้าหน้าที่พนักงานบริษัทโกลว์ พลังงาน จำกัดผู้ให้โอกาสกลุ่มของข้าพเจ้าได้สร้างประสบการณ์ในเรื่องการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและความรู้เกี่ยวกับกระบวนการทำงานภายในโรงไฟฟ้าในระหว่างที่เข้าไปศึกษาดูงานที่บริษัทโกลว์ พลังงาน จำกัด และยังได้ถ่ายทอดความรู้ในเรื่องเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในขณะที่มีการซ่อมบำรุงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกด้วย

ขอขอบคุณ คุณ วีระวุฒิ คำสาสินธุ์ และคุณชวลิต กันคำ ผู้ให้ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการทำงานภายในโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำอย่างละเอียดในระหว่างที่เข้าไปศึกษาดูงานที่โรงไฟฟ้าเขื่อนวชิราลงกรณ์ (การไฟฟ้าฝ่ายผลิต)ในขณะที่มีการซ่อมบำรุงเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อีกทั้งให้ความอนุเคราะห์ให้แท่งสเตเตอร์แบบโรเบลบาร์ที่ใช้ในการทำโครงงานและให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องอบแท่งสเตเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาทำโครงงานของกลุ่มข้าพเจ้า

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงดันสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำต่างๆ เกี่ยวกับโครงงานและให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือต่างๆ รวมถึงให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายขอขอบคุณครอบครัวของกลุ่มข้าพเจ้าที่ช่วยสนับสนุนเป็นอย่างดีและคอยให้กำลังใจในการทำงานเสมอมา

สำหรับคุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้ช่วยเหลือตลอดมา

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VIII
สารบัญตาราง	XV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 วิธีการดำเนินงาน	2
1.5 แผนการดำเนินงาน	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 สเตเตอร์	4
2.1.1 โครงสเตเตอร์	4
2.1.2 แกนสเตเตอร์	5
2.1.3 ขดลวดสเตเตอร์	5
2.2 โครงสร้างระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์	9
2.2.1 ลักษณะโครงสร้างระบบฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในขดลวดสเตเตอร์	9
2.2.2 ระดับชั้นฉนวน	10
2.2.3 ฉนวนที่ใช้สำหรับขดลวดสเตเตอร์	11
2.2.4 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของฉนวน	13
2.3 ปრაกฏการณ์โพลาริเซชัน	13
2.3.1 คุณสมบัติฉนวนในปรากฏการณ์โพลาริเซชัน	14
2.3.2 ชนิดของโพลาริเซชัน	16
2.4 กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน	19
2.4.1 กระแสโพลาริเซชัน	19
2.4.2 กระแสดีโพลาริเซชัน	21
2.5 วงจรการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน	22
บทที่ 3 ศึกษาดูงาน	23
3.1 โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ จังหวัดกาญจนบุรี	23
3.2 โรงไฟฟ้าโกลว์ จังหวัดระยอง	36
3.3 บริษัท เอเชียมอเตอร์ เซอร์วิส เซ็นเตอร์ จำกัด	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ IV ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

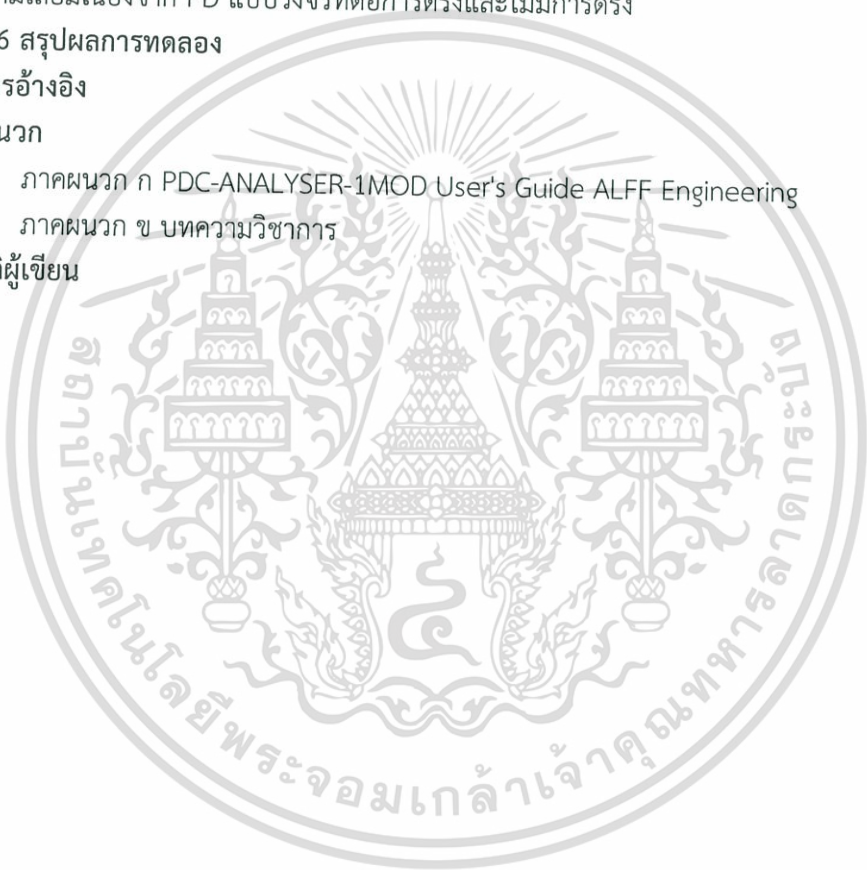
	หน้า
บทที่ 4 อุปกรณ์และออกแบบวิธีการทดสอบ	47
4.1 ชั้นทดสอบ	47
4.1.1 การเตรียมชั้นทดสอบ	47
4.1.2 การเตรียมชั้นทดสอบตามกรณีศึกษา	47
4.2 การต่อวงจรทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน	50
4.2.1 อุปกรณ์	50
4.2.2 วงจรวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน	50
4.3 วิธีการทดสอบ	53
4.3.1 การทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของชั้นทดสอบที่มีฉนวนสภาพดี เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการเปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่มีการจำลองกรณีเสื่อมสภาพ	53
4.3.2 การทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของแท่งสเตเตอร์โดยจำลองกรณีศึกษา	54
4.3.3 การวิเคราะห์แฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกก่อนและหลังการจำลองกรณีศึกษา	55
4.3.4 การวิเคราะห์ค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการจำลองกรณีศึกษา	56
บทที่ 5 ผลการทดสอบ	58
5.1 การทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันโดยวงจรที่มีการ์ดจริงและไม่มีการ์ดจริง	58
5.1.1 ชั้นทดสอบก่อนจำลองรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้างของชั้นทดสอบ	59
5.1.2 ชั้นทดสอบก่อนจำลองโพรงอากาศภายในชั้นทดสอบ	60
5.1.3 ชั้นทดสอบก่อนจำลองโพรงน้ำมันฉนวนในชั้นทดสอบ	61
5.1.4 ชั้นทดสอบก่อนจำลองโพรงน้ำภายในชั้นทดสอบ	62
5.1.5 ชั้นทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง	63
5.1.6 ชั้นทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง	64
5.1.7 ชั้นทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง	65
5.1.8 ชั้นทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง	66
5.2 การทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของชั้นทดสอบหลังการจำลองกรณี	67
5.2.1 การทดสอบวัดกระแสดีโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของชั้นทดสอบในกรณีเสื่อมเนื่องจากผลของการเกิดรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้างของชั้นทดสอบ	67
5.2.2 การทดสอบวัดกระแสดีโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของชั้นทดสอบในกรณีเสื่อมเนื่องจากเกิดโพรงอากาศภายในชั้นทดสอบ	69
5.2.3 การทดสอบวัดกระแสดีโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของชั้นทดสอบในกรณีเสื่อมเนื่องจากเกิดโพรงน้ำมันฉนวนภายในชั้นทดสอบ	71

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.2.4 การทดสอบวัดกระแสดีโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของชั้นทดสอบ ในกรณีเสื่อมเนื่องจากเกิดโพรงน้ำภายในชั้นทดสอบ	73
5.2.5 การทดสอบวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของชั้นทดสอบ กรณีเสื่อมเนื่องจากความร้อน	76
5.2.6 การทดสอบวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของชั้นทดสอบ กรณีเสื่อมเนื่องจากผลของการเกิด PD ในชั้นทดสอบ	86
5.3 การวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก	89
5.3.1 การวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริกก่อนและหลังการจำลอง รอยเสียดสีที่ผิวด้านข้างของชั้นทดสอบ	89
5.3.2 การวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริกก่อนและหลังการจำลอง โพรงอากาศภายในชั้นทดสอบ	90
5.3.3 การวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริกก่อนและหลังการจำลอง โพรงน้ำมันฉนวนภายในชั้นทดสอบ	91
5.3.4 การวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริกก่อนและหลังการจำลอง โพรงน้ำภายในชั้นทดสอบ	92
5.3.5 การวิเคราะห์แฟคเตอร์สูญเสียไดอิเล็กทริกก่อนและหลังการอบที่ อุณหภูมิ 100 °C	93
5.3.6 การวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริกก่อนและหลังการอบ ที่อุณหภูมิ 120 °C	94
5.3.7 การวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริกก่อนและหลังการอบ ที่อุณหภูมิ 140 °C	95
5.3.8 การวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริกก่อนและหลังการอบ ที่อุณหภูมิ 160 °C	96
5.3.9 การวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริกของชั้นทดสอบที่ ไม่เกิด PD และชั้นทดสอบที่มีความเสื่อมเนื่องจาก PD	97
5.4 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้า (icon)	98
5.4.1 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการจำลองรอยเสียดสีที่ผิว ด้านข้างของชั้นทดสอบแบบวงจรที่ต่อคาร์ตริงและไม่มีคาร์ตริง	98
5.4.2 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการจำลองโพรงอากาศ ภายในชั้นทดสอบแบบวงจรที่ต่อคาร์ตริงและไม่มีคาร์ตริง	99
5.4.3 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการจำลองโพรงน้ำมันฉนวน ภายในชั้นทดสอบแบบวงจรที่ต่อคาร์ตริงและไม่มีคาร์ตริง	100
5.4.4 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการจำลองโพรงน้ำภายใน ชั้นทดสอบแบบวงจรที่ต่อคาร์ตริงและไม่มีคาร์ตริง	101
5.4.5 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 100 °C แบบวงจรที่ต่อคาร์ตริงและไม่มีคาร์ตริง	102

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.4.6 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 120 °C แบบวงจรที่ต่ออาร์ตริงและไม่มีอาร์ตริง	103
5.4.7 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 140 °C แบบวงจรที่ต่ออาร์ตริงและไม่มีอาร์ตริง	104
5.4.8 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 160 °C แบบวงจรที่ต่ออาร์ตริงและไม่มีอาร์ตริง	105
5.4.9 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าของชั้นทดสอบที่ไม่เกิด PD และชั้นทดสอบ ที่มีความเสื่อมเนื่องจาก PD แบบวงจรที่ต่ออาร์ตริงและไม่มีอาร์ตริง	106
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง	107
เอกสารอ้างอิง	111
ภาคผนวก	112
ภาคผนวก ก PDC-ANALYSER-1MOD User's Guide ALFF Engineering	113
ภาคผนวก ข บทความวิชาการ	122
ประวัติผู้เขียน	127



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมวชิราลงกรณ จ.กาญจนบุรี (ก) สเตเตอร์ (ข) โรเตอร์	4
2.2 โครงสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำที่เชื่อมวชิราลงกรณ จ.กาญจนบุรี	4
2.3 แกนสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมวชิราลงกรณ จ.กาญจนบุรี	5
2.4 ขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมวชิราลงกรณ จ.กาญจนบุรี	5
2.5 การวางขดลวดสเตเตอร์แบบ Random-wound	6
2.6 ขดลวดสเตเตอร์แบบคอยล์	6
2.7 การพันแท่งทองแดงแบบ Transposition ของแท่งสเตเตอร์แบบแท่งโรเบล	7
2.8 (ก) แท่งสเตเตอร์แบบแท่งโรเบล (ข) การเชื่อมกันของปลายแท่งสเตเตอร์แบบแท่งโรเบล	7
2.9 โครงสร้างของขดลวดสเตเตอร์แบบคอยล์	8
2.10 โครงสร้างของแท่งสเตเตอร์แบบโรเบล	8
2.11 โครงสร้างของระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์	9
2.12 ไมก้าเทปสำหรับกระบวนการเว็คคัมเพรสเซอร์อิมเพิร์กเนชั่น	11
2.13 ไมก้าเทปผสมเรซินสำหรับกระบวนการเรซินริช	11
2.14 ไมก้าเทปแบบผ่านการอบเรซินสำหรับกระบวนการเรซินริช	12
2.15 โครโน่าเทป	12
2.16 เซมิคอนดักทีฟเทป	12
2.17 โพลีเอสเตอร์เทป	13
2.18 กระบวนการโพลาริเซชัน	14
2.19 แสดงไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าระหว่างประจุสองประจุ	14
2.20 กระบวนการ Electronic Polarization	16
2.21 กระบวนการ Atomic Polarization	17
2.22 กระบวนการ Dipolar Polarization	17
2.23 กระบวนการ Hopping Polarization	18
2.24 กระบวนการ Space Charge Polarization	18
2.25 ระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดโพลาริเซชันทั้ง 5 แบบภายใต้การป้อนแรงดันขั้นบันได	19
2.26 องค์ประกอบของกระแสโพลาริเซชัน	20
2.27 กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน	22
2.28 วงจรวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของฉนวนบริเวณขดลวดสเตเตอร์ ทั้ง 2 ตำแหน่ง (ก) ฉนวนระหว่างเฟส และ (ข) ฉนวนระหว่างเฟสกับกราวด์	22
3.1 (ก) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของเชื่อมวชิราลงกรณ จังหวัดกาญจนบุรีทั้ง 3 ตัว (ข) ลักษณะภายนอกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะทำงาน	23
3.2 ป้ายบอกข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	23

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.3 (ก) ใช้เครนยกยัดกับสเตเตอร์ (ข) ขณะทำการยกสเตเตอร์ (ค) ยกสเตเตอร์ออกจากโรเตอร์ (ง) วางสเตเตอร์เพื่อรอการซ่อมแซม	24
3.4 โครงสเตเตอร์	25
3.5 แกนสเตเตอร์	25
3.6 ขดลวดสเตเตอร์	26
3.7 โรเตอร์แบบขั้วยื่น	26
3.8 ส่วนประกอบของโรเตอร์	27
3.9 ขั้วยื่นของโรเตอร์	27
3.10 แผ่นเหล็กلامีนำขั้วอัดกันเป็นชั้นๆ	27
3.11 ขดลวดสนามบนโรเตอร์	28
3.12 สลิปริง	28
3.13 แปรรงถ่าน	28
3.14 (ก) แกนโรเตอร์ส่วนบน (ข) แกนโรเตอร์ส่วนล่าง	29
3.15 ไฟแสดงสถานะเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงาน	29
3.16 โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวร	29
3.17 สเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวร	30
3.18 (ก) ตัวระบายความร้อน (ข) ท่อในการถ่ายเทความร้อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	31
3.19 ฉนวนเสียหายจากแรงดันเกิน	31
3.20 คอยล์หลวมเนื่องมาจากการสั่น	32
3.21 ฉนวนเสื่อมจากความร้อน	32
3.22 ฉนวนเสื่อมจาก PD	33
3.23 การเปลี่ยนแท่งสเตเตอร์	34
3.24 การซ่อมโรเตอร์	35
3.25 การทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้า	36
3.26 (ก) ขดลวด (ข) เครื่อง Looping coil	40
3.27 พันผ้าดิบรอบขดลวด	40
3.28 เครื่องตัดขดลวด	41
3.29 ขดลวดแบบคอยล์	41
3.30 ฟิโลแซม	41
3.31 พันฟิโลแซมรอบต้นขด	41
3.32 เทปโพลีเอสเตอร์	41
3.33 พันเทปโพลีเอสเตอร์รอบต้นขด	41
3.34 ตัดผ้าดิบจากตรงกลางออกแล้วติดด้วยไมลาฟิล์ม	42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.35 นำขดลวดเข้าเครื่อง Hot press	42
3.36 เครื่องTaping Machine	43
3.37 เทปชาไม้ก้า	43
3.38 พันเทปคอนดักทีฟ	43
3.39 ทำการ hot press	43
3.40 พันฟิลโลแฮมรอบ Overhang	43
3.41 พันเทปเซมิคอนดักทีฟระหว่างของแท่งสเตเตอร์ที่อยู่ในช่องสลีตและส่วนที่ออกนอกร่องสลีต	44
3.42 สเตเตอร์แบบคอล์ยที่เสร็จเรียบร้อยแล้ว	44
3.43 การทดลอง AC hipot test	45
3.44 การต่อวงจรทดสอบด้วยแรงดันเกิน	45
3.45 ออสซิลอสโคปแสดงสัญญาณการเปรียบเทียบเสิร์จ	46
4.1 เตรียมขั้นทดสอบ	47
4.2 ขั้นทดสอบ	47
4.3 อบอุ่นขั้นทดสอบ กรณีที่เสื่อมเนื่องจากความร้อน	48
4.4 ขั้นทดสอบที่รอย PD	48
4.5 ขั้นทดสอบที่เสื่อมเนื่องจากเกิดรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้างของแท่งสเตเตอร์	48
4.6 ขั้นทดสอบที่เสื่อมเนื่องจากเกิดโพรงอากาศภายในเนื้อฉนวน	49
4.7 ขั้นทดสอบที่เสื่อมเนื่องจากเกิดโพรงน้ำภายในเนื้อฉนวน	49
4.8 ขั้นทดสอบที่เสื่อมเนื่องจากเกิดโพรงน้ำภายในเนื้อฉนวน	49
4.9 PDC Analyzer	50
4.10 (ก) สายจ่ายแรงดันสูงสำหรับ PDC-Analyzer-1MOD (ข) สายวัดกระแส (ค) สายกราวด์	50
4.11 วงจรทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันที่ฉนวนระหว่างเฟส	51
4.12 วงจรทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันที่ฉนวนระหว่างเฟส	51
4.13 กระแสรั่วไหลที่ไหลบนผิวฉนวนเมื่อต่อวงจรแบบระหว่างเฟส	52
4.14 วงจรทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันที่ฉนวนระหว่างเฟสแบบมีการ์ดริง	52
4.15 วงจรทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันที่ฉนวนระหว่างเฟสแบบมีการ์ดริง	53
4.16 กระแสรั่วไหลที่ไหลลงสายดินเมื่อต่อวงจรแบบระหว่างเฟสแบบมีการ์ดริง	53
5.1 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันโดยวงจรที่มีการ์ดริงและไม่มีการ์ดริงของขั้นทดสอบก่อนจำลองรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้างของขั้นทดสอบ	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.2 กระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันโดยวงจรที่มีการ์ดริงและไม่มีการ์ดริงของ ชั้นทดสอบก่อนจำลองโพรงอากาศภายในชั้นทดสอบ	60
5.3 กระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันโดยวงจรที่มีการ์ดริงและไม่มีการ์ดริงของ ชั้นทดสอบก่อนจำลองโพรงน้ำมันฉนวนภายในชั้นทดสอบ	61
5.4 กระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันโดยวงจรที่มีการ์ดริงและไม่มีการ์ดริงของ ชั้นทดสอบก่อนจำลองโพรงน้ำภายในชั้นทดสอบ	62
5.5 กระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันโดยวงจรที่มีการ์ดริงและไม่มีการ์ดริงของ ชั้นทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง	63
5.6 กระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันโดยวงจรที่มีการ์ดริงและไม่มีการ์ดริงของ ชั้นทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง	64
5.7 กระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันโดยวงจรที่มีการ์ดริงและไม่มีการ์ดริงของ ชั้นทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง	65
5.8 กระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันโดยวงจรที่มีการ์ดริงและไม่มีการ์ดริงของ ชั้นทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง	66
5.9 กระแสโพลาริซ์และดีโพลาริซ์ของชั้นทดสอบที่ไม่มีรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้างของชั้นทดสอบ	68
5.10 กระแสโพลาริซ์และดีโพลาริซ์ของชั้นทดสอบที่มีรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้างของชั้นทดสอบ	68
5.11 เปรียบเทียบกระแสโพลาริซ์และดีโพลาริซ์ระหว่างชั้นทดสอบที่ไม่มีรอยเสียดสีที่ผิว ด้านข้างและมีรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้าง 2 ด้าน ของชั้นทดสอบ	69
5.12 กระแสโพลาริซ์และดีโพลาริซ์ของชั้นทดสอบก่อนจำลองโพรงอากาศภายในชั้นทดสอบ	70
5.13 กระแสโพลาริซ์และดีโพลาริซ์ของชั้นทดสอบหลังจำลองโพรงอากาศภายในชั้นทดสอบ	70
5.14 เปรียบเทียบกระแสโพลาริซ์และดีโพลาริซ์ของชั้นทดสอบก่อนและหลังจำลอง โพรงอากาศภายในชั้นทดสอบ	71
5.15 กระแสโพลาริซ์และดีโพลาริซ์ของชั้นทดสอบก่อนจำลองโพรงน้ำมันฉนวนภายใน ชั้นทดสอบ	72
5.16 กระแสโพลาริซ์และดีโพลาริซ์ของชั้นทดสอบหลังจำลองโพรงน้ำมันฉนวนภายใน ชั้นทดสอบ	72
5.17 เปรียบเทียบกระแสโพลาริซ์และดีโพลาริซ์ของชั้นทดสอบก่อนและหลังจำลองโพรง น้ำมันฉนวนภายในชั้นทดสอบ	73
5.18 กระแสโพลาริซ์และดีโพลาริซ์ของชั้นทดสอบก่อนจำลองโพรงน้ำภายในชั้นทดสอบ	74
5.19 กระแสโพลาริซ์และดีโพลาริซ์ของชั้นทดสอบหลังจำลองโพรงน้ำภายในชั้นทดสอบ	75
5.20 เปรียบเทียบกระแสโพลาริซ์และดีโพลาริซ์ของชั้นทดสอบก่อนและหลังจำลองโพรงน้ำ ภายในชั้นทดสอบ	75

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.21 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของชั้นทดสอบก่อนนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง	77
5.22 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของชั้นทดสอบที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง	77
5.23 เปรียบเทียบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันระหว่างชั้นทดสอบก่อนและหลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง	78
5.24 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของชั้นทดสอบก่อนนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง	79
5.25 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของชั้นทดสอบที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง	79
5.26 เปรียบเทียบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันระหว่างชั้นทดสอบก่อนและหลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง	80
5.27 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของชั้นทดสอบก่อนนำไปอบที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง	81
5.28 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของชั้นทดสอบที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง	81
5.29 เปรียบเทียบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันระหว่างชั้นทดสอบก่อนและหลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 140 °C	82
5.30 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของชั้นทดสอบก่อนนำไปอบที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง	83
5.31 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของชั้นทดสอบที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง	83
5.32 เปรียบเทียบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันระหว่างชั้นทดสอบที่ก่อนและหลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 160 °C	84
5.33 เปรียบเทียบกระแสโพลาริเซชันของชั้นทดสอบก่อนและหลังผ่านการอบเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 100, 120, 140 และ 160 °C	85
5.34 เปรียบเทียบกระแสดีโพลาริเซชันของชั้นทดสอบก่อนและหลังผ่านการอบเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 100, 120, 140 และ 160 °C	86
5.35 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของชั้นทดสอบที่ไม่มีรอย PD	87
5.36 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของชั้นทดสอบที่มีรอย PD	87
5.37 เปรียบเทียบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันระหว่างชั้นทดสอบที่มีรอย PD และชั้นทดสอบที่ไม่มีรอย PD	88

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.38 กราฟแสดงแพคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริกของก่อนและหลังจำลองการเกิดเสียดสีที่ผิวด้านข้างของชั้นทดสอบ	89
5.39 กราฟแสดงแพคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริกของก่อนและหลังการจำลองโพรงอากาศภายในชั้นทดสอบ	90
5.40 กราฟแสดงแพคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริกของก่อนและหลังการจำลองโพรงน้ำมันฉนวนภายในชั้นทดสอบ	91
5.41 กราฟแสดงแพคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริกของก่อนและหลังการจำลองโพรงน้ำภายในชั้นทดสอบ	92
5.42 กราฟแสดงแพคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริกของก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง	93
5.43 กราฟแสดงแพคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริกของก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง	94
5.44 กราฟแสดงแพคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริกของก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง	95
5.45 กราฟแสดงแพคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริกของก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง	96
5.46 กราฟแสดงแพคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริกของชั้นทดสอบที่ไม่เกิด PD และชั้นทดสอบที่มีความเสื่อมเนื่องจาก PD	97
5.47 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการจำลองรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้างของชั้นทดสอบแบบวงจรถึงและไม่มีกั้วจริง	98
5.48 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการจำลองการเกิดโพรงอากาศภายในของชั้นทดสอบแบบวงจรถึงและไม่มีกั้วจริง	99
5.49 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการจำลองการเกิดโพรงน้ำมันภายในของชั้นทดสอบแบบวงจรถึงและไม่มีกั้วจริง	100
5.50 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการจำลองการเกิดโพรงน้ำภายในของชั้นทดสอบแบบวงจรถึงและไม่มีกั้วจริง	101
5.51 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 100 °C แบบวงจรถึงและไม่มีกั้วจริง	102
5.52 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 120 °C แบบวงจรถึงและไม่มีกั้วจริง	103
5.53 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 140 °C แบบวงจรถึงและไม่มีกั้วจริง	104

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.54 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 160 °C แบบวงจรที่ต่ออาร์ตริงและไม่มีอาร์ตริง	105
5.55 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าของชั้นทดสอบที่ไม่เกิด PD และชั้นทดสอบ ที่มีความเสื่อมเนื่องจาก PD แบบวงจรที่ต่ออาร์ตริงและไม่มีอาร์ตริง	106



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) เป็นอุปกรณ์ที่มีบทบาทสำคัญอย่างมากในระบบการผลิตกำลังไฟฟ้า สำหรับโรงจักรไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในปัจจุบันจะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส ซึ่งสามารถแบ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous Generator) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Asynchronous Generator) ซึ่งมีหลายขนาดพิกัดกำลังขึ้นอยู่กับระบบไฟฟ้า ซึ่งหากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดความเสียหายหรือผิดปกติ ในขณะที่ทำงานจะทำให้ระบบอื่นๆที่เกี่ยวข้องได้รับผลกระทบด้วย ซึ่งปัจจัยหลักๆที่ทำให้เกิดความผิดปกติในอุปกรณ์ไฟฟ้าเกิดจากความเสื่อมสภาพของฉนวน ในการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าทุกชนิด เมื่อถูกใช้งานเป็นเวลานานย่อมเกิดความเสื่อมสภาพจากการใช้งานเนื่องจากปัจจัยต่างๆ ทั้งด้านความร้อนขณะใช้งาน ความเครียดสนามไฟฟ้า แรงทางกลที่รับขณะใช้งาน สภาพแวดล้อม ฝุ่นละอองและสิ่งปนเปื้อนต่างๆ จะส่งผลให้อุปกรณ์ไฟฟ้านั้นเกิดการเสื่อมสภาพเกิดขึ้น ซึ่งการเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ไฟฟ้าดังกล่าวอาจนำไปสู่ความผิดปกติและเกิดความล้มเหลวในการปฏิบัติงาน ซึ่งเช่นเดียวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง ผลจากปัจจัยต่างๆดังกล่าวย่อมมีผลทำให้ฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดการเสื่อมสภาพ ทำให้กระบวนการทำงานต่างๆที่ระบบ ที่เกี่ยวข้องได้รับผลกระทบส่งผลต่อความน่าเชื่อถือ อีกทั้งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานและผู้ที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง ดังนั้นหากสามารถประเมินสภาพฉนวนและวิเคราะห์สาเหตุความผิดปกติของฉนวนได้ก่อนที่ฉนวนจะเกิดความผิดปกติหรือได้รับความเสียหายได้ ก็จะทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และวางแผนการวางแผนซ่อมบำรุงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ เพื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพและเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดความผิดปกติขึ้นขณะปฏิบัติงาน

ในปัจจุบันวิธีการวิเคราะห์สภาพฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น การทดสอบค่าความต้านทานฉนวน (Insulation resistance Test) การทดสอบหาค่าดัชนีการมีขั้ว (Polarization Index Test) การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (High Potential Test) และการทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน เป็นต้น ซึ่งวิธีการวิเคราะห์สภาพฉนวนที่กล่าวมาเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป แต่เนื่องด้วยวิธีการดังกล่าวใช้แรงดันสูงในการทดสอบ ดังนั้นการวิเคราะห์สภาพฉนวนเมื่อทดสอบด้วยแรงดันสูงอาจทำให้ฉนวนได้รับความเสียหายจากการทดสอบได้ หรือมีโอกาสที่จะเสื่อมสภาพมากขึ้นจากแรงดันทดสอบ ดังนั้นวิธีทางเลือกสำหรับการทดสอบที่สามารถวิเคราะห์ฉนวนได้โดยไม่ทำให้ฉนวนได้รับความเสียหายเพิ่มเติม คือวิธีการวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวิธีการทดสอบวัดกระแสโพลาร์ไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชัน โดยการทดสอบนี้จะใช้แรงดันต่ำในการทดสอบ จึงไม่ทำให้ฉนวนได้รับความเสียหายเพิ่มเติมจากแรงดันทดสอบ อีกทั้งปัจจุบันในประเทศไทยการวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวิธีการทดสอบนี้ยังไม่ได้ได้รับการศึกษาวิจัยอย่างแพร่หลาย ทำให้คณะผู้จัดทำเกิดความสนใจในวิธีการวิเคราะห์ผลของกระแสโพลาร์ไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชัน โดยการจำลองฉนวนให้มีความเสื่อมสภาพเนื่องจากสาเหตุต่างๆ อาทิ ผลจากความร้อน รอยเสียดสี การเกิดโพรงในเนื้อฉนวน และเสื่อมเนื่องจากการดิสชาร์จบางส่วน PD เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบกับผลของกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของฉนวนที่ไม่มีคุณสมบัติเสื่อมสภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
2. เพื่อศึกษาการฉนวนของแท่งสเตเตอร์ (Stator Bar) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
3. เพื่อศึกษาทฤษฎีและวิธีการทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน

(Polarization and Depolarization Current)

4. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลของกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของฉนวนของแท่งสเตเตอร์ที่จำลองกรณีศึกษา

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
2. ศึกษาการฉนวนของแท่งสเตเตอร์ที่ใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
3. ทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของแท่งสเตเตอร์ โดยทดสอบด้วยเครื่อง PDC-Analyser-1MOD

- แท่งสเตเตอร์ฉนวนมีสภาพดี
- แท่งสเตเตอร์ที่มีความเสื่อมเนื่องจากความร้อน
- แท่งสเตเตอร์ที่มีความเสื่อมเนื่องจากการเกิด PD
- แท่งสเตเตอร์ที่มีความเสื่อมเนื่องจากการเกิดรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้าง
- แท่งสเตเตอร์ที่มีความเสื่อมเนื่องจากการเกิดโพรงอากาศในเนื้อฉนวน
- แท่งสเตเตอร์ที่มีความเสื่อมเนื่องจากการเกิดโพรงน้ำมันฉนวนในเนื้อฉนวน
- แท่งสเตเตอร์ที่มีความเสื่อมเนื่องจากการเกิดโพรงน้ำในเนื้อฉนวน

1.4 วิธีการดำเนินงาน

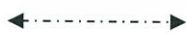
- ศึกษาทฤษฎีการเกิดปรากฏการณ์โพลาริเซชัน
- ศึกษาและออกแบบขั้นตอนทดสอบเพื่อทดสอบฉนวนของแท่งสเตเตอร์ (Stator Bar)
- ศึกษาและออกแบบการจำลองกรณีศึกษา ขั้นตอนทดสอบที่มีความเสื่อมเนื่องจากกรณีต่างๆ
- ทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน
- วิเคราะห์ผลการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนของการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ปี 2559					ปี 2560				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย	พ.ค
1. ศึกษาทฤษฎีและส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	←-----→									
2. ศึกษาทฤษฎีและวิธีการทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน	←-----→									
3. ศึกษาและออกแบบชิ้นทดสอบเพื่อทดสอบฉนวนของแท่งสเตเตอร์			←-----→							
4. ศึกษาและดูงานโรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ์			←-----→							
5. จัดทำรายงานและสรุปข้อมูล			←-----→							
6. ศึกษาและออกแบบการจำลองกรณีศึกษา ชิ้นทดสอบที่มีความเชื่อมโยงจากกรณีต่างๆ					←-----→					
7. ทำการทดสอบวัด PDC กรณีต่างๆ					←-----→					
8. จัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์						←-----→				



การวางแผน



การปฏิบัติงานจริง

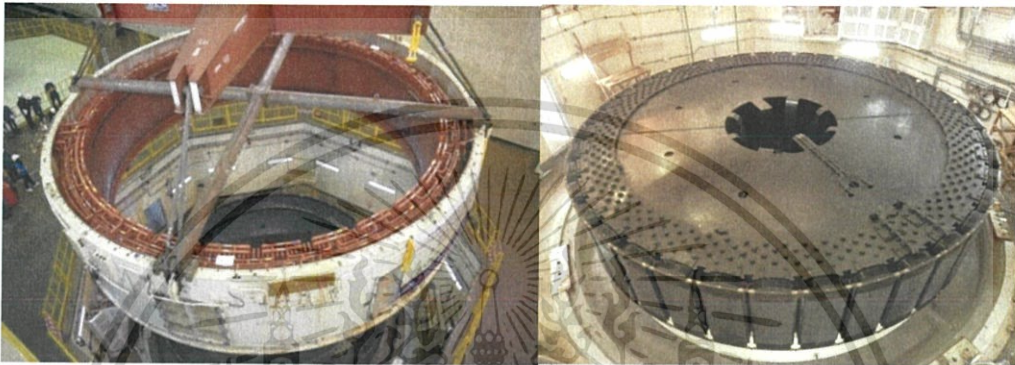
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้และเข้าใจในระบบฉนวนของแท่งสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
2. มีความรู้และเข้าใจในทฤษฎีกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน
3. สามารถวิเคราะห์หาค่าฉนวนได้ด้วยวิธีวิเคราะห์กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน และนำผลการวิเคราะห์มาใช้ประกอบการวางแผนการซ่อมบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้
4. สามารถคาดคะเนสาเหตุของการเสื่อมสภาพฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในเบื้องต้นได้ด้วยวิธีการวิเคราะห์กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า คือ อุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถแบ่งส่วนประกอบหลักได้ 2 ส่วน คือ สเตเตอร์ (Stator) เป็นโครงสร้างส่วนที่อยู่นิ่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และโรเตอร์ (Rotor) เป็นโครงสร้างส่วนที่เคลื่อนที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.1



(ก)

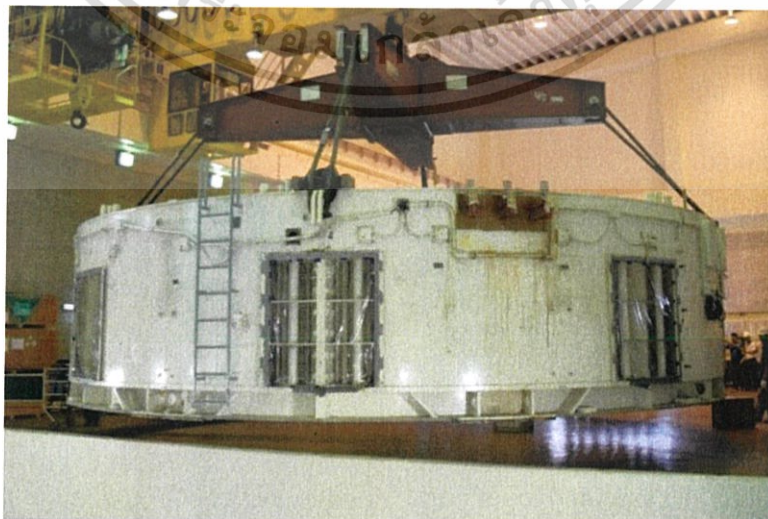
(ข)

รูปที่ 2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เขื่อนวชิราลงกรณ จ.กาญจนบุรี (ก) สเตเตอร์
(ข) โรเตอร์

2.1 สเตเตอร์ (Stator) [1]

2.1.1 โครงสเตเตอร์ (Frame)

โครงสเตเตอร์ ทำจากเหล็กหนาเพื่อความแข็งแรง ลดการสั่นสะเทือนและเสียงรบกวน และถูกออกแบบให้มีความแข็งแรงรองรับน้ำหนักของสเตเตอร์ ทนความเครียดจากการงอและการโก่งตัว นอกจากนี้ยังถูกออกแบบมาให้ทนต่อความเครียดที่รุนแรงจากการลัดวงจร

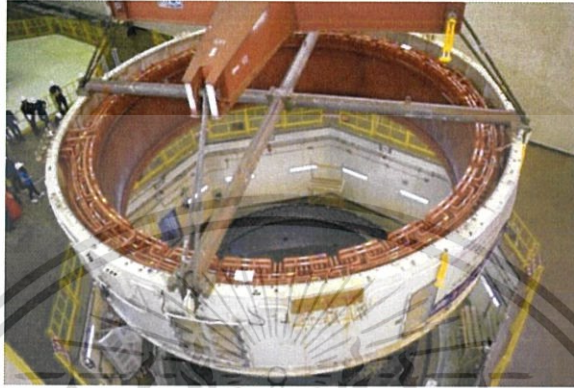


รูปที่ 2.2 โครงสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำที่เขื่อนวชิราลงกรณ จ.กาญจนบุรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 แกนสเตเตอร์ (Stator Core)

แกนสเตเตอร์ ทำจากแผ่นเหล็กซิลิกอนรีดเย็นเป็นเหล็กอ่อนผสมสารซิลิกอน ซึ่งมีกำลังสูญเสียต่ำ (cold-rolled low-loss silicon steel) เรียงซ้อนกันในกรงแผ่นบางๆ อัดซ้อนกัน เพื่อลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy Current) และลดการสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis) จากนั้นเชื่อมติดกัน ส่วนนี้จะถูกนำไปติดตั้งกับโครงสเตเตอร์ นอกจากนี้แกนสเตเตอร์จะมีช่องสล๊อตสำหรับวางขดลวดอาร์มาเจอร์ และทำหน้าที่เป็นทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็ก



รูปที่ 2.3 แกนสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เขื่อนวชิราลงกรณ จ.กาญจนบุรี

2.1.3 ขดลวดสเตเตอร์ (Stator Winding)

ขดลวดสเตเตอร์จะมีลักษณะเป็นขดลวดตัวนำถูกพันด้วยฉนวน สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ ขดลวดที่สเตเตอร์เป็นส่วนที่เหนียวนำแรงดันไฟฟ้า และจะวางอยู่ในร่องสล๊อตของแกนเหล็ก ขดลวดสเตเตอร์มีอยู่ด้วยกัน 3 ชุด (เฟส A, B และ C) แต่ละชุดวางมุมห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า มีลักษณะการพันขดลวด 2 แบบ คือ การพันขดลวดแบบชั้นเดียว จำนวนคอยล์ต่อกลุ่มจะเท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวนขั้วแม่เหล็ก และการพันขดลวดแบบสองชั้น มีจำนวนคอยล์ต่อกลุ่มเท่ากับจำนวนขั้วแม่เหล็ก



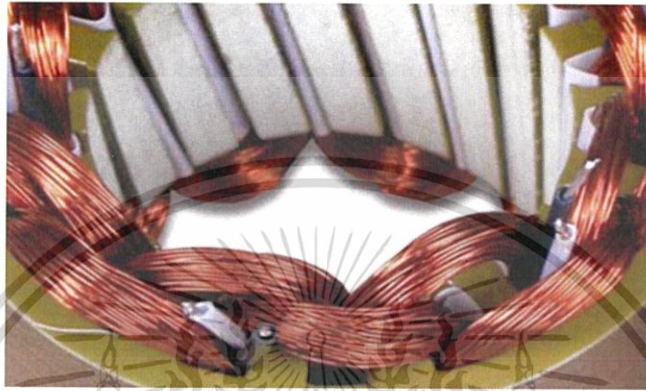
รูปที่ 2.4 ขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เขื่อนวชิราลงกรณ จ.กาญจนบุรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดของโครงสร้างขดลวดสเตเตอร์ สามารถแบ่งได้ 2 แบบ ตามลักษณะการวางในร่องสลีต

1) การวางขดลวดสเตเตอร์แบบ Random-wound [1]

โดยทั่วไปจะใช้กับเครื่องจักรกลที่มีพิกัดกำลังต่ำและถูกใช้งานที่ระดับแรงดันไม่เกิน 1000 โวลต์ มีลักษณะการวางขดลวดสเตเตอร์ โดยกลุ่มลวดตัวนำที่เคลื่อนฉนวนซึ่งทำหน้าที่เป็นขดลวดสเตเตอร์ถูกพันเป็นวงกลมผ่านช่องสลีตในแกนสเตเตอร์โดยการวางมีลักษณะแบบสุ่ม คือวางกลุ่มลวดตัวนำไว้ในร่องสลีตใดก็ได้โดยไม่คิดถึงผลของแรงดันต่อรอบ (volt per turn) ของขดลวด



รูปที่ 2.5 การวางขดลวดสเตเตอร์แบบ Random-wound [2]

2) การวางแท่งสเตเตอร์แบบ Form-Wound

โดยทั่วไปจะใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่พิกัด 50 ถึง 100 MVA และถูกใช้งานที่ระดับแรงดัน 1000 โวลต์ขึ้นไป ลักษณะการวางแท่งสเตเตอร์มีรูปแบบจะเป็นการวางโดยคำนึงถึงแรงดันต่อรอบของแท่งสเตเตอร์ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม ซึ่งการวางแท่งสเตเตอร์แบบนี้มีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ

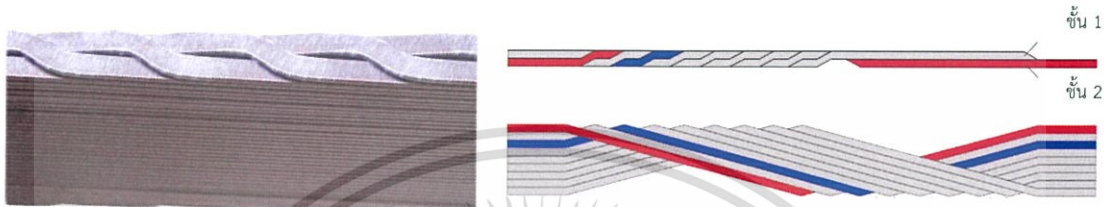
- แท่งสเตเตอร์แบบคอยล์ (Coil type) แท่งสเตเตอร์แบบคอยล์ถูกสร้างจากขดลวดที่มีการฉนวนเรียบร้อยแล้วก่อนแทรกกลงไปในร่องสลีตในแกนสเตเตอร์ มีลักษณะรูปทรงคล้ายเพชร (Diamond shape)



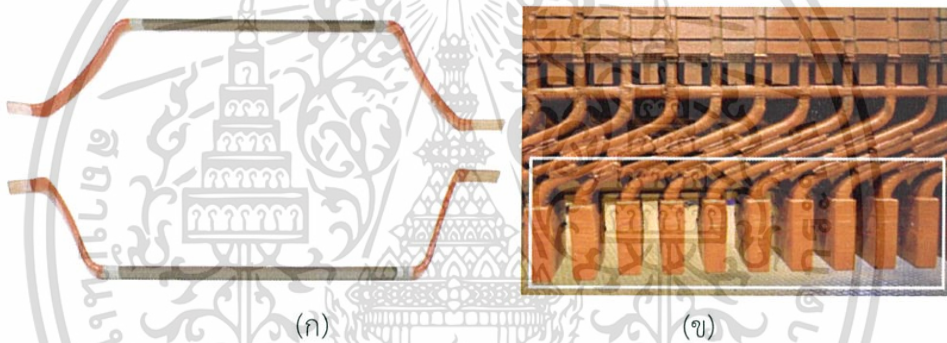
รูปที่ 2.6 ขดลวดสเตเตอร์แบบคอยล์

- แท่งสเตเตอร์แบบโรเบล (Roebel bar type) แท่งสเตเตอร์แบบโรเบลนิยมใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ เนื่องจากแท่งสเตเตอร์แบบคอยล์อาจมีขนาดใหญ่ ทำให้ยากต่อการแทรกลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในร่องสลีต ดังนั้นแท่งสเตเตอร์แบบแท่งโรเบลจึงถูกคิดค้นขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โดยลดขนาดของแท่งทองแดงลง และมีการพันแท่งทองแดงแบบ Transposition ดังรูปที่ 2.7 ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีขนาดลดลง นอกจากนี้ยังช่วยลดปัญหาความสูญเสียในแท่งสเตเตอร์จากกระแสไหลวน แท่งสเตเตอร์แบบแท่งโรเบล จึงมีลักษณะคล้ายกับการตัดครึ่งขดลวดแบบคอยล์ ที่มีรูปทรงเพชร (Diamond shape) ดังนั้นจึงเรียกลักษณะดังกล่าวนี้ว่า half-coil ซึ่งในการประกอบลงร่องสลีต half-coil แต่ละชิ้นจะถูกนำมาเชื่อมต่อกันแบบอนุกรมโดยปลายของ half-coil จะถูกเชื่อมติดกันดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 การพันแท่งทองแดงแบบ Transposition ของแท่งสเตเตอร์แบบแท่งโรเบล [3]



รูปที่ 2.8 (ก) แท่งสเตเตอร์แบบแท่งโรเบล (ข) การเชื่อมกันของปลายแท่งสเตเตอร์แบบแท่งโรเบล[4]

โครงสร้างของขดลวดสเตเตอร์ ขดลวดสเตเตอร์ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของขดลวดสเตเตอร์ที่อยู่ภายในร่องสลีต (Slot Portion) และส่วนของขดลวดสเตเตอร์ที่โผล่พ้นร่องสลีต (End winding Portion) ฉนวนของทั้งสองส่วนจะใช้วัสดุที่แตกต่างกัน ฉนวนที่อยู่ในร่องสลีตจะมีโพรงอากาศน้อยกว่าและมีความแข็งแรงมากกว่าฉนวนบริเวณส่วนพ้นร่องสลีต เนื่องจากฉนวนในบริเวณสลีตซึ่งเป็นส่วนตรงในกรรมวิธีการผลิตจะใช้เครื่องอัดความร้อน (Hot Press หรือ Heat Press) บีบอัดด้วยแรงดันและอบด้วยความร้อน ทำให้เรซินแทรกซึมในช่องว่างอากาศได้มากกว่า ฉนวนบริเวณส่วนพ้นร่องสลีตซึ่งมีลักษณะโค้ง ทำให้ไม่สามารถใช้เครื่องอัดความร้อนบีบอัดได้ ฉนวนบริเวณนี้จึงเป็นส่วนที่บอบบางและมีจุดบกพร่องมากกว่า ปัจจุบันนี้ในกรรมวิธีการผลิตได้มีการใช้กระบวนการ Vacuum Pressure Impregnation (VPI) ซึ่งจะสามารถใช้ได้กับฉนวนทั้งสองบริเวณ

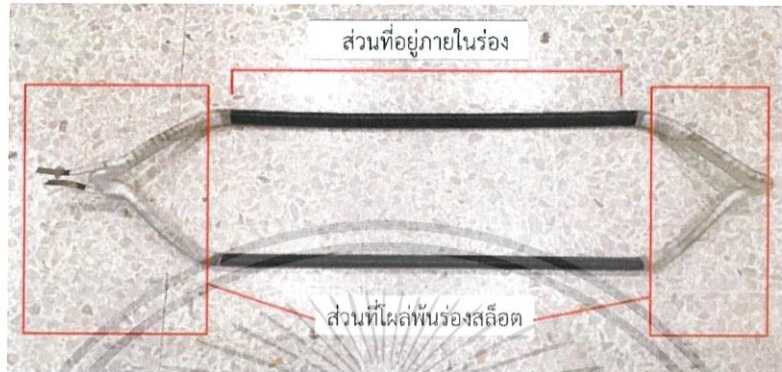
1) ระบบฉนวนขดลวดสเตเตอร์ในร่องสลีต (Slot Portion)

ฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ที่อยู่ในร่องสลีตจะประกอบด้วยชั้นฉนวนกราวด์และชั้นวัสดุกึ่งตัวนำด้านการเกิดโคโรนา ชั้นฉนวนกราวด์จะทนความชื้นสนามไฟฟ้าได้สูงแต่มีความยืดหยุ่นน้อยกว่า ฉนวนที่ใช้พันบริเวณส่วนพ้นร่องสลีต

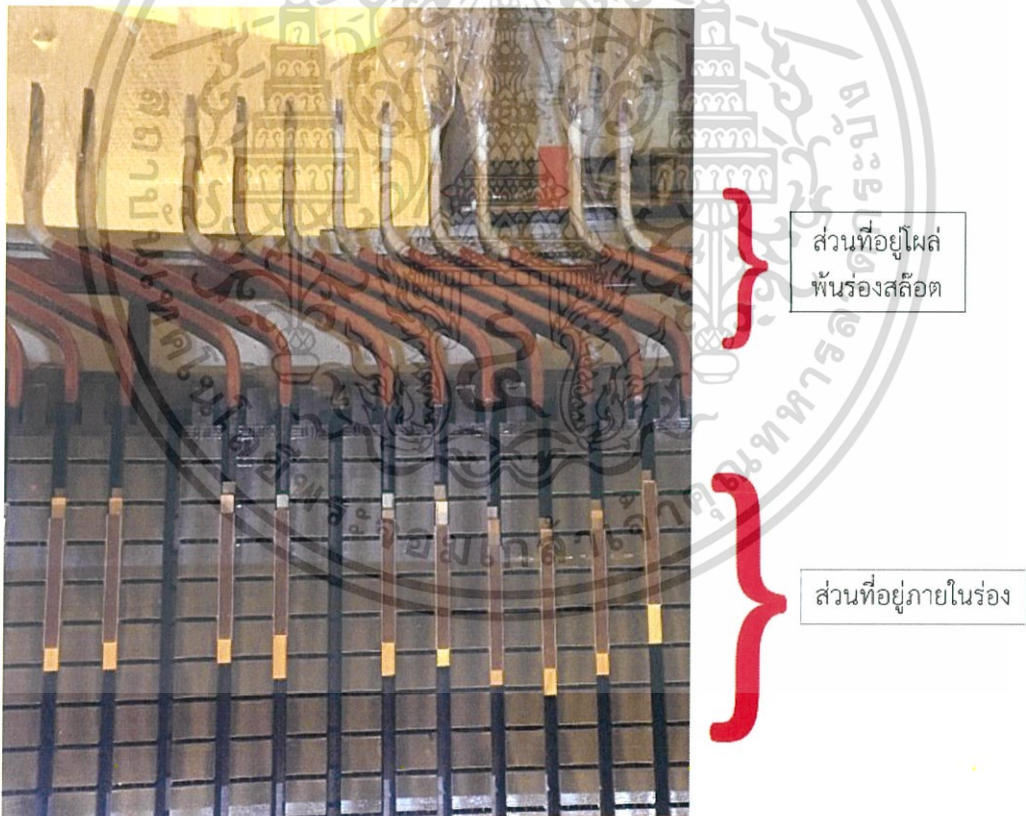
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ระบบฉนวนขดลวดสเตเตอร์บริเวณส่วนพันร่อง (End winding Portion)

