

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เทคนิคตรวจวัดความชื้นของกระดาษฉนวนของหม้อแปลง
โดยใช้กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน

THE MEASUREMENT TECHNIQUE OF MOISTURE CONTENT IN
OIL-PAPER INSULATIONS OF A TRANSFORMER BY ANALYZING
POLARIZATION AND DEPOLARIZATION CURRENT

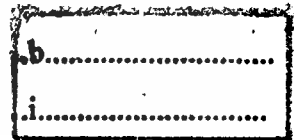


T105519

อภิชาติ นิมเทียน

APICHART NIMTIEN

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....105519
วัน,เดือน,ปี 26 พ.ย. 2552



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ.....KMITL-2009-EN-M-020-164.....อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**THE MEASUREMENT TECHNIQUE OF MOISTURE CONTENT IN
OIL-PAPER INSULATIONS OF A TRANSFORMER BY ANALYZING
POLARIZATION AND DEPOLARIZATION CURRENT**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2009

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KMITL-2009-EN-M-020-164
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2009

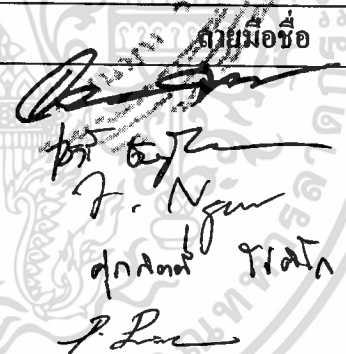
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ เทคนิคการตรวจวัดความชื้นของกระดาษฉนวนของหม้อแปลงโดยใช้กระแสโพลาริเซชัน
และกระแสดีโพลาริเซชัน
Thesis Title The Measurement Technique of Moisture Content in Oil-Paper Insulations of A
Transformer by Analyzing Polarization and Depolarization Current
นักศึกษา นายอภิชาติ นิมเทียมน
รหัสประจำตัว 50060220
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ประภาส ไพรสุวรรณ
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITE-2009-EN-M-020-164

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.อนันต์วัฒน์	คุณากร	
ผศ.ดร.เชาว์	ชมภูอินไหว	
รศ.ดร.อิสระชัย	งามหรรุ	
ดร.ศุภกิตต์	โชติโก	
รศ.ประภาส	ไพรสุวรรณ	

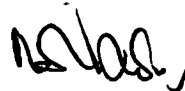
วัน/เดือน/ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 22 ตุลาคม พ.ศ. 2552 เวลา 14.00-16.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 22 ตุลาคม พ.ศ. 2552

สำนักทะเบียนและประมวลผล สจล.

วันที่ส่งเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

วันที่ 30 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2552

ลงชื่อ.....