ฉนวนของขดลวดบริเวณส่วนพันร่องควรใช้ฉนวนซึ่งมีความยืดหยุ่นพิเศษเนื่องจากบริเวณส่วนนี้เป็นส่วนที่ได้รับแรงสั่นสะเทือนเนื่องจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้า และการที่ฉนวนมีความยืดหยุ่นจะทำให้สะดวกในการติดตั้งของขดลวด นอกจากนี้ฉนวนบริเวณนี้จะพันหุ้มด้วยชั้นเทปเคลือบลดความเครียดเพื่อป้องกันการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนตามผิวฉนวน



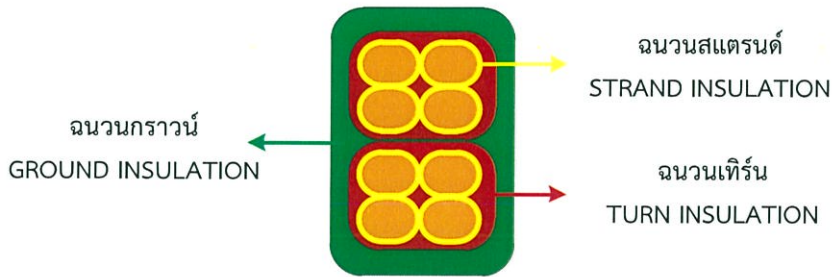
รูปที่ 2.9 โครงสร้างของขดลวดสเตเตอร์แบบคอยล์



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของแท่งสเตเตอร์แบบโรเบล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 โครงสร้างระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ [5]



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์

2.2.1 ลักษณะโครงสร้างระบบฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในขดลวดสเตเตอร์

โครงสร้างระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์แบ่งออกได้ 3 ส่วน ได้แก่

1) ฉนวนสเตรนด์ (Strand Insulation)

ฉนวนสเตรนด์เป็นฉนวนที่ใช้ห่อหุ้มลวดตัวนำเกลียวที่ใช้เป็นตัวนำของขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งจะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจรระหว่างตัวนำย่อยภายในขดลวดสเตเตอร์ แต่เดิมนั้นฉนวนชั้นนี้จะทำจากวัสดุเรซิน แต่เนื่องจากต้องการเพิ่มเนื้อที่สำหรับขดลวดโลหะทองแดงเพื่อให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้น จึงเปลี่ยนมาใช้วัสดุประเภท แก้วโพลีเอสเตอร์ (Polyester Glass) แทน

ฉนวนสเตรนด์อาจเกิดความเสียหายในระหว่างขั้นตอนการผลิตขดลวดได้ จึงต้องมีสมบัติเชิงกลที่ดี ฉนวนชนิดนี้จะอยู่ระหว่างตัวนำย่อยภายในขดลวดซึ่งสัมผัสกับส่วนที่มีอุณหภูมิสูงสุดในสเตเตอร์ เมื่อมีการไหลผ่านของกระแสในสเตเตอร์ก่อให้เกิดค่าความสูญเสีย จึงต้องมีคุณสมบัติทางความร้อนที่ดี ถึงแม้ว่าผู้ผลิตจะมั่นใจว่าการลัดวงจรจะไม่เกิดขึ้นในขดลวดใหม่ แต่มันอาจเกิดขึ้นในระหว่างการทำงานเพราะผลทางความร้อน หรือ รีดรอยทางกล (mechanical aging) การลัดวงจรเพียงเล็กน้อยในขดลวดหรือบาร์แบบ Form-Wound จะไม่ทำให้ขดลวดเกิดความเสียหาย แต่จะเพิ่มค่าความสูญเสียให้กับขดลวดสเตเตอร์และยังส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น

วัสดุที่ใช้ในฉนวนสเตรนด์จะเป็นพวกกระดาษไม่ก้ำบาง, ฟิล์มโพลีเอสเตอร์, โพลีโอมาย, ฟิล์มโอมายโพลีเมอร์ เป็นต้น

2) ฉนวนเทิร์น (Turn Insulation)

ฉนวนเทิร์นเป็นฉนวนส่วนที่อยู่ถัดจากฉนวนสเตรนด์ ซึ่งจะทำหน้าที่ป้องกันการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด หากมีการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดจะมีพฤติกรรมเหมือนกับขดลวดหุติภูมิของหม้อแปลงอัตโนมัติ โดยส่วนมากฉนวนชนิดนี้จะใช้วัสดุชนิดเดียวกับฉนวนกราวด์ (Ground Wall Insulation)

วัสดุที่ใช้ในฉนวนจะเป็นพวก แอสฟัลต์ ไมก้า เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ฉนวนกราวด์ (Ground wall Insulation)

ฉนวนกราวด์เป็นส่วนที่แยกตัวนำทองแดงจากกราวด์ที่แกนสเตเตอร์ สำหรับอายุการใช้งานของฉนวนชนิดนี้ขึ้นอยู่กับผลของความเครียดทางไฟฟ้า ความร้อน และความเครียดทางกล

การออกแบบการระบายความร้อนของฉนวนกราวด์ในขดลวดแบบ Form-Wound นั้นฉนวนกราวด์จะเป็นส่วนที่ส่งผ่านความร้อนจากตัวนำทองแดง (แหล่งความร้อน) กับแกนสเตเตอร์ (ระบายความร้อน) ดังนั้นฉนวนกราวด์ควรมีค่าความต้านทานทางความร้อน (Thermal resistance) ที่ต่ำเพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิทองแดงสูง และฉนวนกราวด์ยังช่วยป้องกันตัวนำทองแดงจากการสั้นสะเทือนในการตอบสนองต่อแรงของสนามแม่เหล็กอีกด้วย

โดยวัสดุที่นำมาใช้ทำฉนวนประเภทนี้มีหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน วัสดุที่ใช้ในฉนวนจะเป็นพวกกระดาษเทปไมกาเสริมแรงด้วยใยแก้ว เป็นต้น

2.2.2 ระดับชั้นฉนวน

วัสดุฉนวนที่ใช้ในการพันแท่งสเตเตอร์ แต่ละชนิดจะมีค่าอุณหภูมิที่ทนได้แตกต่างกันดังตารางที่ 2.1 ตารางที่ 2.1 แสดงระดับชั้นฉนวน อุณหภูมิ และวัสดุที่ใช้ในเนื้อฉนวน [6]

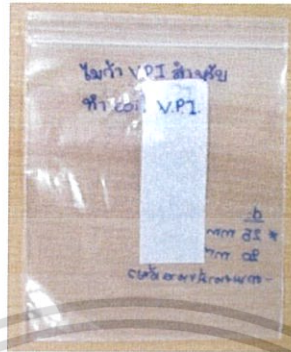
ระดับชั้นฉนวน (Insulation Class)	อุณหภูมิสูงสุด °C (Maximum hot spot temperature)	ตัวอย่างวัสดุฉนวน (Typical materials)
Y	90	ผ้าฝ้าย, ผ้าไหม, กระดาษเซลลูโลส, เส้นใยไหม
A	105	ผ้าฝ้าย, ผ้าไหม, กระดาษเซลลูโลส, ลินิน โดยจะมีการนำวัสดุฉนวนไปชุบด้วยน้ำมันวานิชหรือเรซิน รวมทั้งอีนาเมล
E	120	ลิมาเนตพลาสติกหรือเทอร์โมพลาสติกร่วมกับไฟเบอร์เทอร์โมเซตติ้ง, อีพ็อกซีอีนาเมลหรือวานิช
B	130	ไมก้า, ไฟเบอร์กลาสและแก้วใยหิน (Asbestos) โดยจะใช้เซลลูล์คอสต์และโพลีเอสเตอร์เรซินเป็นตัวยึดประสาน
F	155	ไมก้า, ไฟเบอร์กลาสและแก้วใยหินเช่นเดียวกันกับระดับชั้น B แต่วัสดุที่ใช้เป็นตัวยึดประสานจะใช้อีพ็อกซีเรซิน
H	180	ไมก้า, ไฟเบอร์กลาสและแก้วใยหินเช่นเดียวกันกับระดับชั้น B แต่วัสดุยึดประสานจะใช้ซิลิโคนเรซินหรือยางซิลิโคน
C	>180	ฉนวนประเภทไมก้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 ฉนวนที่ใช้สำหรับขดลวดสเตเตอร์ [4,5]

1) ไมก้าเทปสำหรับกระบวนการเว็คคัมเพรสเซอร์อิมเพริกเนชั่น (VPI)

ฉนวนไมก้าเทปชนิดนี้จะไม่มีเรซินเคลือบที่ผิวโดยจะใช้พันขดลวดสเตเตอร์บริเวณที่อยู่ในร่องสลีตและบริเวณไหล่พื้นร่องสลีตเพื่อที่จะนำไปผ่านกระบวนการเว็คคัมเพรสเซอร์อิมเพริกเนชั่น



รูปที่ 2.12 ไมก้าเทปสำหรับกระบวนการเว็คคัมเพรสเซอร์อิมเพริกเนชั่น

2) ไมก้าเทปผสมเรซินสำหรับกระบวนการเรซินริช (Resin Rich, RR)

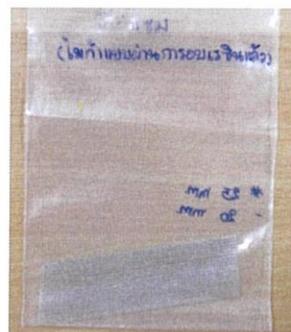
ฉนวนไมก้าเทปชนิดนี้จะมีส่วนผสมของเรซินอยู่โดยจะใช้พันขดลวดสเตเตอร์บริเวณที่อยู่ในร่องสลีตซึ่งขดลวดสเตเตอร์ที่พันด้วยเทปชนิดนี้จะถูกนำไปผ่านกระบวนการเรซินริช



รูปที่ 2.13 ไมก้าเทปผสมเรซินสำหรับกระบวนการเรซินริช [4]

3) ไมก้าเทปแบบผ่านการอบเรซินสำหรับกระบวนการเรซินริช

ฉนวนไมก้าเทปชนิดนี้จะผ่านการอบเรซินโดยจะใช้พันสำหรับขดลวดสเตเตอร์บริเวณไหล่พื้นร่องสลีตและเนื่องจากบริเวณดังกล่าวไม่สามารถเข้าสู่กระบวนการเรซินริชได้ดังนั้นจึงต้องใช้ไมก้าแบบผ่านการอบเรซิน



รูปที่ 2.14 ไมก้าเทปแบบผ่านการอบเรซินสำหรับกระบวนการเรซินริช [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) โครโรนาเทป (Conductive tape)

ฉนวนชนิดนี้จะใช้พันขดลวดสเตเตอร์บริเวณที่อยู่ภายในร่องสลิตโดยฉนวนชนิดนี้จะเป็นฉนวนที่มีค่าความต้านทานต่ำเพื่อที่จะทำให้ศักย์ของโครโรนาเทปมีค่าใกล้เคียงกับศักย์ของแกนสเตเตอร์ ดังนั้นจึงทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมช่องว่างระหว่างผิวของฉนวนและแกนสเตเตอร์มีค่าต่ำจึงไม่ทำให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วนในบริเวณดังกล่าว



รูปที่ 2.15 โครโรนาเทป [4]

5) เซมิคอนดักทีฟเทป (Semi-conductive tape)

ฉนวนชนิดนี้จะใช้พันของขดลวดสเตเตอร์บริเวณส่วนที่โผล่พ้นร่องสลิตโดยทำหน้าที่ช่วยลดความเครียดสนามไฟฟ้าและกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าให้มีความสม่ำเสมอ เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ดังนั้นจึงทำให้อากาศบริเวณดังกล่าวมีความเสี่ยงต่อการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนได้



รูปที่ 2.16 เซมิคอนดักทีฟเทป

6) โพลีเอสเตอร์เทป (Polyester heat shrinkable tape)

ฉนวนชนิดนี้จะใช้พันขดลวดสเตเตอร์บริเวณพื้นร่องสลิตซึ่งเป็นบริเวณที่มีความโค้งงอโดยเป็นฉนวนที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับขดลวดบริเวณดังกล่าว



รูปที่ 2.17 โพลีเอสเตอร์เทป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพของฉนวน

1) การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน

การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่มีผลต่อความเสียหายของขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งอาจเกิดได้จากหลายปัจจัย เช่น การระบายความร้อนไม่ดีพอ การทำงานที่โหลดเกิน การออกแบบไม่ดี หรือการที่ขดลวดได้รับกระแสที่มีฮาร์มอนิกสูงจาก Inverter-fed drive (IFD) เป็นต้น ล้วนทำให้ขดลวดมีอุณหภูมิสูงได้ทั้งสิ้น และในการที่ขดลวดมีอุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งทำให้พันธะของสารประกอบอินทรีย์ในเนื้อฉนวนถูกทำลาย

สำหรับสเตเตอร์แบบ Form-Wound เมื่อความแข็งแรงของพันธะระหว่างฉนวนสแตนด์และฉนวนกราวนด์ลดลงจะทำให้ชั้นเทปไม่ก้ำเกิดการแยกตัวขึ้นได้

2) การเสื่อมสภาพเนื่องจากไฟฟ้า

การเสื่อมสภาพเนื่องจากไฟฟ้าอาจเกิดจากแรงดันเสิร์จชั่วคราว แรงดันฟ้าผ่า การที่เซอร์กิตเบรกเกอร์เปิดหรือปิดวงจร การได้รับแรงดันเสิร์จซ้ำๆ การดิสชาร์จบางส่วน เป็นต้น ซึ่งการเสื่อมสภาพเนื่องจากไฟฟ้าอาจทำให้เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน และทำให้ฉนวนเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีและเสื่อมสภาพในที่สุด

3) การเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาวะแวดล้อม

การเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาวะแวดล้อม เกิดจากสิ่งแวดล้อมที่ใช้งานของอุปกรณ์ เช่น อุณหภูมิใช้งาน ความชื้น ฝุ่นละอองสกปรก เป็นต้น ความชื้นจะเป็นอันตรายกับฉนวนประเภทเทอร์โมพลาสติกหรือโพลีเอสเตอร์ซึ่งจะทำให้เกิดรอยแตกบริเวณปลายร่องสล็อต คราบน้ำมันรวมกับฝุ่นละอองมักจะส่งผลทางอ้อมคือ จะไปอุดตันท่อระบายอากาศทำให้การระบายอากาศไม่ดีพอ เกิดความร้อนสะสมและทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนที่สะสมนั้น

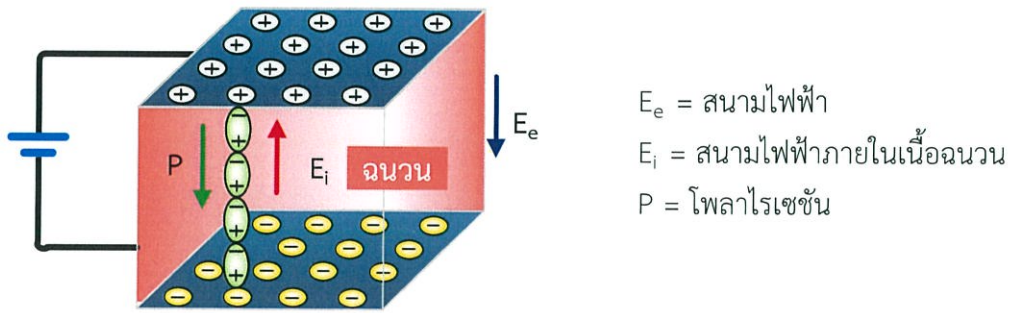
4) การเสื่อมสภาพเนื่องจากผลทางกล

การเสื่อมสภาพเนื่องจากผลทางกล เกิดได้จากหลายสาเหตุเช่น การสั่นเนื่องจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้า ในกรณีที่ขดลวดสเตเตอร์หลวมหรือมีช่องว่างในร่องสล็อต เมื่อขดลวดสเตเตอร์สั่น จะทำให้ฉนวนบริเวณปลายร่องสล็อตจะถูกเสียดสีและเกิดรอยฉีกขาดได้

2.3 ปรากฏการณ์โพลาริเซชัน (Polarization) [4,5,7]

คุณลักษณะโพลาริเซชัน คือพฤติกรรมของฉนวน เมื่อฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า แต่ละอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ในเนื้อฉนวนจะถูกโพลาริเซชัน ทำให้เกิดพฤติกรรมเชิงขั้วขึ้นมาเนื่องจากสนามไฟฟ้า พิจารณาพฤติกรรมภายใต้สนามไฟฟ้า กลุ่มหมอกอิเล็กตรอนจะพยายามเคลื่อนที่สวนทางกับสนามไฟฟ้า ในขณะที่ประจุบวกในนิวเคลียสจะเคลื่อนที่ไปทิศเดียวกับสนามไฟฟ้า ประจุบวกและอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ห่างออกจากกันได้ไม่เกินกว่าคุณสมบัติความยืดหยุ่นของพันธะของอะตอม การเคลื่อนที่ของประจุบวกและกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนทำให้จุดศูนย์กลางรวมมวลของอิเล็กตรอนแยกออกจากนิวเคลียส รูปร่างของอะตอมจะเปลี่ยนไปเล็กน้อย อะตอมหรือโมเลกุลที่ถูกโพลาริเซชันทำให้เกิดไดโพลไฟฟ้า (Electric dipole) ในวัสดุฉนวน ไดโพลไฟฟ้าแต่ละไดโพล จะเรียงตัวตามทิศทางของสนามไฟฟ้างดรูปที่ 2.18 กระบวนการการมีขั้ว หรือ โพลาริเซชัน การเรียงตัวของไดโพลไฟฟ้าทำให้ประจุไดโพลที่เรียงตัวต่อกันภายในเนื้อฉนวนหักล้างกันหมด ในขณะที่ประจุที่อยู่บนผิวฉนวนจะยังคงมีอยู่ โพลาริเซชันถูกกำหนดให้มีทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้าจากภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



E_e = สนามไฟฟ้า
 E_i = สนามไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวน
 P = โพลาริเซชัน

รูปที่ 2.18 กระบวนการโพลาริเซชัน [7]

โพลาริเซชัน (Polarization, P) (C/m^2) ถูกนิยามว่าเป็นอัตราส่วนของไดโพลโมเมนต์ (Dipole moment) ที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นมาจากภายในเนื้อฉนวนภายใต้สนามไฟฟ้าภายนอกที่ป้อนให้กับอิเล็กโตรดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของฉนวน

$$\text{โพลาริเซชัน} = \frac{\text{ไดโพลโมเมนต์}}{\text{ปริมาตรของฉนวน}} \quad (2.1)$$

โดยที่ไดโพลโมเมนต์ (Dipole moment, p) เกิดขึ้นได้ดังต่อไปนี้หากมีจุดประจุอยู่ 2 จุด จุดหนึ่งมีประจุ $+q$ และอีกจุดหนึ่งมีประจุ $-q$ จะเกิดไดโพลโมเมนต์ระหว่างประจุทั้งสองขึ้น โดยที่ไดโพลโมเมนต์ที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการที่ 2.2

$$\vec{p} = q\vec{d} \quad (2.2)$$

d คือ เวกเตอร์ระยะกระจัด (displacement vector) มีทิศทางจากประจุลบไปยังประจุบวก ดังนั้นไดโพลโมเมนต์ จึงเป็นปริมาณเวกเตอร์และมีทิศทางจากประจุลบไปประจุบวก



รูปที่ 2.19 แสดงไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าระหว่างประจุสองประจุ [7]

2.3.1 คุณสมบัติฉนวนในปรากฏการณ์โพลาริเซชัน

การเกิดปรากฏการณ์โพลาริเซชันจะเกิดขึ้นถ้าวัสดุอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า โดยพิจารณาจากตัวเก็บประจุที่มีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอโดยมีสุญญากาศเป็นฉนวน ความหนาแน่นสนามไฟฟ้า (D) เป็นสัดส่วนกับเวกเตอร์สนามไฟฟ้า (E) กับค่าเปอร์มิตติวิตี (ϵ_0) ซึ่งเป็นค่าคงที่

$$D = \epsilon_0 E \quad (2.3)$$

โดยสนามไฟฟ้าภายในสุญญากาศ จะเกิดโพลาริเซชัน P ระดับอะตอม ค่าความสามารถยอมรับได้ของไดอิเล็กตริก (χ) สัมพันธ์กับโพลาริเซชันและสนามไฟฟ้า

$$P = \chi \epsilon_0 E \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความสามารถยอมรับได้ของไดอิเล็กตริกเท่ากับศูนย์ ในสุญญากาศ แต่จะเพิ่มขึ้นเนื่องจาก โพลาริเซชันในฉนวนแข็ง โดยมีความสัมพันธ์ค่าเปอร์มิตติวิตี (\mathcal{E}) ดังนี้

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0(1+\chi) \quad (2.5)$$

โพลาริเซชันจะมีทิศทางเดียวกับทิศทางของความเข้มสนามไฟฟ้า ความสัมพันธ์ระหว่าง โพลาริเซชันกับความหนาแน่นไฟฟ้าดังสมการนี้

$$D = \mathcal{E}_0 E + P = \mathcal{E}_0 (1+\chi) E \quad (2.6)$$

จากสมการดังกล่าวแสดงว่าโพลาริเซชันจะสามารถคงอยู่ได้โดยปราศจากสนามไฟฟ้า ภายนอก ซึ่งเกิดหลังจากการจ่ายประจุไฟฟ้าให้กับฉนวน โดยที่กระบวนการดีโพลาริเซชันจะทำให้ เกิดความหนาแน่นสนามไฟฟ้า เมื่อกระบวนการทั้งสองต่างกัน จะทำให้ค่าคงที่เวลาต่างกันด้วย ส่งผลให้ เวลาและความถี่ขึ้นอยู่กับค่าความสามารถยอมรับได้ของไดอิเล็กตริก

คุณสมบัติของฉนวนในโดเมนเวลา ความหนาแน่นของกระแสและฟังก์ชันการตอบสนองของฉนวน เพื่อครอบคลุมปรากฏการณ์ทางกายภาพของการคายกระแสและการนำกระแสด้วยสมการ คณิตศาสตร์ เริ่มต้นด้วยสมการของแมกซ์เวลล์ สนามไฟฟ้า $E(t)$ สร้างความหนาแน่นกระแส $J(t)$ เป็น ผลรวมของกระแสการนำไฟฟ้าและกระแสการกระจัด (Displacement Current)

$$\nabla \times H(t) = J(t) = \sigma_0 E(t) + \frac{dD(t)}{dt} \quad (2.7)$$

เมื่อ σ_0 คือ ปริมาณการนำของวัสดุ ดังนั้นการโพลาริเซชัน $P(t)$ ยังก่อให้เกิดการนำของกระแสการ กระจัดซึ่งเขียนได้ดังนี้

$$J(t) = \sigma_0 E_0 + \mathcal{E}_0 \mathcal{E}(\infty) \frac{dE(t)}{dt} + \frac{dP(t)}{dt} \quad (2.8)$$

เมื่อ $E(t)$ จะถูกกำหนดโดยฟังก์ชันขั้นบันได $H(t)$ ให้ขนาดแอมพลิจูดเป็น E_0 โดยใช้วิธีการรวมกันใน โดเมนเวลา จะได้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ทั้งหมด $J(t)$ เป็น

$$J(t) = \sigma_0 E_0 + \mathcal{E}_0 E_0 \mathcal{E}(\infty) \delta(t) + f(t) \quad (2.9)$$

$$\mathcal{E}(\infty) = 1 + \chi(\infty) \quad (2.10)$$

เมื่อ $\mathcal{E}(\infty)$ เป็นเปอร์มิตติวิตีความถี่สูง

เมื่อ $\delta(t)$ ฟังก์ชันเดลต้าเป็นอนุพันธ์ของฟังก์ชันขั้นบันได $H(t)$

เมื่อ $f(t)$ แสดงถึงฟังก์ชันการตอบสนองของฉนวนบริสุทธิ์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเวลาขึ้นอยู่กับค่า ความสามารถยอมรับได้ของไดอิเล็กตริกหรือเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ \mathcal{E}_r ฟังก์ชัน $f(t)$ เป็นฟังก์ชันลด แบบเชิงเส้น

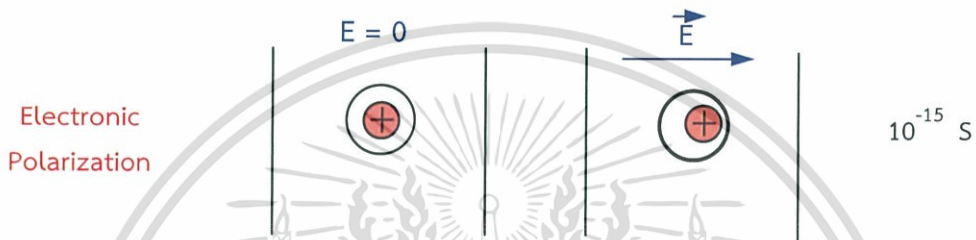
$$f(t) = \frac{d\chi(t)}{dt} = \frac{d\mathcal{E}_r(t)}{dt} \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 ชนิดของโพลาริเซชัน [8]

1) Electronic Polarization หรือ Optical Polarization

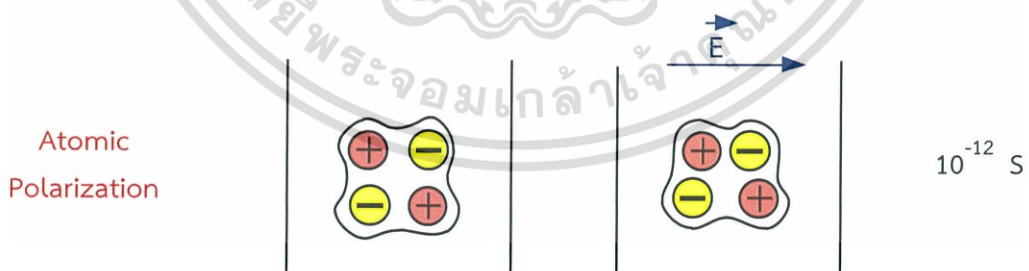
เป็นกระบวนการโพลาริเซชันระดับอะตอมของฉนวน เมื่อฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า ทำให้กลุ่มหมอกอิเล็กตรอนที่อยู่รอบๆ นิวเคลียสเกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเล็กน้อย เพื่อจัดเรียงตัวใหม่เนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าภายนอกที่มากกระทำ แต่การเปลี่ยนแปลงในลักษณะดังกล่าวมีขนาดเล็กมาก เนื่องจากแรงจากสนามไฟฟ้าภายนอกที่กระทำต่ออะตอมนั้นมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับแรงยึดเหนี่ยวภายในอะตอมที่เกิดจากนิวเคลียสกระทำต่ออิเล็กตรอน นี้เกิดขึ้นภายในเวลา 10^{-14} วินาที ซึ่งมีความสอดคล้องกับความเร็วแสงและการมีขั้วแบบดังกล่าวนี้จะไม่ทำให้เกิดการสูญเสียทางไฟฟ้า



รูปที่ 2.20 กระบวนการ Electronic Polarization [8]

2) Ionic Polarization หรือ Vibrational Polarization

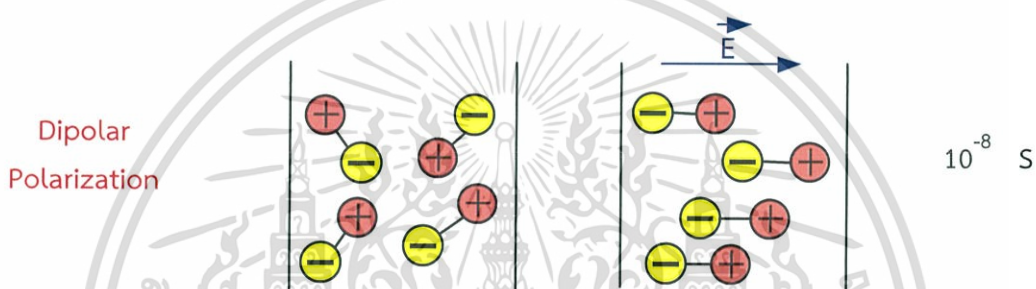
Atomic Polarization เป็นกระบวนการโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นกับวัสดุที่เป็นผลึกไอออนิก เมื่อมีสนามไฟฟ้าจากภายนอกกระทำ จะทำให้ไอออนบวกและไอออนลบของพันธะไอออนิกมีการเคลื่อนที่ ซึ่งการเคลื่อนที่นี้จะทำให้เกิดไดโพลที่ไม่สมดุล เนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอกสามารถทำให้การจัดเรียงตัวของนิวเคลียสภายในอะตอมและการสั่นของโครงสร้างโมเลกุลเปลี่ยนแปลงไป การมีขั้วแบบนี้ไม่สามารถเกิดขึ้นภายในเวลาที่รวดเร็วดังเช่น Electronic Polarization ได้เพราะนิวเคลียสของอะตอมเคลื่อนที่ได้ช้ามากเมื่อเทียบกับอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.21 กระบวนการ Atomic Polarization [8]

3) Orientation Polarization หรือ Dipolar Polarization

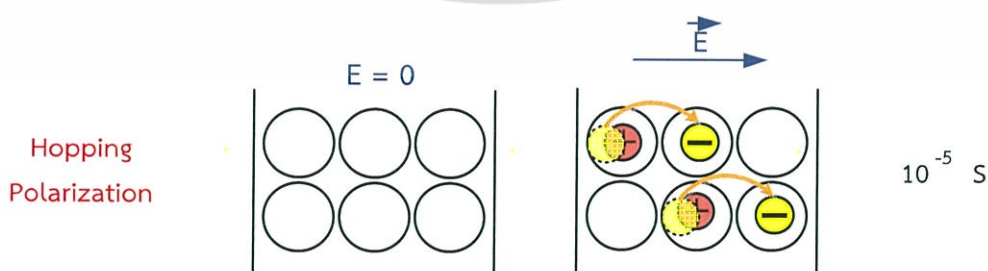
Orientation Polarization เป็นการโพลาไรซ์ที่เกิดขึ้นกับไดโพลเล็กทรอนิกส์ที่มีโมเมนต์เป็นแบบเชิงขั้วถาวร (Permanent dipole) เช่น น้ำกรดไฮโดรคลอริก เป็นต้น ในกรณีที่เรามีวัสดุที่มีโมเมนต์เชิงขั้วถาวร โมเมนต์ภายในวัสดุนั้นจะมีอะตอมอยู่ ซึ่งการเรียงตัวของอะตอมจะเรียงตัวอยู่อย่างกระจัดกระจาย ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนและเมื่อเราวัดค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับศูนย์และทิศทางการเรียงตัวจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาแต่ค่อนข้างใช้เวลานานและมันจะเรียงตัวอย่างกันสมดุลในตัววัสดุนั้น แต่เมื่อเราจ่ายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปภายในโมเมนต์ที่เป็นแบบเชิงขั้วแบบถาวรนั้น ภายในโมเมนต์เองจะเกิดการเรียงตัวใหม่ตามทิศทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องจากภายในโมเมนต์นั้นอะตอมจะมีขั้วอยู่ จึงเกิดการเรียงตัวใหม่ตามทิศทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เราจ่ายไป ปรากฏการณ์ลักษณะนี้เราจะเรียกมันว่าการเกิดออเรนเทชันโพลาไรซ์เซชัน ซึ่งการโพลาไรซ์เซชันประเภทนี้จะใช้เวลาในการเกิดนานกว่า Electronic Polarization และ Atomic Polarization



รูปที่ 2.22 กระบวนการ Dipolar Polarization [8]

4) Hopping Polarization

Hopping Polarization เป็นกระบวนการโพลาไรซ์ที่อธิบายปรากฏการณ์ที่ประจุภายในฉนวน คือ เมื่อฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนภายในฉนวนจะกระโดดจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งโดยที่พฤติกรรมการกระโดดนี้จะเกิดในระยะเวลาสั้น จากนั้นอิเล็กตรอนดังกล่าวจะค้างอยู่ในตำแหน่งใหม่ที่กระโดดไปทำให้ที่ตำแหน่งใหม่แสดงพฤติกรรมเป็นประจุลบ เสมือนกับว่าโฮลเคลื่อนที่ในทิศตรงกันข้าม ซึ่งพฤติกรรมการย้ายตำแหน่งของประจุภายในฉนวนจะทำให้เกิดการโพลาไรซ์ภายในเนื้อฉนวน

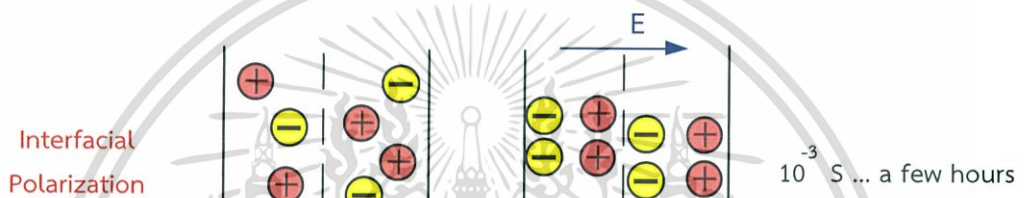


รูปที่ 2.23 กระบวนการ Hopping Polarization [8]

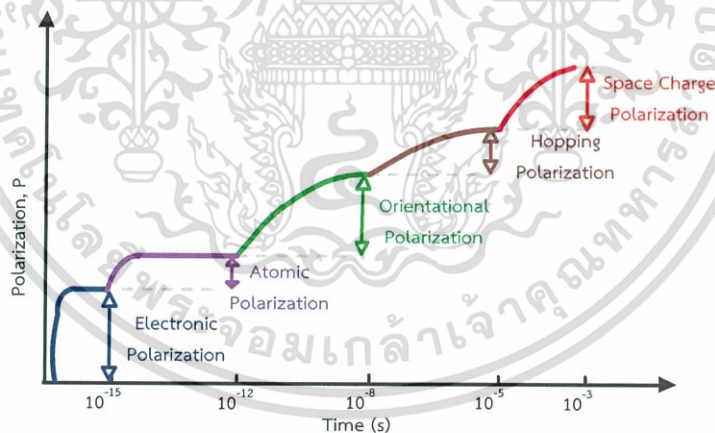
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) Space Charge Polarization หรือ Interfacial Polarization

Space Charge Polarization เกิดขึ้นเนื่องจากการแพร่กระจายของไอออนโดยก่อนใส่สนามไฟฟ้า อนุภาคประจุบวกและอนุภาคประจุลบจะมีการจัดเป็นระเบียบ แต่เมื่ออนุภาคนั้นอยู่ในสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดการกระจายของประจุในอนุภาคนั้นตามทิศทางสนามไฟฟ้าอนุภาคประจุบวกและอนุภาคประจุลบที่สามารถเคลื่อนที่ได้ที่อยู่ในเนื้ออนุภาคนั้นจะเคลื่อนที่แยกออกจากกัน และอนุภาคประจุดังกล่าวจะเคลื่อนที่มาสะสมกันตรงรอยต่อของอนุภาคนั้น 2 ชนิด ที่มีค่าเปอร์มีตริวิตีที่แตกต่างกัน ซึ่งจะทำให้เกิดการสะสมของประจุบวกหรือประจุลบที่รอยต่อของอนุภาคนั้นดังกล่าว การเคลื่อนที่ของประจุกระทำทำให้เกิดการสะสมของประจุที่รอยต่อระหว่างอนุภาคนั้น 2 ชนิด ถูกเรียกว่า Space Charge Polarization ซึ่ง Space Charge Polarization นี้จะทำให้การกระจายของสนามไฟฟ้าภายในเนื้ออนุภาคนั้นผิดเพี้ยนไป โดยทั่วไปโพลาริเซชันชนิดนี้จะเกิดในเฟอร์ไรต์และสารกึ่งตัวนำ และจะมีขนาดเล็กมาก



รูปที่ 2.24 กระบวนการ Space Charge Polarization [8]



รูปที่ 2.25 ระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดโพลาริเซชันทั้ง 5 แบบภายใต้การป้อนแรงดันขึ้นบันได [4]

ณ ปัจจุบัน เราสามารถทราบขนาดของการมีขั้ว ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุฉนวนได้โดยสังเกตจากขนาดของกระแสที่ไหลผ่านเนื้อฉนวนเพราะไม่สามารถวัดขนาดการมีขั้วภายในวัสดุฉนวนโดยการวัดการมีขั้วได้โดยตรง และจนถึงปัจจุบันนี้ เรายังคงไม่สามารถบอกถึงความนำของวัสดุฉนวนโดยปราศจากการเกี่ยวเนื่องกับกระบวนการการมีขั้วได้

พิจารณาการจ่ายแรงดันรูปขั้นบันได ให้กับฉนวนเป็นเวลานานเพียงพอที่จะทำให้เกิดการมีขั้ว จะสามารถสังเกตเห็นกระแสโพลาริเซชัน (polarization current, i_{pol}) ได้โดยขนาดของกระแสดังกล่าวจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา เมื่อจ่ายแรงดันรูปขั้นบันไดให้กับฉนวนและทำการวัดกระแสที่ไหลผ่านเนื้อฉนวนซึ่งจะเรียกกระแสดังกล่าวว่ากระแสชาร์จ (charging current)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาและเรียนรู้เท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน (Polarization and Depolarization current)

ฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลหมุนประกอบด้วยไม่ก้ำผสมเรซินเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นจึงทำให้ฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ประกอบด้วยรอยต่อของฉนวนเป็นจำนวนมากซึ่งรอยต่อดังกล่าวจะเกิดขึ้นระหว่างวัสดุฉนวนไม่ก้ำและเรซินและด้วยเหตุนี้เมื่อทำการป้อนแรงดันกระแสตรงให้กับฉนวนกระบวนกรโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นภายในฉนวนจึงเป็นการโพลาริเซชันประเภท Interfacial Polarization เป็นหลักและในปัจจุบันเนื่องจากไม่สามารถวัดขนาดการโพลาริเซชันภายในฉนวนได้โดยตรงจึงหาขนาดของการโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นภายในฉนวนโดยสังเกตจากขนาดของกระแสที่ไหลผ่านฉนวนขณะที่ฉนวนเกิดการโพลาริเซชัน เมื่อพิจารณาการป้อนแรงดันกระแสตรงให้กับฉนวนเป็นเวลานานเพียงพอที่จะทำให้ฉนวนเกิดการโพลาริเซชันและขนาดของแรงดันที่ป้อนไม่เพียงพอที่จะทำให้ฉนวนเกิดการเบรกดาวน์ ฉนวนจะเกิดการโพลาริเซชันเพื่อตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าจากภายนอกที่มากระทำและเมื่อฉนวนเกิดการโพลาริเซชันจะทำให้เกิดกระแสไหลผ่านเนื้อฉนวนซึ่งกระแสที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการป้อนแรงดันให้กับฉนวนนี้คือกระแสโพลาริเซชัน (polarization current, i_{pol})

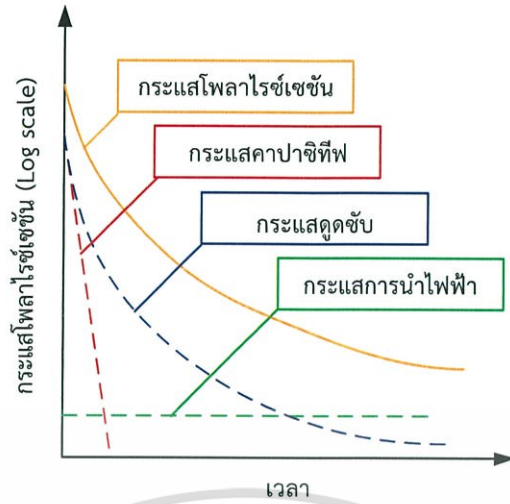
2.4.1 กระแสโพลาริเซชัน (Polarization current)

กระแสโพลาริเซชันในทางทฤษฎีจะมีองค์ประกอบ 3 ส่วน คือ

- 1) กระแสคาปาซิทีฟ (capacitive current, i_c) ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของตัวเก็บประจุภายในฉนวน และจะลดลงในทันทีทันใด
- 2) กระแสดูดซับ (absorption current, i_{ab}) ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดขึ้นจากกระบวนกรโพลาริเซชันภายในเนื้อฉนวน
- 3) กระแสการนำไฟฟ้า (conductance current, i_{con}) ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดจากค่าความนำไฟฟ้าของวัสดุและมีอยู่ในวัสดุทุกชนิด

การฉนวนหลายชั้นส่งผลถึงปรากฏการณ์โพลาริเซชันและการนำไฟฟ้า วิธีการวินิจฉัยฉนวนโดยการวัดผลของอินเทอร์เฟเชียลโพลาริเซชันที่เกิดจากปรากฏการณ์โพลาริเซชัน เกิดโดยการนำไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างชั้นฉนวน โดยความชื้น, อุณหภูมิและอายุการใช้งานจะส่งผลต่อปรากฏการณ์เหล่านี้

กระแสโพลาริเซชันในทางทฤษฎีและองค์ประกอบของกระแสแสดงได้ดังรูปที่ 2.26 แต่ในทางปฏิบัติกระแสโพลาริเซชันที่วัดได้จะมีกระแสรั่วไหล (leakage current, i_l) รวมอยู่ด้วยซึ่งกระแสรั่วไหลนี้เกิดขึ้นจากสิ่งปนเปื้อนที่ผิวฉนวนหรือเกิดจากความสกปรกของสภาพแวดล้อมขณะทำการทดสอบโดยจะพิจารณากระแสการนำไฟฟ้าและกระแสรั่วไหลเป็นกระแสการนำไฟฟ้าที่วัดได้ในทางปฏิบัติ (practical conduction current, $i_{con(practical)}$)



รูปที่ 2.26 องค์ประกอบของกระแสโพลาริเซชัน [4]

$$i_{pol (practical)} = i_c + i_{ab} + i_{con} + i_l \tag{2.12}$$

$$i_{con (practical)} = i_{con} + i_l \tag{2.13}$$

กระแสโพลาริเซชันในทางทฤษฎีสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.14)

$$i_{pol}(t) = C_0 V_0 \left[\frac{\sigma_0}{\epsilon_0} + \epsilon \delta(t) + f(t) \right] \tag{2.14}$$

โดยที่ C_0 คือ ค่าความจุไฟฟ้าทางเรขาคณิต (geometric capacitance) ของวัตถุทดสอบ

V_0 คือ แรงดันกระแสตรงที่ใช้ในการทดสอบ

σ_0 คือ ค่าความนำไฟฟ้ากระแสตรงบริสุทธิ์ (pure dc conductivity)

ϵ_0 คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ (permittivity of vacuum)

ϵ_{inf} คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ (relative permittivity) ที่เวลาเริ่มต้น (ที่ 0 วินาที)

$\delta(t)$ คือ ฟังก์ชันเดลต้า (delta function) ที่เกิดขึ้นจากการจ่ายแรงดันรูปขั้นบันไดแบบ

ทันทีทันใดให้กับวัตถุทดสอบที่เวลาเริ่มต้น

$f(t)$ คือ ฟังก์ชันผลตอบสนองของไดอิเล็กตริก (dielectric response function)

จากสมการที่ (2.15) สามารถแบ่งกระแสโพลาริเซชันออกเป็น 3 เทอมเรียงลำดับจากซ้ายไปขวาดังนี้

เทอมที่ 1 คือเทอมของ $\frac{\sigma}{\epsilon}$ ซึ่งเป็นเทอมที่มีความสัมพันธ์กับค่าความนำไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวน และเป็นเทอมที่ไม่ขึ้นอยู่กับกระบวนการโพลาริเซชันของฉนวน เทอมที่ 1 นี้จะปรากฏในขณะที่ทำการจ่ายแรงดันให้กับฉนวนเท่านั้นซึ่งเทอมที่ 1 จะเป็นเทอมที่มีความสัมพันธ์กับกระแสการนำไฟฟ้าของฉนวน

เทอมที่ 2 คือเทอมของ $\epsilon \delta(t)$ ซึ่งเป็นเทอมที่ไม่สามารถทำการวัดได้ในทางปฏิบัติเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของขนาดกระแสอย่างรวดเร็วซึ่งเทอมที่ 2 นี้จะเกิดจากกระบวนการโพลาริเซชันที่ใช้ระยะเวลาในการเกิดรวดเร็วตั้งแต่เช่น Electronic Polarization เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอมที่ 3 คือเทอมของ $f(t)$ เป็นเทอมที่มีความสัมพันธ์กับกระบวนการโพลาริซ์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวนยกเว้นกระบวนการโพลาริซ์ที่ใช้ระยะเวลาในการเกิดรวดเร็วดังที่กล่าวไปในเทอมที่ 2 ซึ่งเทอมที่ 3 นี้จะเป็นเทอมที่มีความสัมพันธ์กับกระแสคาปาซิทีฟและกระแสดูดซับ

2.4.2 กระแสดีโพลาริซ์เซชัน (Depolarization current)

จากข้อ 2.4.1 เมื่อหยุดจ่ายแรงดันให้กับฉนวนและทำการลัดวงจรฉนวนเพื่อให้ฉนวนเกิดการคายประจุลงสู่กราวด์โมเลกุลและประจุไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนจะเกิดการจัดเรียงตัวเข้าสู่สภาวะปกติก่อนที่จะมีสนามไฟฟ้ามากระทำกระแสคายประจุ (Discharge current) ที่วัดได้ขณะทำการลัดวงจรให้กับฉนวนจะถูกเรียกว่ากระแสดีโพลาริซ์เซชัน (depolarization current, i_{depol}) กระแสดีโพลาริซ์เซชัน จะมีองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ

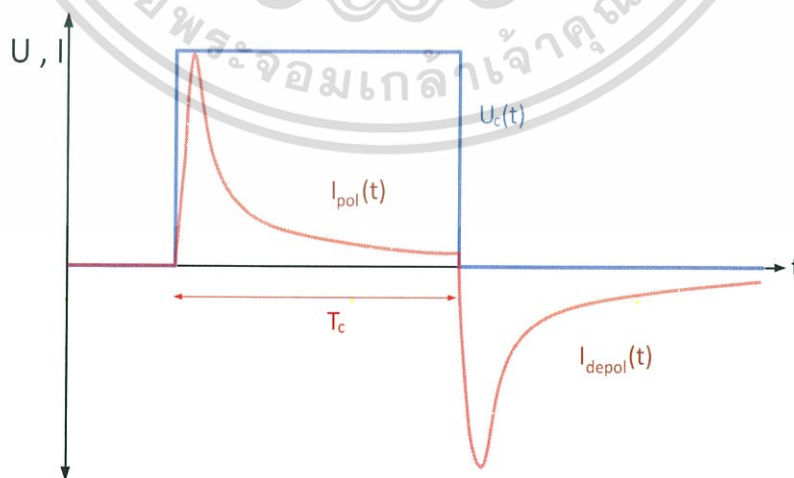
1) กระแสคาปาซิทีฟดิสชาร์จ (capacitive discharge current, $i_{c(discharge)}$) ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดขึ้นและลดลงอย่างทันทีทันใดและจะมีคุณลักษณะเหมือนกับกระแสคาปาซิทีฟของกระแสโพลาริซ์เซชันแต่มีขั้วตรงข้ามกัน

2) กระแสดูดซับดิสชาร์จ (absorption discharge current, $i_{ab(discharge)}$) ซึ่งเป็นกระแสที่มีค่าสูงในช่วงแรกและเมื่อทำการคายประจุให้กับฉนวนต่อไปเรื่อยๆ กระแสดังกล่าวจะมีค่าลดลงกระแสดูดซับดิสชาร์จนี้จะมีคุณลักษณะเหมือนกับกระแสดูดซับของกระแสโพลาริซ์เซชันแต่จะมีขั้วตรงข้ามกันสำหรับกระแสดีโพลาริซ์เซชันจะไม่มีองค์ประกอบของกระแสการนำไฟฟ้าและกระแสรั่วไหลรวมอยู่ด้วยเนื่องจากทำการหยุดป้อนแรงดันให้กับฉนวนแล้วกระแสดีโพลาริซ์เซชันเขียนได้ดังสมการที่ (2.17) และกระแสโพลาริซ์เซชันและกระแสดีโพลาริซ์เซชันที่วัดได้แสดงดังรูปที่ 2.28

$$i_{depol} = i_{c(discharge)} + i_{ab(discharge)} \quad (2.15)$$

$$i_{depol}(t) = -C_0 V_0 [f(t) - f(t + T_c)] \quad (2.16)$$

T_c คือ ระยะเวลาที่ทำการจ่ายแรงดันให้กับวัตถุทดสอบ



รูปที่ 2.28 กระแสโพลาริซ์เซชันและกระแสดีโพลาริซ์เซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.14) และ (2.16) พบว่า สามารถหากระแสนำไฟฟ้าในทางปฏิบัติได้โดยการนำกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชันที่วัดได้มาลบออกจากกระแสโพลาร์ไรซ์เซชันที่วัดได้ในทางปฏิบัติ

$$I_{con(practical)} = I_{pol(practical)} - I_{depol} \quad (2.17)$$

$$I_{con(practical)} = I_c + I_{ab} + I_{con} + I_l - I_{c(discharge)} - I_{ab(discharge)} \quad (2.18)$$

$$I_{con(practical)} = I_{con} + I_l \quad (2.19)$$

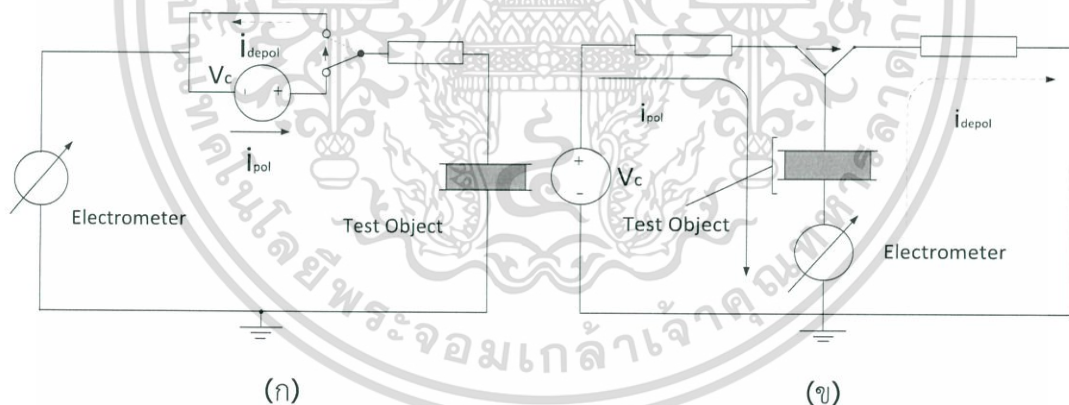
2.5 วงจรการวัดกระแสโพลาร์ไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชัน (Polarization and Depolarization current)

ในการวัดกระแสโพลาร์ไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชันของฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนจะทำการวัดฉนวนดังกล่าวใน 2 ตำแหน่ง คือ

1) ฉนวนระหว่างเฟส (Phase to Phase Insulation) สามารถวัดกระแสโพลาร์ไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชันของฉนวนของเครื่องจักรกลหมุน ทำได้ในห้องปฏิบัติการ โดยวัดทดสอบไม่ได้มีการต่อกราวด์

2) ฉนวนระหว่างเฟสกับกราวด์ (Phase to Ground Insulation) ใช้สำหรับวัดกระแสโพลาร์ไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชันของฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแบบ on site เนื่องจากโครงสร้างเตเตอร์เป็นส่วนที่ต่อลงกราวด์

ซึ่งผลการวัดกระแสของทั้งสองบริเวณไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้เนื่องจากทั้งสองบริเวณมีค่าความจุไฟฟ้าที่แตกต่างกันมาก



รูปที่ 2.29 วงจรวัดกระแสโพลาร์ไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชันของฉนวนบริเวณขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 2 ตำแหน่ง (ก) ฉนวนระหว่างเฟส และ (ข) ฉนวนระหว่างเฟสกับกราวด์

บทที่ 3 ศึกษาดูงาน

3.1 โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ จังหวัดกาญจนบุรี

การทำปฏิญาณนิพนธ์ในครั้งนี้ ทางคณะนักศึกษาได้ศึกษาดูงานเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยได้รับความอนุเคราะห์จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ในการให้เข้าชมโรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ จ.กาญจนบุรี

รอบที่ 1 ช่วงเช้า : ศึกษาดูงานช่วงซ่อมบำรุงใหญ่ (Overhaul) ยูนิต 3

โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ จังหวัดกาญจนบุรี ใช้การปล่อยน้ำจากเขื่อนซึ่งเป็นแรงทางกลเปลี่ยนให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยให้น้ำผ่านกังหันซึ่งอยู่แกนเดียวกับโรเตอร์ทำให้เกิดการหมุนโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในโรงไฟฟ้าประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 ยูนิต โดยในช่วงศึกษาดูงานได้มีการซ่อมบำรุงใหญ่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ายูนิตที่ 3 การซ่อมบำรุงใหญ่จะเป็นช่วงที่ทางโรงไฟฟ้าจะทำการถอดชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกมาซ่อมแซม ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 (ก) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของเขื่อนวชิราลงกรณ จังหวัดกาญจนบุรีทั้ง 3 ตัว
(ข) ลักษณะภายนอกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะทำงาน

โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 3 ตัว มีลักษณะเดียวกันแสดงเป็นป้ายที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ป้ายข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของเขื่อนวชิราลงกรณ์ จังหวัดกาญจนบุรี

Normal Capacity	96.6 MVA
Maximum Capacity	111.1 MVA
Rated Voltage	13.8 kV
Normal Current	4,041 A
Maximum Current	4,648 A
Power Factor	0.9
Rated Speed	150 rpm
Rated Frequency	50 Hz
No. of Phases	3
No. of Pole	40

ขั้นตอนการซ่อมบำรุงใหญ่ มีขั้นตอนดังนี้.

- 1) ใช้เครนยกยึดกับสเตเตอร์
- 2) ขณะทำการยกสเตเตอร์
- 3) ยกสเตเตอร์ออกจากโรเตอร์
- 4) วางสเตเตอร์เพื่อการซ่อมแซม



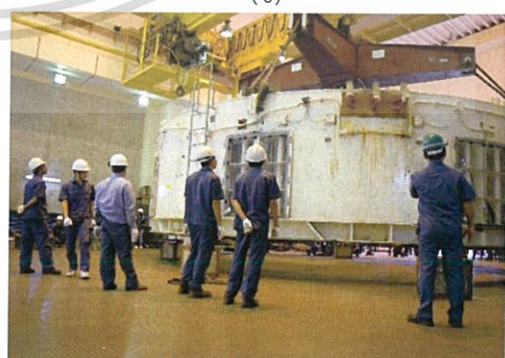
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.3 (ก) ใช้เครนยกยึดกับสเตเตอร์ (ข) ขณะทำการยกสเตเตอร์ (ค) ยกสเตเตอร์ออกจากโรเตอร์

(ง) วางสเตเตอร์เพื่อการซ่อมแซม

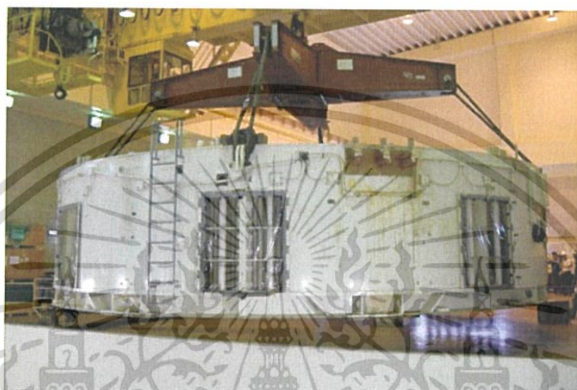
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ จังหวัดกาญจนบุรีประกอบด้วย 4 ส่วนสำคัญหลัก ๆ คือ สเตเตอร์, โรเตอร์, ตัวกระตุ้น, และการระบายความร้อน

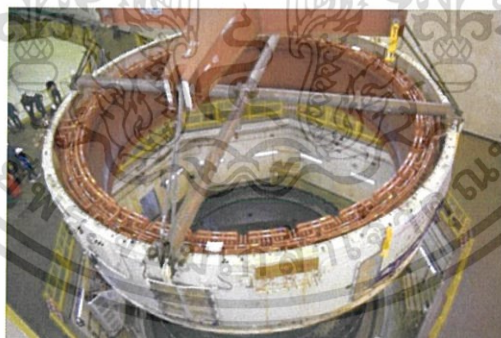
1. สเตเตอร์

โครงสเตเตอร์ ทำจากเหล็กหนาเพื่อความแข็งแรง ลดการสั่นสะเทือนและเสียงรบกวน และถูกออกแบบให้มีความแข็งแรงรองรับมวลของสเตเตอร์ ทนความเครียดจากการงอและการโก่งตัว นอกจากนี้ยังถูกออกแบบมาให้ทนต่อความเครียดที่รุนแรงจากการลัดวงจร



รูปที่ 3.4 โครงสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเขื่อนวชิราลงกรณ

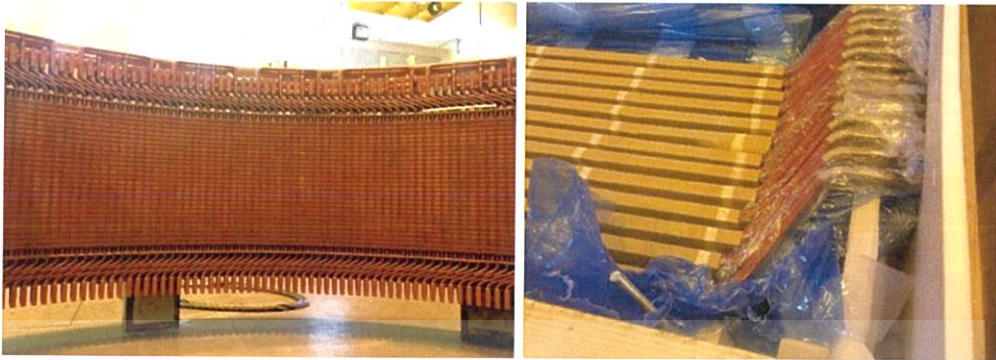
แกนสเตเตอร์ ทำจากแผ่นเหล็กซิลิกอนรีดเย็นอัดซ้อนกัน เพื่อลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนและลดการสูญเสียเนื่องจากฮีสเตอร์ซิส จากนั้นเชื่อมด้วยเหล็กคาร์บอนต่ำติดกัน ส่วนนี้จะถูกนำไปติดตั้งกับโครงสเตเตอร์



รูปที่ 3.5 แกนสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเขื่อนวชิราลงกรณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขดลวดสเตเตอร์ มีลักษณะเป็นขดลวดตัวนำถูกพันด้วยฉนวน โดยโรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ จังหวัดกาญจนบุรี ใช้ขดลวดแบบโรเบล



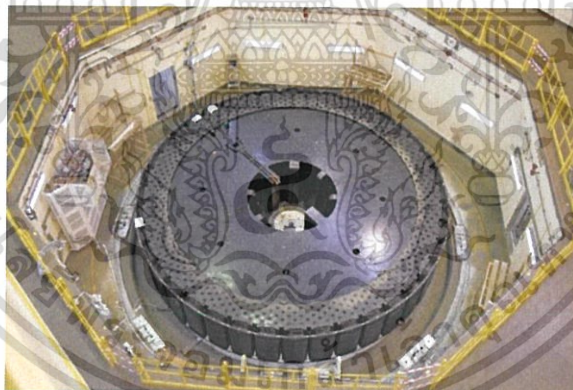
รูปที่ 3.6 ขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเขื่อนวชิราลงกรณ

2. โรเตอร์

โรเตอร์ คือ ส่วนที่หมุนของเครื่องจักรกลเชิงโครนัส ซึ่งโรเตอร์จะเป็นที่อยู่ของขดลวดสนามขดของโรเตอร์

แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. โรเตอร์แบบทรงกระบอก
2. โรเตอร์แบบมีขั้วยื่น



รูปที่ 3.7 โรเตอร์แบบขั้วยื่น

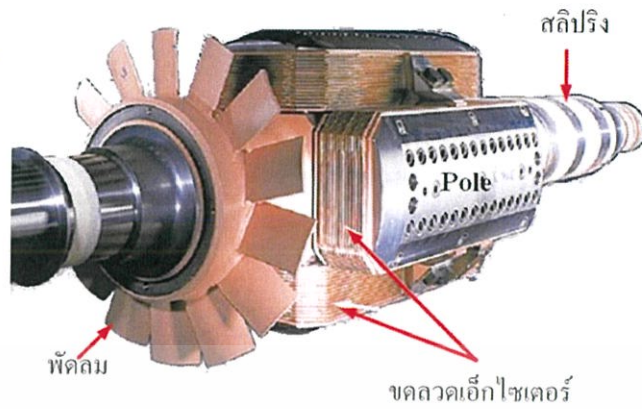
สำหรับเขื่อนวชิราลงกรณเป็นเขื่อนพลังงานน้ำ ความเร็วรอบต่ำ จึงใช้โรเตอร์แบบมีขั้วยื่นใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าความเร็วต่ำ จึงทำให้มีขั้วจำนวนมาก ตามสมการที่ 3.1

$$N = \frac{120f}{P} \quad (3.1)$$

โดยโรเตอร์ที่ใช้ในเขื่อนมี 40 ขั้ว ความเร็วรอบจึงเท่ากับ $(120 \times 50) / 40 = 150$ rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนประกอบของโรเตอร์

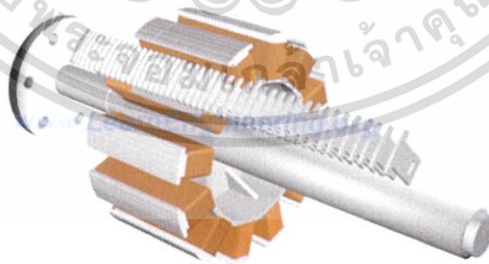


รูปที่ 3.8 ส่วนประกอบของโรเตอร์

ส่วนที่เป็นขั้วยื่น มีลักษณะเป็นแผ่นเหล็กลามิनाซ้อนอัดกันเป็นชั้นๆ เพื่อเป็นขั้วยื่นของโรเตอร์ และขั้วยื่นนี้เป็นที่อยู่ของขดลวดสนามพันรอบอยู่



รูปที่ 3.9 ขั้วยื่นของโรเตอร์



รูปที่ 3.10 แผ่นเหล็กลามิनाซ้อนอัดกันเป็นชั้นๆ [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นลามิना จะอยู่รอบส่วนที่เป็นขั้วยื่นของโรเตอร์ทำหน้าที่รับแรงดันกระแสตรงมาจากชุดตัวกระตุ้น เพื่อทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กที่โรเตอร์



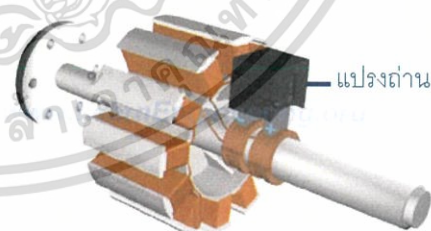
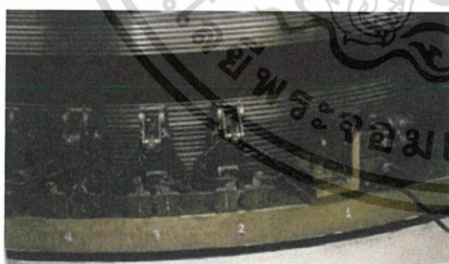
รูปที่ 3.11 แผ่นลามิनाบนโรเตอร์

สลีปรัง เป็นส่วนที่ต่อเข้ากับขดลวดสนามที่อยู่บนโรเตอร์ ทำหน้าที่สัมผัสกับแปรงถ่าน เพื่อรับไฟกระแสตรงจากตัวกระตุ้น



รูปที่ 3.12 สลีปรัง

แปรงถ่าน ทำหน้าที่รับไฟกระแสตรงจากตัวกระตุ้น เพื่อจ่ายให้สลีปรัง



รูปที่ 3.13 แปรงถ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกนโรเตอร์ ส่วนบนเป็นส่วนที่ติดอยู่ของสลิปริง ดังรูป 3.14(ก) และส่วนล่างติดกับกังหันน้ำ เพื่อรับแรงดันน้ำ ทำให้โรเตอร์เกิดการหมุน ดังรูป 3.14(ข)



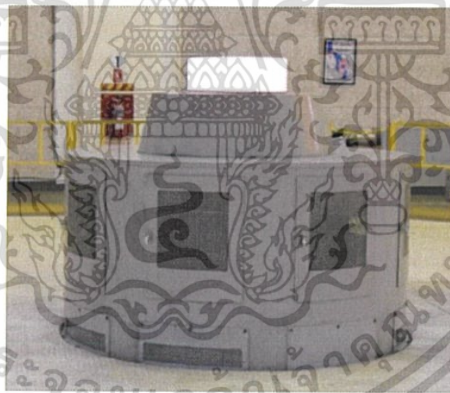
(ก)



(ข)

รูปที่ 3.14 (ก) แกนโรเตอร์ส่วนบน (ข) แกนโรเตอร์ส่วนล่าง

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวร เพื่อนำไฟจากการผลิตไฟฟ้า มาแสดงออกเป็นไฟ แสดงการทำงานอยู่ส่วนบนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 3.15 ไฟแสดงสถานะเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงาน



รูปที่ 3.16 โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 สเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวร

3. ตัวกระตุ้น

เครื่องจักรกลเชิงโครนัส (ยกเว้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กถาวร) จำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อกระตุ้นขดลวดสนามสร้างสนามแม่เหล็ก ดังนั้นเครื่องจักรกลเชิงโครนัสเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าความเร็วคงที่สำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าความถี่คงที่ แรงดันเอาต์พุตของเครื่องที่ขึ้นอยู่กับกระแสกระตุ้น สำหรับเขื่อนวชิราลงกรณใช้วิธีกระตุ้น แบบกระตุ้นตัวเอง

การกระตุ้นกระแสตรงแบบกระตุ้นตัวเอง รับแรงดันกระตุ้นจากแรงดันขาออก โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตแรงดันกระแสสลับ 13.8 กิโลโวลต์ ผ่านหม้อแปลงเพื่อลดแรงดันลง แล้วทำการเปลี่ยนกระแสสลับเป็นกระแสตรงโดยผ่านวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ไทรสเตอร์ ทำการจ่ายผ่านแปลงถ่าน ที่มีการสัมผัสกับสลีปริ่ง เพื่อกระตุ้นขดลวดสนามที่โรเตอร์ ทำให้เกิดการผลิตไฟฟ้า ในการเริ่มต้นที่ยังไม่มีแรงดันจากขาออก จะใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายกระแสตรงแทน

4. ระบบระบายความร้อน

การระบายความร้อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในเขื่อนวชิราลงกรณ จะใช้น้ำในการระบายความร้อน โดยมีตัวระบายความร้อน ประกบอยู่ข้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยใช้ระบบน้ำปิด โดยมีช่องรูขนาดเล็ก หรือที่เรียกกันว่ารังผึ้ง สำหรับเพื่อให้น้ำไหลผ่าน เพื่อให้น้ำถ่ายเทความร้อนจากตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อถ่ายเทความร้อนเสร็จ น้ำที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นจะไหลลงสู่แม่น้ำ โดยที่เขื่อนวชิราลงกรณจะมีระบบ Back Wash เพื่อให้น้ำสวนกลับทิศทางเพื่อไม่ให้รังผึ้งตัน เพราะน้ำที่ใช้ในการระบายความร้อนเป็นน้ำจากเขื่อนซึ่งมีตะกอนค่อนข้างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.18 (ก) ตัวระบายความร้อน (ข) ท่อในการถ่ายเทความร้อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

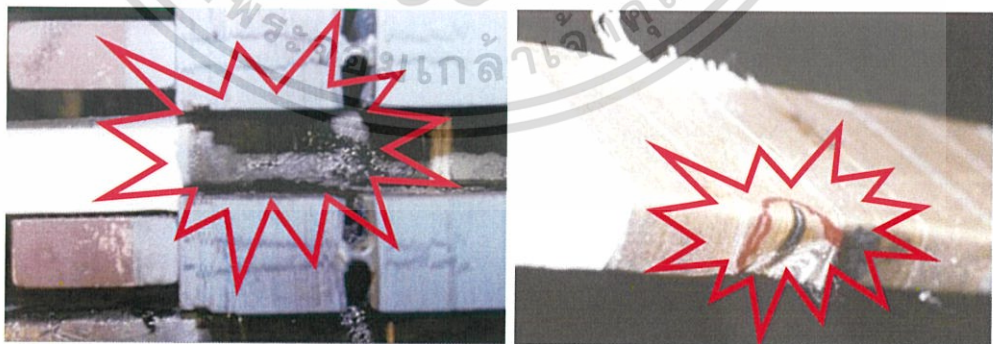
หลังจากคณะนักศึกษาได้ทำการศึกษาส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในช่วงเช้า หลังจากนั้นช่วงบ่าย ได้ฟังการให้ความรู้เรื่องสาเหตุความเสื่อมสภาพของฉนวนจากพี่วิศวกร

รอบที่ 1 ช่วงบ่าย : สาเหตุการเสื่อมสภาพของฉนวนและความเสียหายของอุปกรณ์ไฟฟ้า

ฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าส่วนใหญ่ทำขึ้นมาจากหลายองค์ประกอบ เพื่อให้มีความคงทนทางไฟฟ้า ทางกล ความร้อนและสภาพแวดล้อม ดังนั้นการบำรุงรักษาสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพของฉนวนต่อความร้อน, ความรุนแรงที่กระทำต่อวัสดุฉนวนและสภาพแวดล้อมของพื้นที่ อย่างไรก็ตาม สาเหตุของการเสื่อมสภาพของฉนวนจนก่อให้เกิดความเสียหาย อาจะเกิดจากสาเหตุต่างๆ ดังนี้

1) ความเครียดทางไฟฟ้า (Electrical Stresses)

ฉนวนถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานที่ระบบแรงดันคงที่ดังนั้นเมื่อเกิดแรงดันเกินภายในฉนวนย่อมเป็นสาเหตุนำไปสู่การเสื่อมสภาพของฉนวน

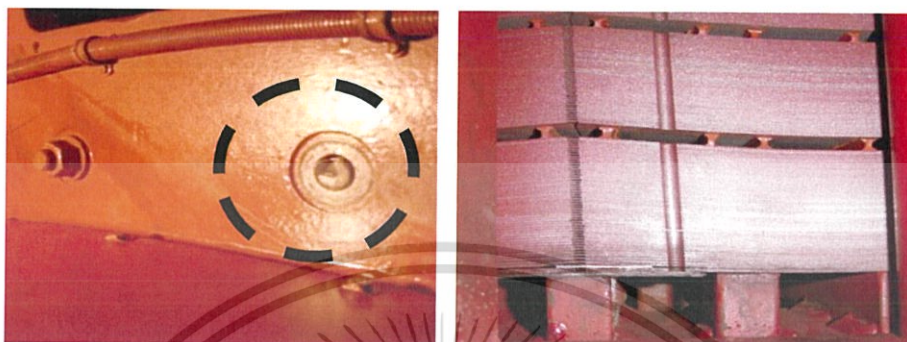


รูปที่ 3.19 ฉนวนเสียหายจากแรงดันเกิน [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ผลจากทางกล (Mechanical Stresses)

อาจเกิดขึ้นได้จากการเดินเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่เดินและหยุดบ่อยครั้ง ความสั่นสะเทือนจากการเดินเครื่องจักรไฟฟ้าตามปกติ หรือเดินเครื่องแล้วหยุดเป็นหนึ่งในสาเหตุที่ทำให้ฉนวนเกิดความเสียหาย



รูปที่ 3.20 คอยล์หลวมเนื่องมาจากการสั่น

3) ผลทางเคมี (Chemical Stresses)

การอยู่ใกล้กับสารเคมี น้ำมัน ไอระเหยไฮดรอกซิดกร่อนและสิ่งสกปรกทั่วไป ย่อมมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของวัสดุฉนวน

4) ผลจากความร้อน (Thermal Stresses)

การเดินเครื่องจักรกลไฟฟ้าในสภาพแวดล้อมความร้อนสูงหรือเย็นจัด จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการขยายและหดตัวของฉนวน ซึ่งอาจจะเป็นผลทำให้เกิดรอยร้าวจากการขยายตัวเนื่องจากความร้อน ซึ่งทำให้เกิดความเสียหายกับตัวฉนวน โดยผลจากความร้อนอาจเกิดได้ตลอด จากการเดินเครื่องจักรกลไฟฟ้าเป็นเวลานานหรือหยุดทำงาน



รูปที่ 3.21 ฉนวนเสื่อมจากความร้อน

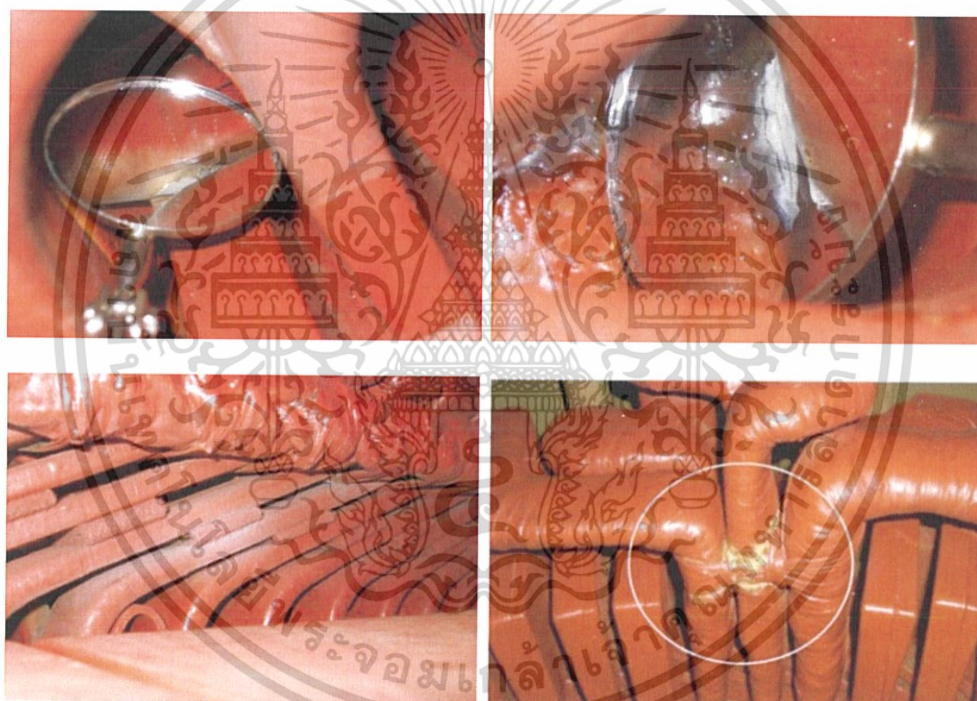
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) การปนเปื้อนจากสิ่งแวดล้อม (Environmental Contamination)

การปนเปื้อนจากสิ่งแวดล้อม มีหลายปัจจัยตั้งแต่ความชื้น ฝุ่นละออง นอกจากสาเหตุที่กล่าวมา อาจมีสาเหตุอื่นๆอีก เช่น ฟ้าผ่า น้ำท่วมฉับพลัน ย่อมเป็นปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของฉนวนที่ออกแบบ เมื่อนำมาติดตั้งใช้งานแล้วในกรณีระยะยาวหลังจากผ่านการเฝ้าติดตามในกระบวนการสุดท้าย จะนำไปสู่ความเสี่ยงต่อความปลอดภัยของผู้ใช้งานรวมถึงตัวเครื่องจักรกลไฟฟ้า การทดสอบฉนวนของเครื่องจักรกลไฟฟ้า จึงต้องทำเพื่อความปลอดภัยแล้วนำผลที่ได้จากการตรวจสอบมาวิเคราะห์ว่าจะทำอย่างไรกับฉนวน ก่อนที่จะเกิดความเสียหายขึ้นทั้งหมด

การเกิดดิสชาร์จบางส่วน

สามารถเกิดได้จากสาเหตุ เช่น การเสื่อมจากความร้อน, คอยล์ในสล็อตหลวม, การเสียหายที่เคมีคอนดักทีฟ, การเกิดแรงดันเกินซ้ำ เป็นต้น



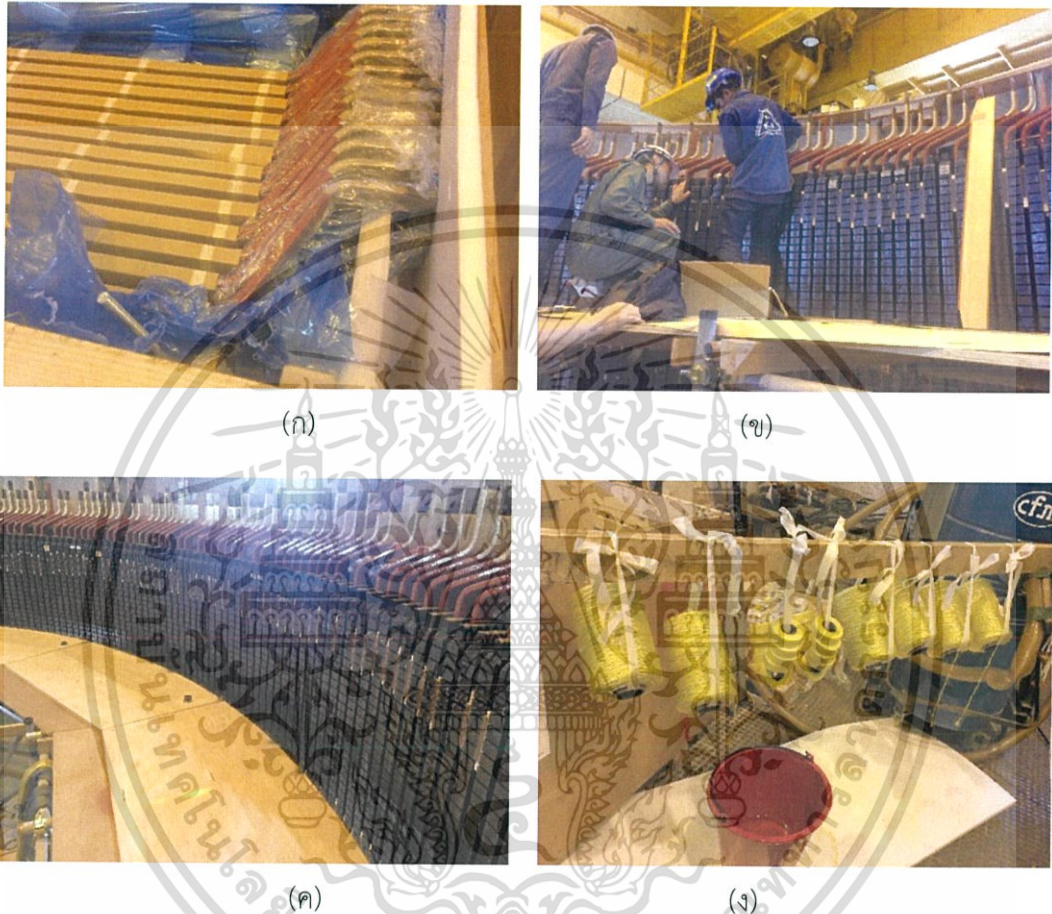
รูปที่ 3.22 ฉนวนเสื่อมจาก PD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอบที่ 2 : ศึกษาดูงานช่วงซ่อมแซม

- ซ่อมแซมสเตเตอร์

ช่วงซ่อมแซม สเตเตอร์จะถูกยกมาตั้งเพื่อรอการซ่อมแซม โดยเปลี่ยนแท่งสเตเตอร์ใหม่ในส่วนที่วางในร่องสล๊อต และมีการพันฉนวนใหม่ในส่วนที่ยื่นออกนอกร่องสล๊อต



รูปที่ 3.23 การเปลี่ยนแท่งสเตเตอร์

- (ก) แท่งสเตเตอร์ใหม่สำหรับเปลี่ยน (ข) ผู้ปฏิบัติงานทำการเปลี่ยนสเตเตอร์
 (ค) สเตเตอร์ที่ถูกเปลี่ยนใหม่ (ง) เทปสำหรับพันสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ซ่อมแซมโรเตอร์

ในส่วนของการซ่อมแซมโรเตอร์ ผู้ปฏิบัติงานจะนำขดลวดโรเตอร์มาพันสีใหม่ และทำการใส่ลงในแกนโรเตอร์



(ก)

(ข)



(ค)

รูปที่ 3.24 การซ่อมโรเตอร์

- (ก) แกนโรเตอร์
- (ข) แผ่นลามิเนตของโรเตอร์
- (ค) ผู้ปฏิบัติการทำการซ่อมโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 โรงไฟฟ้าโกลว์ จังหวัดระยอง

การศึกษาดูงานในครั้งนี้คณะนักศึกษาได้เรียนรู้เกี่ยวกับการทดสอบเพื่อตรวจสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยใช้การทดสอบค่าตัวเก็บประจุ



รูปที่ 3.25 การทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้า

การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การทดสอบสเตเตอร์

- การวัดค่าความต้านทานฉนวน
- การวัดการดูดกลืนของไดอิเล็กตริก (ดัชนีโพลาริเซชัน)
- การทดสอบแรงดันเกิน
- การทดสอบกำลังสูญเสียในฉนวน
- การทดสอบความต้านทานของขดลวด
- การทดสอบการวัดค่าอิมพีแดนซ์
- การทดสอบวัดค่าตัวเก็บประจุ
- ดิสชาร์จบางส่วน
- การทดสอบการสูญเสียในแกนเหล็ก

การทดสอบโรเตอร์

- การวัดค่าความต้านทานฉนวน
- การทดสอบความต้านทานของขดลวด
- การวัดอิมพีแดนซ์
- การทดสอบสมดุลขั้วหรือการทดสอบแรงดันตกต่อขั้ว
- การทดสอบหยุดความดันไฮโดรเจน
- การทดสอบแบบไม่ทำลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบสเตเตอร์

1. การวัดค่าความต้านทานฉนวน

การวัดความต้านทานของฉนวนเป็นไปตามทฤษฎีพื้นฐานของกฎของโอห์ม ด้วยการจ่ายแรงดันกระแสตรงที่ต่ำกว่าแรงดันทดสอบให้กับไดอิเล็กตริกและทำการวัดกระแสที่ไหลผ่าน โดยหลักการค่าความเป็นฉนวนจะมีค่าสูงมากแต่ไม่เท่ากับอนันต์และค่าความต้านทานของฉนวนบ่งบอกถึงคุณภาพของฉนวน เพื่อวัดค่าความเป็นฉนวนเทียบกับกราวด์ สภาพความชื้นและสกปรกของฉนวนจะมีอิทธิพลเป็นอย่างมาก ระดับแรงดันที่ใช้จะอยู่ในช่วงให้เลือกหลายแบบ คือ 500 ,1000 ,2500 และ 5000 Vdc

2. การวัดการดูดกลืนของไดอิเล็กตริก (ดัชนีโพลาริเซชัน)

เป็นการทดสอบพิเศษใช้สำหรับระบบฉนวนแห้ง ทดสอบการดูดกลืนของไดอิเล็กตริก เพื่อดูความสัมพันธ์ของสภาพฉนวนกับความชื้นในฉนวน ฉนวนแต่ละประเภทที่มีความชื้นเข้าไปมากน้อยแต่ละระดับก็มีอันตรายในการใช้งานไม่เท่ากัน ค่า PI นี้หาได้จากผลต่างของความต้านทานฉนวนที่วัดได้ในแต่ละช่วงเวลาเทียบกับค่าเริ่มต้น IEEE Std. 43 กำหนดใช้ค่าความต้านทานฉนวนที่ 10 นาที หาดด้วยค่าที่ 1 นาที

3. การทดสอบแรงดันเกิน

ทดสอบเพื่อต้องการทราบว่าฉนวนไฟฟ้านั้นสามารถรองรับและทนต่อ Voltage สูงได้หรือไม่ ชนิดของแรงดันทดสอบ มีทั้งไฟกระแสสลับ และกระแสตรง ขึ้นอยู่กับเครื่องมือและความคล่องตัวในการทดสอบ และต้องทดสอบค่าความต้านทานของฉนวนทั้งก่อนและหลังการทดสอบแรงดันเกินนี้ทุกครั้ง

4. การทดสอบแฟลตเตอร์กำลังสูญเสีย

เพื่อดูความชื้น ความสกปรก และโพรงภายในฉนวน ซึ่งจะแสดงถึงการไอออไนเซชันภายในโพรงนั้นๆ แสดงความเสื่อมสภาพของฉนวนเหล่านั้น โดยเปรียบเทียบค่าแตกต่าง (Tip-up) ที่ระดับแรงดัน Rated Voltage Line to Ground ที่ 100 % ลบด้วยที่ 25 %

5. การทดสอบความต้านทานของขดลวด

เพื่อดูว่าภายในขดลวดเกิดการหลวม ของการเชื่อมต่อต่างๆ หรือเปิดวงจร ภายในหรือไม่ การเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้ในสภาวะเดียวกันจะแสดงสถานะการหลวม ของการเชื่อมต่อได้

6. การทดสอบวัดค่าอิมพีแดนซ์ (ทดสอบเช่นเดียวกับข้อ 5 โดยใช้ไฟกระแสสลับ)

เพื่อดูค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดแต่ละเฟสเปรียบเทียบกับกัน หรือเปรียบเทียบกับผลทดสอบที่ผ่านมา ถ้าขดลวดภายในสล็อต ไม่แน่นพอจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์เปลี่ยนไป

7. การทดสอบค่าตัวเก็บประจุ (Capacitance) และ ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric Dissipation factor, $\tan\delta$ หรือ DDF)

การวัดค่าตัวเก็บประจุของขดลวดในบางครั้งสามารถทำให้รู้ถึงปัญหาที่เกิดขึ้นกับฉนวนได้ เช่น การเสื่อมคุณภาพเนื่องจากความร้อน หรือ การอึดตัวของฉนวนเนื่องจากความชื้น เป็นต้น

ค่าตัวประกอบพลังงานสูญเสีย (Dissipation factor) และตัวประกอบกำลังเป็นตัวบ่งชี้การสูญเสียภายในเนื้อฉนวนเนื่องจากกระบวนการเสื่อมสภาพบางอย่างของฉนวน เช่น การเสื่อมสภาพความร้อนและดูดซับความชื้น ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปหากมีการเพิ่มขึ้นของความสูญเสียเหล่านี้ก็จะทำให้เกิดปัญหาขึ้นกับฉนวน

ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกเป็นคุณสมบัติของวัสดุฉนวนใดๆ โดยคุณสมบัติของฉนวนที่นั่นจะต้องมีค่า $\tan\delta$ น้อย

8. ดิสชาร์จบางส่วน

เพื่อแสดงถึงระบบฉนวนมีการไอออไนเซชันมากน้อยเพียงใด บริเวณใดมีการดิสชาร์จของประจุมากและปริมาณไอออไนเซชัน หรือที่เกิดขึ้นมีมากระดับไหน การทดสอบมีทั้งแบบหยุดเดินเครื่อง (Off - Line) และแบบเดินเครื่อง (On - Line) การทดสอบแบบเดินเครื่อง จะแสดงสถานะและผลลัพธ์ตามความเป็นจริงมากกว่า

9. การทดสอบการสูญเสียในแกนเหล็ก

เพื่อดูสภาพแกนเหล็กของแกนสเตเตอร์ ฉนวนระหว่างแผ่นลามิเนต และมีบริเวณใดบ้างที่เกิดจุดร้อน (Hot spot) ภายในแกนสเตเตอร์ ซึ่งจะทำให้แกนสเตเตอร์ บริเวณนั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้น และทำให้ฉนวนของขดลวดเสื่อมสภาพเร็วขึ้นนำไปสู่การล้มเหลวของฉนวน และอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ประสิทธิภาพลดลง

การทดสอบโรเตอร์

1. การวัดค่าความต้านทานฉนวน

เพื่อวัดแสดงค่าความต้านทานของฉนวนเทียบกับกราวด์ สภาพความชื้นและสกปรกของฉนวนจะมีอิทธิพลต่อค่านี้มาก ระดับแรงดันที่ใช้ทดสอบ 500 Vdc

2. การทดสอบความต้านทานของขดลวด

เพื่อดูว่าภายในขดลวดมีความหลวมของการเชื่อมต่อต่างๆ หรือการเปิดวงจรภายในหรือไม่ การเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้ในสถานะเดียวกันจะแสดงสถานะการหลวมของการเชื่อมต่อได้

3. การวัดอิมพีแดนซ์ (ทดสอบเช่นเดียวกับข้อ 2 โดยใช้ไฟกระแสสลับ)
เพื่อดูค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดว่าเกิด ลัดวงจรระหว่างรอบหรือไม่
4. การทดสอบสมดุลขั้วหรือการทดสอบแรงดันตกต่อขั้ว
เพื่อดูว่าแต่ละขั้วมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากันหรือไม่ (แต่ละขั้วจะต้องมีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกันมากที่สุด)
5. การทดสอบหยุดความดันไฮโดรเจน
เพื่อตรวจสอบการรั่วไหลของไฮโดรเจน ตามแกนของขดลวดโรเตอร์โดยความดันของการทดสอบก๊าซไนโตรเจนที่ใช้อยู่ประมาณ 1.5 - 2 เท่า ของความดันภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะใช้งาน
6. การทดสอบแบบไม่ทำลาย
ลิ้มของโรเตอร์ : เพื่อตรวจสอบหารอยร้าว โดยวิธีการทดสอบอัลตราโซนิก
ใบพัดลมของโรเตอร์ : เพื่อตรวจสอบหารอยร้าว โดยวิธีการทดสอบด้วยสารแทรกซึมแบบแห้ง

การทดสอบตัวกระตุ้น

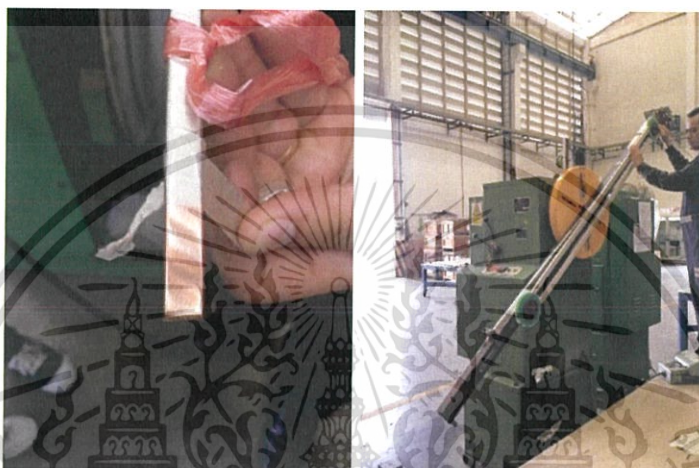
ทำการทดสอบเช่นเดียวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่จะเน้นวิธี

- การทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จที่ขดลวดอาร์มาเจอร์
- การทดสอบแรงดันตกต่อขั้วที่ขั้วสนาม
- การทดสอบความต้านทานฉนวนเพื่อแสดงสภาพของฉนวน
- การทดสอบไดโอด

3.3 บริษัท เอเชียมอเตอร์ เซอร์วิส เซ็นเตอร์ จำกัด

การศึกษาดูงานในครั้งนี้คณะนักศึกษาได้รับการเรียนรู้เกี่ยวกับขั้นตอนการสร้างขดลวดสเตเตอร์ในมอเตอร์

1. เตรียมขดลวดโดยการสร้างขดลวดใหม่จะต้องวัดค่า R, L และ C และขนาดขดลวดเดิมเพื่อให้ขดลวดที่สร้างขึ้นใหม่ตรงกับขดลวดเดิมทุกประการ ดังรูปที่ 3.23 (ก)
2. นำขดลวดที่พันฉนวนแล้วไปเข้าเครื่อง Looping coil เพื่อดึงขดลวดให้เป็นรอบ ดังรูปที่ 3.26 (ข)



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.26 (ก) ขดลวด (ข) เครื่อง Looping coil

3. พันด้วยผ้าดิบเพื่อป้องกันขดลวดไม่ให้เสียหายจากการดัดขึ้นรูป โดยพัน1รอบ แล้ววัดค่า R, L และ C อีกรอบ ดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 พันผ้าดิบรอบขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. นำขดลวดไปตัดโดยใช้เครื่องตัดคอยล์ดังรูปที่ 3.28 ตัดคอยล์ให้เป็นขดลวดรูปทรงเพชร สามารถนำไปใส่ร่องสลอตได้ดังรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.28 เครื่องตัดขดลวด



รูปที่ 3.29 ขดลวดแบบคอยล์

5. ใช้ฟิลิแชมดังรูปที่ 3.30 ทั้งหมด 7 รอบ พันที่ส่วนต้นขด ดังรูปที่ 3.31 และใช้เทปโพลีเอสเตอร์ดังรูปที่ 3.32 พันส่วนต้นขดดังรูปที่ 3.33



รูปที่ 3.30 ฟิลิแชม



รูปที่ 3.31 พันฟิลิแชมรอบต้นขด



รูปที่ 3.32 เทปโพลีเอสเตอร์



รูปที่ 3.33 พันเทปโพลีเอสเตอร์รอบต้นขด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ตัดผ้าดิบจากตรงกลางขดลวดและแกะผ้าดิบออก ดังรูปที่ 3.34(ก) แล้วติดไมลาฟิล์ม เพื่อยึดขดลวดไว้ด้วยกัน ดังรูปที่ 3.34(ข)



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 3.34 ตัดผ้าดิบจากตรงกลางออกแล้วติดด้วยไมลาฟิล์ม

7. นำขดลวดไปเข้าเครื่อง Hot press เพื่อนวดขดลวดให้แต่ละแผ่นตรงและติดกัน โดยให้ความร้อนผ่านเหล็กไกด์ ตั้งค่าเครื่องให้ความร้อน 160 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3.35



รูปที่ 3.35 นำขดลวดเข้าเครื่อง Hot press

8. นำขดลวดไปเข้าเครื่อง Taping Machine ดังรูปที่ 3.36 เพื่อพันเทปซาไมก้า ดังรูปที่ 3.37 โดยเฉพาะฉนวนในร่องสลีต โดยจะพันฉนวนให้หนากว่าร่องสลีตเล็กน้อย

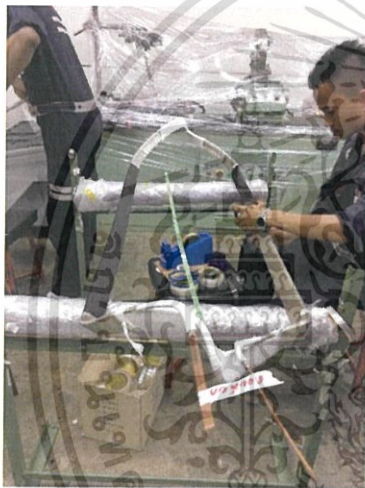
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.36 เครื่อง Taping Machine

รูปที่ 3.37 เทปชาไมก้า

9. พันเทปคอนดักทีฟของส่วนของแท่งสเตเตอร์ที่อยู่ในช่องสลีต ดังรูปที่ 3.38 ทำการ Curing พัน hyperstrip กันน้ำยาไหลจากแบบแล้วมา hot press ข้างละหนึ่งชั่วโมงครึ่ง ดังรูปที่ 3.39



รูปที่ 3.38 พันเทปคอนดักทีฟ



รูปที่ 3.39 ทำการ hot press

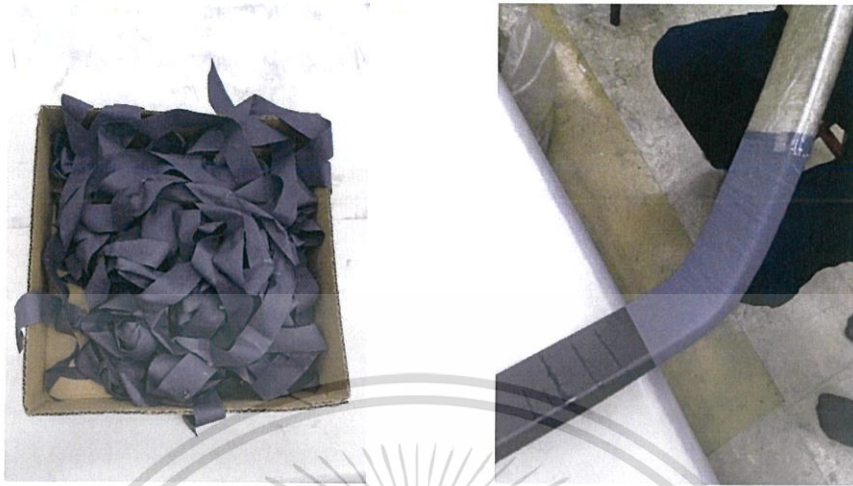
10. พันฟิลิโชนที่ส่วน Overhang ดังรูปที่ 3.40



รูปที่ 3.40 พันฟิลิโชนรอบ Overhang

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. ใช้เทปเซมิคอนดักทีฟ พันในช่วงระหว่างของแท่งสเตเตอร์ที่อยู่ในช่องสลีตและส่วนที่ออกนอกร่องสลีต ดังรูปที่ 3.41



รูปที่ 3.41 พันเทปเซมิคอนดักทีฟระหว่างของแท่งสเตเตอร์ที่อยู่ในช่องสลีตและส่วนที่ออกนอกร่องสลีต

12. พันโพลีเอสเตอร์ที่ส่วน Overhang เป็นอันเสร็จเรียบร้อย ดังรูปที่ 3.42



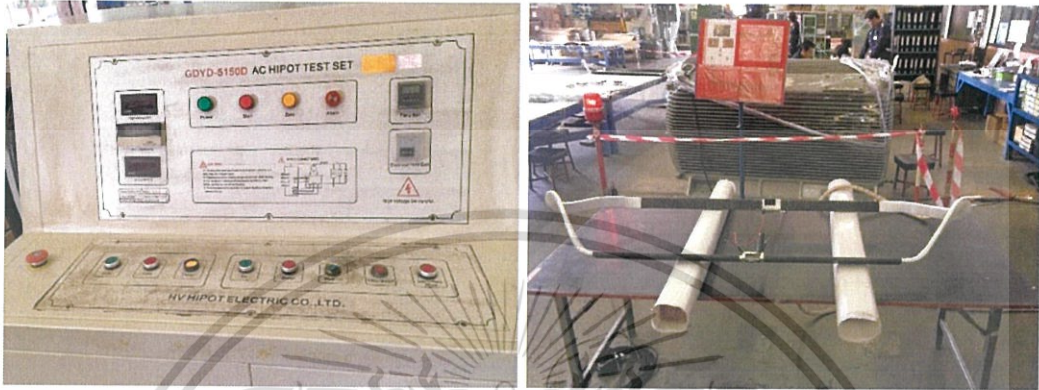
รูปที่ 3.42 สเตเตอร์แบบคอยล์ที่เสร็จเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบแท่งสเตเตอร์

1. การทดลอง AC hipot

ใช้เครื่อง GDYD-5150D AC HIPOT TEST SET ดังรูป 3.47 ทดสอบแท่งสเตเตอร์ โดยคืบตัวนำเพื่อจ่ายไฟ และคืบกราวด์ทั้งสองข้าง ดังรูปที่ 3.43



รูปที่ 3.43 การทดลอง AC hipot test

2. การทดสอบวิธีการเปรียบเทียบเสิร์จ

เป็นการทดสอบความสมดุลของค่าอิมพีแดนซ์ของฉนวนด้วยวิธีการเปรียบเทียบเสิร์จ ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบกราฟของแรงดัน 2 กราฟที่เกิดขึ้นจากการจ่ายและหยุดจ่ายกระแสที่เป็นพัลส์ไปยังขดลวด 2 ชุด ในกรณีที่ถ้าหากค่าอิมพีแดนซ์มีความสมมาตรหรือมีค่าไม่แตกต่างกันกราฟของแรงดันที่ได้ก็จะซ้อนกัน แต่ถ้าหากขดลวดบางชุดที่มีความบกพร่อง เช่น เกิดการลัดวงจรหรือฉนวนของแกนเหล็กบางส่วนมีการเสื่อมสภาพกราฟของแรงดันที่ได้ก็จะแยกออกจากกันซึ่งผลการทดสอบจะถูกตรวจจับด้วยออสซิลอโคป ชนิด 2 เส้น (Dual trace) ดังรูปที่ 3.45



รูปที่ 3.44 การต่อวงจรทดสอบด้วยแรงดันเกิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.45 ออสซิลโลสโคปแสดงสัญญาณการเปรียบเทียบเสิร์จ

ตารางที่ 3.2 การอ่านค่ากราฟการทดสอบการเปรียบเทียบเสิร์จ

การต่อขดลวด ลักษณะของขดลวด	การต่อขดลวดแบบสตาร์	การต่อขดลวดแบบเดลต้า
ดี		
ลัดวงจร ระหว่างขด		
ลัดวงจร ระหว่างตัวนำ		
ต่อ ตัวนำกลับขั้ว		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

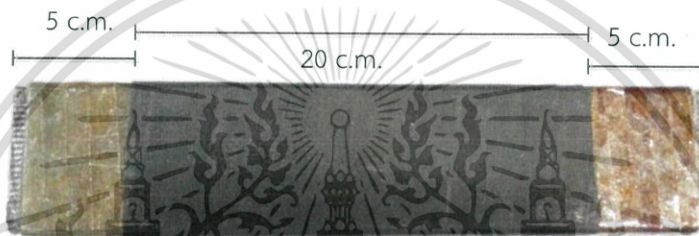
บทที่ 4

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบและออกแบบวิธีการทดสอบ

4.1 ชั้นทดสอบ

4.1.1 การเตรียมชั้นทดสอบ

นำแท่งสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำที่ผ่านการใช้งานมาเป็นเวลา 30 ปี ซึ่งมีพิกัดแรงดันที่ 13.8 กิโลโวลต์ และมีระดับชั้นของฉนวนอยู่ที่ชั้น B ทนได้ 130 องศาเซลเซียส มาใช้เป็นวัตถุทดสอบ โดยนำแท่งสเตเตอร์ในส่วนที่อยู่ในร่องสลีตมาตัดแบ่งเป็นท่อน ท่อนละ 30 เซนติเมตร ใช้เป็นชั้นทดสอบ หลังจากนั้นทำการปกฉนวนดังรูปที่ 4.1 จำนวน 10 ชั้น เมื่อได้ชั้นทดสอบแล้ว จะเตรียมชั้นทดสอบตามกรณีที่เราจะศึกษาพฤติกรรมของฉนวนต่อกระแส โฟลาริชเซชันและดีโฟลาริชเซชัน



รูปที่ 4.1 เตรียมชั้นทดสอบ



รูปที่ 4.2 ชั้นทดสอบ

4.1.2 การเตรียมชั้นทดสอบตามกรณีศึกษา

นำชั้นทดสอบที่ได้เตรียมไว้มาจำลองกรณีความเสื่อมในเนื้อฉนวน โดยจะจำลองทั้งหมด 6 กรณี ดังนี้

- กรณีเสื่อมเนื่องจากความร้อน
- กรณีเสื่อมเนื่องจากผลของการเกิด PD ในชั้นทดสอบ
- กรณีเสื่อมเนื่องจากผลของการเกิดรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้างของชั้นทดสอบ
- กรณีเสื่อมเนื่องจากเกิดโพรงอากาศภายในชั้นทดสอบ
- กรณีเสื่อมเนื่องจากเกิดโพรงน้ำมันฉนวนภายในชั้นทดสอบ
- กรณีเสื่อมเนื่องจากเกิดโพรงน้ำภายในชั้นทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การเตรียมขึ้นทดสอบกรณีที่เกี่ยวข้องเนื่องจากความร้อน