ซึ่งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าหาความรู้และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เทคนิคการตรวจวัดความชื้นของกระดาษฉนวนของหม้อแปลง โดยใช้กระแสโพลาริซ์เซชันและกระแสดีโพลาริซ์เซชัน
นักศึกษา	นายอภิชาติ นิ่มเทียน
รหัสนักศึกษา	50060220
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2552
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ประภาส ไพรสุวรรณ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอวิธีการศึกษาผลของความชื้นในเพรสบอร์ด ผลของฉนวนน้ำมันที่มีความเป็นกรดต่อการฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้า และการวิเคราะห์คุณภาพของฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยการวิเคราะห์กระแสโพลาริซ์เซชันและกระแสดีโพลาริซ์เซชัน วัตถุประสงค์คือเพรสบอร์ดที่มีความชื้น 1.7%, 3.7% และ 5.5% ถูกจำลองขึ้นมานำไปติดตั้งในชุดทดสอบที่มีน้ำมันบรรจุอยู่ ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของความชื้นในเพรสบอร์ด มีผลทำให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์ดเพิ่มขึ้น กรณีของแรงดันดิสชาร์จเริ่มเกิดภายใต้ความชื้นที่เพิ่มขึ้นของเพรสบอร์ดและน้ำมันที่มีความเป็นกรด มีผลทำให้แรงดันดิสชาร์จเริ่มเกิดของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมันมีค่าต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ลดลงของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมันพบว่า ลักษณะการฉนวนที่ดีนั้น จะต้องมีค่าความนำกระแสและค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ 1 Hz (%) มีค่าต่ำ อัตราส่วนระหว่างค่าเก็บประจุที่ความถี่ 10^{-4} Hz กับค่าเก็บประจุที่ 50 Hz มีค่าน้อย และมีค่าแรงดันย้อนกลับสูงสุดเกิดขึ้นหลังผ่านช่วงเวลาการชาร์จประจุไม่น้อยกว่า 500 วินาที สำหรับการตรวจวัดความชื้นของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมันใหม่ จะทำการเปรียบเทียบด้วย PDC-analyser และวิธีคาร์ลพิตเซอร์พบว่าความชื้นของเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมันที่ตรวจวัดด้วย PDC-analyser มีค่าใกล้เคียงกับค่าความชื้นของเพรสบอร์ดที่ได้จากวิธีคาร์ลพิตเซอร์ แต่ผลการวัดความชื้นของเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมันจะเกิดความแตกต่างกัน ในกรณีที่ใช้วัดความชื้นของเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมันที่มีกรด นอกจากนี้ยังได้นำเสนอผลการทดสอบจากหม้อแปลงจริง ที่ติดตั้งใช้งานอยู่ในโรงงานอุตสาหกรรมอีกด้วย ผลการศึกษารายงานอยู่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

Thesis Title	The Measurement Technique of Moisture Content in Oil-Paper Insulations of A Transformer by Analyzing Polarization and Depolarization Current
Student	Mr. Apichart Nimtien
Student ID.	50060220
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2009
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Prapart Prisuwana

ABSTRACT

This thesis presents the study of the effect of moisture content in a pressboard and the acid content in the transformer oil on the transformer insulation system. It also introduces the insulation characteristic analysis using polarization and depolarization current measurement technique. The test samples, pressboard with 1.7%, 3.7% and 5.5% moisture content are modeled to be installed in the test cell which contains transformer oil. The test results showed that the dielectric constant of the test samples is directly proportional with the increase of moisture content in the test insulation system. It also caused the lower partial discharge inception voltage in the case of high moisture and acid content in oil. The test results were confirmed by the lower AC breakdown voltage of specimen with higher moisture content. The test results also illustrated that the good insulator should be as follows: the conductivity, the loss tangent at 1 Hz: and the capacitance ratio at 10^{-4} Hz and 50 Hz should be a small value. However, the recovery voltage should be high and the first peak of recovery voltage should also appear at the longer charging time (more than 500 s). To compare the moisture content in pressboard immersed in new transformer oil measurement, two methods were employed, PDC-analyser and Karl Fisher technique. The test results obtained from both techniques were relatively similar in the case of the pressboard moisture content measurement. However, the moisture content in the pressboard immersed in the transformer oil with acid content is difference. Besides, this thesis proposes the PDC test result of the installed transformer in the factory.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก รศ. ประภาส ไพโรสุวรรณ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์, ผศ. นรเศรษฐ พัฒนเดช ซึ่งเป็นผู้ให้ความรู้ทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ตลอดจนทำให้แนวคิดที่เป็นประโยชน์อย่างมากกับงานวิจัย ข้าพเจ้ารู้สึกทราบซึ่งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ทั้งสองท่าน และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ คุณสามภพ แสงอำยวน, คุณสุวพิชญ์ ลิขิตสุภณ, คุณกฤษฎวัฒน์ ทองแถมแก้ว, คุณอัญชติ ทองอินทร์ และพี่ๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง โรงซ่อมหม้อแปลง และ แผนกทดสอบสภาพฉนวนและวิเคราะห์ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ได้สนับสนุนเครื่องมือ ตลอดจนข้อมูล และหนังสือต่างๆ ที่ใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณคุณ สุภลักษณ์ ชนะงาม คุณ วิรชน ภูหินกอง และ พี่ๆ นักวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้เอื้ออำนวยในการทดสอบทางเคมี ตลอดจนให้คำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง

ขอขอบคุณบริษัท จรุงไทยไวร์แอนด์เคเบิล จำกัด (มหาชน) และพี่ๆเจ้าหน้าที่ฝ่ายตรวจสอบคุณภาพและห้องทดสอบ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์น้ำมันหม้อแปลง

ขอขอบคุณคุณณัฐพันธ์ บุญเสนอ, คุณเพทาย นิมสนอง, และคุณภูชิต ถึงสุข ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยช่วยเหลืออำนวยความสะดวกในการทดสอบ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชากรรมไฟฟ้าสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

อภิชาติ นิมเทียน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 ที่มาของปัญหา.....	1
1.3 ผลงานการศึกษาในอดีต.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัยและการวิเคราะห์ระบบจนวนของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง.....	4
2.1 การไหลไรซ์ ในไดโอดีคตริก.....	4
2.2 ไดโอดีคตริกในสนามไฟฟ้าสถิต.....	6
2.3 ผลตอบสนองไดโอดีคตริกูปโดเมนเวลา.....	9
2.4 ผลตอบสนองไดโอดีคตริก ในรูปโดเมนความถี่.....	15
2.5 โมเดลไดโอดีคตริก.....	18
2.6 การวิเคราะห์ระบบจนวนของหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง.....	22
2.6.1 จนวนภายในหม้อแปลง ไฟฟ้าชนิด oil immersed.....	22
2.6.1.1 จนวนเซลลูโลส ในหม้อแปลงไฟฟ้า.....	23
2.6.1.2 จนวนน้ำมันในหม้อแปลงไฟฟ้า.....	25
2.6.2 ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างเพรสบอร์ดและน้ำมัน.....	26
2.6.3 การเสื่อมสภาพของจนวนหม้อแปลงไฟฟ้า.....	27
2.6.3.1 วัสดุเซลลูโลสและความชื้นที่เกิดขึ้นในวัสดุเซลลูโลส.....	28
2.6.3.2 การเสื่อมอายุและความนำไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง.....	30
2.6.4 การวัดผลตอบสนอง ไดโอดีคตริกของหม้อแปลง ไฟฟ้าด้วย PDC Analyser.....	32

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.4.1 วงจรการวัด PDC ของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	32
2.6.4.2 การวิเคราะห์ผลที่วัดได้ในรูปโดเมนความถี่.....	33
2.6.4.3 การวิเคราะห์ผลที่วัดได้ในรูปโดเมนเวลา.....	35
2.6.4.4 การประเมินค่าความชื้นในเพรสเซอร์ และค่าความนำในน้ำมัน.....	37
บทที่ 3 การออกแบบชุดทดสอบฉนวนเพรสเซอร์ผสมน้ำมัน.....	42
3.1 ชุดทดสอบวัดคุณสมบัติของฉนวนเพรสเซอร์ผสมน้ำมัน.....	42
3.1.1 ชุดทดสอบวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านเนื้อฉนวนเพรสเซอร์ผสมน้ำมัน.....	42
3.1.2 ขั้นตอนการออกแบบชุดทดสอบวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านเนื้อฉนวน เพรสเซอร์ผสมน้ำมัน.....	43
3.1.3 ชุดทดสอบวัดค่าเก็บประจุและค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวนเพรสเซอร์.....	46
3.1.4 ขั้นตอนการออกแบบชุดทดสอบวัดค่าเก็บประจุและค่าเปอร์มิตติวิตี ของฉนวนเพรสเซอร์ผสมน้ำมัน.....	48
3.2 ชุดทดสอบหาค่าความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวนแข็งผสมน้ำมัน.....	49
3.2.1 ขั้นตอนการออกแบบชุดทดสอบหาค่าความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวนแข็ง ผสมน้ำมัน.....	49
3.3 ดังศัญญาภาส.....	50
3.3.1 ขั้นตอนการออกแบบดังศัญญาภาส.....	50
บทที่ 4 การทดสอบฉนวนเพรสเซอร์จุ่มน้ำมันและฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง.....	51
4.1 การทดสอบฉนวนเพรสเซอร์จุ่มน้ำมัน.....	51
4.1.1 การเตรียมฉนวนเพรสเซอร์.....	51
4.1.2 การเตรียมน้ำมันหม้อแปลง.....	53
4.1.3 การทดสอบหาค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ_r) ของเพรสเซอร์และน้ำมัน.....	55
4.1.4 การจำลองรูปแบบสนามไฟฟ้าของฉนวนเพรสเซอร์จุ่มน้ำมัน.....	56
4.1.5 การวัดแรงดันดิสชาร์จเริ่มเกิดและการศึกษาการเกิดรูปแบบดิสชาร์จ บางส่วนของฉนวนเพรสเซอร์จุ่มน้ำมัน.....	61