เริ่มจากนำขึ้นทดสอบจำนวน 4 ชิ้นที่เตรียมไว้แล้วมาอบ โดยเริ่มจากนำขึ้นทดสอบขึ้นที่ 1 มาอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงทำการเปลี่ยนขึ้นทดสอบที่เตรียมไว้ มาอบที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง อบจนครบทั้ง 4 ชิ้นทดสอบ โดยเริ่มจากอุณหภูมิ 100 °C, 120 °C, 140 °C และ 160 °C ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 อบขึ้นทดสอบ กรณีที่เกี่ยวข้องเนื่องจากความร้อน

2. การเตรียมขึ้นทดสอบกรณีที่เกี่ยวข้องเนื่องจากผลของการเกิด PD ในขึ้นทดสอบ

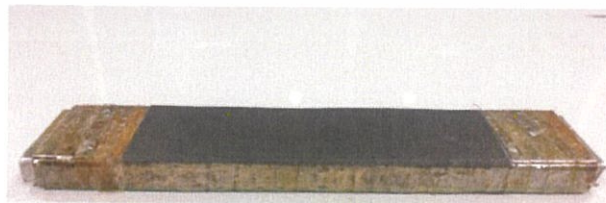
นำแท่งสเตเตอร์ที่เคยเกิด PD ซึ่งสังเกตได้จากรอยขาวเหลืองที่อยู่บนแท่งสเตเตอร์ มาตัดเป็นท่อนจำนวน 1 ท่อน ขนาดความยาว 30 เซนติเมตร จะได้ขึ้นทดสอบ 1 ชิ้น ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ขึ้นทดสอบที่รอย PD

3. การเตรียมขึ้นทดสอบกรณีที่เกี่ยวข้องเนื่องจากผลของการเกิดรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้าง

เราจะนำขึ้นทดสอบที่ตัดแบ่งไว้แล้วมาทำให้เกิดรอยถลอก โดยการใส่ตะไบขัดถูไปบริเวณด้านข้างของแท่งสเตเตอร์หนึ่งด้าน หลังจากนั้นนำไปทดสอบแล้วจะนำกลับมาขัดถูบริเวณด้านข้างอีกหนึ่งด้านและนำไปทดสอบอีกครั้งเป็นจำนวน 1 ชิ้น ดังรูปที่ 4.5

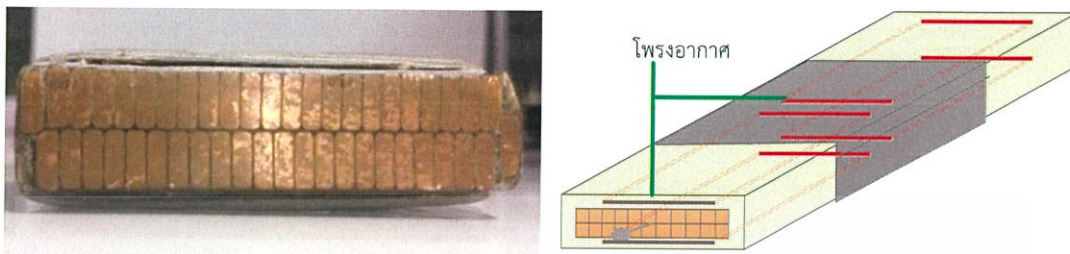


รูปที่ 4.5 ขึ้นทดสอบที่เสียดเนื่องจากเกิดรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้างของแท่งสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การเตรียมชั้นทดสอบกรณีที่เกี่ยวข้องเนื่องจากเกิดโพรงอากาศภายในชั้นทดสอบ

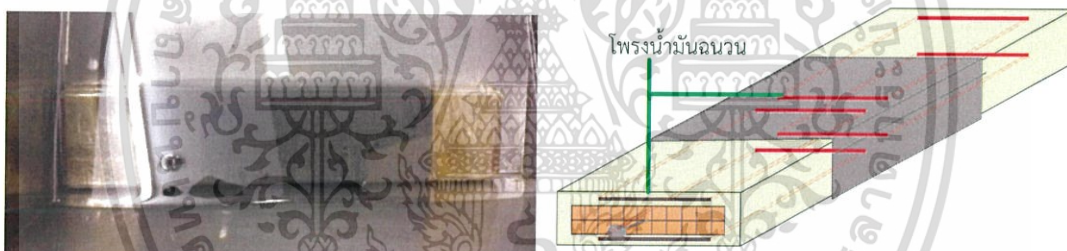
เราจะนำแผ่นเหล็กที่มีความกว้างประมาณ 1.5 นิ้ว มาใช้ตอกลงไปเนื้อฉนวนของชั้นทดสอบที่ตัดแบ่งไว้ ตอกลงทั้ง 4 ด้าน ด้านละ 14 เซนติเมตร เพื่อให้เกิดโพรงอากาศภายในชั้นทดสอบเป็นจำนวน 1 ชั้น ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ชั้นทดสอบที่เสื่อมเนื่องจากเกิดโพรงอากาศภายในชั้นทดสอบ

5. การเตรียมชั้นทดสอบกรณีที่เกี่ยวข้องเนื่องจากเกิดโพรงน้ำมันฉนวนภายในชั้นทดสอบ

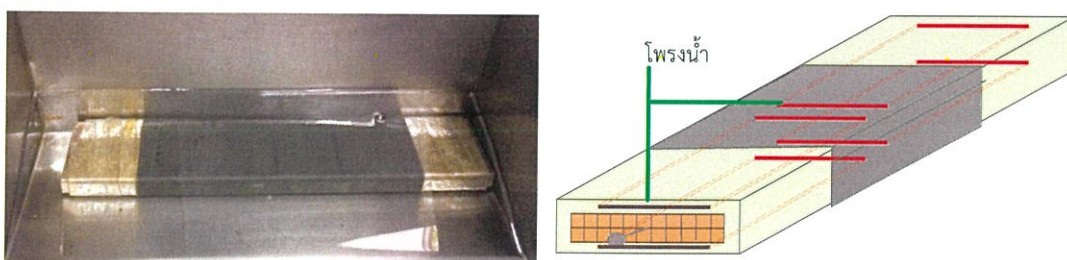
เราจะทำการเตรียมชั้นงานเหมือนขั้นตอนการเตรียมชั้นงานกรณีที่เกี่ยวข้องเนื่องจากเกิดโพรงอากาศภายในชั้นทดสอบ หลังจากนั้นจึงนำไปแช่ในน้ำมันฉนวนเป็นเวลา 2 สัปดาห์เป็นจำนวน 1 ชั้น ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ชั้นทดสอบที่เสื่อมเนื่องจากเกิดโพรงน้ำมันฉนวนภายในชั้นทดสอบ

6. การเตรียมชั้นทดสอบกรณีที่เกี่ยวข้องเนื่องจากเกิดโพรงน้ำภายในชั้นทดสอบ

เราจะทำการเตรียมชั้นงานเหมือนขั้นตอนการเตรียมชั้นงานกรณีที่เกี่ยวข้องเนื่องจากเกิดโพรงอากาศภายในชั้นทดสอบ หลังจากนั้นจึงนำไปแช่ในน้ำเป็นเวลา 2 สัปดาห์เป็นจำนวน 1 ชั้น ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ชั้นทดสอบที่เสื่อมเนื่องจากเกิดโพรงน้ำภายในชั้นทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การต่อวงจรทดสอบวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชัน

4.2.1 อุปกรณ์

1. เครื่องวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชัน (PDC Analyzer)



รูปที่ 4.9 PDC Analyzer

2. สายไฟที่ใช้

- สายจ่ายแรงดันสูงสำหรับ PDC-Analyzer-1MOD
- สายวัดกระแส (Sensing cable)
- สายกราวด์ (Ground wire)



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 4.10 (ก) สายจ่ายแรงดันสูงสำหรับ PDC-Analyzer-1MOD (ข) สายวัดกระแส (ค) สายกราวด์

4.2.2 วงจรวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชัน

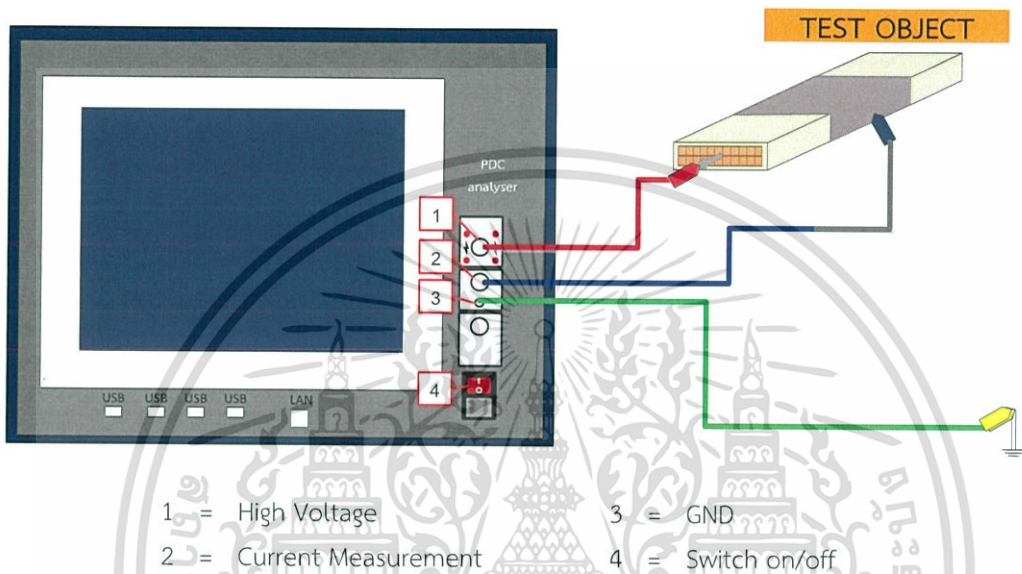
วงจรวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันที่ใช้ในงานวิจัยเล่มนี้มี 2 วงจร คือ

- วงจรวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของฉนวนระหว่างเฟส (Phase to Phase Insulation)
- วงจรวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของฉนวนระหว่างเฟสแบบมีการ์ดริง (Phase to Phase Insulation with guard ring)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. วงจรวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของฉนวนระหว่างเฟส

สำหรับการต่อวงจรที่ใช้ทดสอบการวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของฉนวนระหว่างเฟส จะต่อวงจรตามรูปที่ 4.11 โดยนำฟอยล์อลูมิเนียมมาจำลองแทนร่องสลิตของสเตเตอร์พันรอบขึ้นทดสอบ หลังจากนั้นจะจ่ายแรงดัน 2000 โวลต์ เข้าไปยังแท่งสเตเตอร์ผ่านตะปูเป็นเวลา 2000 วินาที หลังจากครบตามเวลาจะปล่อยให้ดิสชาร์จเป็นเวลา 2000 วินาที เพื่อวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชัน

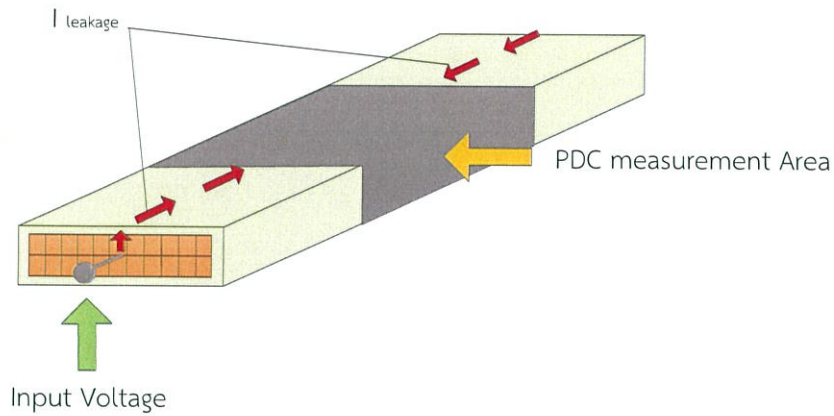


รูปที่ 4.11 วงจรทดสอบวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันที่ฉนวนระหว่างเฟส



รูปที่ 4.12 วงจรทดสอบวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและกระแสดีโพลาริซ์เซชันที่ฉนวนระหว่างเฟส

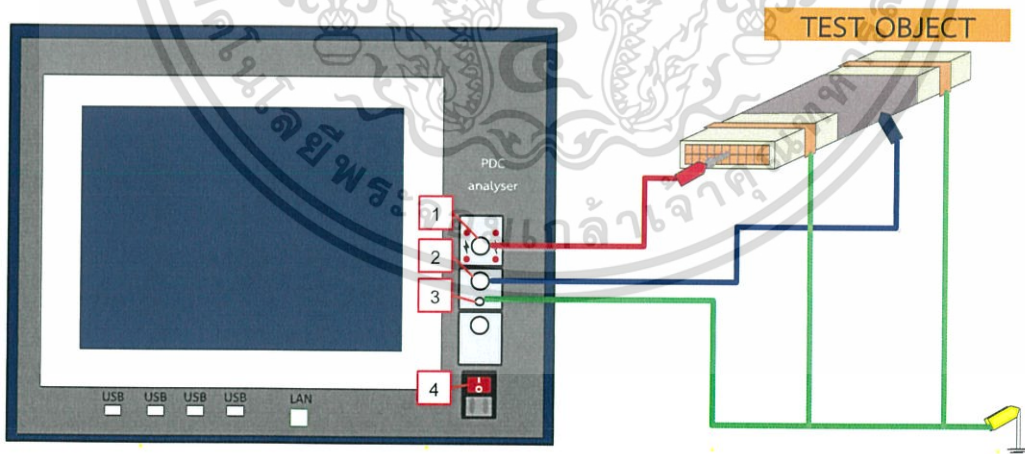
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 กระแสรั่วไหลที่ไหลบนผิวฉนวนเมื่อต่อวงจรแบบระหว่างเฟส การต่อวงจรทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันที่ฉนวนระหว่างเฟส กระแสที่วัดได้จะมีผลของค่าของกระแสรั่วไหลตามผิวฉนวน

2. วงจรวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของฉนวนระหว่างเฟสแบบมีการ์ดจริง

สำหรับการต่อวงจรที่ใช้ทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของฉนวนระหว่างเฟสแบบมีการ์ดจริง จะต่อวงจรตามรูปที่ 4.14 โดยนำฟอยล์อลูมิเนียมมาจำลองแทนร่องสลิตของสเตเตอร์ และต่อการ์ดจริงทั้งสองข้างของชิ้นทดสอบ เพื่อกำจัดกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นเพื่อให้ค่าที่ได้จากการทดสอบมีความแม่นยำมากขึ้น หลังจากนั้นจะจ่ายแรงดัน 2000 โวลต์ เข้าไปยังแท่งสเตเตอร์ผ่านตะปูเป็นเวลา 2000 วินาที หลังจากครบตามเวลาจะปล่อยให้ดิสชาร์จเป็นเวลา 2000 วินาที เพื่อวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน



1 = High Voltage

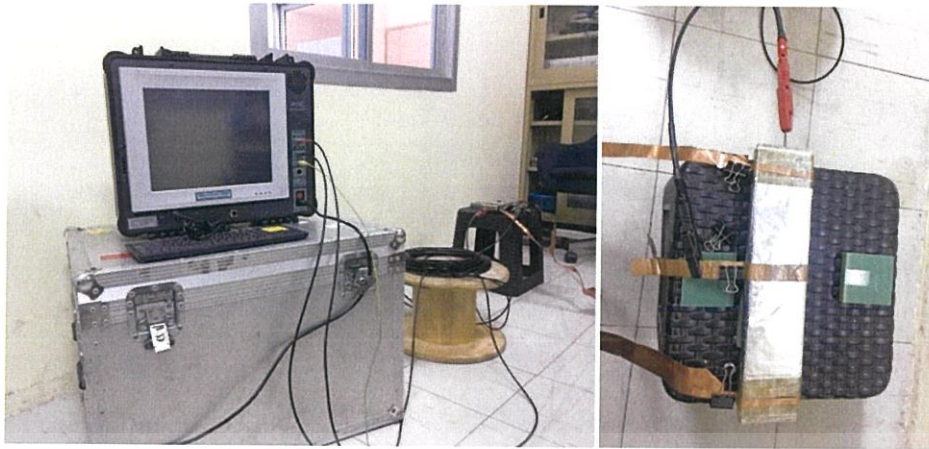
2 = Current Measurement

3 = GND

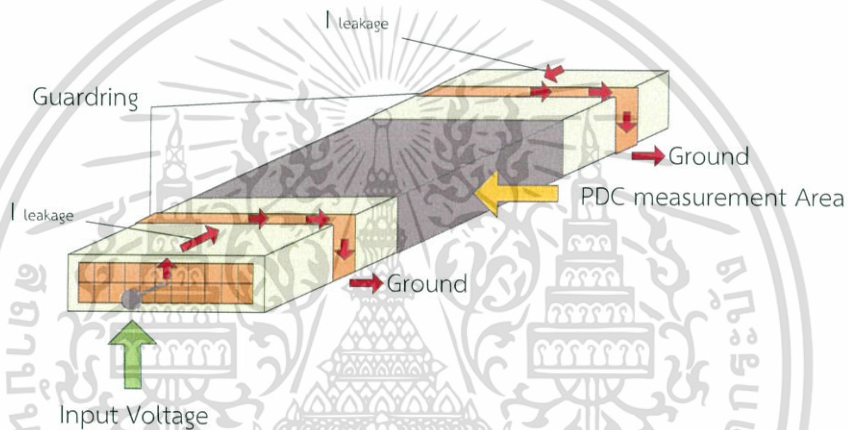
4 = Switch on/off

รูปที่ 4.14 วงจรทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันที่ฉนวนระหว่างเฟสแบบมีการ์ดจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 วงจรทดสอบวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันที่ฉนวนระหว่างเฟสแบบมีการ์ดริง



รูปที่ 4.16 กระแสรั่วไหลที่ไหลลงสายดินเมื่อต่อวงจรแบบระหว่างเฟสแบบมีการ์ดริง

การต่อวงจรทดสอบวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันที่ฉนวนระหว่างเฟส แบบมีการ์ดริง กระแสที่วัดได้จากวงจรนี้จะลดผลกระแสรั่วไหลตามฉนวน

4.3 วิธีการทดสอบ

4.3.1 การทดสอบวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของฉนวนทดสอบที่มีฉนวนสภาพดี เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการเปรียบเทียบกับฉนวนทดสอบที่มีการจำลองกรณีเสื่อมสภาพ

1. สำหรับการทดสอบนี้จะต่อวงจรวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของฉนวนระหว่างเฟสแบบไม่มีการ์ดริง และทำการทดสอบวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันเพื่อศึกษาพฤติกรรมความเป็นฉนวนของฉนวนของฉนวนทดสอบ ก่อนนำฉนวนทดสอบไปจำลองกรณีศึกษา โดยทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อควบคุมอุณหภูมิและความชื้น โดยจะจ่ายแรงดัน 2000 โวลต์ เข้าไปยังฉนวนทดสอบผ่านตะปูเป็นเวลา 2000 วินาที หลังจากครบตามเวลาจะปล่อยให้ดีสชาร์จเป็นเวลา 2000 วินาที เพื่อวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชัน

2. สำหรับการทดสอบนี้จะต่อวงจรวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของฉนวนระหว่างเฟสแบบมีการ์ดริง และทำการทดสอบวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันเพื่อศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาพนวนของขึ้นทดสอบ ก่อนนำขึ้นทดสอบไปจำลองกรณีศึกษา โดยทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อควบคุมอุณหภูมิและความชื้น โดยจะจ่ายแรงดัน 2000 โวลต์ เข้าไปยังขึ้นทดสอบผ่านตะปูเป็นเวลา 2000 วินาที หลังจากครบตามเวลาที่จะปล่อยให้ดีสชาร์จเป็นเวลา 2000 วินาที เพื่อวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชัน

4.3.2 การทดสอบวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของแท่งสเตเตอร์โดยจำลองกรณีศึกษา

สำหรับการทดสอบนี้จะต่อวงจรวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของนวนระหว่างเฟสแบบไม่มีคาร์ดริงและวัดซ้ำอีกครั้งโดยต่อวงจรวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของนวนระหว่างเฟสแบบมีคาร์ดริง จะทำการทดสอบโดยจำลองกรณีให้นวนได้รับความเสื่อมแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 6 กรณี ดังนี้

1. การทดสอบวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของขึ้นทดสอบกรณีเสื่อมเนื่องจากความร้อน

จะทำการทดสอบวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและกระแสดีโพลาริซ์เซชันหลังจากที่นวนผ่านการให้ความร้อน 100, 120, 140 และ 160 องศาเซลเซียส โดยวัดซ้ำ 3 รอบ

2. การทดสอบวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของขึ้นทดสอบกรณีเสื่อมเนื่องจากผลของการเกิด PD ภายในขึ้นทดสอบ

จะทำการทดสอบวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและกระแสดีโพลาริซ์เซชันจากนวนที่มีรอย PD โดยวัดซ้ำ 3 รอบ

3. การทดสอบวัดกระแสดีโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของขึ้นทดสอบในกรณีเสื่อมเนื่องจากผลของการเกิดรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้างของขึ้นทดสอบ

จะทำการทดสอบวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและกระแสดีโพลาริซ์เซชันหลังจากที่นวนผ่านการทำลายผิวเคมีคอนดักทีฟ โดยวัดซ้ำ 3 รอบ

4. การทดสอบวัดกระแสดีโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของขึ้นทดสอบในกรณีเสื่อมเนื่องจากเกิดโพรงอากาศภายในขึ้นทดสอบ

จะทำการทดสอบวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและกระแสดีโพลาริซ์เซชันหลังจากที่นวนผ่านการจำลองโพรงอากาศภายในขึ้นทดสอบ โดยวัดซ้ำ 3 รอบ

5. การทดสอบวัดกระแสดีโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของขึ้นทดสอบในกรณีเสื่อมเนื่องจากเกิดโพรงน้ำมันนวนภายในขึ้นทดสอบ

จะทำการทดสอบวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและกระแสดีโพลาริซ์เซชันหลังจากที่นวนผ่านการจำลองโพรงน้ำมันนวนภายในขึ้นทดสอบ โดยวัดซ้ำ 3 รอบ

6. การทดสอบวัดกระแสดีโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของขึ้นทดสอบในกรณีเสื่อมเนื่องจากเกิดโพรงน้ำภายในขึ้นทดสอบ

จะทำการทดสอบวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันหลังจากที่นวนผ่านการจำลองโพรงน้ำภายในขึ้นทดสอบ โดยวัดซ้ำ 3 รอบ

4.3.3 การวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกก่อนและหลังการจำลองกรณีศึกษา

สำหรับการวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกนี้จะต่อระหว่างเฟสแบบมีการ์ดริง จะทำการทดสอบโดยเปรียบเทียบข้อมูลก่อนและหลังการจำลองกรณี โดยแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 9 กรณี ดังนี้

1. การวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกก่อนและหลังการจำลองรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้างของชั้นทดสอบ

จะทำการวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกระหว่างชั้นทดสอบที่ฉนวนอยู่ในสภาพดีเปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่จำลองรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้าง

2. การวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกก่อนและหลังการจำลองโพรงอากาศภายในชั้นทดสอบ

จะทำการวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกระหว่างชั้นทดสอบที่ฉนวนอยู่ในสภาพดีเปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่จำลองโพรงอากาศภายในชั้นทดสอบ

3. การวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกก่อนและหลังการจำลองโพรงน้ำมันฉนวนภายในชั้นทดสอบ

จะทำการวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกระหว่างชั้นทดสอบที่ฉนวนอยู่ในสภาพดีเปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่จำลองโพรงน้ำมันฉนวนภายในชั้นทดสอบ

4. การวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกก่อนและหลังการจำลองโพรงน้ำภายในชั้นทดสอบ

จะทำการวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกระหว่างชั้นทดสอบที่ฉนวนอยู่ในสภาพดีเปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่จำลองโพรงน้ำภายในชั้นทดสอบ

5. การวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

จะทำการวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกระหว่างชั้นทดสอบที่ฉนวนอยู่ในสภาพดีเปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

6. การวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส

จะทำการวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกระหว่างชั้นทดสอบที่ฉนวนอยู่ในสภาพดีเปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. การวิเคราะห์แฟลคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส

จะทำการวิเคราะห์แฟลคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกระหว่างชั้นทดสอบที่ฉนวนอยู่ในสภาพดีเปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส

8. การวิเคราะห์แฟลคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส

จะทำการวิเคราะห์แฟลคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกระหว่างชั้นทดสอบที่ฉนวนอยู่ในสภาพดีเปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส

9. การวิเคราะห์แฟลคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของชั้นทดสอบที่ไม่เกิด PD และชั้นทดสอบที่มีความเสื่อมเนื่องจาก PD

จะทำการวิเคราะห์แฟลคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกระหว่างชั้นทดสอบที่ฉนวนอยู่ในสภาพดีเปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่มีความเสื่อมเนื่องจาก PD

4.3.4 การวิเคราะห์ค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการจำลองกรณีศึกษา

สำหรับการวิเคราะห์ค่ากระแสการนำไฟฟ้านี้จะต่อระหว่างเฟสแบบมีการ์ดริง จะทำการทดสอบโดยเปรียบเทียบข้อมูลก่อนและหลังการจำลองกรณี โดยจะเลือกมา 1 ครั้งจากการทดสอบ 3 ครั้ง ที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน โดยแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 9 กรณี ดังนี้

1. การวิเคราะห์ค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการจำลองรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้างของชั้นทดสอบ

จะทำการวิเคราะห์ค่ากระแสการนำไฟฟ้าระหว่างชั้นทดสอบที่ฉนวนอยู่ในสภาพดีเปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่จำลองรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้าง

2. การวิเคราะห์ค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการจำลองโพรงอากาศภายในชั้นทดสอบ

จะทำการวิเคราะห์ค่ากระแสการนำไฟฟ้าระหว่างชั้นทดสอบที่ฉนวนอยู่ในสภาพดีเปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่จำลองโพรงอากาศภายในชั้นทดสอบ

3. การวิเคราะห์ค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการจำลองโพรงน้ำมันฉนวนภายในชั้นทดสอบ

จะทำการวิเคราะห์ค่ากระแสการนำไฟฟ้าระหว่างชั้นทดสอบที่ฉนวนอยู่ในสภาพดีเปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่จำลองโพรงน้ำมันฉนวนภายในชั้นทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าก่อนและหลังการจำลองโพรงน้ำภายในชั้นทดสอบ

จะทำการวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าระหว่างชั้นทดสอบที่ฉนวนอยู่ในสภาพดีเปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่จำลองโพรงน้ำภายในชั้นทดสอบ

5. การวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

จะทำการวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าระหว่างชั้นทดสอบที่ฉนวนอยู่ในสภาพดีเปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

6. การวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส

จะทำการวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าระหว่างชั้นทดสอบที่ฉนวนอยู่ในสภาพดีเปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส

7. การวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส

จะทำการวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าระหว่างชั้นทดสอบที่ฉนวนอยู่ในสภาพดีเปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส

8. การวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส

จะทำการวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าระหว่างชั้นทดสอบที่ฉนวนอยู่ในสภาพดีเปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส

9. การวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าของชั้นทดสอบที่ไม่เกิด PD และชั้นทดสอบที่มีความเสื่อมเนื่องจาก PD

จะทำการวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าระหว่างชั้นทดสอบที่ฉนวนอยู่ในสภาพดีเปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่มีความเสื่อมเนื่องจาก PD

บทที่ 5

ผลการทดสอบ

5.1 การทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันโดยวงจรมีการ์ดรีจและไม่มีการ์ดรีจ

จากการทดลองวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันในห้องปฏิบัติการที่ควบคุมให้อุณหภูมิอยู่ในช่วง 18-21 °C และความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 45-60% โดยต่อวงจรมีการ์ดรีจเปรียบเทียบกับวงจรมีการ์ดรีจ พบว่าค่ากระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของทั้งสองวงจรมีค่าต่างกัน เมื่อต่อการ์ดรีจจะเห็นว่ากราฟจะต่ำกว่าวงจรมีการ์ดรีจ เนื่องจากวงจรมีการ์ดรีจจะลดผลของกระแสรั่วไหลตามผิว ในการทดลองได้ทำการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของชั้นทดสอบ 8 ชั้นดังนี้

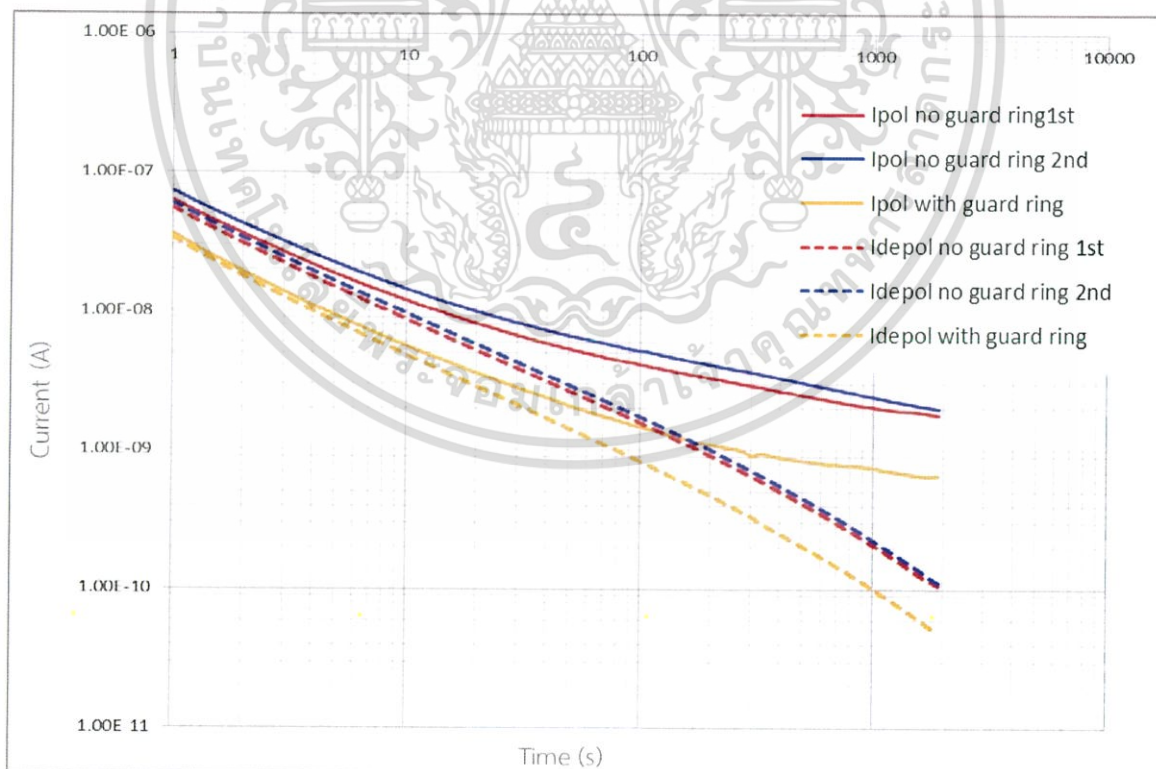
- 5.1.1 ชั้นทดสอบก่อนจำลองรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้างของชั้นทดสอบ
- 5.1.2 ชั้นทดสอบก่อนจำลองโพรงอากาศภายในชั้นทดสอบ
- 5.1.3 ชั้นทดสอบก่อนจำลองโพรงน้ำมันฉนวนภายในชั้นทดสอบ
- 5.1.4 ชั้นทดสอบก่อนจำลองโพรงน้ำภายในชั้นทดสอบ
- 5.1.5 ชั้นทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
- 5.1.6 ชั้นทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
- 5.1.7 ชั้นทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
- 5.1.8 ชั้นทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

5.1.1 ขั้นตอนทดสอบก่อนจำลองรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้างของขั้นตอนทดสอบ

สำหรับการทดสอบในหัวข้อนี้ได้ทำการวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชัน โดยเปรียบเทียบระหว่างวงจรที่มีการดริ่งและไม่มีการดริ่งของขั้นตอนทดสอบก่อนจำลองรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้างของขั้นตอนทดสอบ

ตารางที่ 5.1 ค่าความเก็บประจุของขั้นตอนทดสอบ กระแสคงค้าง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ขณะที่ทดลอง

ค่า	กราฟสี	วงจรไม่ต่อการดริ่ง		วงจรต่อการดริ่ง
		แดง	น้ำเงิน	เหลือง
C(pF)		338	343	331
I_{re} (pA)		5.1	7.6	8.6
T(°C)		18	24.5	17.5
%RH		45	43	61



รูปที่ 5.1 กระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันโดยวงจรที่มีการดริ่งและไม่มีการดริ่งของขั้นตอนทดสอบก่อนจำลองรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้างของขั้นตอนทดสอบ

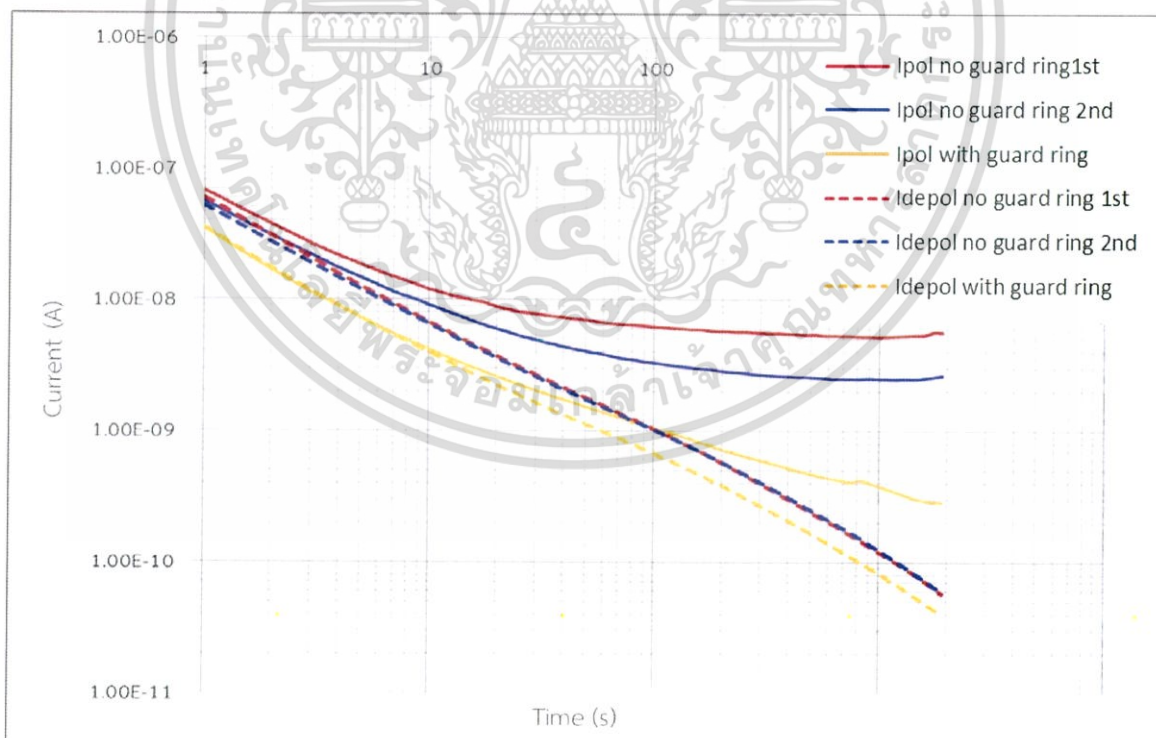
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 ขึ้นทดสอบก่อนจำลองโพรงอากาศภายในขึ้นทดสอบ

สำหรับการทดสอบในหัวข้อนี้ได้ทำการวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชัน โดยเปรียบเทียบระหว่างวงจรที่มีการดริงและไม่มีการดริงของขึ้นทดสอบก่อนจำลองโพรงอากาศภายในขึ้นทดสอบ

ตารางที่ 5.2 ค่าความเก็บประจุของขึ้นทดสอบ กระแสคงค้าง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ขณะที่ทดลอง

ค่า	กราฟสี	วงจรไม่ต่อการดริง		วงจรต่อการดริง
		แดง	น้ำเงิน	เหลือง
C(pF)		364	354	354
I_{re} (pA)		67	7.9	9.4
T(°C)		20.2	19.2	20.9
%RH		52	45	47



รูปที่ 5.2 กระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันโดยวงจรที่มีการดริงและไม่มีการดริงของขึ้นทดสอบก่อนจำลองโพรงอากาศภายในขึ้นทดสอบ

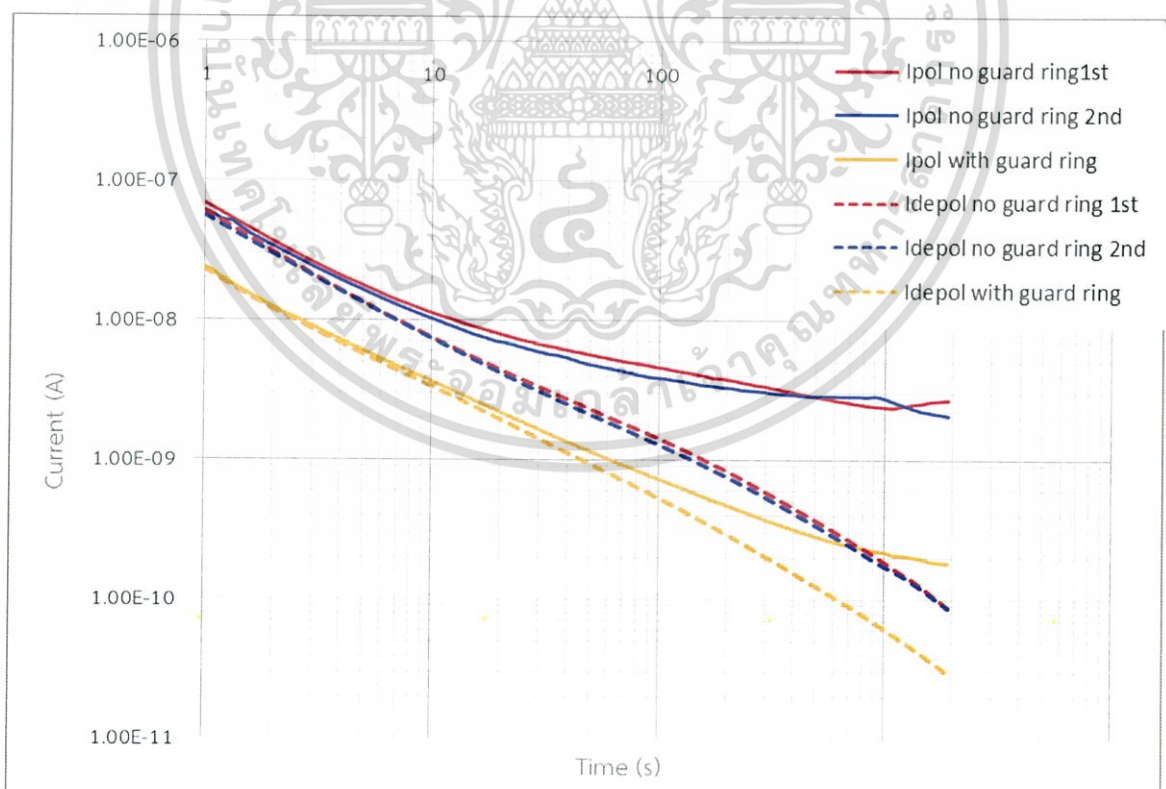
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 ชั้นทดสอบก่อนจำลองโพรงน้ำมันฉนวนในชั้นทดสอบ

สำหรับการทดสอบในหัวข้อนี้ได้ทำการวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชัน โดยเปรียบเทียบระหว่างวงจรที่มีการ์ดริงและไม่มีการ์ดริงของชั้นทดสอบก่อนจำลองโพรงน้ำมันฉนวน ภายในชั้นทดสอบ

ตารางที่ 5.3 ค่าความเก็บประจุของชั้นทดสอบ กระแสคงค้าง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ขณะที่ทดลอง

ค่า	กราฟสี	วงจรไม่ต่อการ์ดริง		วงจรต่อการ์ดริง
		แดง	น้ำเงิน	เหลือง
C(pF)		367	367	363
I_{re} (pA)		8.0	12.7	7.3
T(°C)		19.2	18.2	17.3
%RH		45	44	60



รูปที่ 5.3 กระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันโดยวงจรที่มีการ์ดริงและไม่มีการ์ดริงของชั้นทดสอบ ก่อนจำลองโพรงน้ำมันฉนวนภายในชั้นทดสอบ

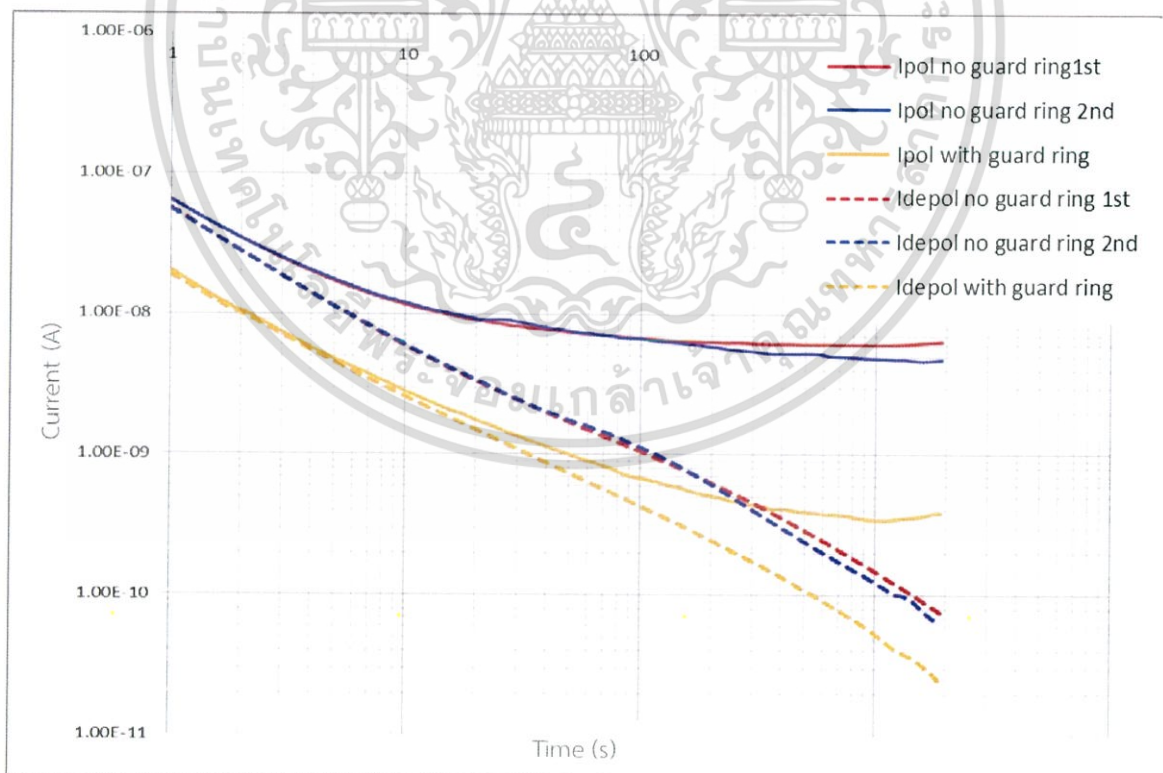
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.4 ชั้นทดสอบก่อนจำลองโพรงน้ำภายในชั้นทดสอบ

สำหรับการทดสอบในหัวข้อนี้ได้ทำการวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันโดยเปรียบเทียบระหว่างวงจรที่มีการ์ดริงและไม่มีกัرداریงของชั้นทดสอบก่อนจำลองโพรงน้ำภายในชั้นทดสอบ

ตารางที่ 5.4 ค่าความเก็บประจุของชั้นทดสอบ กระแสคงค้าง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ขณะที่ทดลอง

กราฟสี ค่า	วงจรไม่ต่อกัرداریง		วงจรต่อกัرداریง
	แดง	น้ำเงิน	เหลือง
C(pF)	365	368	364
I_{re} (pA)	6.4	6.4	14.8
T(°C)	17.5	18.5	18.1
%RH	48	46	57



รูปที่ 5.4 กระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันโดยวงจรที่มีการ์ดริงและไม่มีกัرداریงของชั้นทดสอบก่อนจำลองโพรงน้ำภายในชั้นทดสอบ

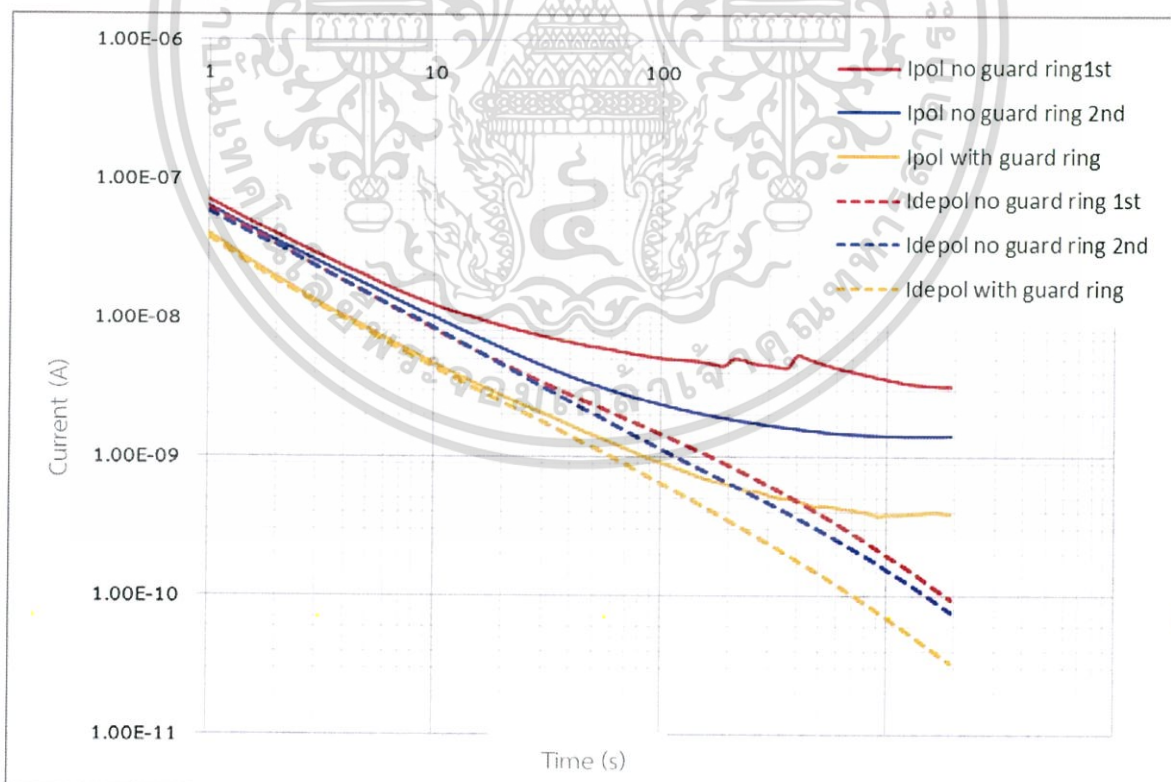
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.5 ขึ้นทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

สำหรับการทดสอบในหัวข้อนี้ได้ทำการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันโดยเปรียบเทียบระหว่างวงจรมีการดริ่งและไม่มีการดริ่งของขึ้นทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ตารางที่ 5.5 ค่าความเก็บประจุของขึ้นทดสอบ กระแสคงค้าง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ขณะที่ทดลอง

กราฟสี	วงจรมีการดริ่ง		วงจรมีการดริ่ง
	แดง	น้ำเงิน	เหลือง
C(pF)	345	345	338
I _{re} (pA)	6.7	7.0	5.7
T(°C)	19.6	20.6	17.4
%RH	46	41	56



รูปที่ 5.5 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันโดยวงจรมีการดริ่งและไม่มีการดริ่งของขึ้นทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

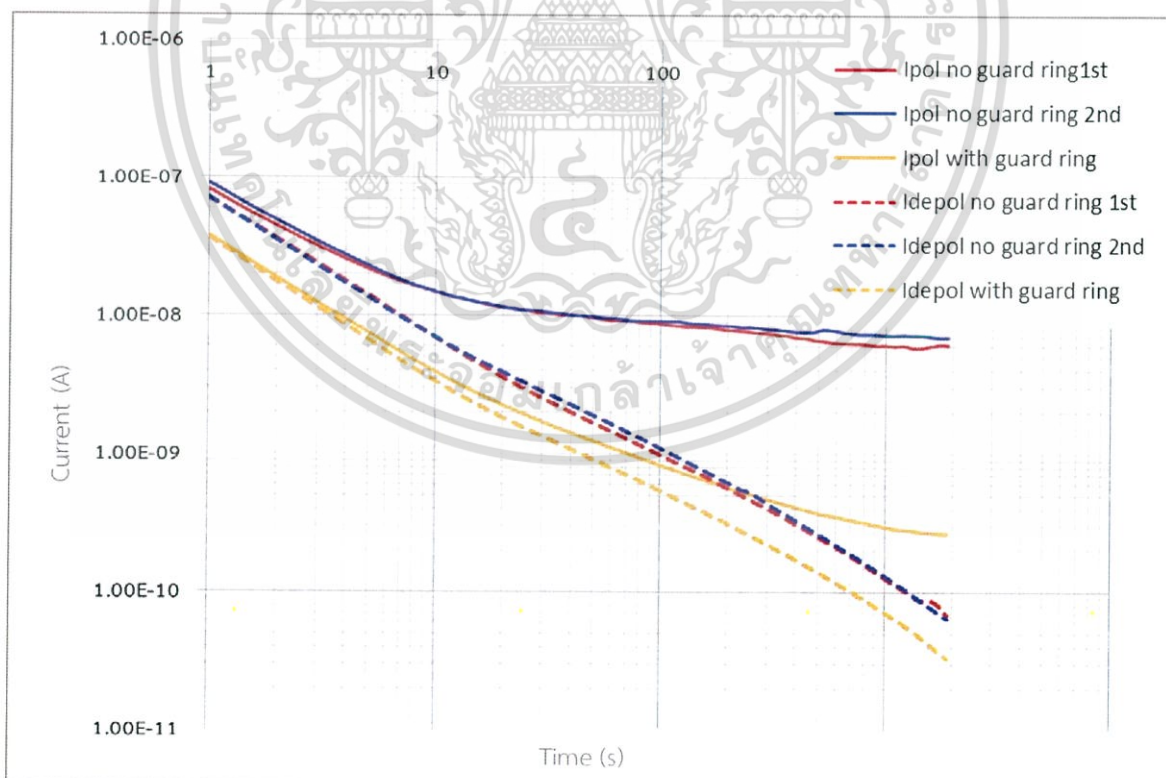
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.6 ขึ้นทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

สำหรับการทดสอบในหัวข้อนี้ได้ทำการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันโดยเปรียบเทียบระหว่างวงจรที่มีการ์ดริงและไม่มีการ์ดริงของขึ้นทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ตารางที่ 5.6 ค่าความเก็บประจุของขึ้นทดสอบ กระแสคงค้าง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ขณะที่ทดลอง

กราฟสี่ ค่า	วงจรไม่ต่อการ์ดริง		วงจรต่อการ์ดริง
	แดง	น้ำเงิน	เหลือง
C(pF)	356	356	340
I _{re} (pA)	7.5	7.4	15.0
T(°C)	20.9	21	17.0
%RH	49	50	55



รูปที่ 5.6 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันโดยวงจรที่มีการ์ดริงและไม่มีการ์ดริงของขึ้นทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

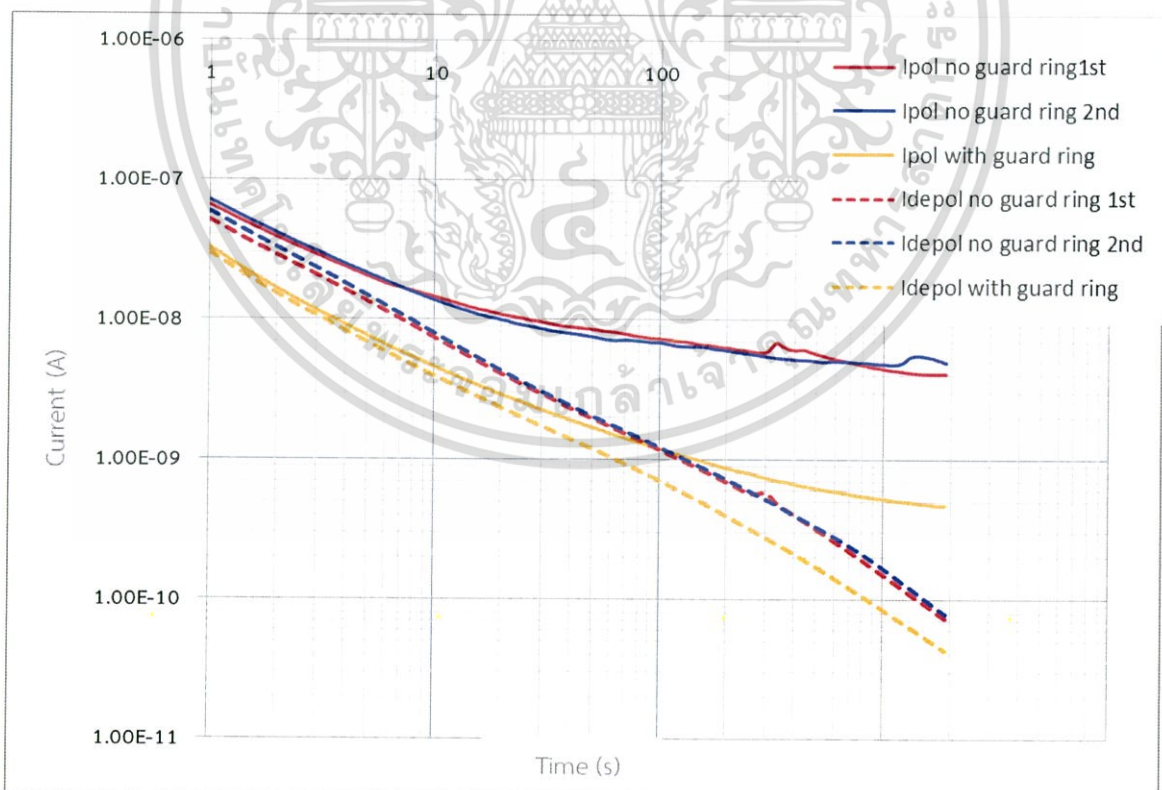
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.7 ขึ้นทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

สำหรับการทดสอบในหัวข้อนี้ได้ทำการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันโดยเปรียบเทียบระหว่างวงจรมีการ์ดริงและไม่มีการ์ดริงของขึ้นทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ตารางที่ 5.7 ค่าความเก็บประจุของขึ้นทดสอบ กระแสคงค้าง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ขณะที่ทดลอง

กราฟสี ค่า	วงจรมีการ์ดริง		วงจรมีการ์ดริง
	แดง	น้ำเงิน	เหลือง
C(pF)	342	347	341
I_{re} (pA)	6.7	7.4	10.9
T(°C)	18.4	19.5	17.1
%RH	49	50	55



รูปที่ 5.7 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันโดยวงจรมีการ์ดริงและไม่มีการ์ดริงของขึ้นทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

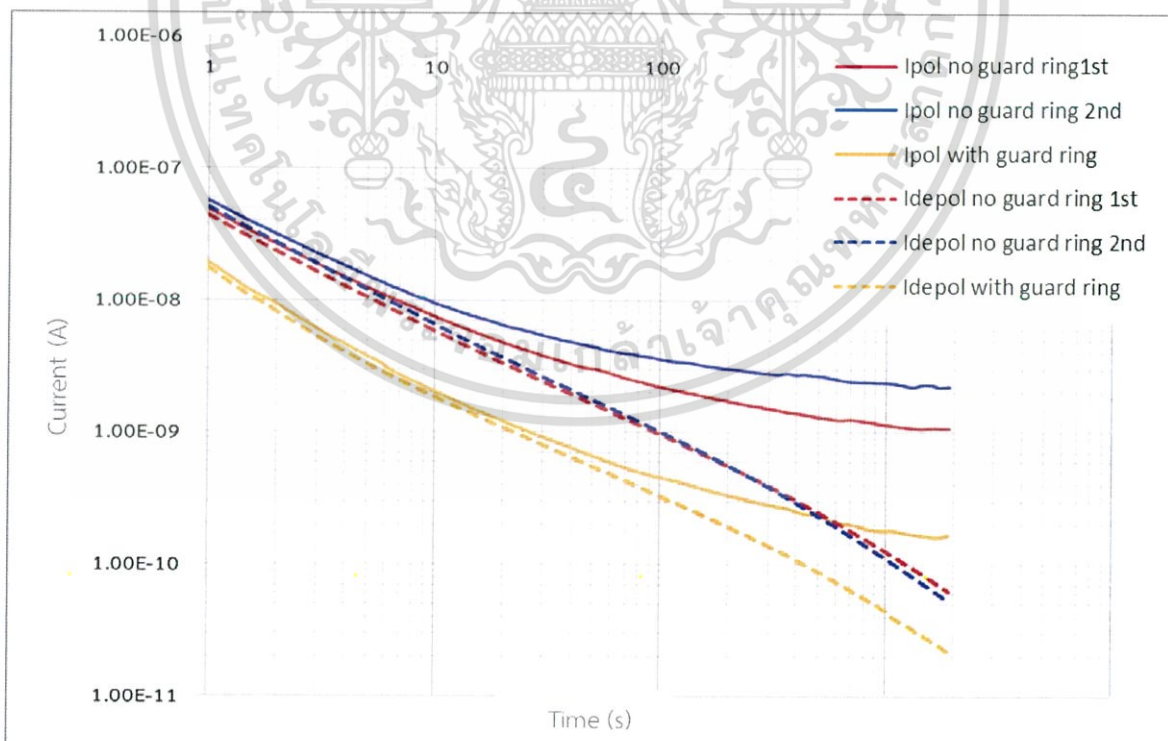
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.8 ขั้นตอนทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

สำหรับการทดสอบในหัวข้อนี้ได้ทำการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันโดยเปรียบเทียบระหว่างวงจรมีการ์ดริงและไม่มีการ์ดริงของขั้นตอนทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ตารางที่ 5.8 ค่าความเก็บประจุของขั้นตอนทดสอบ กระแสคงค้าง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ขณะที่ทดลอง

กราฟสี่ ค่า	วงจรมีการ์ดริง		วงจรมีการ์ดริง
	แดง	น้ำเงิน	เหลือง
C(pF)	352	350	339
I_{re} (pA)	7.2	6.1	9.4
T(°C)	20.4	19.1	17.7
%RH	47	49	58



รูปที่ 5.8 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันโดยวงจรมีการ์ดริงและไม่มีการ์ดริงของขั้นตอนทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของชั้นทดสอบหลังการจำลองกรณี

สำหรับการทดสอบนี้ จะทำการทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของชั้นทดสอบหลังการจำลองกรณี โดยแบ่งเป็น 6 กรณี ดังนี้

1. การทดสอบวัดกระแสดีโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของชั้นทดสอบในกรณีเสื่อมเนื่องจากผลของการเกิดรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้างของชั้นทดสอบ
2. การทดสอบวัดกระแสดีโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของชั้นทดสอบในกรณีเสื่อมเนื่องจากเกิดโพรงอากาศภายในชั้นทดสอบ
3. การทดสอบวัดกระแสดีโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของชั้นทดสอบในกรณีเสื่อมเนื่องจากเกิดโพรงน้ำมันฉนวนภายในชั้นทดสอบ
4. การทดสอบวัดกระแสดีโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของชั้นทดสอบในกรณีเสื่อมเนื่องจากเกิดโพรงน้ำภายในชั้นทดสอบ
5. การทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของชั้นทดสอบกรณีเสื่อมเนื่องจากความร้อน
6. การทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของชั้นทดสอบกรณีเสื่อมเนื่องจากผลของการเกิด PD ในชั้นทดสอบ

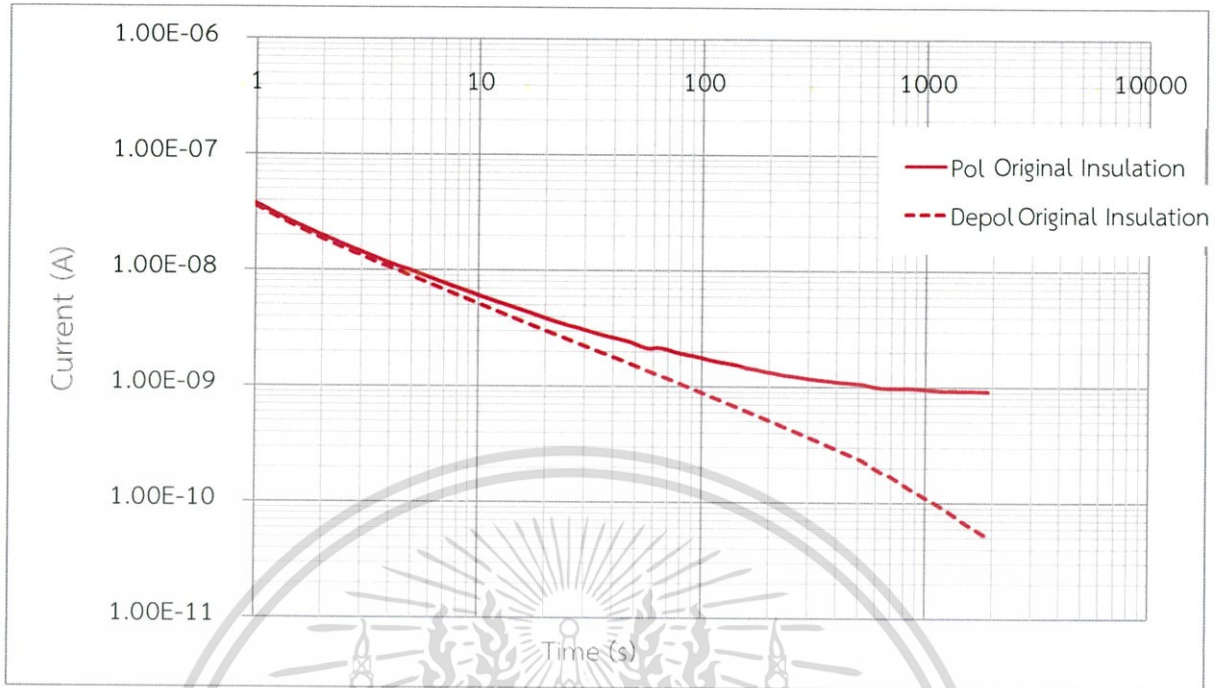
5.2.1 การทดสอบวัดกระแสดีโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของชั้นทดสอบในกรณีเสื่อมเนื่องจากผลของการเกิดรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้างของชั้นทดสอบ

สำหรับการทดสอบในหัวข้อนี้ได้ทำการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของชั้นทดสอบที่มีรอยเสียดสีและไม่มีรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้างของชั้นทดสอบ

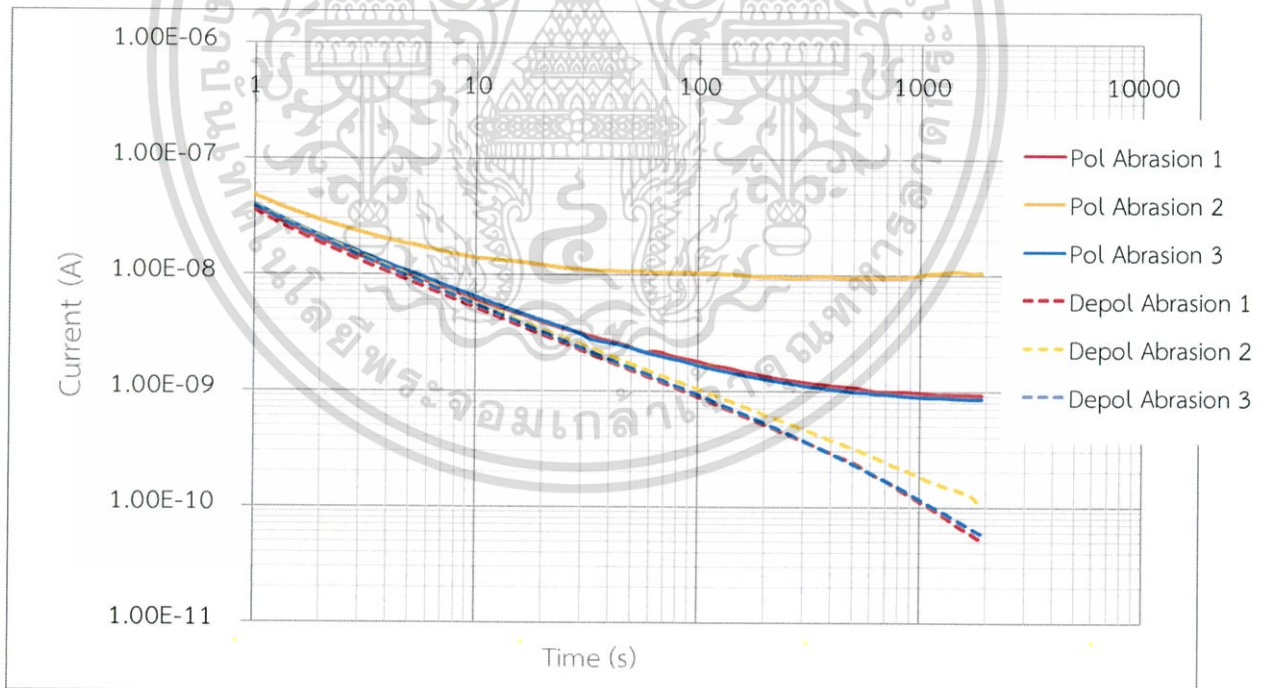
ตารางที่ 5.9 ค่าความเก็บประจุของชั้นทดสอบ กระแสคงค้าง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ขณะที่ทดลอง

ชั้นทดสอบ	ก่อน	ชั้นทดสอบที่มีรอยเสียดสี		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
ค่า C (pF)	331	340	338	338
ค่า I _{re} (pA)	8.6	0.8	15.8	8.6
ค่า T (°C)	17.5	19.6	18.6	18.4
ค่า %RH	61	51	63	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

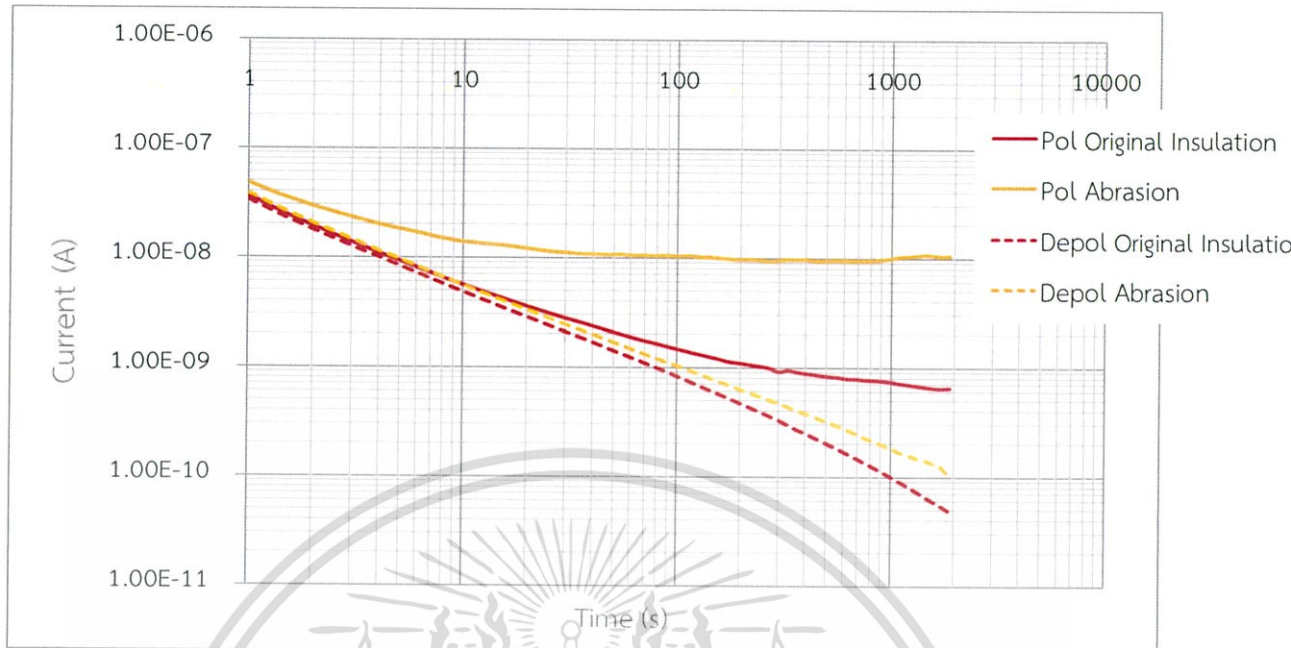


รูปที่ 5.9 กระแสโพลาริซ์และดีโพลาริซ์ของชั้นทดสอบที่ไม่มีรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้างของชั้นทดสอบ



รูปที่ 5.10 กระแสโพลาริซ์และดีโพลาริซ์ของชั้นทดสอบที่มีรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้างของชั้นทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 เปรียบเทียบกระแสโพลาริซ์และดีโพลาริซ์ระหว่างชั้นทดสอบที่ไม่มีรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้าง และมีรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้าง 2 ด้าน ของชั้นทดสอบ

- ชั้นทดสอบที่ไม่มีรอยเสียดสี ขณะทดลองมีอุณหภูมิ 17.5 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 61%
- ชั้นทดสอบที่มีรอยเสียดสี ขณะทดลองมีอุณหภูมิ 18.6 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 63%

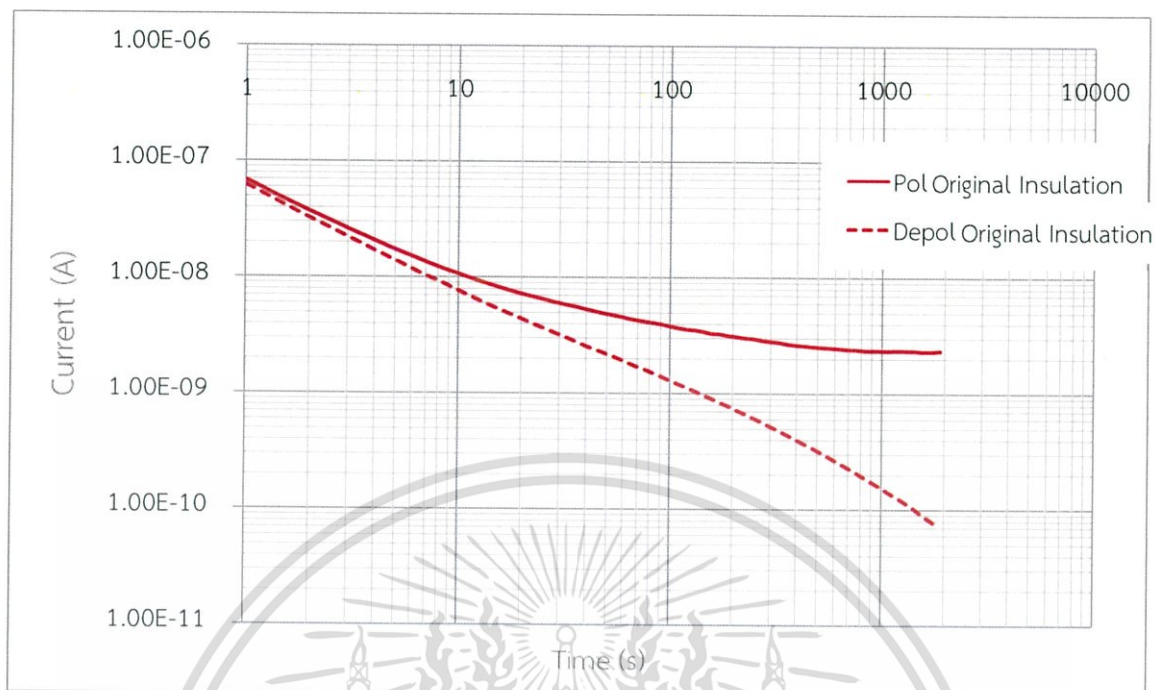
5.2.2 การทดสอบวัดกระแสดีโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของชั้นทดสอบในกรณีเสื่อมเนื่องจากเกิดโพรงอากาศภายในชั้นทดสอบ

สำหรับการทดสอบในหัวข้อนี้ได้ทำการวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของชั้นทดสอบก่อนและหลังจำลองโพรงอากาศภายในชั้นทดสอบ

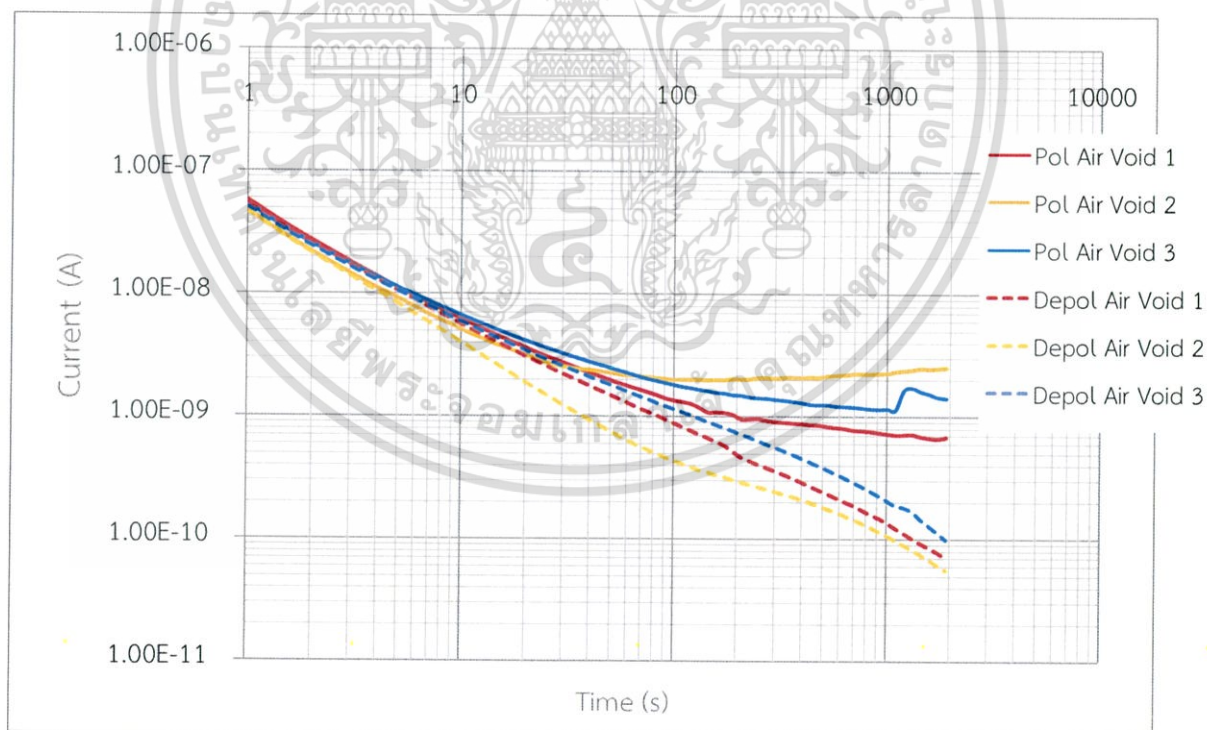
ตารางที่ 5.10 ค่าความเก็บประจุของชั้นทดสอบ กระแสคงค้าง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ขณะที่ทดลอง

ชั้นทดสอบ	ก่อน	หลังเกิดโพรงอากาศ		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
ค่า	2	1	2	3
C (pF)	358	317	331	335
I_{re} (pA)	7.8	7.9	20.91	11.1
T (°C)	18.4	19.2	18.4	18.2
%RH	49	54	62	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

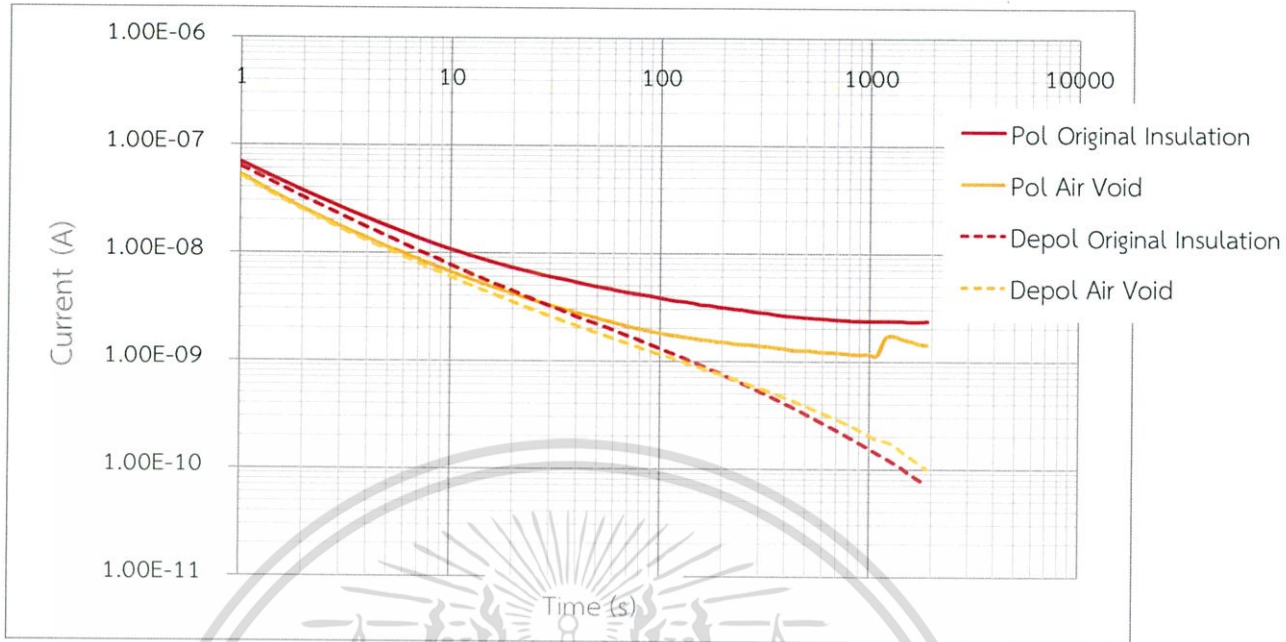


รูปที่ 5.12 กระแสโพลาริซ์และดีโพลาริซ์ของชั้นทดสอบก่อนจำลองโพรงอากาศภายในชั้นทดสอบ



รูปที่ 5.13 กระแสโพลาริซ์และดีโพลาริซ์ของชั้นทดสอบหลังจำลองโพรงอากาศภายในชั้นทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบกระแสโพลาริซ์และดีโพลาริซ์ของชั้นทดสอบก่อนและหลังจำลองโพรงอากาศภายในชั้นทดสอบ

- ชั้นทดสอบก่อนจำลองโพรงอากาศภายในชั้นทดสอบ ทดลองที่อุณหภูมิ 18.4 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 49%
- ชั้นทดสอบหลังจำลองโพรงอากาศภายในชั้นทดสอบ ทดลองที่อุณหภูมิ 18.2 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 56%

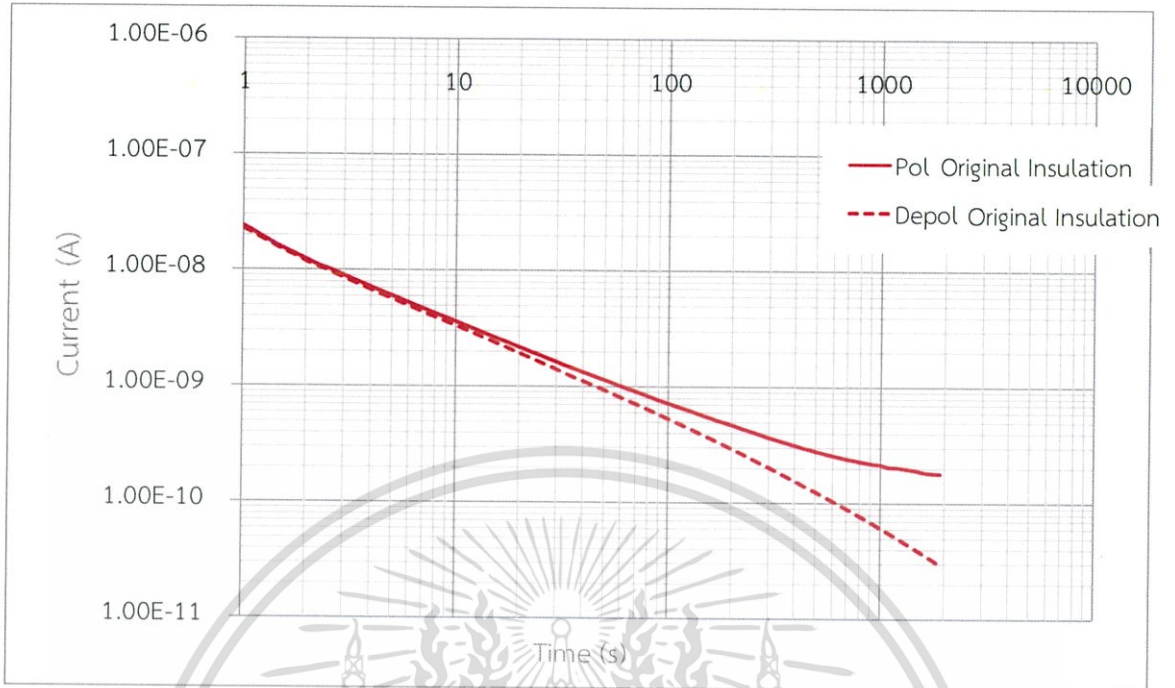
5.2.3 การทดสอบวัดกระแสดีโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของชั้นทดสอบในกรณีเสื่อมเนื่องจากเกิดโพรงน้ำมันฉนวนภายในชั้นทดสอบ

สำหรับการทดสอบในหัวข้อนี้ได้ทำการวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของชั้นทดสอบก่อนและหลังจำลองโพรงน้ำมันฉนวนภายในชั้นทดสอบ

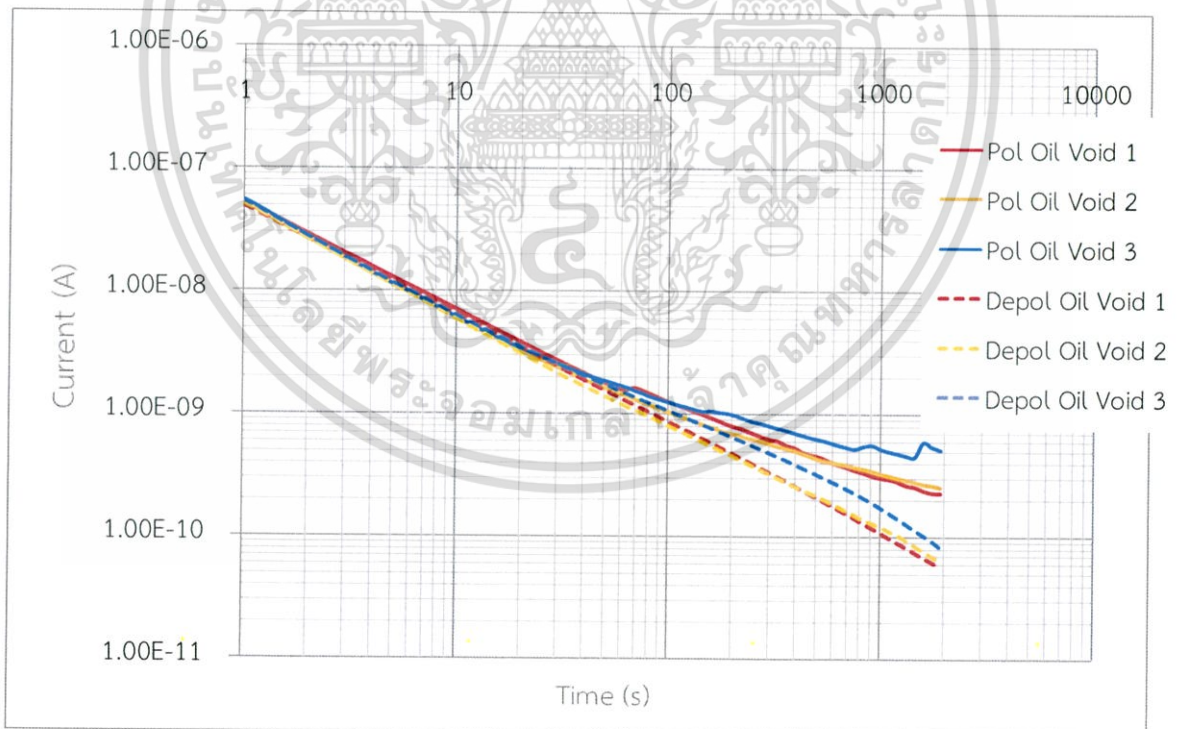
ตารางที่ 5.11 ค่าความเก็บประจุของชั้นทดสอบ กระแสคงค้าง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ขณะที่ทดลอง

ชั้นทดสอบ ครั้งที่ ค่า	ก่อน	หลังเกิดโพรงน้ำมันฉนวน		
	3	1	2	3
C (pF)	363	300	311	308
I _{re} (pA)	7.3	7.5	6.3	6.9
T (°C)	17.3	19.5	18.1	18.1
%RH	60	56	55	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

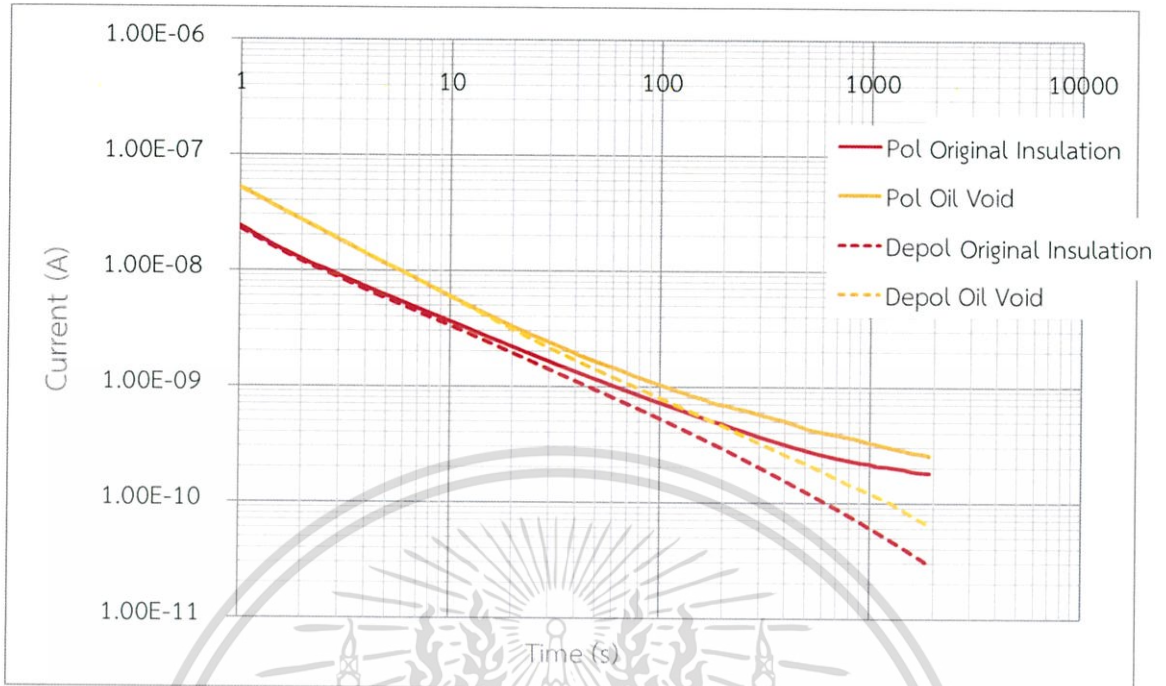


รูปที่ 5.15 กระแสโพลาริซ์และดีโพลาริซ์ของชั้นทดสอบก่อนจำลองโพรงน้ำมันฉนวนภายในชั้นทดสอบ



รูปที่ 5.16 กระแสโพลาริซ์และดีโพลาริซ์ของชั้นทดสอบหลังจำลองโพรงน้ำมันฉนวนภายในชั้นทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.17 เปรียบเทียบกระแสโพลาริซ์และดีโพลาริซ์ของชั้นทดสอบก่อนและหลังจำลองโพรงน้ำมัน
ฉนวนภายในชั้นทดสอบ

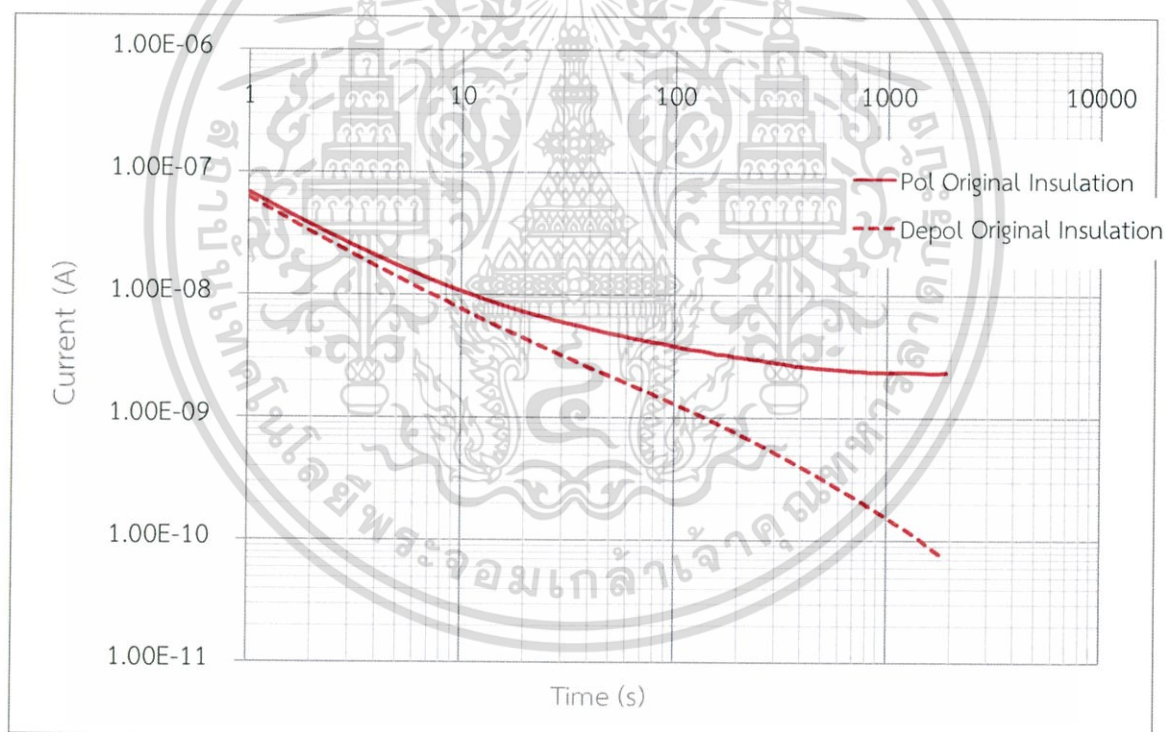
- ชั้นทดสอบก่อนจำลองโพรงน้ำมันฉนวนภายในชั้นทดสอบ ทดลองที่อุณหภูมิ 17.3 °C และ ความชื้นสัมพัทธ์ 60%
- ชั้นทดสอบหลังจำลองโพรงน้ำมันฉนวนภายในชั้นทดสอบ ทดลองที่อุณหภูมิ 18.1 °C และ ความชื้นสัมพัทธ์ 55%

5.2.4 การทดสอบวัดกระแสดีโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของชั้นทดสอบในกรณีเสื่อม เนื่องจากเกิดโพรงน้ำภายในชั้นทดสอบ

สำหรับการทดสอบในหัวข้อนี้ได้ทำการวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของชั้น
ทดสอบก่อนและหลังจำลองโพรงน้ำภายในชั้นทดสอบ

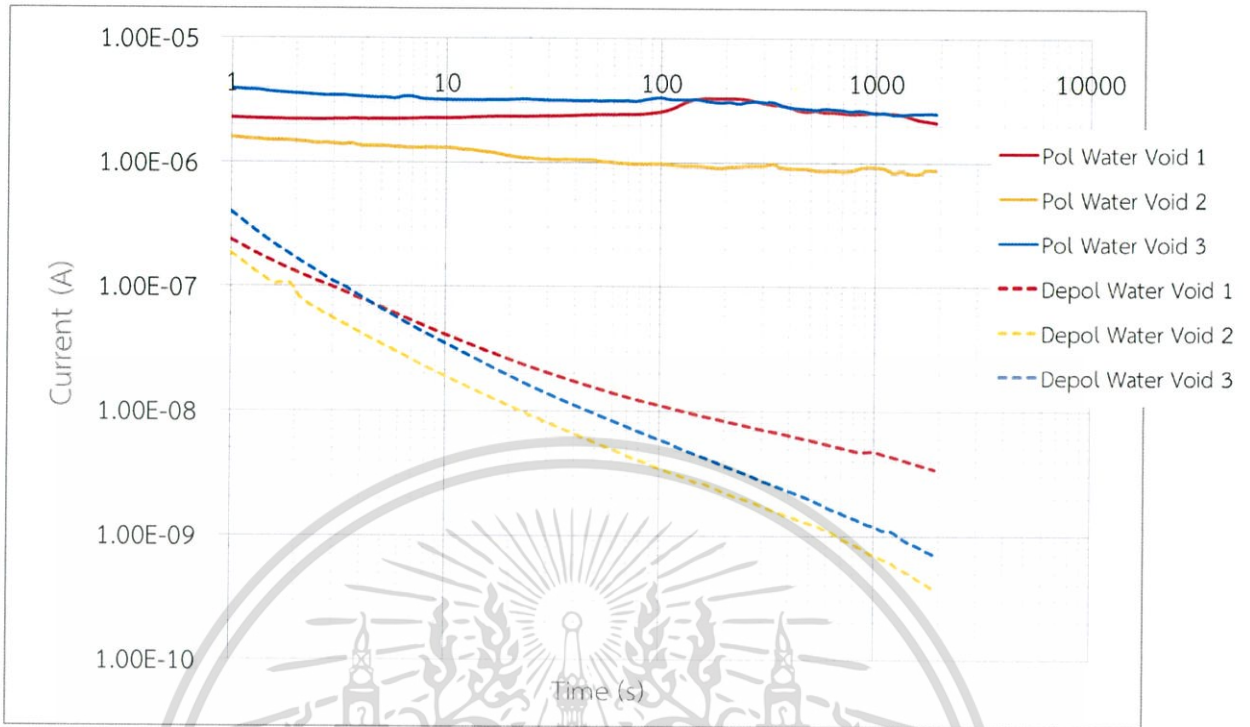
ตารางที่ 5.12 ค่าความเก็บประจุของชั้นทดสอบ กระแสคงค้าง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ขณะที่ทดลอง

ชั้นทดสอบ	ก่อน	หลังเกิดโพรงน้ำ		
ครั้งที่ ค่า	1	1	2	3
C (pF)	364	2321	2440	2516
I_{re} (pA)	14.8	569	376.0	330.7
T (°C)	18.1	18.4	19.4	19.4
%RH	57	58	52	52
Voltage (V)	2000	500	500	1000

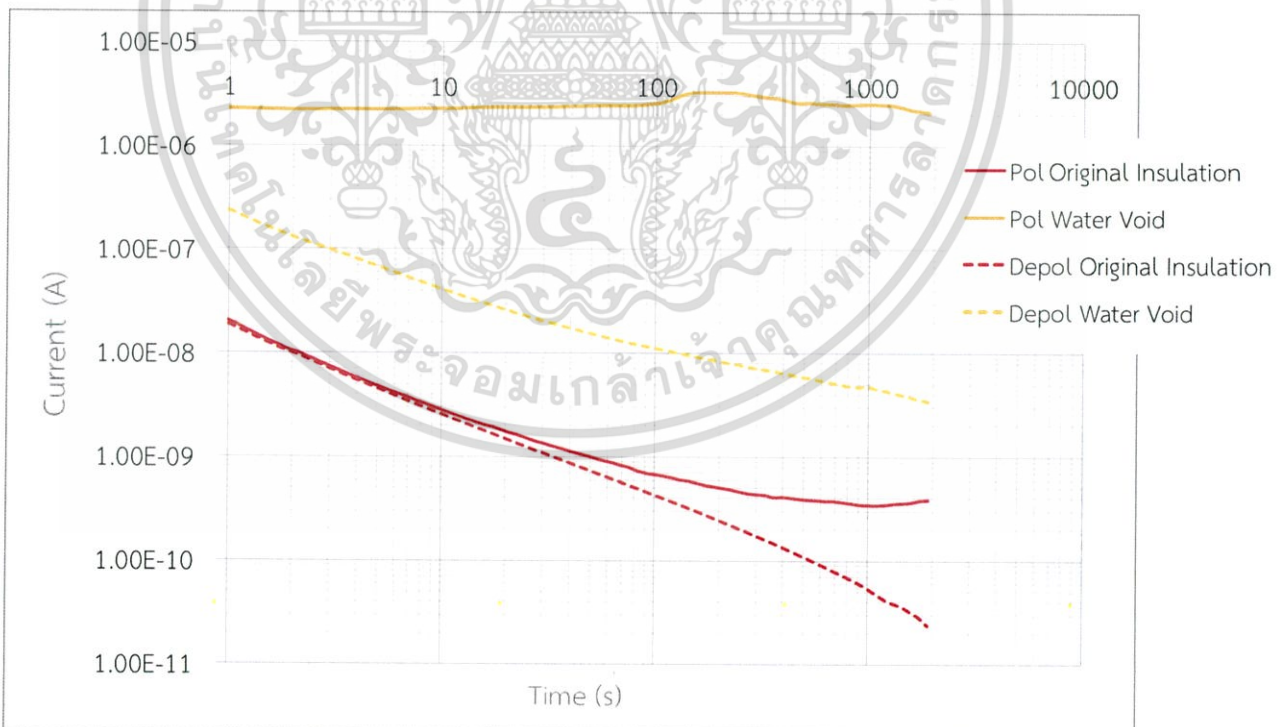


รูปที่ 5.18 กระแสโพลาริซ์และดีโพลาริซ์ของชั้นทดสอบก่อนจำลองโพรงน้ำภายในชั้นทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.19 กระแสโพลาริซและดีโพลาริซของชั้นทดสอบหลังจำลองโพรงน้ำภายในชั้นทดสอบ



รูปที่ 5.20 เปรียบเทียบกระแสโพลาริซและดีโพลาริซของชั้นทดสอบก่อนและหลังจำลองโพรงน้ำภายในชั้นทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชั้นทดสอบก่อนจำลองโปรแกรมภายในชั้นทดสอบ ทดลองที่อุณหภูมิ 18.1 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 57%
- ชั้นทดสอบหลังจำลองโปรแกรมภายในชั้นทดสอบ ทดลองที่อุณหภูมิ 18.4 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 58%

5.2.5 การทดสอบวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของชั้นทดสอบกรณีเสื่อมเนื่องจากความร้อน

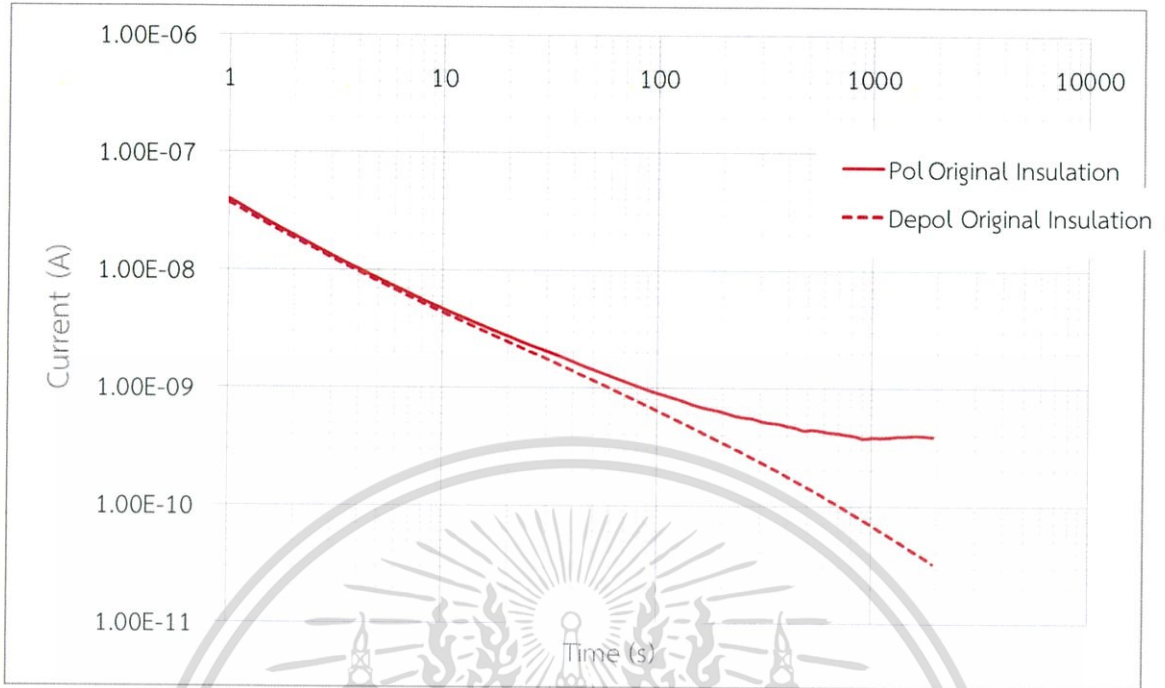
สำหรับการทดสอบในหัวข้อนี้ได้ทำการวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของชั้นทดสอบที่เสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนซึ่งต่อวงจรวัดแบบมีเกิร์ดริง โดยเปรียบเทียบก่อนและหลังการอบ 100 °C, 120 °C, 140 °C และ 160 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และเปรียบเทียบผลการทดสอบของแต่ละอุณหภูมิ ได้ผลดังนี้