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.6 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวน เพรสเซอร์คุ่มน้ำมัน.....	65
4.1.7 การทดสอบเพื่อหาผลตอบสนองไดอิเล็กตริกความชื้น ค่าความนำ และความต้านทาน ของฉนวนเพรสเซอร์คุ่มน้ำมัน.....	66
4.1.7.1 การทดสอบเพื่อหาผลตอบสนอง ไดอิเล็กตริก ความชื้น ค่าความนำ และค่าความต้านทาน ของฉนวนเพรสเซอร์คุ่มน้ำมัน เมื่อเพรสเซอร์ มีความชื้นแตกต่างกัน.....	68
4.1.7.2 การทดสอบเพื่อหาผลตอบสนอง ไดอิเล็กตริกความชื้น ค่าความ ต้านทาน และค่าความนำ ของฉนวนเพรสเซอร์คุ่มน้ำมันที่มี ความชื้นในน้ำมันแตกต่างกัน.....	72
4.1.7.3 การทดสอบเพื่อหาผลตอบสนอง ไดอิเล็กตริกความชื้น และค่าความนำ ของเพรสเซอร์คุ่มน้ำมัน เมื่อความเป็นกรดในน้ำมันแตกต่างกัน.....	77
4.1.7.4 การทดสอบเพื่อหาผลตอบสนอง ไดอิเล็กตริกความชื้น และค่าความนำ ของฉนวนเพรสเซอร์คุ่มน้ำมัน เมื่อความชื้นที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจาก ความชื้นในบรรยากาศ.....	82
4.1.7.5 การทดสอบผลของแรงดันที่ใช้ในการวัด PDC ของเพรสเซอร์ คุ่มน้ำมัน.....	86
4.1.7.6 การทดสอบผลของความชื้นต่อฉนวนเพรสเซอร์.....	87
4.2 การทดสอบฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง.....	88
4.2.1 การทดสอบฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสภาวะการใช้งานตามปกติ.....	89
4.2.1.1 การทดสอบฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 500 kVA 33kV/380 V.....	89
4.2.1.2 การทดสอบฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 600 kVA 22kV/380 V.....	94
4.2.2 การทดสอบฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังก่อนและหลังปรับปรุงสภาพ การฉนวน.....	99
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	104
5.1 สรุป.....	104
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	105

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม.....	106
ภาคผนวก.....	113
ภาคผนวก ก.การวัดค่าความชื้นภายในเพรสบอร์ดตามมาตรฐาน ASTM D 3277-65.....	114
ก.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ.....	114
ก.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	114
ก.3 วิธีการทดสอบ.....	114
ภาคผนวก ข. การวัดค่าความชื้นภายในน้ำมันตามมาตรฐาน ASTM D 1533.....	116
ข.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ.....	116
ข.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	116
ข.3 วิธีการทดสอบ.....	116
ภาคผนวก ค.การวัดค่าความเป็นกรดภายในน้ำมันตามมาตรฐาน ASTM D664-07.....	117
ค.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ.....	117
ค.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	117
ค.3 การเตรียมสารเคมี.....	117
ภาคผนวก ง.การจำลองกระแสดีโพลาริซ์เซชัน.....	119
ง.1 การจำลองกระแสดีโพลาริซ์เซชันจนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อเพรสบอร์ดมีความชื้นแตกต่างกัน.....	119
ง.2 การจำลองกระแสดีโพลาริซ์เซชันจนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อความชื้นในน้ำมันแตกต่างกัน.....	122
ง.3 การจำลองกระแสดีโพลาริซ์เซชันจนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อเพรสบอร์ดมีความชื้นแตกต่างกันและน้ำมันมีความเป็นกรด.....	124
ง.4 การจำลองกระแสดีโพลาริซ์เซชันจนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อความชื้นของจนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมันที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจาก ความชื้นในบรรยากาศ.....	127
ง.5 การจำลองกระแสดีโพลาริซ์เซชัน จนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง.....	128
ภาคผนวก จ.การวัดความชื้นจนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมันด้วย PDC- analyser.....	130

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
จ.1 การวัดความชื้นฉนวนเพรสเซอร์คัม น้ำมันด้วย PDC- analyser เมื่อเพรสเซอร์มีความชื้นแตกต่างกัน.....	130
จ.2 การวัดความชื้นฉนวนเพรสเซอร์คัม น้ำมันด้วย PDC- analyser เมื่อความชื้นในน้ำมันแตกต่างกัน.....	131
จ.3 การวัดความชื้นฉนวนเพรสเซอร์คัม น้ำมันด้วย PDC- analyser เมื่อเพรสเซอร์มีความชื้นแตกต่างกันและน้ำมันมีความเป็นกรด.....	132
จ.4 การวัดความชื้นฉนวนเพรสเซอร์คัม น้ำมันด้วย PDC- analyser ซึ่งเกิดจากความชื้นต่อฉนวนเพรสเซอร์.....	134
จ.5 การวัดความชื้นฉนวนเพรสเซอร์คัม น้ำมันด้วย PDC - analyser เมื่อความชื้นของฉนวนเพรสเซอร์คัม น้ำมันที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจาก ความชื้นในบรรยากาศ.....	134
จ.6 การวัดความชื้นฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังด้วย PDC- analyser.....	135
ภาคผนวก ฉ. การเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าที่ได้ระหว่างตัวโปรแกรมกับค่าที่คำนวณ..	136
ภาคผนวก ช. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	137
ประวัติผู้เขียน.....	143