1. อบชั้นทดสอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

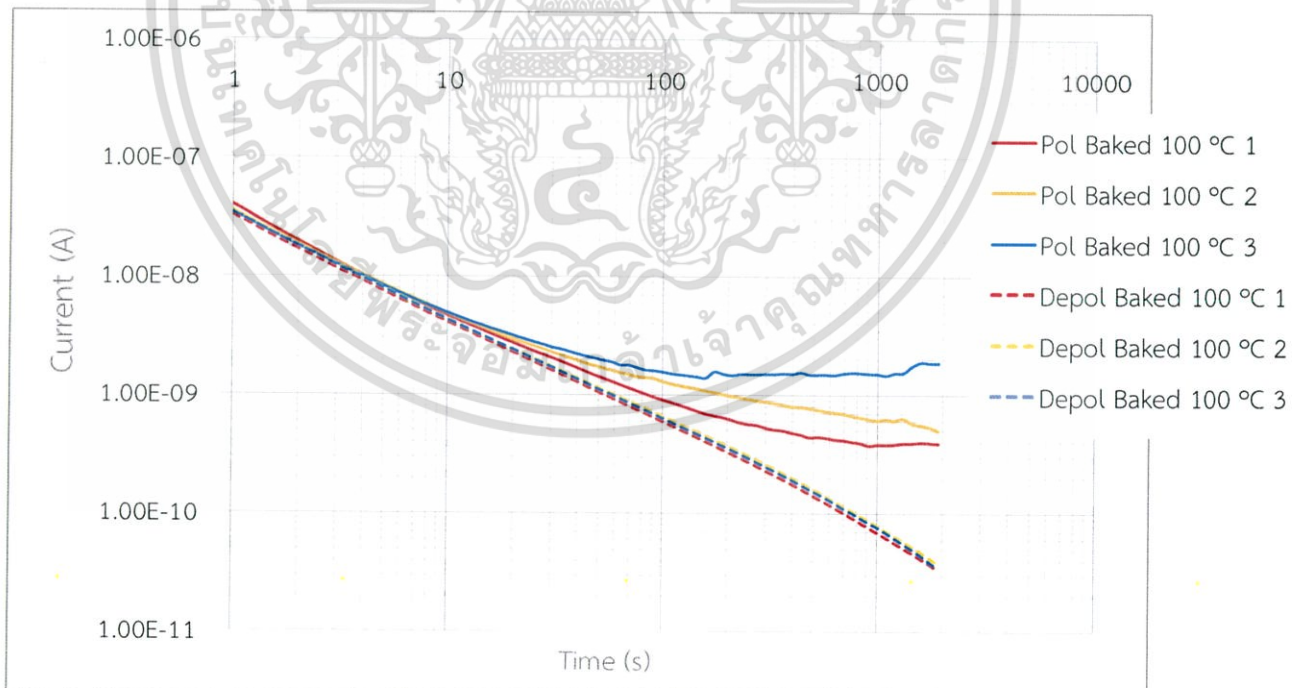
ตารางที่ 5.13 ค่าความเก็บประจุของชั้นทดสอบ กระแสคงค้าง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ขณะที่ทดลอง

	ก่อนอบ	หลังอบที่ 100 °C 12 ชม.		
ครั้งที่	2	1	2	3
ค่า				
C (pF)	338	330	332	330
I _{re} (pA)	5.7	6.3	7.1	3.8
T (°C)	17.4	20.5	18.8	18.9
%RH	56	54	60	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

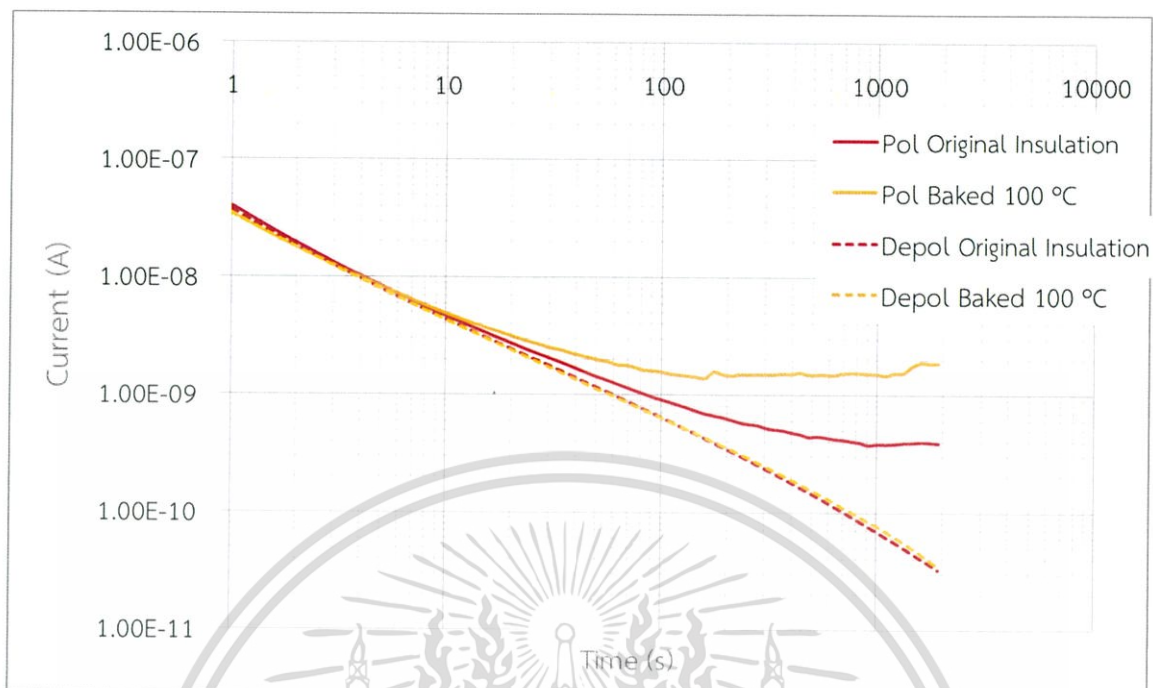


รูปที่ 5.21 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของชั้นทดสอบก่อนนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



รูปที่ 5.22 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของชั้นทดสอบที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.23 เปรียบเทียบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันระหว่างขั้นตอนทดสอบก่อนและหลังผ่าน การอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

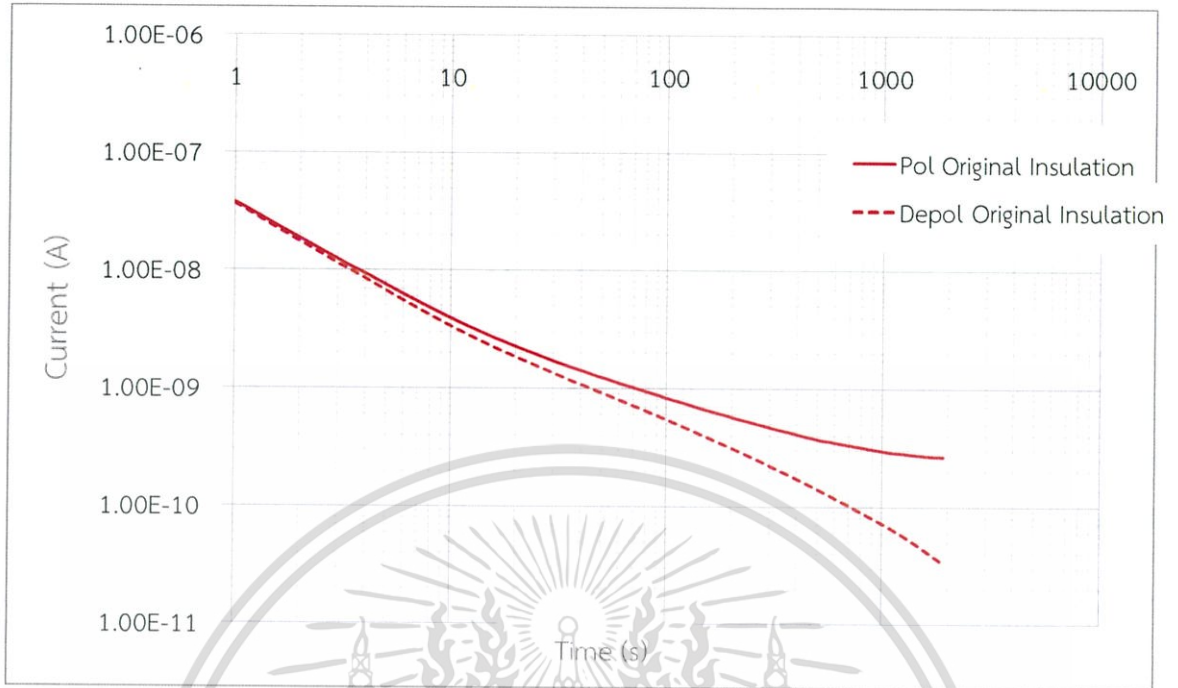
- ขั้นตอนทดสอบก่อนการอบ ขณะทดลองมีอุณหภูมิ 17.4 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 56%
- ขั้นตอนทดสอบที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ขณะทดลองมีอุณหภูมิ 18.9 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 57 %

2. อบขั้นตอนทดสอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

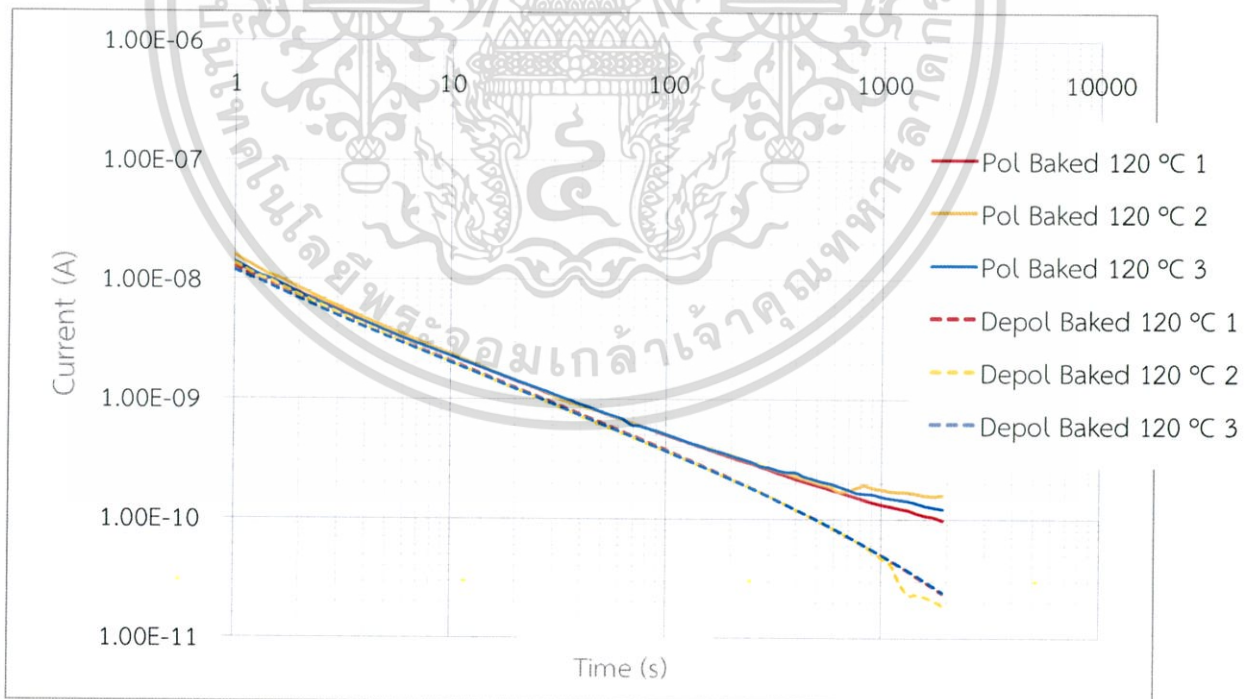
ตารางที่ 5.14 ค่าความเก็บประจุของขั้นตอนทดสอบ กระแสคงค้าง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ขณะที่ทดลอง

ขั้นตอนทดสอบ	ก่อน	หลังอบที่ 120 °C 12 ชม.		
ครั้งที่ ค่า	2	1	2	3
C (pF)	340	336	335	342
I _{re} (pA)	15.0	6.7	8.8	8.3
T (°C)	17.0	20.2	20	17.8
%RH	55	55	59	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

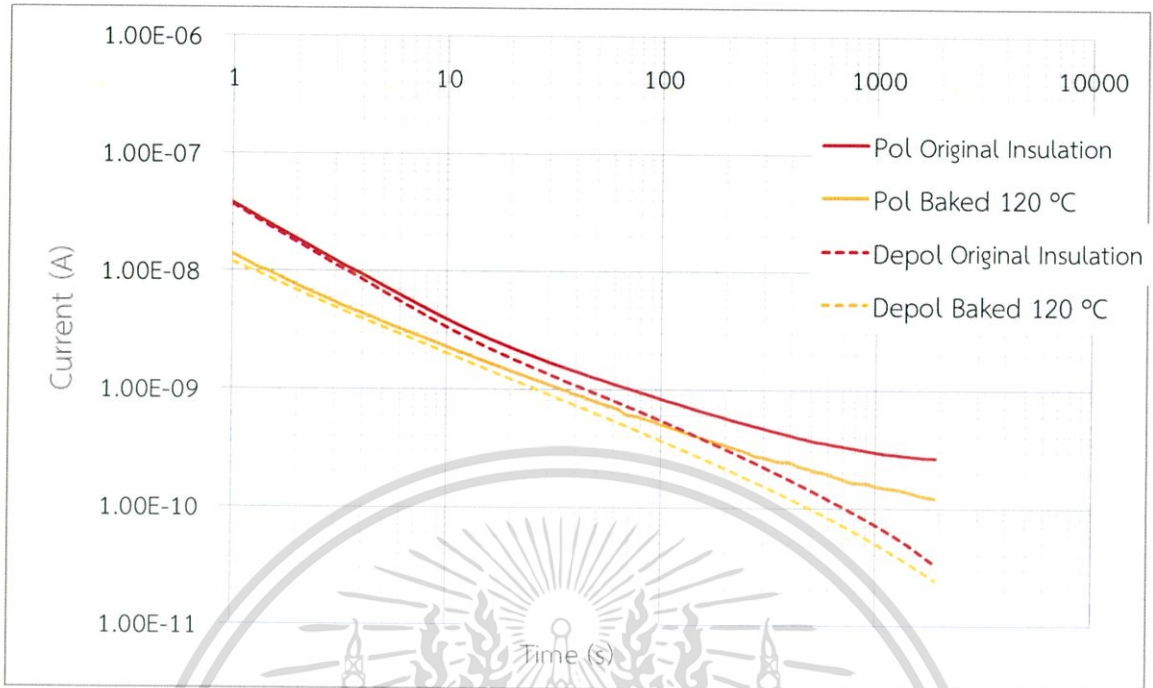


รูปที่ 5.24 กระแสโพลาริซเซชันและดีโพลาริซเซชันของชั้นทดสอบก่อนนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



รูปที่ 5.25 กระแสโพลาริซเซชันและดีโพลาริซเซชันของชั้นทดสอบที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.26 เปรียบเทียบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันระหว่างขั้นตอนทดสอบก่อนและหลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

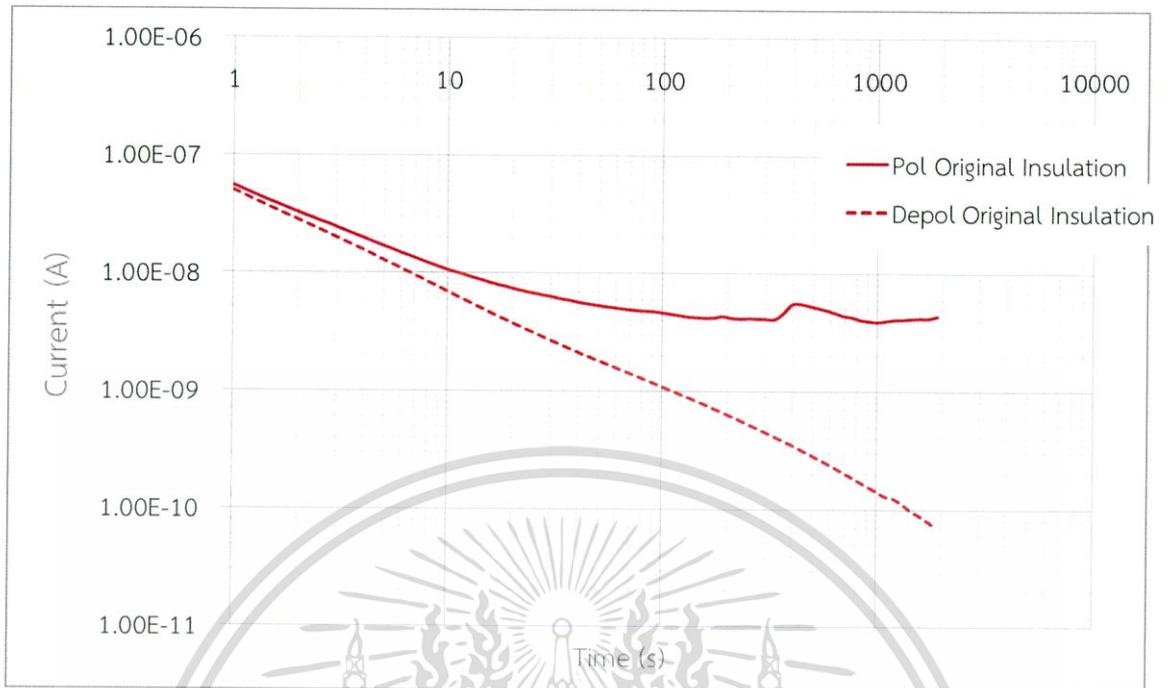
- ขั้นตอนทดสอบก่อนการอบ ขณะทดลองมีอุณหภูมิ 17 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 55%
- ขั้นตอนทดสอบที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง ขณะทดลองมีอุณหภูมิ 17.8 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 56%

3. อบขั้นตอนทดสอบที่อุณหภูมิ 140°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

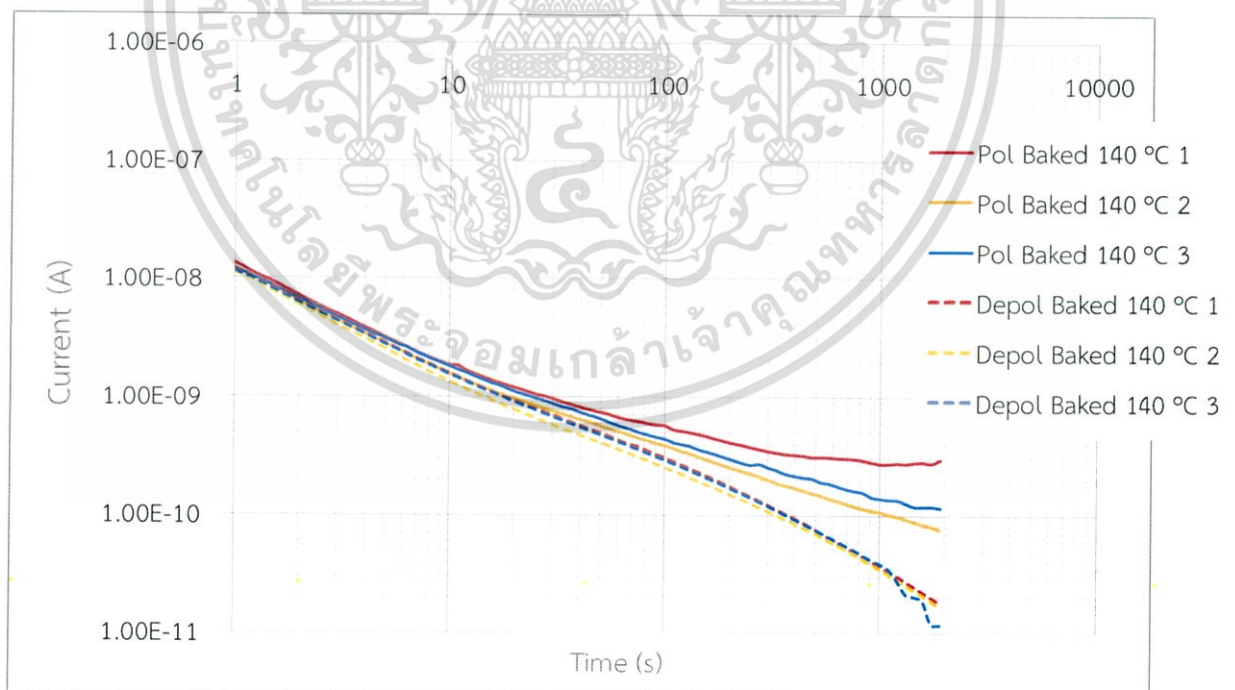
ตารางที่ 5.15 ค่าความเก็บประจุของขั้นตอนทดสอบ กระแสคงค้าง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ขณะที่ทดลอง

ขั้นตอนทดสอบ	ก่อน	หลังอบที่ 140 °C 12 ชม.		
ครั้งที่	2	1	2	3
ค่า				
C (pF)	341	255	258	258
I _{re} (pA)	10.9	9	10.9	23.3
T (°C)	17.1	18.5	20	18.4
%RH	55	57	59	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

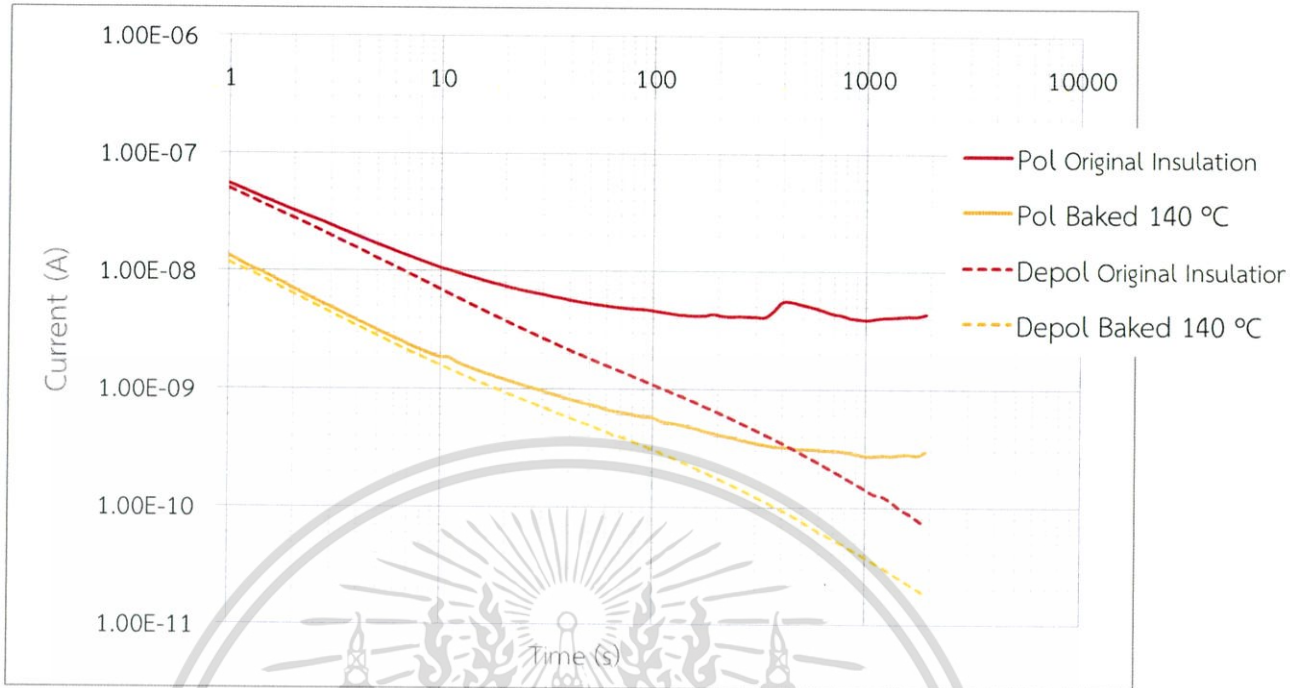


รูปที่ 5.27 กระแสโพลาริซเซชันและดีโพลาริซเซชันของชั้นทดสอบก่อนนำไปอบที่อุณหภูมิ $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



รูปที่ 5.28 กระแสโพลาริซเซชันและดีโพลาริซเซชันของชั้นทดสอบที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.29 เปรียบเทียบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันระหว่างขั้นตอนทดสอบก่อนและหลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 140 °C

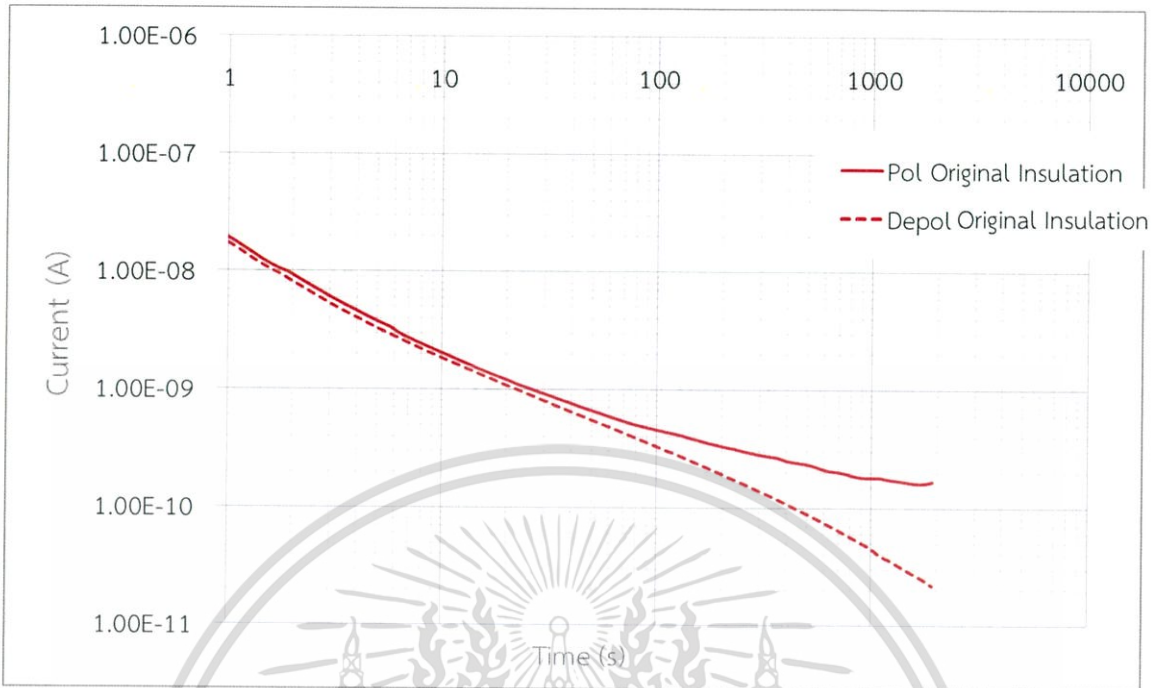
- ขั้นตอนทดสอบก่อนการอบ ขณะทดลองมีอุณหภูมิ 17.1 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 55%
- ขั้นตอนทดสอบที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง ขณะทดลองมีอุณหภูมิ 18.5 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 57%

4. อบขั้นตอนทดสอบที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

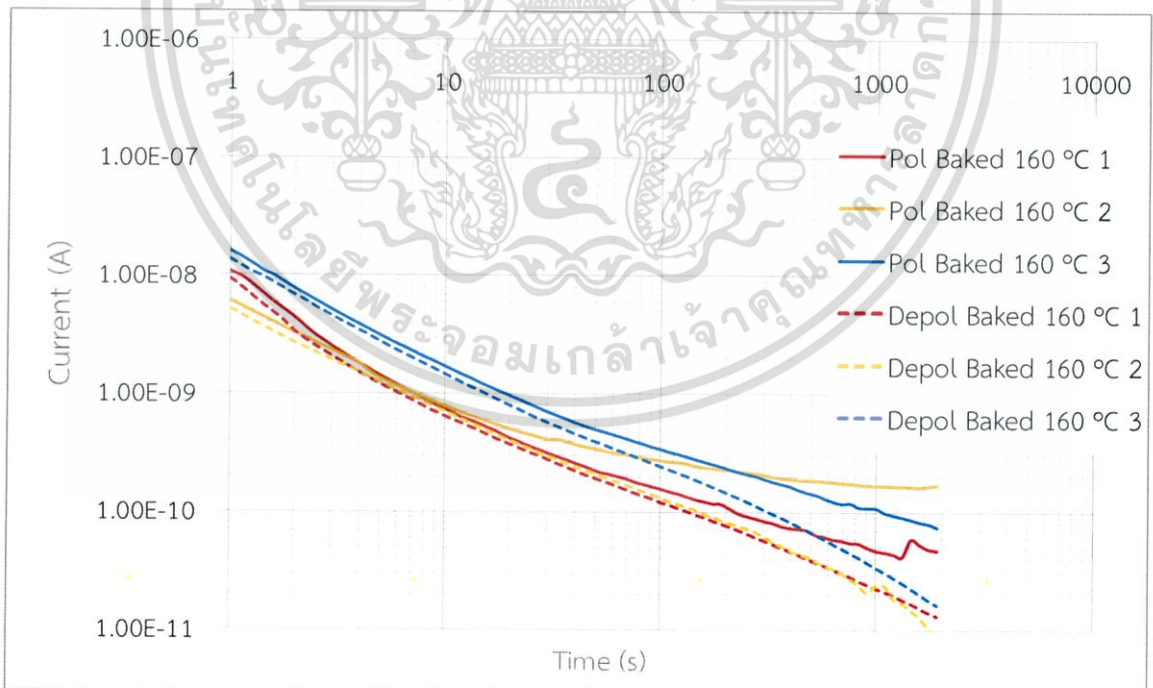
ตารางที่ 5.16 ค่าความเก็บประจุของขั้นตอนทดสอบ กระแสคงค้าง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ขณะที่ทดลอง

ขั้นตอนทดสอบ	ก่อน	หลังอบที่ 160 °C 12 ชม.		
ครั้งที่	3	1	2	3
ค่า				
C (pF)	339	222	224	255
I_{re} (pA)	9.4	56	16.1	6.9
T (°C)	17.7	20.9	20.5	20.9
%RH	58	51	61	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

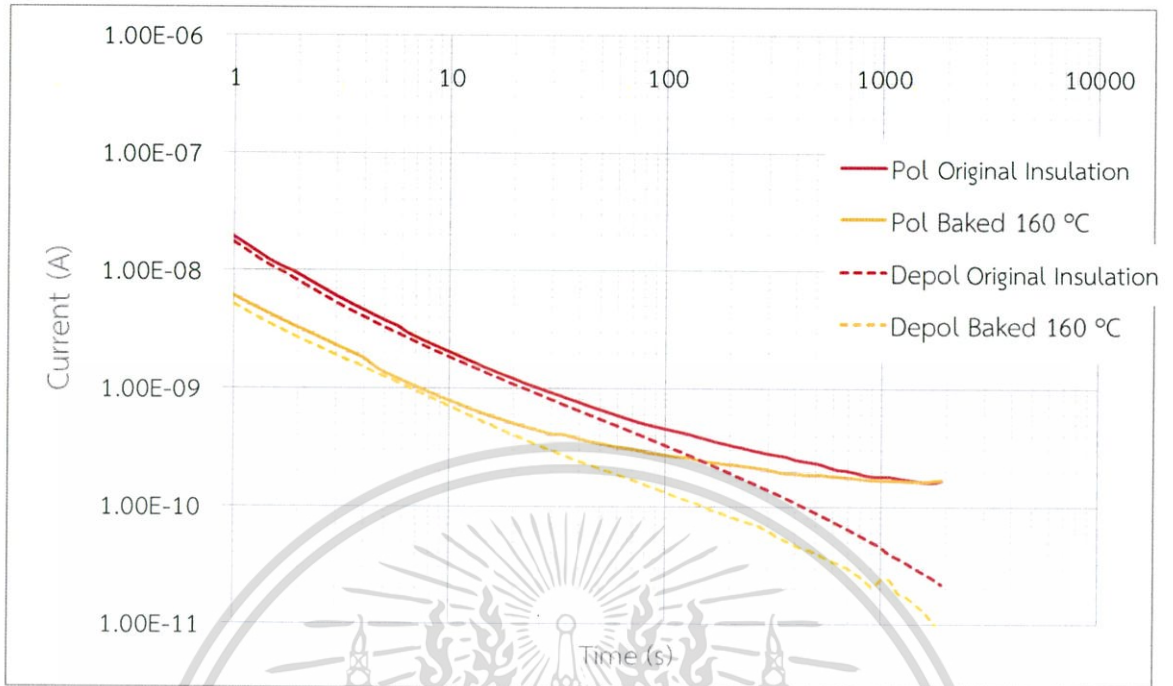


รูปที่ 5.30 กระแสโพลาริซเซชันและดีโพลาริซเซชันของชั้นทดสอบก่อนนำไปอบที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



รูปที่ 5.31 กระแสโพลาริซเซชันและดีโพลาริซเซชันของชั้นทดสอบที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

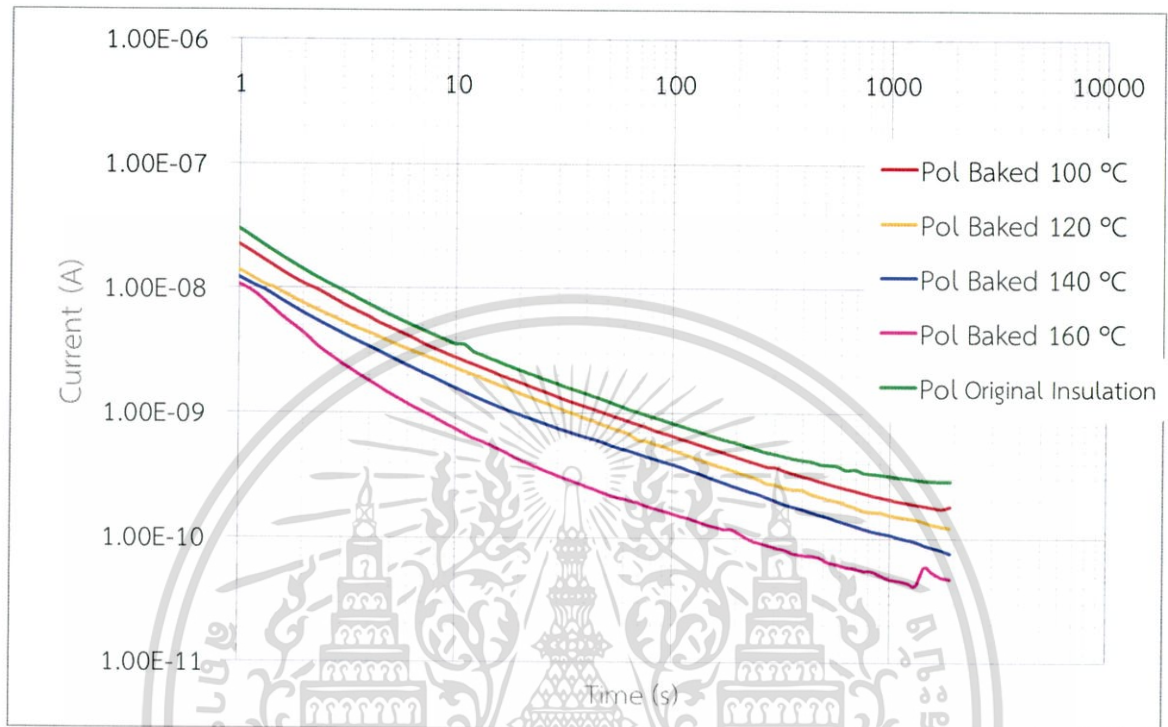
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



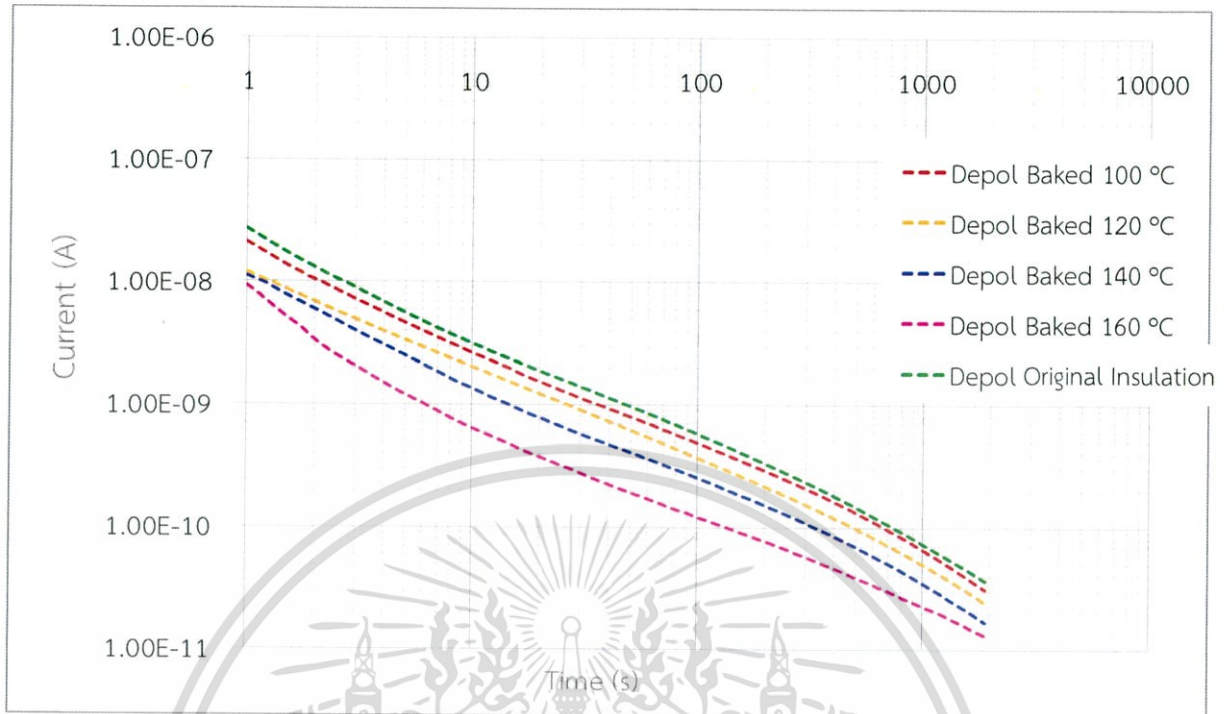
รูปที่ 5.32 เปรียบเทียบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันระหว่างชั้นทดสอบที่ก่อนและหลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 160 °C

- ชั้นทดสอบก่อนการอบ ขณะทดลองมีอุณหภูมิ 17.7 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 58%
- ชั้นทดสอบที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง ขณะทดลองมีอุณหภูมิ 20.5 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 61%

5. เปรียบเทียบกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันก่อนและหลังการอบ และเปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 100 °C 120 °C 140 °C 160 °C



รูปที่ 5.33 เปรียบเทียบกระแสโพลาริซ์เซชันของชั้นทดสอบก่อนและหลังผ่านการอบเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 100, 120, 140 และ 160 °C



รูปที่ 5.34 เปรียบเทียบกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชันของชั้นทดสอบก่อนและหลังผ่านการอบเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 100, 120, 140 และ 160 °C

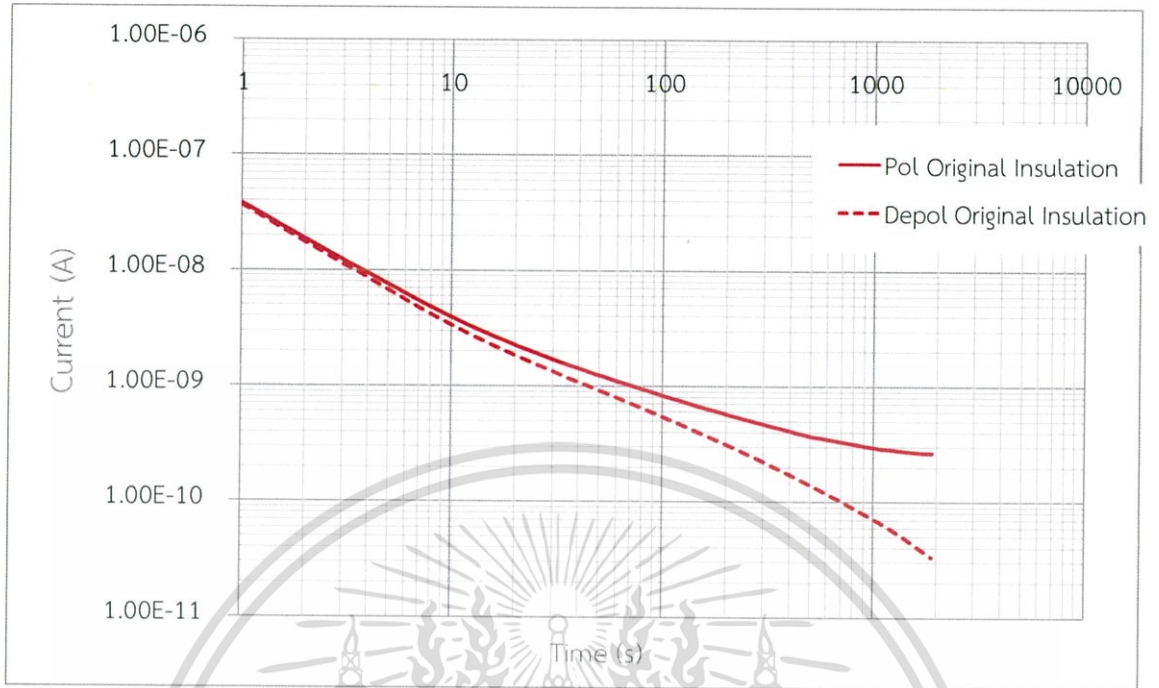
5.2.6 การทดสอบวัดกระแสโพลาร์ไรซ์เซชันและดีโพลาร์ไรซ์เซชันของชั้นทดสอบกรณีเสื่อมเนื่องจากผลของการเกิด PD ในชั้นทดสอบ

สำหรับการทดสอบในหัวข้อนี้ได้ทำการวัดกระแสโพลาร์ไรซ์เซชันและดีโพลาร์ไรซ์เซชันของชั้นทดสอบที่มีรอย PD โดยต่อวงจรของฉนวนระหว่างเฟสแบบมีการ์ดริง เปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่ไม่มีรอย PD

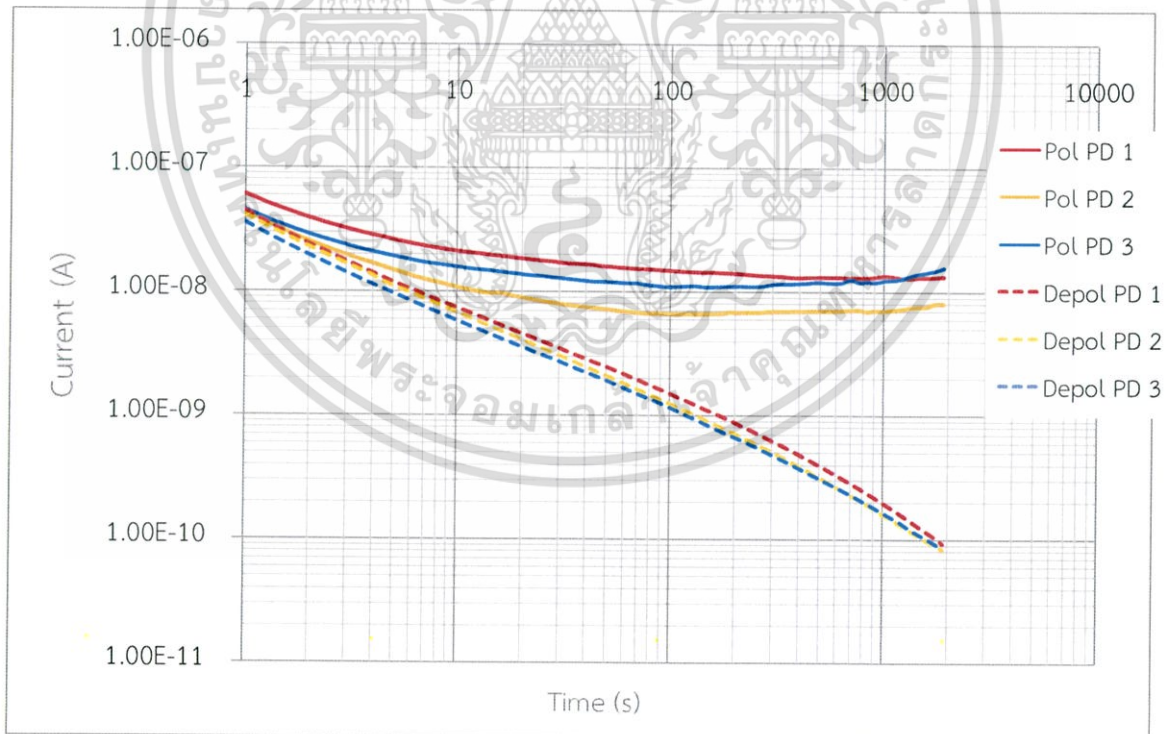
ตารางที่ 5.17 ค่าความเก็บประจุของชั้นทดสอบ กระแสคงค้าง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ขณะที่ทดลอง

ชั้นทดสอบ	ก่อน	PD		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
ค่า	1	1	2	3
C (pF)	340	340	354	358
I _{re} (pA)	15.0	23.7	16.9	69.6
T (°C)	17.0	18.3	18.7	18.6
%RH	55	63	57	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

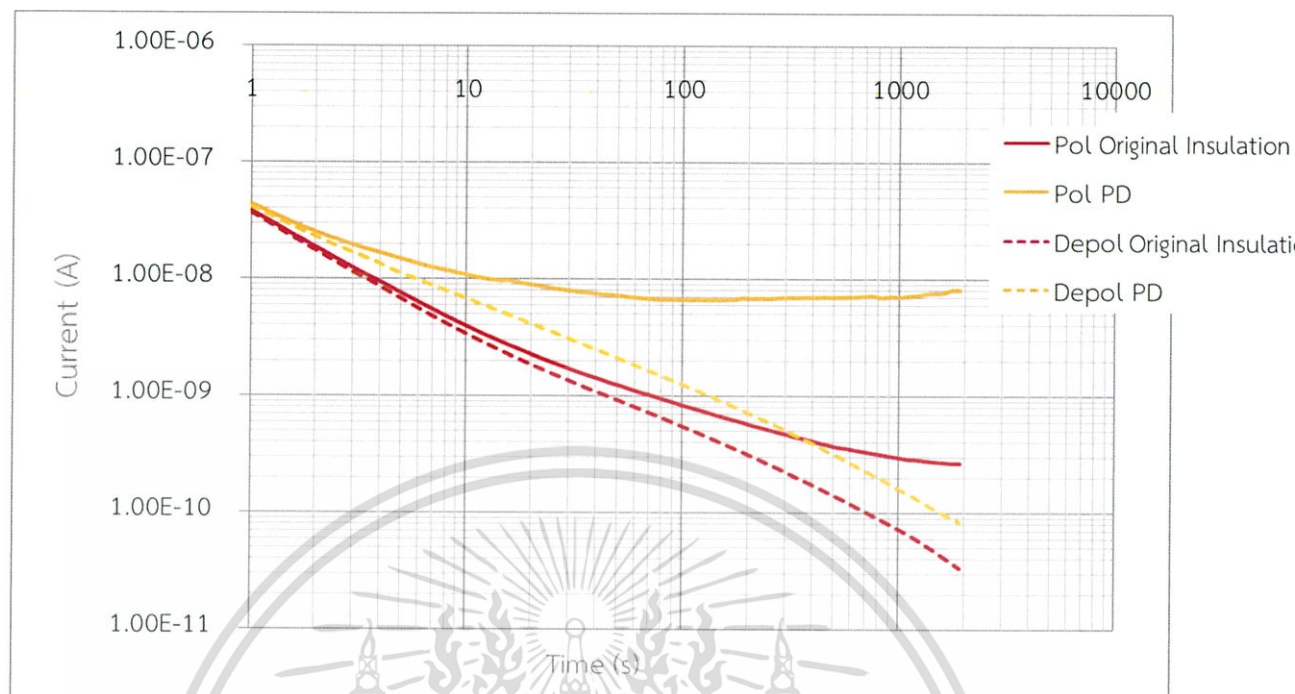


รูปที่ 5.35 กระแสโพลาริซและดีโพลาริซของชั้นทดสอบที่ไม่มีรอย PD



รูปที่ 5.36 กระแสโพลาริซและดีโพลาริซของชั้นทดสอบที่มีรอย PD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.37 เปรียบเทียบกระแสโพลาริซ์และดีโพลาริซ์ระหว่างชั้นทดสอบที่มีรอย PD และชั้นทดสอบที่ไม่มีรอย PD

- ชั้นทดสอบที่ไม่มีรอย PD ขณะทดลองมีอุณหภูมิ 17 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 55%
- ชั้นทดสอบที่มีรอย PD ขณะทดลองมีอุณหภูมิ 18.7 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 57%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric dissipation factor ; $\tan\delta$)

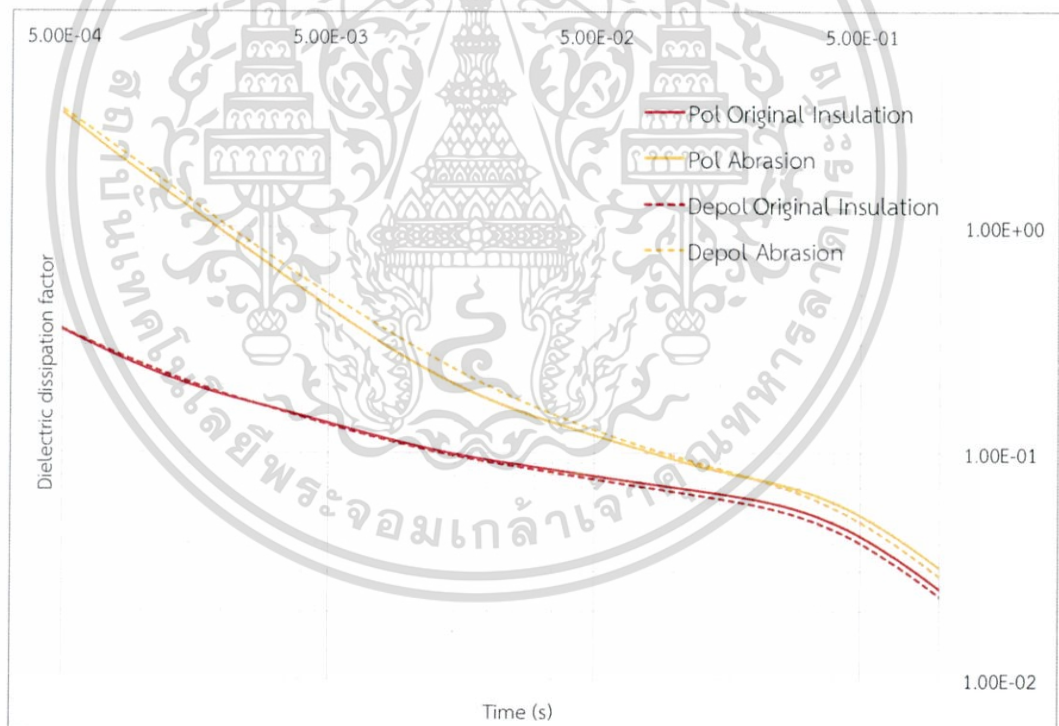
สำหรับในหัวข้อนี้ จะทำการวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของชั้นทดสอบก่อนการจำลองกรณีและหลังจากการจำลองกรณีของการทดสอบ โดยจะเลือกมา 1 ครั้ง จากการทดสอบ 3 ครั้ง ที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน เพื่อให้ได้ค่าที่มีความใกล้เคียงกันของค่าตัวแปรต่าง ๆ และความน่าเชื่อถือของการเปรียบเทียบ

5.3.1 การวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกก่อนและหลังการจำลองรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้างของชั้นทดสอบ

เปรียบเทียบชั้นทดสอบก่อนและหลังจำลองการเกิดเสียดสีที่ผิวด้านข้างของชั้นทดสอบ

โดยก่อนการจำลองกรณี ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 17.5 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 61% ค่าของกระแสคงค้าง 8.6 pA ค่าความเก็บประจุ 331 pF

และหลังการจำลองกรณี ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 18.6 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 63% ค่าของกระแสคงค้าง 15.8 pA ค่าความเก็บประจุ 338 pF



รูปที่ 5.38 กราฟแสดงแฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของก่อนและหลังจำลองการเกิดเสียดสีที่ผิวด้านข้างของชั้นทดสอบ

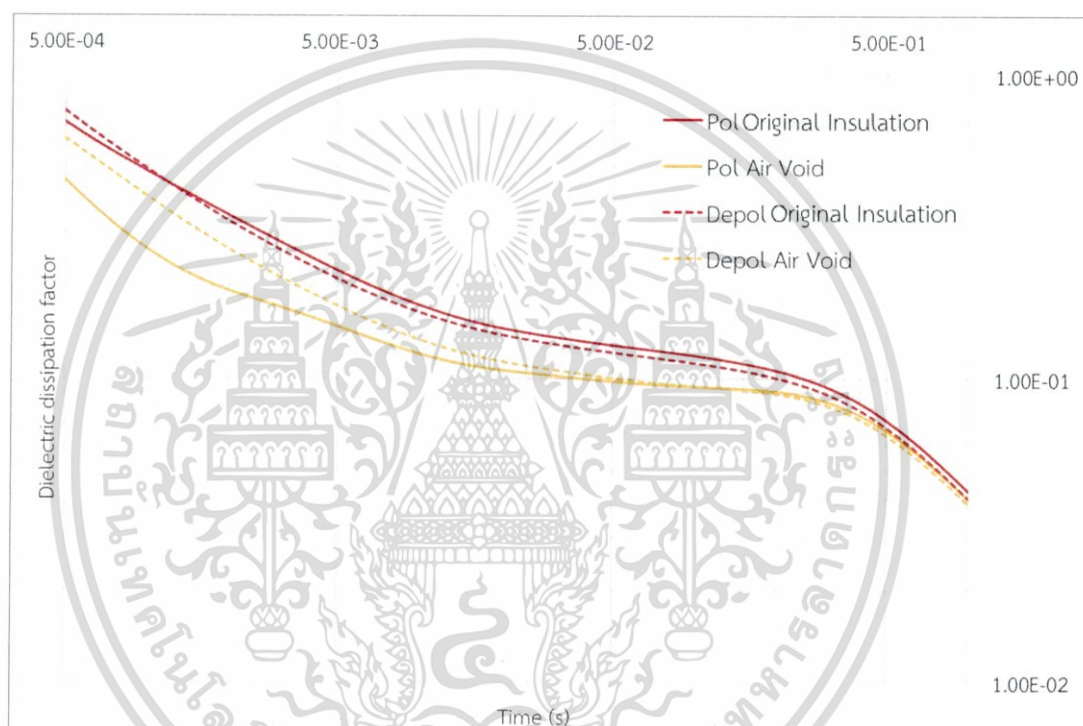
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.2 การวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกก่อนและหลังการจำลองโพรงอากาศภายในชั้นทดสอบ

เปรียบเทียบชั้นทดสอบก่อนและหลังการจำลองโพรงอากาศภายในชั้นทดสอบ

โดยก่อนการจำลองกรณี ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 18.4 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 49% ค่าของกระแสคงค้าง 7.8 pA ค่าความเก็บประจุ 358 pF

และหลังการจำลองกรณี ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 18.2 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 56% ค่าของกระแสคงค้าง 11.1 pA ค่าความเก็บประจุ 335 pF



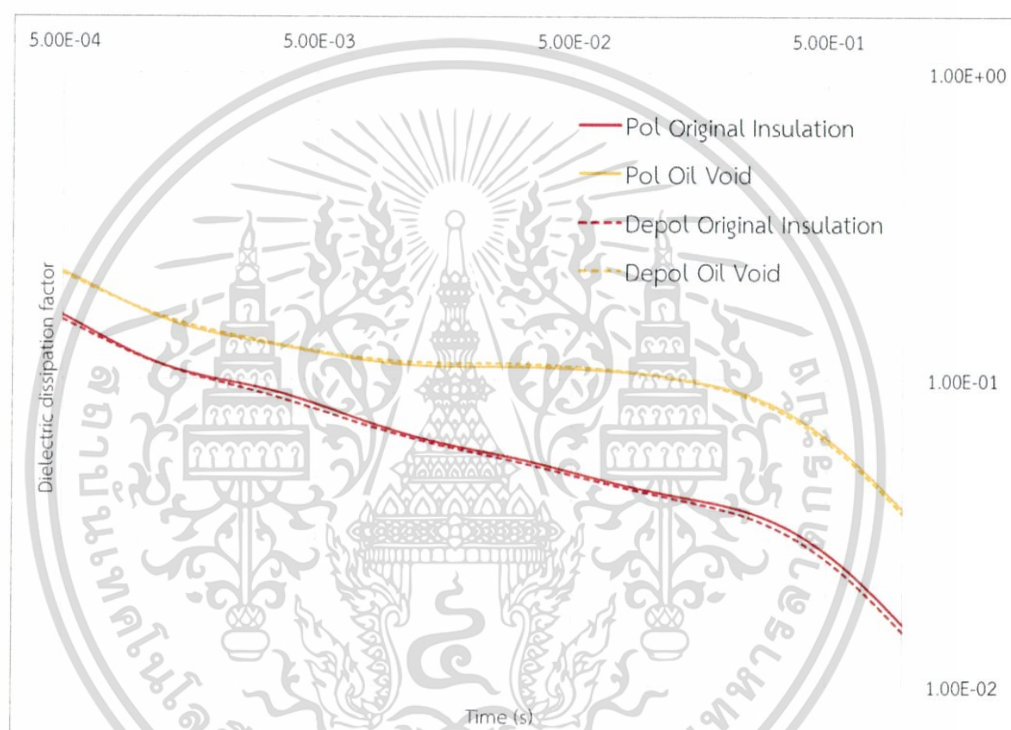
รูปที่ 5.39 กราฟแสดงแฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของก่อนและหลังการจำลองโพรงอากาศภายในชั้นทดสอบ

5.3.3 การวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกก่อนและหลังการจำลองโพรงน้ำมันฉนวนภายในชั้นทดสอบ

เปรียบเทียบชั้นทดสอบก่อนและหลังการจำลองโพรงน้ำมันฉนวนภายในชั้นทดสอบ

โดยก่อนการจำลองกรณี ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 17.3 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 60% ค่าของกระแสคงค้าง 7.3 pA ค่าความเก็บประจุ 363 pF

และหลังการจำลองกรณี ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 18.1 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 55% ค่าของกระแสคงค้าง 6.3 pA ค่าความเก็บประจุ 311 pF



รูปที่ 5.40 กราฟแสดงแฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของก่อนและหลังการจำลองโพรงน้ำมันฉนวนภายในชั้นทดสอบ

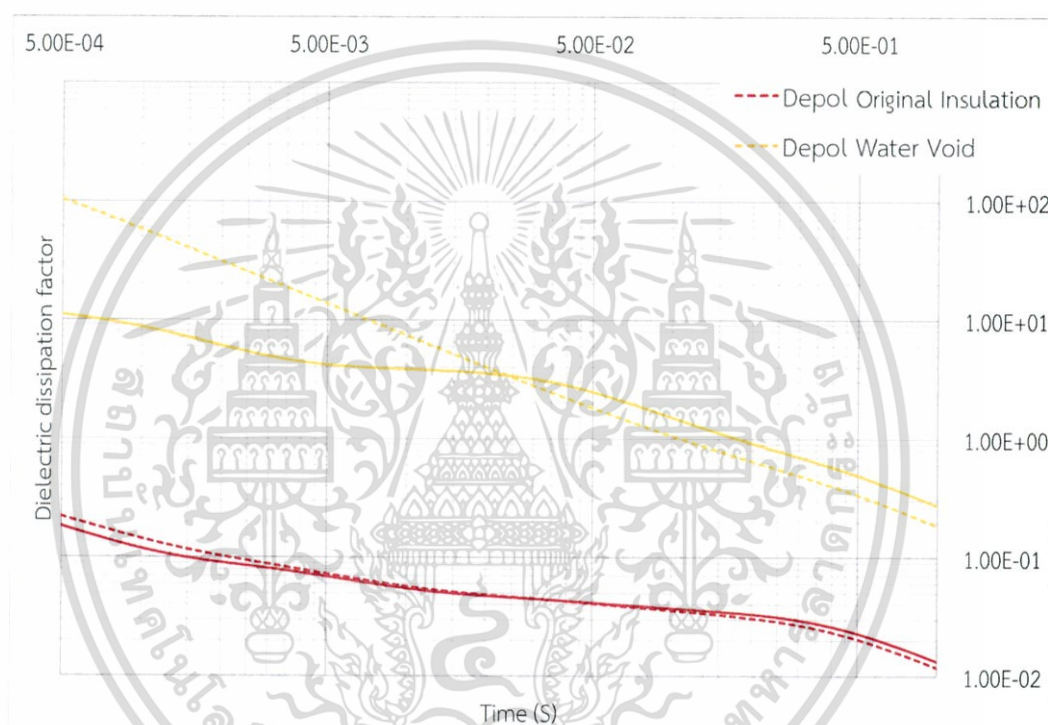
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.4 การวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกก่อนและหลังการจำลองโพรงน้ำภายในชั้นทดสอบ

เปรียบเทียบชั้นทดสอบก่อนและหลังการจำลองโพรงน้ำภายในชั้นทดสอบ

โดยก่อนการจำลองกรณี ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 18.1 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 57% ค่าของกระแสคงค้าง 14.8 pA ค่าความเก็บประจุ 364 pF

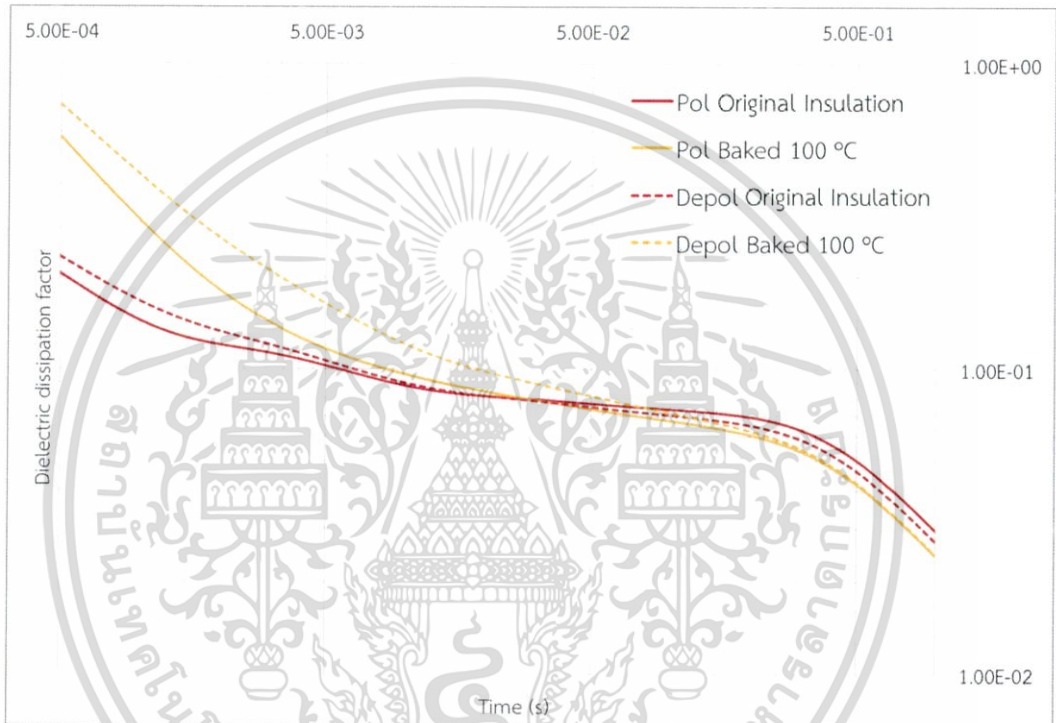
และหลังการจำลองกรณี ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 19.4 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 52% ค่าของกระแสคงค้าง 376 pA ค่าความเก็บประจุ 2440 pF



รูปที่ 5.41 กราฟแสดงแฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของก่อนและหลังการจำลองโพรงน้ำภายในชั้นทดสอบ

5.3.5 การวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 100 °C

เปรียบเทียบขึ้นทดสอบก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยก่อนการจำลองกรณี ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 17.4 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 56% ค่าของกระแสคงค้าง 5.7 pA ค่าความเก็บประจุ 338 pF และหลังการจำลองกรณี ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 18.9 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 57% ค่าของกระแสคงค้าง 3.8 pA ค่าความเก็บประจุ 330 pF

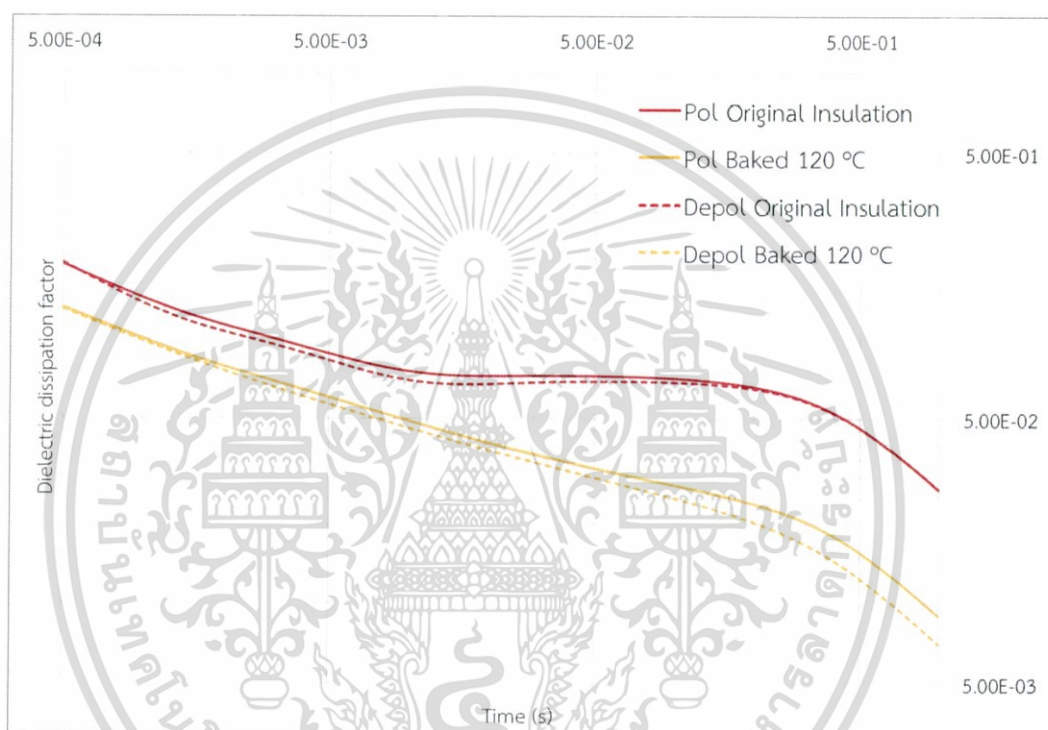


รูปที่ 5.42 กราฟแสดงแฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.6 การวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 120 °C

เปรียบเทียบขึ้นทดสอบก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยก่อนการจำลองกรณี ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 17 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 55% ค่าของกระแสคงค้าง 15.0 pA ค่าความเก็บประจุ 340 pF และหลังการจำลองกรณี ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 20 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 59% ค่าของกระแสคงค้าง 8.8 pA ค่าความเก็บประจุ 335 pF

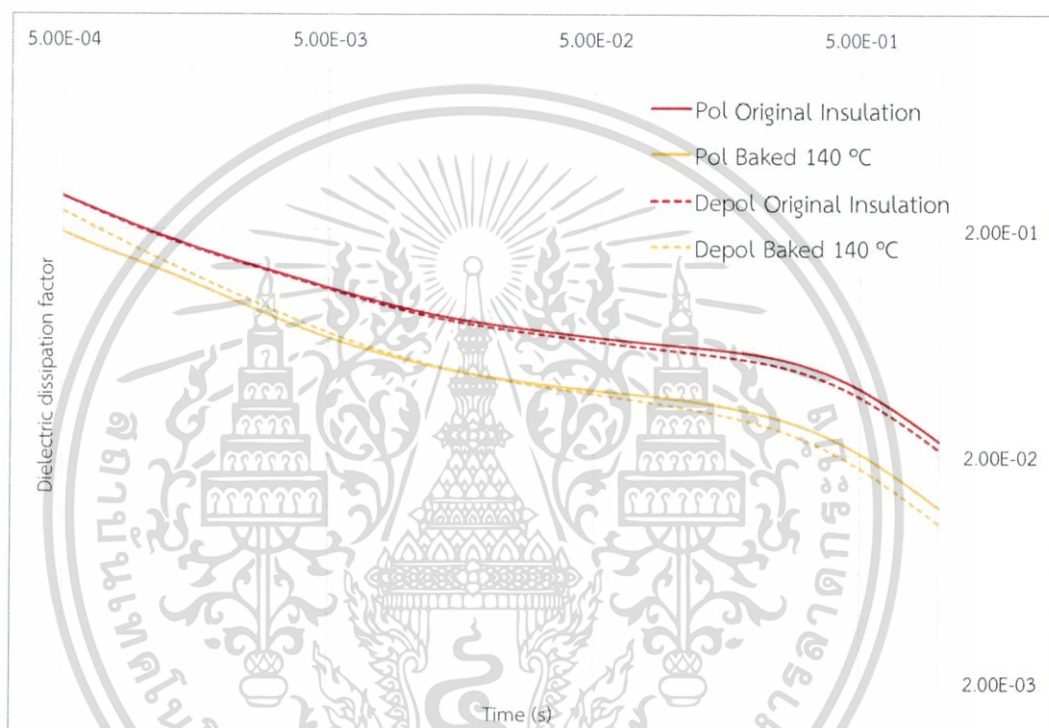


รูปที่ 5.43 กราฟแสดงแฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.7 การวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 140 °C

เปรียบเทียบขึ้นทดสอบก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยก่อนการจำลองกรณี ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 17.1 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 55% ค่าของกระแสคงค้าง 10.9 pA ค่าความเก็บประจุ 341 pF และหลังการจำลองกรณี ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 18.5 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 57% ค่าของกระแสคงค้าง 9.0 pA ค่าความเก็บประจุ 255 pF



รูปที่ 5.44 กราฟแสดงแฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

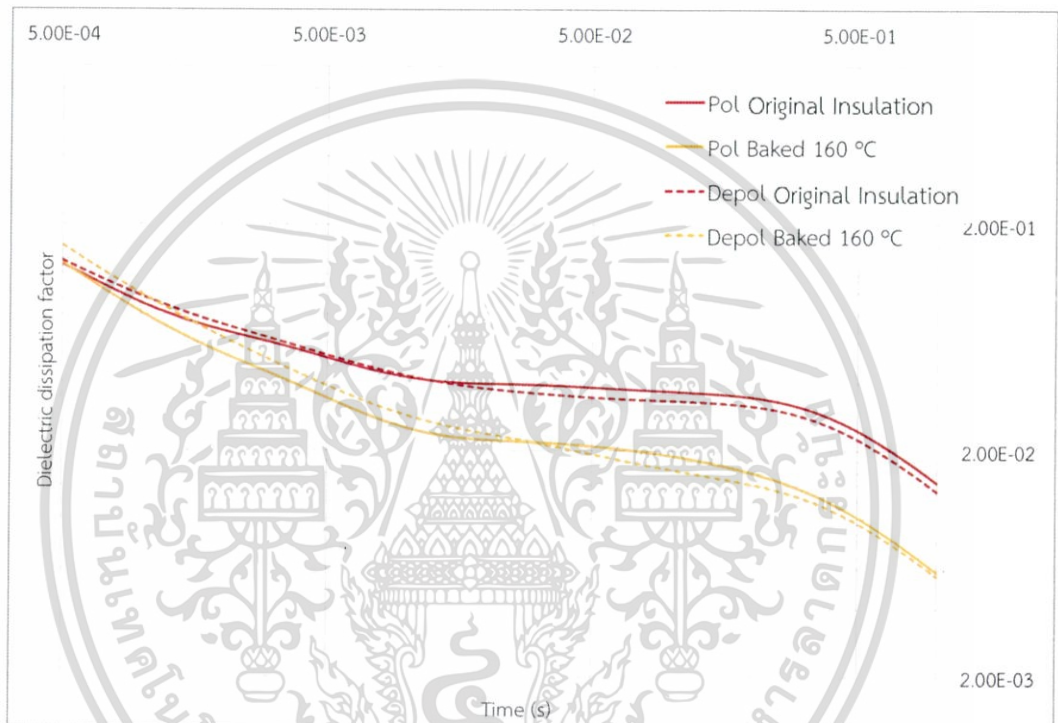
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.8 การวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 160 °C

เปรียบเทียบขึ้นทดสอบก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

โดยก่อนการจำลองกรณี ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 17.7 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 58% ค่าของกระแสคงค้าง 9.4 pA ค่าความเก็บประจุ 339 pF

และหลังการจำลองกรณี ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 20.5 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 61% ค่าของกระแสคงค้าง -16.1 pA ค่าความเก็บประจุ 224 pF



รูปที่ 5.45 กราฟแสดงแฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

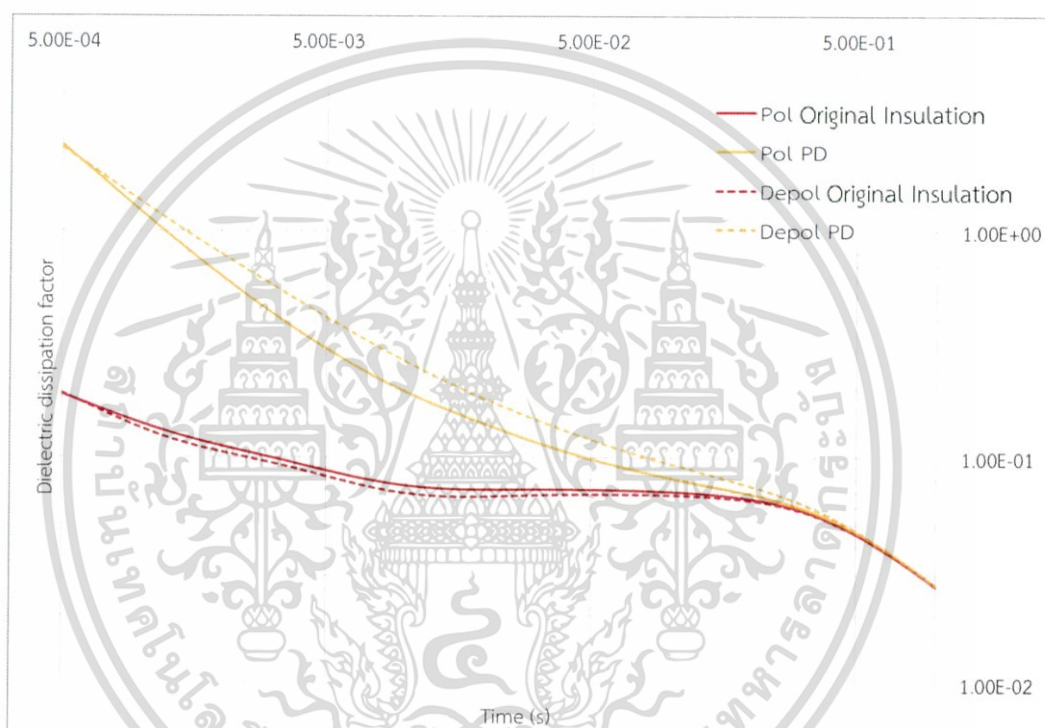
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.9 การวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของชั้นทดสอบที่ไม่เกิด PD และชั้นทดสอบที่มีความเสื่อมเนื่องจาก PD

เปรียบเทียบชั้นทดสอบที่ไม่เกิด PD และชั้นทดสอบที่มีความเสื่อมเนื่องจาก PD

โดยชั้นทดสอบที่ไม่เกิด PD ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 17 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 55% ค่าของกระแสคงค้าง 15.0 pA ค่าความเก็บประจุ 340 pF

และชั้นทดสอบที่มีความเสื่อมเนื่องจาก PD ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 18.7 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 57% ค่าของกระแสคงค้าง 16.9 pA ค่าความเก็บประจุ 354 pF



รูปที่ 5.46 กราฟแสดงแฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของชั้นทดสอบที่ไม่เกิด PD และชั้นทดสอบที่มีความเสื่อมเนื่องจาก PD

5.4 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้า (i_{con})

สำหรับในหัวข้อนี้ จะทำการเปรียบเทียบค่ากระแสการนำไฟฟ้าของชั้นทดสอบทั้งก่อนการจำลองกรณีและหลังจากการจำลองกรณี ทั้งวงจรที่ต่ออาร์ดริงและไม่ต่ออาร์ดริงของทุกการทดสอบ โดยจะเลือกมา 1 ครั้งจากการทดสอบ 3 ครั้ง ที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน

การแสการนำไฟฟ้าหาได้จากสมการที่ 2.17
$$i_{con} = i_{pot} - i_{depol}$$

5.4.1 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการจำลองรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้างของชั้นทดสอบแบบวงจรที่ต่ออาร์ดริงและไม่มีการ์ดริง

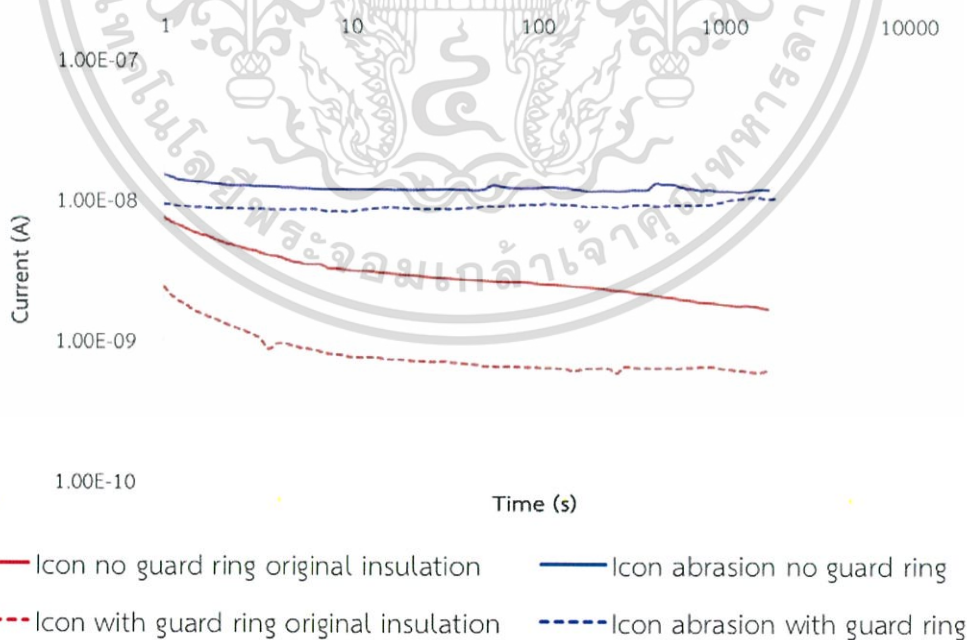
เปรียบเทียบชั้นทดสอบก่อนและหลังจำลองการเกิดเสียดสีที่ผิวด้านข้างของชั้นทดสอบแบบวงจรที่ต่ออาร์ดริงและไม่มีการ์ดริง

โดยก่อนการจำลองกรณีแบบวงจรที่ไม่มีการ์ดริง ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 18 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 45% ค่าของกระแสคงค้าง 5.1 pA ค่าความเก็บประจุ 338 pF

ก่อนการจำลองกรณีแบบวงจรที่ต่ออาร์ดริง ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 17.5 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 61% ค่าของกระแสคงค้าง 8.6 pA ค่าความเก็บประจุ 331 pF

หลังการจำลองกรณีแบบวงจรที่ไม่มีการ์ดริง ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 17.8 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 59% ค่าของกระแสคงค้าง 4.6 pA ค่าความเก็บประจุ 343 pF

หลังการจำลองกรณีแบบวงจรที่ต่ออาร์ดริง ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 18.6 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 63% ค่าของกระแสคงค้าง 15.8 pA ค่าความเก็บประจุ 338 pF



รูปที่ 5.49 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการจำลองรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้างของชั้นทดสอบแบบวงจรที่ต่ออาร์ดริงและไม่มีการ์ดริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.2 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการจำลองโพรงอากาศภายในชั้นทดสอบแบบวงจรถื่อการ์ดริงและไม่มีการ์ดริง

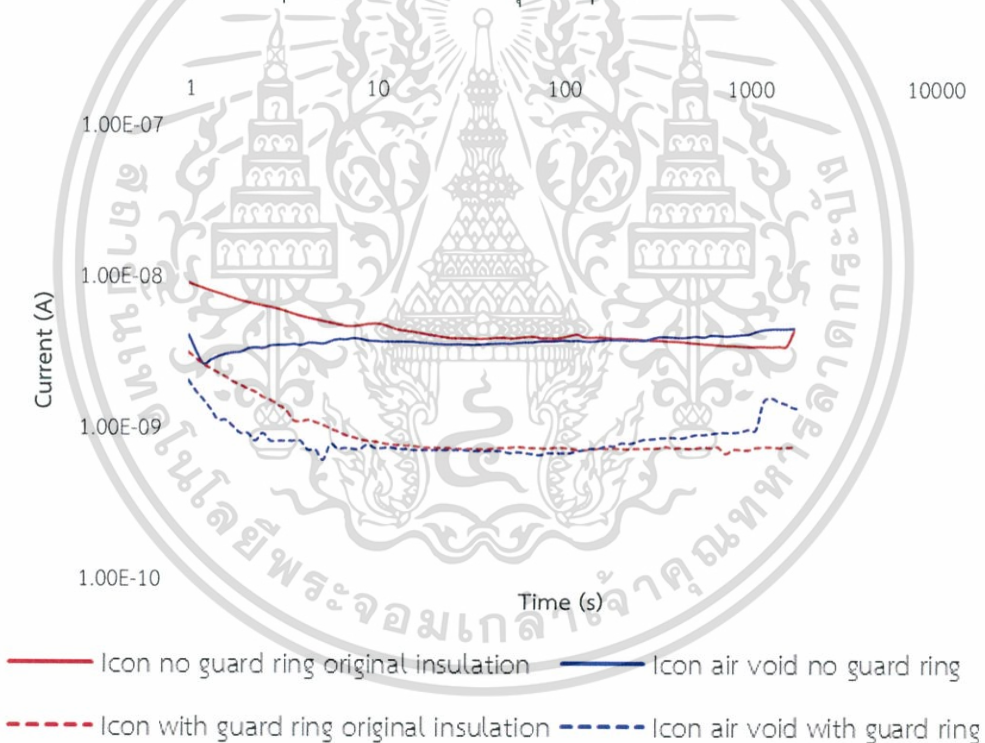
เปรียบเทียบชั้นทดสอบก่อนและหลังจำลองการเกิดโพรงอากาศภายในของชั้นทดสอบแบบวงจรถื่อการ์ดริงและไม่มีการ์ดริง

โดยก่อนการจำลองกรณีแบบวงจรถื่อการ์ดริง ชั้นทดสอบมีอุณหภูมิ 19.2 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 45% ค่าของกระแสคงค้าง 7.9 pA ค่าความเก็บประจุ 354 pF

ก่อนการจำลองกรณีแบบวงจรถื่อการ์ดริง ชั้นทดสอบมีอุณหภูมิ 20.9 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 47% ค่าของกระแสคงค้าง 9.4 pA ค่าความเก็บประจุ 354 pF

หลังการจำลองกรณีแบบวงจรถื่อการ์ดริง ชั้นทดสอบมีอุณหภูมิ 17.7 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 57% ค่าของกระแสคงค้าง 6.5 pA ค่าความเก็บประจุ 338 pF

หลังการจำลองกรณีแบบวงจรถื่อการ์ดริง ชั้นทดสอบมีอุณหภูมิ 18.2 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 56% ค่าของกระแสคงค้าง 11.1 pA ค่าความเก็บประจุ 335 pF



รูปที่ 5.50 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการจำลองการเกิดโพรงอากาศภายในชั้นทดสอบแบบวงจรถื่อการ์ดริงและไม่มีการ์ดริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.3 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการจำลองโพรงน้ำมันฉนวนภายในชั้นทดสอบแบบวงจรที่ต่อการ์ดริงและไม่มีการ์ดริง

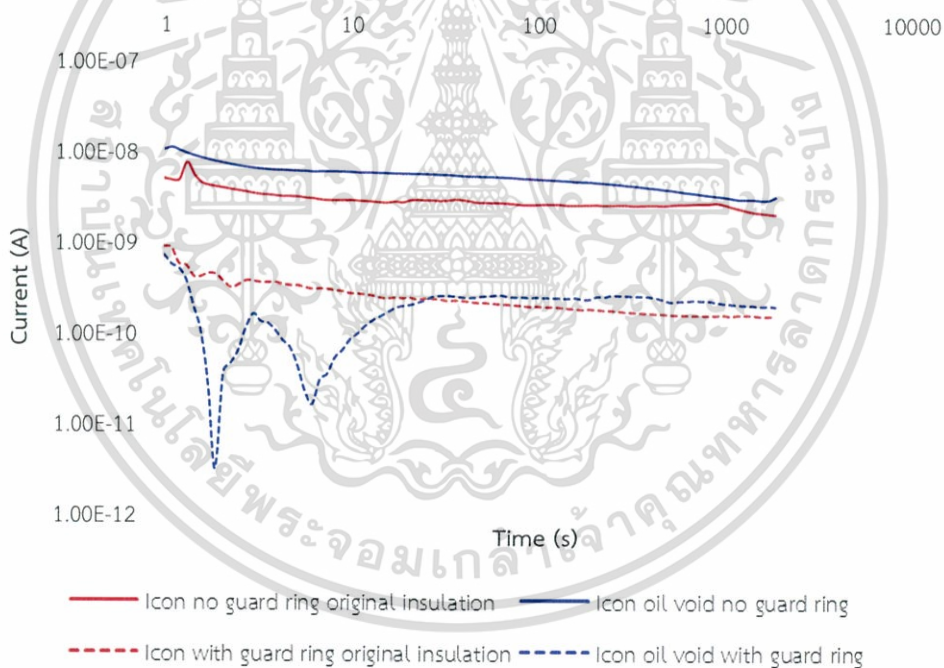
เปรียบเทียบชั้นทดสอบก่อนและจำลองการเกิดโพรงน้ำมันฉนวนภายในชั้นทดสอบแบบวงจรที่ต่อการ์ดริงและไม่มีการ์ดริง

โดยก่อนการจำลองกรณีแบบวงจรที่ไม่มีการ์ดริง ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 17.3 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 60% ค่าของกระแสคงค้าง 7.3 pA ค่าความเก็บประจุ 363 pF

ก่อนการจำลองกรณีแบบวงจรที่ต่อการ์ดริง ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 18.2 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 44% ค่าของกระแสคงค้าง 12.7 pA ค่าความเก็บประจุ 367 pF

หลังการจำลองกรณีแบบวงจรที่ไม่มีการ์ดริง ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 20.5 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 56% ค่าของกระแสคงค้าง 6.0 pA ค่าความเก็บประจุ 319 pF

หลังการจำลองกรณีแบบวงจรที่ต่อการ์ดริง ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 18.1 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 56% ค่าของกระแสคงค้าง 6.3 pA ค่าความเก็บประจุ 311 pF



รูปที่ 5.52 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการจำลองการเกิดโพรงน้ำมันฉนวนภายในชั้นทดสอบแบบวงจรที่ต่อการ์ดริงและไม่มีการ์ดริง

5.4.4 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการจำลองโพรงน้ำภายในชั้นทดสอบแบบวงจรถูกต่อ การ์ดจริงและไม่มีการ์ดจริง

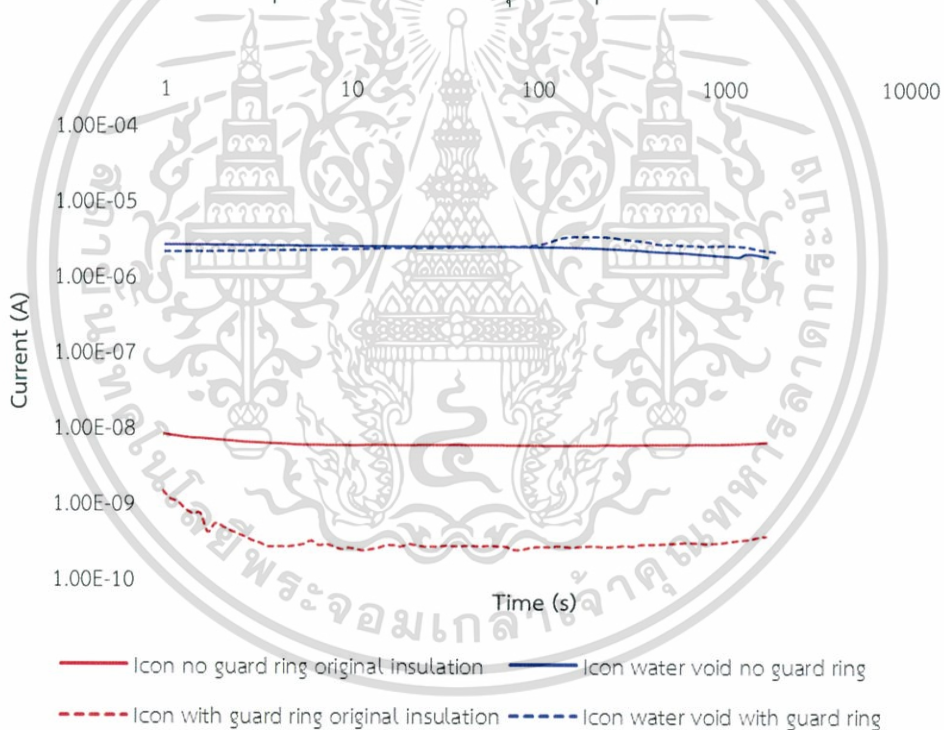
เปรียบเทียบชั้นทดสอบก่อนและหลังจำลองการเกิดโพรงน้ำภายในของชั้นทดสอบแบบวงจรถูกต่อ
การ์ดจริงและไม่มีการ์ดจริง

โดยก่อนการจำลองกรณีแบบวงจรถูกต่อไม่มีการ์ดจริง ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 18.1 °C ค่าความชื้น
สัมพัทธ์ 57% ค่าของกระแสคงค้าง 14.8 pA ค่าความเก็บประจุ 364 pF

ก่อนการจำลองกรณีแบบวงจรถูกต่อการ์ดจริง ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 17.5 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์
48% ค่าของกระแสคงค้าง 6.4 pA ค่าความเก็บประจุ 365 pF

หลังการจำลองกรณีแบบวงจรถูกต่อไม่มีการ์ดจริง ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 17.6 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์
60% ค่าของกระแสคงค้าง -227.3 pA ค่าความเก็บประจุ 2284 pF

หลังการจำลองกรณีแบบวงจรถูกต่อการ์ดจริง ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 18.4 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์
58% ค่าของกระแสคงค้าง 569.0 pA ค่าความเก็บประจุ 2321 pF



รูปที่ 5.33 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการจำลองการเกิดโพรงน้ำภายในชั้นทดสอบแบบ
วงจรถูกต่อการ์ดจริงและไม่มีการ์ดจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.5 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 100 °C แบบวงจรถูกต่อการ์ดจริง และไม่มีการ์ดจริง

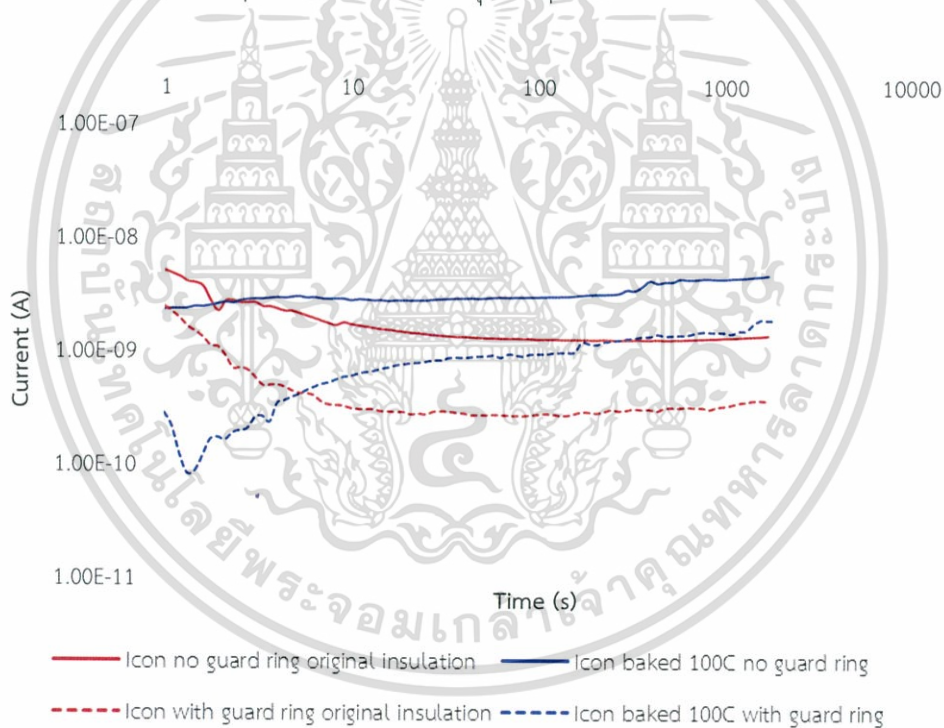
เปรียบเทียบขึ้นทดสอบก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 100 °C แบบวงจรถูกต่อการ์ดจริงและไม่มีการ์ดจริง

โดยก่อนการจำลองกรณีแบบวงจรถูกต่อการ์ดจริง ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 17.4 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 56% ค่าของกระแสคงค้าง 5.7 pA ค่าความเก็บประจุ 338 pF

ก่อนการจำลองกรณีแบบวงจรถูกต่อการ์ดจริง ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 20.6 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 41% ค่าของกระแสคงค้าง 7.0 pA ค่าความเก็บประจุ 345 pF

หลังการจำลองกรณีแบบวงจรถูกต่อการ์ดจริง ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 17.9 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 59% ค่าของกระแสคงค้าง 6.3 pA ค่าความเก็บประจุ 336 pF

หลังการจำลองกรณีแบบวงจรถูกต่อการ์ดจริง ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 18.9 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 57% ค่าของกระแสคงค้าง 3.8 pA ค่าความเก็บประจุ 330 pF



รูปที่ 5.54 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 100 °C แบบวงจรถูกต่อการ์ดจริง และไม่มีการ์ดจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.6 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 120 °C แบบวงจรถูกต่อการ์ดรีจและไม่มีการ์ดรีจ

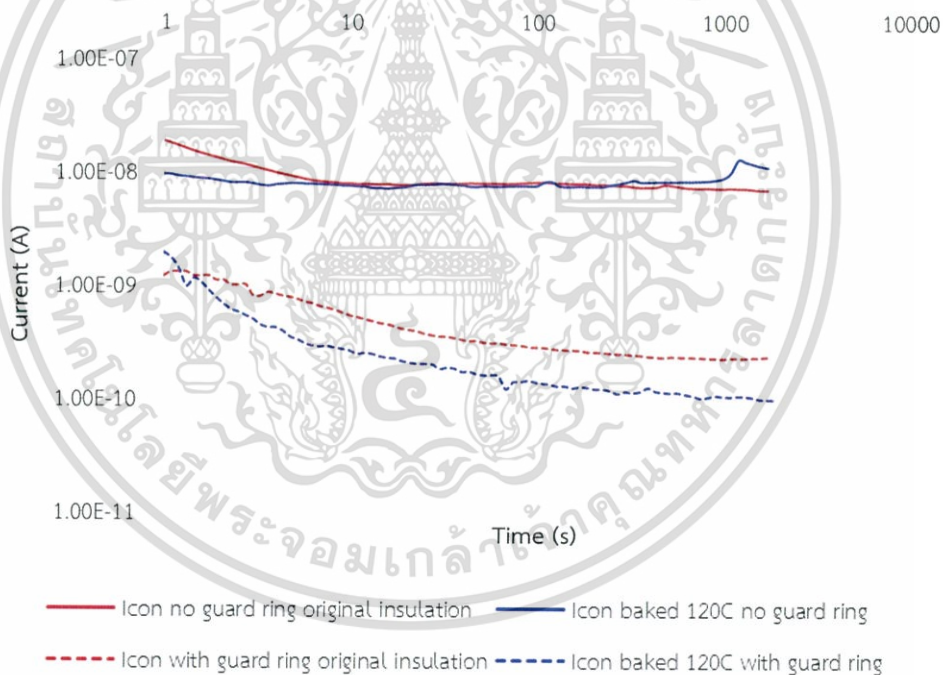
เปรียบเทียบขึ้นทดสอบก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 120 °C แบบวงจรถูกต่อการ์ดรีจและไม่มีการ์ดรีจ

โดยก่อนการจำลองกรณีแบบวงจรถูกต่อการ์ดรีจ ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 17.0 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 55% ค่าของกระแสคงค้าง 15.0 pA ค่าความเก็บประจุ 340 pF

ก่อนการจำลองกรณีแบบวงจรถูกต่อการ์ดรีจ ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 21 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 50% ค่าของกระแสคงค้าง 7.4 pA ค่าความเก็บประจุ 356 pF

หลังการจำลองกรณีแบบวงจรถูกต่อการ์ดรีจ ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 18 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 59% ค่าของกระแสคงค้าง 5.9 pA ค่าความเก็บประจุ 352 pF

หลังการจำลองกรณีแบบวงจรถูกต่อการ์ดรีจ ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 17.8 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 56% ค่าของกระแสคงค้าง 8.3 pA ค่าความเก็บประจุ 342 pF



รูปที่ 5.55 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 120 °C แบบวงจรถูกต่อการ์ดรีจและไม่มีการ์ดรีจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.7 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 140 °C แบบวงจรถูกต่อการ์ดรีจและไม่มีการ์ดรีจ

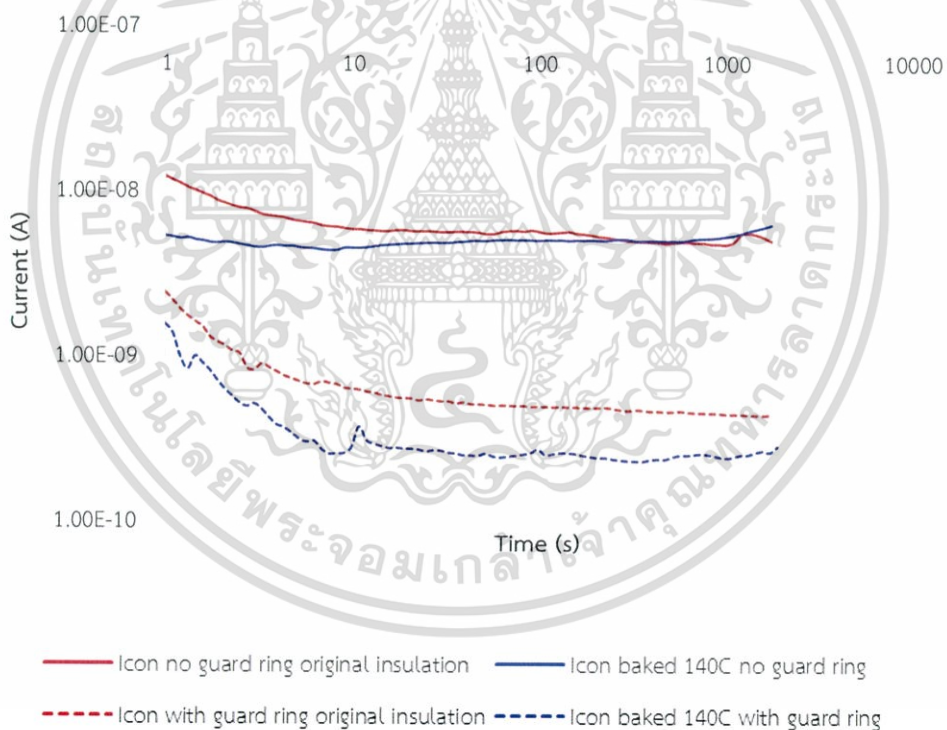
เปรียบเทียบขึ้นทดสอบก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 140 °C แบบวงจรถูกต่อการ์ดรีจและไม่มีการ์ดรีจ

โดยก่อนการจำลองกรณีแบบวงจรถูกต่อการ์ดรีจ ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 17.1 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 55% ค่าของกระแสคงค้าง 10.9 pA ค่าความเก็บประจุ 341 pF

ก่อนการจำลองกรณีแบบวงจรถูกต่อการ์ดรีจ ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 19.5 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 50% ค่าของกระแสคงค้าง 7.4 pA ค่าความเก็บประจุ 347 pF

หลังการจำลองกรณีแบบวงจรถูกต่อการ์ดรีจ ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 18 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 59% ค่าของกระแสคงค้าง 5.5 pA ค่าความเก็บประจุ 269 pF

หลังการจำลองกรณีแบบวงจรถูกต่อการ์ดรีจ ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 18.5 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 57% ค่าของกระแสคงค้าง 9.0 pA ค่าความเก็บประจุ 255 pF



รูปที่ 5.56 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 140 °C แบบวงจรถูกต่อการ์ดรีจและไม่มีการ์ดรีจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.8 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 160 °C แบบวงจรถูกต่อการ์ดจริง และไม่มีการ์ดจริง

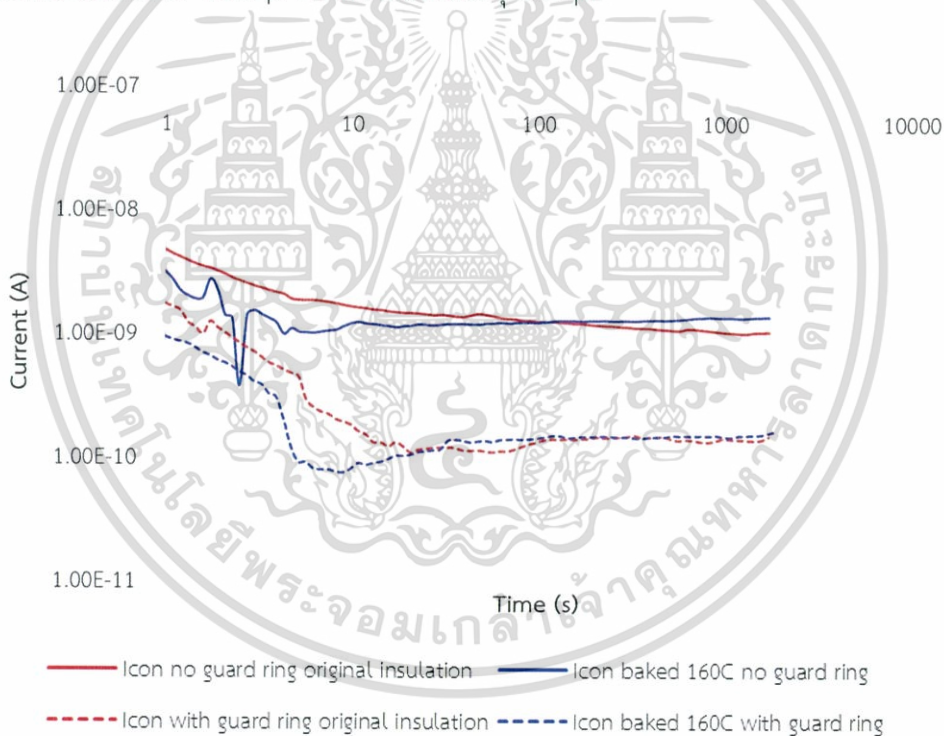
เปรียบเทียบขึ้นทดสอบก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 160 °C แบบวงจรถูกต่อการ์ดจริงและไม่มีการ์ดจริง

โดยก่อนการจำลองกรณีแบบวงจรถูกต่อการ์ดจริง ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 17.7 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 58% ค่าของกระแสคงค้าง 9.4 pA ค่าความเก็บประจุ 339 pF