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของน้ำมันแร่.....	26
2.2 คุณลักษณะของน้ำมันหม้อแปลงเปรียบเทียบกับกลีของน้ำมันหม้อแปลง.....	31
2.3 คุณลักษณะของกระดาษต่อความชื้นที่เกิดขึ้น.....	40
2.4 คุณลักษณะของน้ำมันต่อความชื้นที่เกิดขึ้น.....	41
4.1 ค่า Moisture content (%) ของเพรสบอร์ด.....	53
4.2 ค่า Moisture content (ppm) ของน้ำมัน.....	54
4.3 ค่า Total acid number ของน้ำมัน.....	54
4.4 ค่าแรงดันเบรคความชื้นของน้ำมันหม้อแปลง.....	55
4.5 ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ_r) ของเพรสบอร์ด.....	55
4.6 ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ_r) ของน้ำมัน.....	56
4.7 รูปแบบสนามไฟฟ้าของฉนวนเพรสบอร์ดกับอากาศ.....	60
4.8 รูปแบบสนามไฟฟ้าของฉนวนเพรสบอร์ดกับน้ำมัน.....	60
4.9 ผลการวัดแรงดันดิสชาร์จเริ่มเกิดของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน.....	62
4.10 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน.....	66
4.11 ค่าเก็บประจุและค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อเพรสบอร์ดมีความชื้นแตกต่างกัน.....	71
4.12 ค่าแรงดันย้อนกลับของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อเพรสบอร์ดมีความชื้นแตกต่างกัน.....	71
4.13 ค่าความนำ ค่าความต้านทาน และความชื้นของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อเพรสบอร์ดมีความชื้นแตกต่างกัน.....	72
4.14 ค่าเก็บประจุและค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อความชื้นใน น้ำมันแตกต่างกัน.....	75
4.15 ค่าแรงดันย้อนกลับของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อความชื้นในน้ำมันแตกต่างกัน.....	76
4.16 ค่าความนำและความชื้นของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อความชื้นในน้ำมันแตกต่างกัน.....	76
4.17 ค่าเก็บประจุและค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อความเป็นกรดในน้ำมันแตกต่างกัน.....	80
4.18 ค่าแรงดันย้อนกลับของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อความเป็นกรดในน้ำมันแตกต่างกัน.....	81
4.19 ค่าความนำและความชื้นของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อความเป็นกรดในน้ำมัน แตกต่างกัน.....	81

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.20 ค่าเก็บประจุและค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนเพรสบอร์คุ่มน้ำมัน ที่ได้รับความชื้นที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความชื้นในบรรยากาศ.....	84
4.21 ค่าแรงดันย้อนกลับของฉนวนเพรสบอร์คุ่มน้ำมัน ที่ได้รับความชื้นที่เพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากความชื้นในบรรยากาศ.....	85
4.22 ค่าความนำและความชื้นของฉนวนเพรสบอร์คุ่มน้ำมัน ที่ได้รับความชื้นที่เพิ่มขึ้นอัน เนื่องมาจากความชื้นในบรรยากาศ.....	85
4.23 ค่าความนำและความชื้นของฉนวนเพรสบอร์คุ่มน้ำมัน ซึ่งเกิดจากความชื้น ต่อฉนวนเพรสบอร์ค.....	88
4.24 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า 500 kVA 33kV/380 V.....	93
4.25 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า 600 kVA 22kV/380 V.....	98
4.26 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า 25 MVA 3Ø 115-22 kV.....	102
ง.1 ค่าที่ได้จากการจำลองกระแสดี โพลาริเซชันฉนวนเพรสบอร์คความชื้น 1.7 % จุ่มในน้ำมันใหม่ที่มีความชื้น 17.77 ppm.....	119
ง.2 ค่าที่ได้จากการจำลองกระแสดี โพลาริเซชันฉนวนเพรสบอร์คความชื้น 3.7 % จุ่มในน้ำมันใหม่ที่มีความชื้น 17.77 ppm.....	120
ง.3 ค่าที่ได้จากการจำลองกระแสดี โพลาริเซชันฉนวนเพรสบอร์คความชื้น 5.5 % จุ่มในน้ำมันใหม่ที่มีความชื้น 17.77 ppm.....	121
ง.4 ค่าที่ได้จากการจำลองกระแสดี โพลาริเซชันฉนวนเพรสบอร์คความชื้น 1.7 % จุ่มในน้ำมันใหม่ที่มีความชื้น 21.39 ppm.....	122
ง.5 ค่าที่ได้จากการจำลองกระแสดี โพลาริเซชันฉนวนเพรสบอร์คความชื้น 1.7 % จุ่มในน้ำมันใหม่ที่มีความชื้น 23.43 ppm.....	123
ง.6 ค่าที่ได้จากการจำลองกระแสดี โพลาริเซชันฉนวนเพรสบอร์คความชื้น 5.5 % จุ่มในน้ำมันเก่าที่มี Total acid number = 0.09.....	124
ง.7 ค่าที่ได้จากการจำลองกระแสดี โพลาริเซชันฉนวนเพรสบอร์คความชื้น 3.7 % จุ่มในน้ำมันเก่า ที่มี Total acid number = 0.09.....	125
ง.8 ค่าที่ได้จากการจำลองกระแสดี โพลาริเซชันฉนวนเพรสบอร์คความชื้น 1.7 % จุ่มในน้ำมันเก่า ที่มี Total acid number = 0.09.....	126