ก่อนการจำลองกรณีแบบวงจรถูกต่อการ์ดจริง ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 20.4 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 47% ค่าของกระแสคงค้าง 7.2 pA ค่าความเก็บประจุ 352 pF

หลังการจำลองกรณีแบบวงจรถูกต่อการ์ดจริง ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 18.1 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 55% ค่าของกระแสคงค้าง 6.7 pA ค่าความเก็บประจุ 236 pF

หลังการจำลองกรณีแบบวงจรถูกต่อการ์ดจริง ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 20.5 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 61% ค่าของกระแสคงค้าง -16.1 pA ค่าความเก็บประจุ 224 pF



รูปที่ 5.57 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 160 °C แบบวงจรถูกต่อการ์ดจริง และไม่มีการ์ดจริง

5.4.9 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าของชั้นทดสอบที่ไม่เกิด PD และชั้นทดสอบที่มีความเสื่อมเนื่องจาก PD แบบวงจรที่ต่อการ์ดริงและไม่มีการ์ดริง

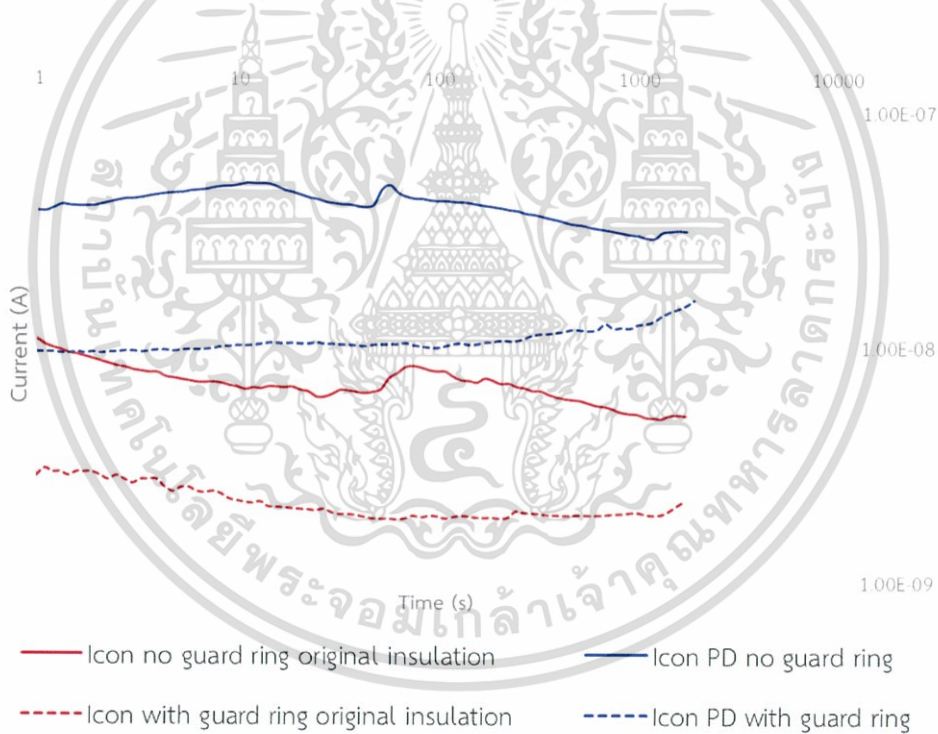
เปรียบเทียบชั้นทดสอบที่ไม่เกิด PD และชั้นทดสอบที่มีความเสื่อมเนื่องจาก PD แบบวงจรที่ต่อการ์ดริงและไม่มีการ์ดริง

โดยก่อนการจำลองกรณีแบบวงจรที่ไม่มีการ์ดริง ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 20.8 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 52% ค่าของกระแสคงค้าง 6.0 pA ค่าความเก็บประจุ 376 pF

ก่อนการจำลองกรณีแบบวงจรที่ต่อการ์ดริง ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 18.2 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 49% ค่าของกระแสคงค้าง 5.6 pA ค่าความเก็บประจุ 370 pF

หลังการจำลองกรณีแบบวงจรที่ไม่มีการ์ดริง ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 18.6 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 61% ค่าของกระแสคงค้าง 2.8 pA ค่าความเก็บประจุ 358 pF

หลังการจำลองกรณีแบบวงจรที่ต่อการ์ดริง ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 18.6 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 62% ค่าของกระแสคงค้าง 69.6 pA ค่าความเก็บประจุ 358 pF



รูปที่ 5.58 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าของชั้นทดสอบที่ไม่เกิด PD และชั้นทดสอบที่มีความเสื่อมเนื่องจาก PD แบบวงจรที่ต่อการ์ดริงและไม่มีการ์ดริง

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองที่ 5.1 การทดสอบวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันโดยวงจรที่มี การ์ดริงและไม่มีการ์ดริงพบว่าค่ากระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของวงจรที่ต่อการ์ดริงจะมีค่า ต่ำกว่าค่ากระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของกรณีที่วัดแบบไม่ต่อการ์ดริง เนื่องจากวงจรวัด กระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของวงจรที่ต่อการ์ดริงนั้นจะทำให้กระแสความนำไฟฟ้าลดลง เพราะกำจัดกระแสรั่วไหลตามผิวฉนวนลง

จากผลการทดลองที่ 5.2 การทดสอบวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของชั้น ทดสอบที่จำลองกรณีเสื่อมสภาพพบว่า

- กรณีที่ชั้นทดสอบเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน ในการทดลองอบขึ้นทดสอบ 4 ชั้น ที่อุณหภูมิ 100°C, 120°C, 140°C และ 160°C ตามลำดับ พบว่าค่ากระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์-เซชันที่วัดได้จะลดลงจากก่อนอบ และยังเมื่อนำชั้นทดสอบที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิสูงขึ้นพบว่า ค่ากระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันจะต่ำลงตามอุณหภูมิที่อบให้ความร้อน ตามลำดับ
- กรณีชั้นทดสอบเสื่อมเนื่องจากผลของการเกิด PD ในชั้นทดสอบ จากการทดลองพบว่าค่ากระแส โพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของชั้นทดสอบที่มีรอย PD จะต่ำกว่าชั้นทดสอบที่ไม่มีรอย PD
- กรณีชั้นทดสอบเสื่อมเนื่องจากผลของการการเกิดรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้างของชั้นทดสอบ จาก การทดลองพบว่าค่ากระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของชั้นทดสอบที่มีรอยเสียดสีที่ผิว ด้านข้างของชั้นทดสอบจะต่ำกว่าชั้นทดสอบที่ไม่มีรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้างของชั้นทดสอบ
- กรณีชั้นทดสอบเสื่อมเนื่องจากเกิดโพรงอากาศภายในชั้นทดสอบ จากการทดลองพบว่าค่ากระแส โพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของชั้นทดสอบที่มีโพรงอากาศภายในชั้นทดสอบจะต่ำกว่าชั้น ทดสอบที่ไม่มีโพรงอากาศภายในชั้นทดสอบ
- กรณีชั้นทดสอบเสื่อมเนื่องจากเกิดโพรงน้ำมันฉนวนภายในชั้นทดสอบ จากการทดลองพบว่า ค่ากระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของชั้นทดสอบที่มีโพรงน้ำมันฉนวนภายในชั้น ทดสอบจะสูงกว่าชั้นทดสอบที่ไม่มีโพรงน้ำมันฉนวนภายในชั้นทดสอบ
- กรณีชั้นทดสอบเสื่อมเนื่องจากเกิดโพรงน้ำภายในชั้นทดสอบ จากการทดลองพบว่าค่ากระแส โพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชันของชั้นทดสอบที่มีโพรงน้ำภายในชั้นทดสอบจะสูงกว่าชั้น ทดสอบที่ไม่มีโพรงน้ำภายในชั้นทดสอบ

จากการทดลองที่ 5.3 การวิเคราะห์แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของชั้นทดสอบที่จำลอง กรณีเสื่อมสภาพพบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กรณีขึ้นทดสอบเสื่อมเนื่องจากผลของการการเกิดรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้างของขึ้นทดสอบ จากการทดลองพบว่าแพคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ได้จากการคำนวณกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของขึ้นทดสอบที่มีรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้างของขึ้นทดสอบจะสูงกว่าขึ้นทดสอบที่ไม่มีรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้างของขึ้นทดสอบ
- กรณีขึ้นทดสอบเสื่อมเนื่องจากเกิดโพรงอากาศภายในขึ้นทดสอบ จากการทดลองพบว่าแพคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ได้จากการคำนวณกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของขึ้นทดสอบที่มีโพรงอากาศภายในขึ้นทดสอบจะต่ำกว่าขึ้นทดสอบที่ไม่มีโพรงอากาศภายในขึ้นทดสอบ
- กรณีขึ้นทดสอบเสื่อมเนื่องจากเกิดโพรงน้ำมันภายในขึ้นทดสอบ จากการทดลองพบว่าแพคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ได้จากการคำนวณกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของขึ้นทดสอบที่มีโพรงน้ำมันภายในขึ้นทดสอบจะสูงกว่าขึ้นทดสอบที่ไม่มีโพรงน้ำมันภายในขึ้นทดสอบ
- กรณีขึ้นทดสอบเสื่อมเนื่องจากเกิดโพรงน้ำภายในขึ้นทดสอบ จากการทดลองพบว่าแพคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ได้จากการคำนวณกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของขึ้นทดสอบที่มีโพรงน้ำภายในขึ้นทดสอบจะสูงกว่าขึ้นทดสอบที่ไม่มีโพรงน้ำภายในขึ้นทดสอบ
- กรณีที่ขึ้นทดสอบเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน ในการทดลองอบขึ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C พบว่าแพคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันที่วัดได้จะมีค่าสูงกว่าในช่วงก่อนเวลา $3.00\text{E-}02$ วินาที และจะลดลงจนมีค่าใกล้เคียงกับขึ้นทดสอบที่ไม่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 100°C ในช่วงหลังเวลา $3.00\text{E-}02$ วินาที
- กรณีที่ขึ้นทดสอบเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน ในการทดลองอบขึ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 120°C พบว่าแพคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันที่วัดได้จะมีค่าต่ำกว่าขึ้นทดสอบที่ไม่ผ่านการอบ
- กรณีที่ขึ้นทดสอบเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน ในการทดลองอบขึ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 140°C พบว่าแพคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันที่วัดได้จะมีค่าต่ำกว่าขึ้นทดสอบที่ไม่ผ่านการอบ
- กรณีที่ขึ้นทดสอบเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน ในการทดลองอบขึ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 160°C พบว่าแพคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันที่วัดได้จะมีค่าใกล้เคียงกับขึ้นทดสอบที่ไม่ผ่านการอบเพียงเล็กน้อยในช่วงก่อนเวลา $3.00\text{E-}02$ วินาที และจะลดลงจนมีค่าต่ำในช่วงหลังเวลา $3.00\text{E-}02$ วินาที
- กรณีขึ้นทดสอบเสื่อมเนื่องจากผลของการเกิด PD ในขึ้นทดสอบ จากการทดลองพบว่าแพคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของขึ้นทดสอบที่มีรอย PD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะสูงกว่าขึ้นทดสอบที่ไม่มีรอย PD อย่างมากและจะลดลงจนมีค่าใกล้เคียงกับขึ้นทดสอบที่ไม่มีรอย PD ในช่วงหลังเวลา 5.00E-01 วินาที

จากการทดลองที่ 5.4 การวิเคราะห์ค่าการนำกระแสการนำไฟฟ้าของขึ้นทดสอบทั้งก่อนการจำลองกรณีและหลังจากการจำลองกรณี ทั้งวงจรที่ต่ออาร์ดริงและไม่ต่ออาร์ดริงของทุกการทดสอบพบว่า

- กรณีขึ้นทดสอบเสื่อมเนื่องจากผลของการการเกิดรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้างของขึ้นทดสอบ จากการทดลองพบว่าค่าการนำกระแสไฟฟ้าของขึ้นทดสอบหลังจำลอง รอยเสียดสีที่ผิวด้านข้างของวงจรที่ไม่ต่ออาร์ดริงและวงจรที่ต่ออาร์ดริงมีค่าสูงกว่าค่าการนำกระแสไฟฟ้าของขึ้นทดสอบก่อนจำลองรอยเสียดสีที่ผิวด้านข้างของวงจรที่ไม่ต่ออาร์ดริงและวงจรที่ต่ออาร์ดริง ตามลำดับ
- กรณีขึ้นทดสอบเสื่อมเนื่องจากเกิดโพรงอากาศภายในขึ้นทดสอบ จากการทดลองพบว่าค่าการนำกระแสไฟฟ้าของขึ้นทดสอบก่อนจำลองโพรงอากาศและหลังจำลองโพรงอากาศภายในขึ้นทดสอบแบบวงจรที่ไม่ต่ออาร์ดริงมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่เดียวกันจะมีค่าสูงกว่าค่าการนำกระแสไฟฟ้าของขึ้นทดสอบก่อนจำลองโพรงอากาศและหลังจำลองโพรงอากาศภายในขึ้นทดสอบแบบวงจรที่ต่ออาร์ดริงที่มีค่าใกล้เคียงกัน
- กรณีขึ้นทดสอบเสื่อมเนื่องจากเกิดโพรงน้ำมันฉนวนภายในขึ้นทดสอบ จากการทดลองพบว่าค่าการนำกระแสไฟฟ้าของขึ้นทดสอบหลังจำลองโพรงน้ำมันฉนวนของวงจรที่ไม่ต่ออาร์ดริงและก่อนจำลองโพรงน้ำมันฉนวนภายในขึ้นทดสอบแบบวงจรที่ต่ออาร์ดริงมีค่าสูงกว่าค่าการนำกระแสไฟฟ้าของขึ้นทดสอบก่อนจำลองโพรงน้ำมันฉนวนแบบวงจรที่ต่ออาร์ดริง ในขณะเดียวกันค่าการนำกระแสไฟฟ้าหลังจำลองโพรงน้ำมันฉนวนภายในขึ้นทดสอบแบบวงจรที่ต่ออาร์ดริง มีค่าลดลงและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงก่อนเวลา 20 วินาทีและเพิ่มสูงขึ้นจนมีค่าสูงกว่าค่าการนำกระแสไฟฟ้าก่อนจำลองโพรงน้ำมันฉนวนภายในขึ้นทดสอบแบบวงจรที่ต่ออาร์ดริงเพียงเล็กน้อยในช่วงหลังเวลา 20 วินาที
- กรณีขึ้นทดสอบเสื่อมเนื่องจากเกิดโพรงน้ำภายในขึ้นทดสอบ จากการทดลองพบว่าค่าการนำกระแสไฟฟ้าของขึ้นทดสอบหลังจำลองโพรงอากาศภายในขึ้นทดสอบแบบวงจรที่ไม่ต่ออาร์ดริงและวงจรที่ต่ออาร์ดริง จะมีค่าใกล้เคียงกันแต่จะมีค่าสูงกว่าค่าการนำกระแสไฟฟ้าของขึ้นทดสอบก่อนจำลองโพรงน้ำภายในขึ้นทดสอบแบบวงจรที่ไม่ต่ออาร์ดริงและแบบวงจรที่ต่ออาร์ดริงตามลำดับ
- กรณีที่ขึ้นทดสอบเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน ในการทดลองอบขึ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C จากการทดลองพบว่าค่าการนำกระแสไฟฟ้าของขึ้นทดสอบหลังอบที่อุณหภูมิ 100°C แบบวงจรที่ไม่ต่ออาร์ดริงมีค่าสูงกว่าค่าการนำกระแสไฟฟ้าของขึ้นทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 100°C แบบวงจรที่ไม่ต่ออาร์ดริง สำหรับค่าการนำกระแสไฟฟ้าของขึ้นทดสอบหลังอบที่อุณหภูมิ 100°C แบบวงจรที่ต่ออาร์ดริงมีค่าต่ำในช่วงก่อนเวลา 5.5 วินาทีและจะเพิ่มขึ้นจนมีค่าใกล้เคียงกับค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำกระแสไฟฟ้าของชิ้นทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 100°C แบบวงจรที่ไม่ต่อการ์ดริง ในขณะที่เดียวกันค่าการนำกระแสไฟฟ้าของชิ้นทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 100°C แบบวงจรที่ต่อการ์ดริงมีค่าสูงในช่วงเริ่มต้นและจะลดลงในช่วงหลังเวลา 5.5 วินาที

- กรณีที่ชิ้นทดสอบเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน ในการทดลองอบชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 120°C จากการทดลองพบว่าค่าการนำกระแสไฟฟ้าของชิ้นทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 120°C แบบวงจรที่ไม่ต่อการ์ดริงและค่าการนำกระแสไฟฟ้าของชิ้นทดสอบหลังอบที่อุณหภูมิ 120°C แบบวงจรที่ไม่ต่อการ์ดริงมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่เดียวกันจะมีค่าสูงกว่าค่าการนำกระแสไฟฟ้าของชิ้นทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 120°C แบบวงจรที่ต่อการ์ดริงและ ค่าการนำกระแสไฟฟ้าของชิ้นทดสอบหลังอบที่อุณหภูมิ 120°C แบบวงจรที่ต่อการ์ดริง ตามลำดับ
- กรณีที่ชิ้นทดสอบเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน ในการทดลองอบชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 140°C จากการทดลองพบว่าค่าการนำกระแสไฟฟ้าของชิ้นทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 140°C แบบวงจรที่ไม่ต่อการ์ดริงและค่าการนำกระแสไฟฟ้าของชิ้นทดสอบหลังอบที่อุณหภูมิ 140°C แบบวงจรที่ไม่ต่อการ์ดริงมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่เดียวกันจะมีค่าสูงกว่าค่าการนำกระแสไฟฟ้าของชิ้นทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 140°C แบบวงจรที่ต่อการ์ดริงและ ค่าการนำกระแสไฟฟ้าของชิ้นทดสอบหลังอบที่อุณหภูมิ 140°C แบบวงจรที่ต่อการ์ดริง ตามลำดับ
- กรณีที่ชิ้นทดสอบเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน ในการทดลองอบชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 160°C จากการทดลองพบว่าค่าการนำกระแสไฟฟ้าของชิ้นทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 160°C แบบวงจรที่ไม่ต่อการ์ดริงมีค่าสูงและค่าการนำกระแสไฟฟ้าของชิ้นทดสอบหลังอบที่อุณหภูมิ 160°C แบบวงจรที่ไม่ต่อการ์ดริงจะมีค่าต่ำกว่าการนำกระแสไฟฟ้าของชิ้นทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 160°C แบบวงจรที่ไม่ต่อการ์ดริงในช่วงก่อนเวลา 100 วินาที และจะเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงกว่าค่าการนำกระแสไฟฟ้าของชิ้นทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 160°C แบบวงจรที่ไม่ต่อการ์ดริงในช่วงหลังเวลา 100 วินาที ในขณะที่เดียวกันค่าการนำกระแสไฟฟ้าของชิ้นทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 160°C แบบวงจรที่ต่อการ์ดริงจะมีค่าสูงในช่วงก่อนเวลา 25 วินาทีและจะมีค่าลดลงในช่วงหลังเวลา 25 วินาที สำหรับค่าการนำกระแสไฟฟ้าของชิ้นทดสอบหลังอบที่อุณหภูมิ 160°C แบบวงจรที่ต่อการ์ดริงจะมีค่าสูงในช่วงก่อนเวลา 25 วินาทีและจะลดลงจนมีค่าใกล้เคียงกับค่าการนำกระแสไฟฟ้าของชิ้นทดสอบก่อนอบที่อุณหภูมิ 160°C แบบวงจรที่ต่อการ์ดริง
- กรณีชิ้นทดสอบเสื่อมเนื่องจากผลของการเกิด PD ในชิ้นทดสอบ จากการทดลองพบว่าค่าการนำกระแสไฟฟ้าของชิ้นทดสอบที่เกิด PD แบบวงจรที่ไม่ต่อการ์ดริงและแบบวงจรที่ต่อการ์ดริงจะมีค่าสูงกว่าค่าการนำกระแสไฟฟ้าของชิ้นทดสอบที่ไม่เกิด PD แบบวงจรที่ไม่ต่อการ์ดริงและแบบวงจรที่ต่อการ์ดริง ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Greg C. Stone, Edward A. Boulter Ian Culbert and Hussein Dhirani, **Electrical Insulation for Rotating Machines**, 1st Ed., Wiley-IEEE Press, 2004.
- [2] <http://cen-ping.com/bldc%20stators.html>
- [3] <https://de.wikipedia.org/wiki/Roebelstab>
- [4] พัชรี ทองอินต๊ะ, “การวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง โดยวิธีการวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและกระแสดีโพลาริซ์เซชัน”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,2559.
- [5] ภูริชญ์ บุรพสายนธ์ และคณะ, “การศึกษาเทคนิคการวินิจฉัยฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2557.
- [6] IEEE std. 43. IEEE Recommended Practice for testing Insulation Resistance of Electric Machinery, 2013.
- [7] นรเศรษฐ์ พัฒนเดช, วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า, พิมพ์ครั้งที่ 3, ห้างหุ้นส่วนจำกัด มิน เซอร์วิส ซัพพลาย, 2557.
- [8] PDC-Analyser- 1 MOD User’s Guide, ALFF Engineering.
- [9] Supatra A. Bhumiwat, “The latest Technology for On-Site Insulation Condition Assessment of Electrical Power Apparatus,” **Electricity Engineers Association of New Zealand**, Christchurch, June 21-22, 2002.
- [10] IEEE std. 56. IEEE Guide for Insulation Maintenance of Large Alternating-Current Rotating Machinery (10000kVA and Larger), 1977.
- [11] IEEE Standard 95-2002, Recommended Practice for Insulation Testing of AC Electric Machinery (2300 V and Above) With High Direct Voltage.
- [12] IEEE Standard 286-2000, Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก
PDC-ANALYSER-1MOD User's Guide ALFF Engineering

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PDC-ANALYSER-1MOD



User's Guide

ALFF Engineering

Gomweg 7
 CH 8915 Hausen am Albis
 Switzerland
 phone: +41 44 77 66 77 6
 fax: +41 44 77 66 77 7
 email: info@alff-engineering.ch
 web: www.alff-engineering.ch

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Caution

The PDC-ANALYSER-1MOD contains an externally accessible high voltage source producing up to 2 kV and up to 5mA (internal current limit).

The instrument must be operated only by skilled persons.

The operators are responsible for protecting the test site against the hazards related to high voltages. All the elements of a test setup, which are connected to this high voltage source or which could be set under voltage by any insulation breakdown, must be protected against being contacted by the operator or by any other person as long as the mains power is supplied to the instrument.

Also, the PDC-ANALYSER-1MOD must be stored and operated in a mechanically secured position and all the cables connected to it must be protected against making anyone fall over them or accidentally pull on them.

Content

1 Hardware	3
2 Measuring program	3
3 Evaluation program	4
4 Performing a measurement	4
5 Specifications	7
Appendix A	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

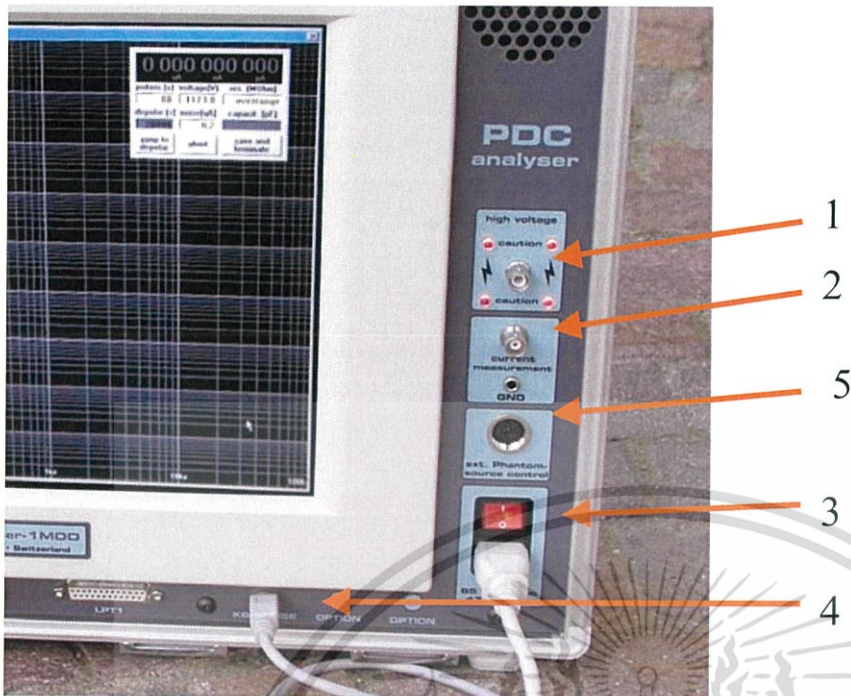


Figure 1: The connections of the **PDC-ANALYSER-1MOD**.

1 Hardware

Please connect the keyboard to jack "4" before turning on the **PDC-ANALYSER-1MOD**.

Use switch "3" to turn on the instrument.

The high voltage cable, which has a SHV plug, is connected to jack "1" and the current sensing cable with the BNC plug is connected to the jack "2" labelled "current measurement".

Plug "5" is for connecting the optional PDC-Phantom-1000XE voltage source, see separate instruction sheet.

For an accurate measurement, a warm-up time period of 60 min is recommended.

2 Measuring program

To perform a measurement with the **PDC-ANALYSER-1MOD**, start "PDC Measurement" by double clicking on this icons on the desktop of the instrument.

On the first window after invoking the program, the measuring parameters can be set:

- The name of directory, where the generated files will be saved.
 - The name prefix for generated files (see Appendix A).
 - The temperature value (important for the evaluation).
 - The test voltage.
 - The duration of an initial delay period before the measurement.
 - The duration of the polarisation.
 - The duration of the depolarisation.
 - The description of the test object (only for information).
- ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

After the desired measuring parameters have been set, the measurement can be started by clicking "start measurements".

A new display appears and the instrument is internally initialised (this takes about seven seconds).

Then the first delay duration is counted down and the current from the current sensing cable is displayed. The measurement can be aborted anytime by pressing ALT-F4. The delay duration can be prematurely cancelled by pressing "jump to measurements".

Caution: As soon as the delay duration has been counted down or brought to end by pressing "jump to measurements", the high voltage source is turned on.

Now the polarisation takes place and the polarisation duration is counted down. During this period, the high voltage is indicated with four red lamps around the high voltage SHV jack "1". The polarisation period can be automatically jumped over by setting the polarisation duration to zero on the setup screen. The measurement program can be aborted anytime by pressing ALT-F4. If the accumulated data should be stored, click on "save and terminate" to terminate the program.

After the polarisation duration has been counted down, the high voltage source is set to exactly zero volts and the depolarisation duration is started. Still, the measurement program can be aborted anytime by pressing ALT-F4, but all the data will be lost. If the accumulated data should be stored, click on "save and terminate".

3 Evaluation program

The measured polarisation and depolarisation currents can be evaluated with the *PDC-Evaluation* program. The basic version of this program permits the determination of the resistance, polarisation index (PI), recovery voltage and derived polarisation spectrum in the time domain and the complex capacitance $\underline{C} = C'(\omega) - jC''(\omega)$ and the derived $\tan\delta(\omega)$ in the frequency domain. For more information, see the User's Guide of *PDC-Evaluation* program.

4 Performing a measurement

To perform an accurate measurement, it is important to connect the test object to be investigated as long as possible to **PDC-ANALYSER-1MOD** before starting the measurement, because both the high voltage supply and the current sense input are normally short circuited to ground. Thus, the capacitances of the test object are well discharged.

Now, a 3-phase power transformer is taken as an example of a test object.

The transformer must be connected to the **PDC-ANALYSER-1MOD** as a capacitor (see figure 2). To obtain such an arrangement, all the high voltage bushings could be connected together, the high voltage windings behave as a first electrode of the capacitor under investigation. The second electrode of the capacitor is formed by connecting all the "low" voltage bushings together. The relaxation currents are sensed from the low voltage windings to ground. During the measurement the tank of transformer must be grounded (see figure 3).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

For an accurate measurement, it is necessary to determine the initial condition of the test object before any application of excitation voltage.

The initial condition (or charging state) of a test object can be determined by monitoring the initial current which flows through it. For visualisation of this current, it is sufficient to start a current measurement with a polarisation duration of zero seconds. It is important, that the initial current is low and at least in a steady state. In case of a high, but constant amplitude of initial current, this current can be considered as an "offset" for the evaluation: it can be subtracted from the measurements.

Before starting the main measurement, it is recommended to carry out control measurements with a short charging duration e.g. 5 seconds to control the whole setup. Verify the amplitudes of measured currents and the value of the capacitance. Such a short control measurement will not affect the main measurement, because the relaxation currents induced by a short charging duration can be neglected after a few minutes of waiting time.

The main measurement can be performed after the *control* measurement by choosing adequate values for the charging voltage amplitude and for the duration of polarisation and depolarisation.

For new power transformers, a charging voltage amplitude of up to 500 V is recommended. Used transformers are less sensitive to the non-linear effects due to their high conductivity of oil. So, for used transformers the excitation voltage can be increased up to 1'000 V. In general, a polarisation duration of 5'000 to 7'000 seconds is sufficient to assess the insulation quality of a power transformer, the same duration is also recommended for the depolarisation duration.

In general, it is important to avoid non-linear effects by keeping the amplitude of the applied excitation voltages as low as possible. It is also recommended to keep the discharge periods between the successive dc voltage applications long enough to avoid any superposition of dielectric responses.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5 Specifications

Electrical Insulation Diagnostic System **PDC-ANALYSER-1MOD**

Current measurement

range	±1 mA
resolution (current display when measuring)	1 pA
resolution (recorded data)	0.1 pA
accuracy	0.5 % of the measured value ±1 pA after 1 hour warming up
impedance	10 kΩ
protection	up to 100 mA respectively 1kV for 50ms
noise suppression	up to 10 µA eff at 50 / 60 Hz mains frequency
filtering (current display when measuring)	mean value in 1 s intervals
filtering (recorded data)	mean value in intervals increasing proportionally with the time from the voltage source switching moment

Voltage source

voltage range when switched on	+30 ... +2000 V
maximum current sourcing when switched on	<+5 mA
impedance when switched on	< 20 kΩ
impedance when switched to zero	< 0.2 Ω
current limiting when switching cap. loads	< ±100 mA for 20 ms

Capacitance measurement

the load capacitance is indirectly measured by computing the ratio charge to voltage when the voltage source is switched off for measuring of the depolarisation current. However the current measurement is not impaired by a load capacitance surpassing the range listed below.

accuracy
maximum load capacitance

source voltage			
2 kV	1 kV	500 V	100 V
±2 % ±5 pF	±2 % ±10 pF	±2 % ±20 pF	±2 % ±100 pF
25 nF	50 nF	100 nF	500 nF

Computer

display 15" TFT, 262'144 colours, resolution 1024 x 786 pixels
processor Intel Pentium III 1 GHz
memory SDRAM 256 MB
hard disk 40 GB
standard interfaces DVD+/-RW, 3½" Floppy, 2 x PCMCIA, parallel and serial ports, Ethernet
options additional serial ports, Audio in/out, external monitor out

Software

operating system windows XP home SP2
measuring and control program installed ready to use, outputs for each measurement one file with polarisation data, one file with depolarisation data and one file with general measurement descriptions
standard evaluation software installed ready to use, easy to use, extensive possibilities to postprocess, to display, to print and to export the measured data, computation of the complex capacitance in function of frequency, computation of a lumped equivalent circuit of the measured insulation, computation of recovery voltages and the derived "polarisation spectrum", computation of polarisation indexes and of insulation resistances according to all known standards and definitions
advanced evaluation software quality assessment of oil-paper insulation systems, quantitative determination of moisture content in pressboard and of oil conductivity for power transformers

Miscellaneous

weight 17.3 kg
power supply 90 ... 260 V, 47 ... 63 Hz, <160 VA
size 514 × 185 × 428 (width × depth × height in mm)
temperature (use) 0 ... 35 °C
temperature (stock) -10 ... 50 °C
pressure 70 ... 106 kPa
humidity 5 ... 80 % non condensing
acceleration < 2 g
length of standard measurement cables 15 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Appendix A

The **PDC-ANALYSER-1MOD** generates 3 files for each measurement.

These files are stored in the directory as entered during setup.

The polarisation current data are registered in a *.p.dat file. The depolarisation current data are registered in a *.d.dat file. Information about the measurement are registered in a *.c.txt file.

The name of each generated file is composed of 3 different parts.

Example: The name of a file could be **testa14p.dat**

testa: is a name prefix, which identifies a measurement series.

14: is a number between 01 to 99, which identifies a single measurement in a measurement series with a given name prefix (in this example, testa). This number increments automatically for each further measurement performed in this series.

p: indicates the type of the file, in this example, polarisation current data file.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ห้วงนของเงินนอเรเตอร์ด้วยวิธีวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน

ANALYSIS OF GENERATOR INSULATION BY POLARISATION AND DEPolarISATION CURRENT MEASUREMENT

ชินปรกรณ์ ชลศิริพงษ์ ณัฐนรี ภูมิพินผล พรรณวิภา มณีทุม วันทิทา เนตรสูงเนิน

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าจอมคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 Email:natnaree.nuta@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความวิชาการฉบับนี้ได้ทำการศึกษาวินิจฉัยห้วงนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพิกัด 13.8 kV ที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 30 ปี ด้วยวิธีการวิเคราะห์กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน ในการศึกษาจะจำลองกรณีห้วงนสเดเตอร์เนื่องเนื่องจากความร้อน โดยทำการวิเคราะห์ผลการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน ค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริก และค่ากระแสการนำไฟฟ้าของห้วงนสเดเตอร์ก่อนและหลังการจำลองกรณีศึกษาการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน รวมทั้งผลของการมีและไม่มีกรังคริงในวงจร PDC จากการทดลองพบว่าวงจรที่ต่อกรังคริงจะมีค่ากระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน ต่ำกว่าวงจรที่ไม่ต่อกรังคริง เนื่องจากการกรังคริงจะกำจัดผลของกระแสรั่วไหลตามผิวห้วงน และพบว่าหลังจากการจำลองการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน ค่ากระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันรวมทั้งแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกจะต่ำกว่าห้วงนเดิม

คำสำคัญ: กระแสโพลาริเซชัน, กระแสดีโพลาริเซชัน, ร่องสลัก

Abstract

The paper investigates the insulation characteristic of the stator bar rated 13.8 kV which has been operated for 30 years by analyzing the polarization and depolarization current (PDC). The PDC of the original insulation sample was measured compared with the thermal degraded insulation. The test results, PDC and dielectric dissipation factor including the conduction current of the original bar and the simulated degraded insulation bar were analyzed. Besides the effect of guard ring in the PDC measurement was examined from the test result, it was found that the PDC obtained from PDC measurement with guard ring was lower than that of the PDC acquired from PDC measurement without guard ring. This was due to the guard ring can get rid of leakage current. Moreover, the thermal degraded insulation provided the lower PDC and lower dielectric dissipation factor than the original one.

Keywords: Polarization Current, Depolarization Current

1. บทนำ

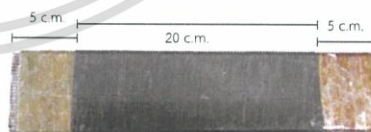
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ที่มีบทบาทสำคัญอย่างมากในระบบการผลิตกำลังไฟฟ้า หากสามารถประเมินสภาพห้วงนและวิเคราะห์สาเหตุความผิดปกติของห้วงนได้ก่อนที่ห้วงนจะได้รับความเสียหายได้ ก็จะทำให้สามารถลดค่าจ่ายในการบำรุงรักษา และวางแผนแนวทางในการวางแผนซ่อมบำรุงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้

ปัจจุบันนี้วิธีการวิเคราะห์ห้วงนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกันหลายวิธี แต่วิธีการส่วนใหญ่ใช้แรงดันสูงในการทดสอบ ดังนั้นอาจทำให้ห้วงนได้รับความเสียหายจากการทดสอบได้ สำหรับวิธีการทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน โดยการทดสอบนี้จะใช้แรงดันต่ำ จึงไม่ทำให้ห้วงนได้รับความเสียหายเพิ่มเติมจากแรงดันทดสอบ ซึ่งวิธีการทดสอบนี้ยังไม่ได้รับการศึกษาวิจัยอย่างแพร่หลาย ทำให้เกิดความสนใจในวิธีการวิเคราะห์ผลของกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน โดยการจำลองให้ห้วงนมีความเสื่อมสภาพเนื่องจากผลของความร้อนและเปรียบเทียบกับห้วงนก่อนจำลองความเสื่อมสภาพ

2. อุปกรณ์และวิธีการทดสอบ

2.1 ชั้นทดสอบ

เลือกชั้นทดสอบส่วนที่อยู่ในร่องสลัก ดัดขึ้นละ 30 ซม. แล้วลอกโคโรนาเทปที่ส่วนปลายเป็นระยะ 5 ซม. ทั้งสองด้าน



รูปที่ 1 ชั้นทดสอบ

2.1.1 การเตรียมกรณีที่เสื่อมเนื่องจากความร้อน

นำชั้นทดสอบมาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง และนำชั้นทดสอบที่เสื่อมมาอบที่อุณหภูมิ 120, 140 และ 160 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 เครื่องมือที่ใช้วัดค่า

1) เครื่อง PDC-Analyser-1MOD

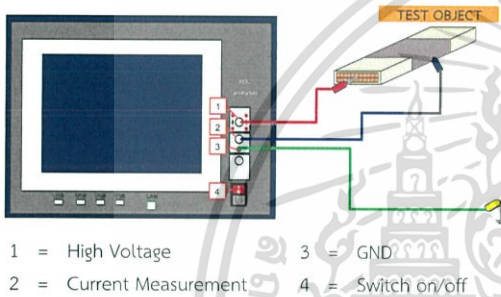


รูปที่ 3 เครื่อง PDC-Analyser-1MOD

2.3 วงจรทดสอบ

2.3.1 วงจรวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของฉนวนระหว่างเฟส

การต่อวงจรที่ใช้ทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของฉนวนระหว่างเฟสจะต่อวงจร ดังรูปที่ 3

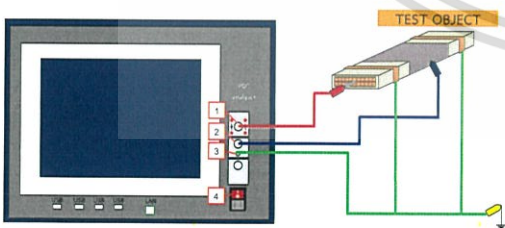


- 1 = High Voltage
- 2 = Current Measurement
- 3 = GND
- 4 = Switch on/off

รูปที่ 4 วงจรวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของฉนวนระหว่างเฟส

2) วงจรวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของฉนวนระหว่างเฟสแบบมีกั้วร์ดริง

สำหรับการต่อวงจรที่ใช้ทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของฉนวนระหว่างเฟสแบบมีกั้วร์ดริง จะต่อวงจรตามรูปที่ 4 ต่อการกั้วร์ดริงทั้งสองข้างของฉนวนทดสอบ เพื่อกำจัดกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้น



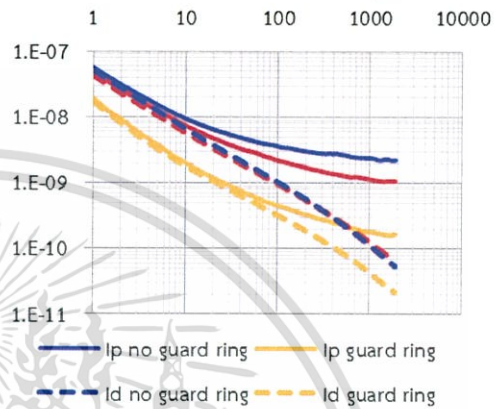
- 1 = High Voltage
- 2 = Current Measurement
- 3 = GND
- 4 = Switch on/off

รูปที่ 5 วงจรวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของฉนวนระหว่างเฟสแบบมีกั้วร์ดริง

3. ผลการทดสอบ

3.1 การทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันโดยวงจรที่มีกั้วร์ดริงและไม่มีกั้วร์ดริง

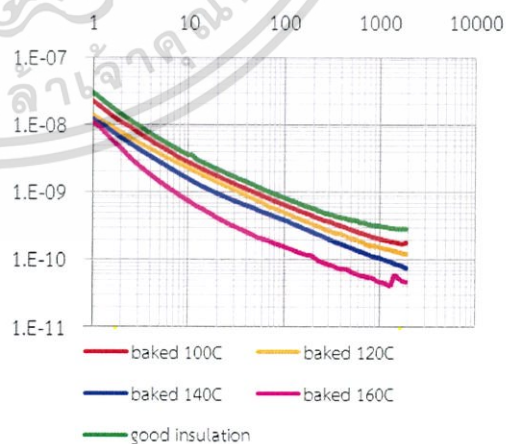
สำหรับการทดสอบนี้จะเปรียบเทียบผลการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของฉนวนทดสอบระหว่างวงจรวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันที่ต่อการกั้วร์ดริงและไม่ต่อการกั้วร์ดริง พบว่าวงจรที่ต่อการกั้วร์ดริงจะมีค่ากระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันน้อยกว่าวงจรที่ไม่ต่อการกั้วร์ดริงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันระหว่างกั้วร์ดริงที่ต่อการกั้วร์ดริงและไม่ต่อการกั้วร์ดริง

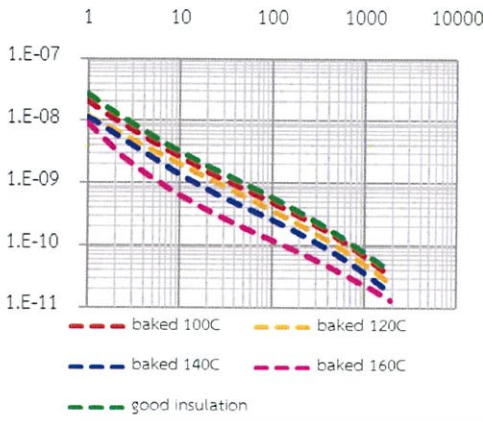
3.2 การทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของฉนวนทดสอบโดยจำลองความเสี่ยงเนื่องจากความร้อน

สำหรับการทดสอบนี้จะวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของฉนวนทดสอบที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 100, 120, 140 และ 160 องศาเซลเซียส เทียบกับฉนวนก่อนอบ โดยต่อวงจรวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของฉนวนระหว่างเฟสแบบมีกั้วร์ดริง

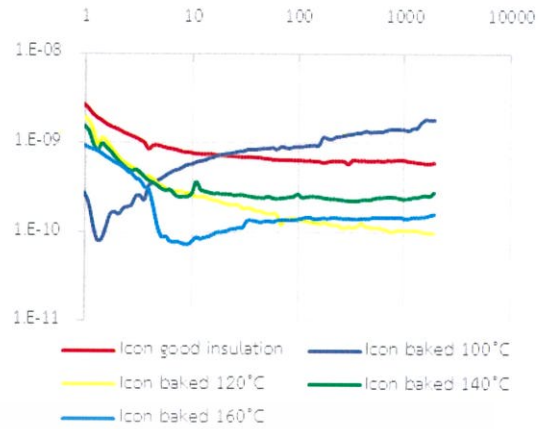


รูปที่ 7 เปรียบเทียบกระแสโพลาริเซชันของฉนวนทดสอบก่อนอบและหลังผ่านการอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



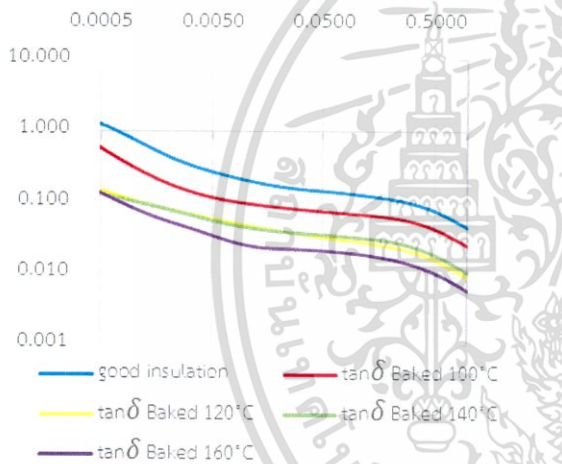
รูปที่ 8 เปรียบเทียบกระแสดีโพลาร์ของชั้นทดสอบก่อนอบและหลังผ่านการอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 9 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าชั้นทดสอบก่อนอบและหลังผ่านการอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ

3.3 กราฟแสดงค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริก

จะทำการเปรียบเทียบค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริก ของชั้นทดสอบหลังจากการจำลองกรณีของทุกชั้นทดสอบ



รูปที่ 12 กราฟเปรียบเทียบค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของชั้นทดสอบก่อนอบและหลังผ่านการอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ

3.4 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้า (i_{con})

สำหรับในหัวข้อนี้ จะทำการเปรียบเทียบค่ากระแสการนำไฟฟ้าของชั้นทดสอบทั้งก่อนการอบและหลังการอบ ทั้งวงจรที่ต่ออาร์ดริงและไม่มีอาร์ดริงของทุกการทดสอบ โดยจะเลือกมา 1 ครั้ง จากการทดสอบ 3 ครั้ง ที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน การแสการนำไฟฟ้าหาได้จากสมการ

$$i_{con} = i_{pol} - I_{depol} \quad (1)$$

4. การสรุปผล

จากผลการทดสอบวัดกระแสดีโพลาร์เซชันและดีโพลาร์เซชันโดยวงจรที่มีอาร์ดริงและไม่มีอาร์ดริงพบว่า ค่ากระแสดีโพลาร์เซชันและดีโพลาร์เซชันของวงจรที่ต่ออาร์ดริงจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่วัดแบบไม่ต่ออาร์ดริง เนื่องจากวงจรที่ต่ออาร์ดริงนั้นจะทำให้กระแสการนำไฟฟ้าลดลง เพราะกัจัดกระแสรั่วไหลตามผิวฉนวนลง

จากผลการทดสอบวัดกระแสดีโพลาร์เซชันและดีโพลาร์เซชันของชั้นทดสอบที่จำลองกรณีที่ชั้นทดสอบเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน ในการทดลองอบชั้นทดสอบ 4 ชั้น ที่อุณหภูมิ 100, 120, 140 และ 160 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่า ค่ากระแสดีโพลาร์เซชันและดีโพลาร์เซชันที่วัดได้จะลดลงจากก่อนอบ และยังเมื่อนำชั้นทดสอบที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิสูงขึ้นมาวัดค่ากระแสดีโพลาร์เซชันและดีโพลาร์เซชัน พบว่าจะต่ำลงตามอุณหภูมิที่อบให้ความร้อนเพิ่มขึ้นตามลำดับ

จากการหาค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกจะพบว่า เมื่อหลังจำลองกรณีความเสื่อมเนื่องจากความร้อนแล้วค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกจะต่ำกว่าก่อนจำลองกรณี

ค่ากระแสการนำไฟฟ้าในกรณีที่เสื่อมเนื่องจากความร้อนจะมีค่ากระแสการนำไฟฟ้าน้อยกว่าตอนที่ฉนวนอยู่ในสภาพดี

5. กิตติกรรมประกาศ

ปัญหาในพจนานุกรมนี้คงไม่สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีหากปราศจากความช่วยเหลือของ รศ.ดร. นรเศรษฐ พัฒนเดช และ ดร.ภพ จันทรเจริญสุข ผู้คอยให้คำปรึกษา รวมทั้งชี้แนะแนวทางการรู้เกี่ยวกับโครงการและให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ขอขอบคุณ คุณ พัชรี ทองอินตะ และคุณเพทาย นิมสนอง ผู้คอยให้คำชี้แนะตลอดจนให้ความรู้และแบ่งปันประสบการณ์อันดีเกี่ยวกับการศึกษาฉนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและวิธีการทดสอบ PDC รวมไปถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณ ปูนขวีร์ ฉายศิริ ที่คอยกรุณาตรวจแก้ไขปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณ วรชัย สวัสดิ์มงคล ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและกระแสตีโพลาริซ์เซชันของขอบคุณ คุณ ธนศว ทอทอง และพี่ๆเจ้าหน้าที่พนักงานบริษัทโกลด์พลังงาน

ขอขอบคุณ คุณ วีระวุฒิ คำสาสินธุ์ ผู้ให้ความรู้เกี่ยวกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำ เขื่อนวชิราลงกรณ จ.กาญจนบุรี

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคน โดยเฉพาะนางสาว พัชรี ทองอินตะ ที่ช่วยแก้ปัญหาด้วยดีมาโดยตลอด



นางสาวณัฐนรี ภูมิพันธ์ผล

เกิดวันที่ 3 มกราคม 2538

Email: natnaree.nuta@gmail.com



นางสาวพรณวิภา มณีทุม

เกิดวันที่ 20 มิถุนายน 2538

Email: 20toey06@gmail.com

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Greg C. Stone, Edward A. Boulter Ian Culbert and Hussein

Dhirani, **Electrical Insulation for Rotating Machines**, 1st Ed., Wiley-IEEE Press, 2004.

[2] พัชรี ทองอินตะ, “การวิเคราะห์หาค่าของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง โดยวิธีการวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและกระแสตีโพลาริซ์เซชัน”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2559.

[3] ภูริชญ์ บุรพสาพันธ์ และคณะ, “การศึกษาเทคนิคการวินิจฉัยหาค่าของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง”, ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2557.

[4] IEEE std. 43. IEEE Recommended Practice for testing Insulation Resistance of Electric Machinery, 2013.

[5] นรเศรษฐ พัฒนเดช, วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า, พิมพ์ครั้งที่ 3, ห้างหุ้นส่วนจำกัด มิน เซอร์วิส ซัพพลาย, 2557.

[6] PDC-Analyser- 1 MOD User’s Guide, ALFF Engineering.

[7] Supatra A. Bhumiwat, “The latest Technology for On-Site Insulation Condition Assessment of Electrical Power Apparatus,” **Electricity Engineers Association of New Zealand**, Christchurch, June 21-22, 2002.



นางสาววันทิตา เนตรสูงเนิน

เกิดวันที่ 31 พฤษภาคม 2538

Email: stamp7th@gmail.com



นายชินปกรณ์ ชลศิริพงษ์

เกิดวันที่ 3 เมษายน 2538

Email: never_play@hotmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นายชินปกรณ์ ชลศิริพงษ์

วัน เดือน ปีเกิด 3 เมษายน 2538

ที่อยู่ 180/170 หมู่บ้านสินทรัพย์นคร ซอย พหลโยธิน 50
ถนน พหลโยธิน แขวง อนุสาวรีย์ เขต บางเขน
จังหวัด กรุงเทพมหานคร 10220ประวัติการศึกษา 2559 วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อ-นามสกุล นางสาวณัฐรี ภูมิพื้นผล

วัน เดือน ปีเกิด 3 มกราคม 2538

ที่อยู่ 11/1 หมู่ที่ 6 ตำบล คมบาง อำเภอบึง
จังหวัด จันทบุรี 22000ประวัติการศึกษา 2559 วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อ-นามสกุล นางสาวพรณวิภา มณีทุม

วัน เดือน ปีเกิด 20 มิถุนายน 2538

ที่อยู่ 3014 หมู่บ้านพระปิ่น5 ซอย เอกชัย 109
แขวง บางบอน เขต บางบอน จังหวัด กรุงเทพมหานคร
10150ประวัติการศึกษา 2559 วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อ-นามสกุล นางสาววันทิตา เนตรสูงเนิน

วัน เดือน ปีเกิด 31 พฤษภาคม 2538

ที่อยู่ 48 หมู่บ้านฝนทองนิเวศน์ ซอยที่ 3 แขวง อนุสาวรีย์
เขต บางเขน จังหวัด กรุงเทพมหานคร 10220ประวัติการศึกษา 2559 วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้