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา แลXต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ง.9 ค่าที่ได้จากการจำลองกระแสตีโพลาริซ์เซชัน ผนวนเพรสบอร์ดความชื้น 1.7 % จุ่มในน้ำมันเก่าทิ้งไว้ให้ได้รับความชื้นในบรรยากาศเป็น48 ชั่วโมง.....	127
ง.10 ค่าที่ได้จากการจำลองกระแสตีโพลาริซ์เซชัน ผนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 500 kVA 33kV/380 V.....	128
ง.11 ค่าที่ได้จากการจำลองกระแสตีโพลาริซ์เซชัน หม้อแปลงไฟฟ้า 600 kVA 22kV/380 V.....	129



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างอะตอม.....	5
2.2 การ โฟลาไรซ์ของอะตอมไม่มีขั้ว หรือ โมเลกุล.....	5
2.3 การ โฟลาไรซ์ของ โมเลกุลเชิงขั้ว.....	6
2.4 ภาพตัดขวางของตัวกลางไดอิเล็กตริกโฟลาไรซ์.....	7
2.5 กลไกการเกิดของมาโครสโคปิกโฟลาไรซ์เซชัน.....	8
2.6 การเกิด โฟลาไรซ์ใน ไดอิเล็กตริกเมื่อป้อนสนามไฟฟ้า E_0 อย่างทันทีทันใดที่ $t = t_0$	11
2.7 การก่อเกิดของกระแสโฟลาไรซ์เซชัน.....	14
2.8 วงจรวัด PDC.....	15
2.9 โมเดลลิเนียร์ไดอิเล็กตริก.....	18
2.10 ผลของระยะเวลาต่อการวัดกระแสดีโฟลาไรซ์เซชัน หม้อแปลงไฟฟ้า 45 MVA.....	19
2.11 แรงดันย้อนกลับ.....	21
2.12 โครงสร้างของฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด oil immersed.....	22
2.13 โครงสร้างภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแบบชนิด Shell และ ชนิด Core.....	23
2.14 ฉนวนกระดาษและ การพันขดลวดแรงสูงด้วยฉนวนกระดาษ.....	24
2.15 โครงสร้างเซลล์โลส.....	24
2.16 สูตรเคมีของเซลล์โลส.....	25
2.17 ความคงทนต่อสนามไฟฟ้าของฉนวนเพรสบอร์ดผสมน้ำมัน.....	27
2.18 การเสื่อมสภาพของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า.....	28
2.19 การเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษจุ่มน้ำมัน.....	28
2.20 กลุ่มของ-OH ของเซลล์โลสซึ่งมีการเชื่อมต่อกับ โมเลกุลของน้ำ.....	29
2.21 ไค้สมดุลความชื้นของฉนวนกระดาษจุ่มน้ำมัน.....	29
2.22 ฟองอากาศจากกระดาษออกมาสู่น้ำมัน เมื่อป้อนความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ.....	30
2.23 การเสื่อมสภาพทำให้สีของน้ำมันเปลี่ยนแปลงไป.....	31
2.24 การละลายของน้ำในน้ำมันที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป.....	32
2.25 วงจรการวัด PDC ของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส และ 3 เฟส.....	32
2.26 วงจรการวัด PDC ของหม้อแปลงออโต.....	33
2.27 PDC ก่อนและหลังการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันของ โมเดลแพนเค้ก.....	34
2.28 ค่าเก็บประจุและความสูญเสีย ก่อนและหลังการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันของ โมเดลแพนเค้ก.....	34

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.29 โพลลาไรซ์สเปกตรัมก่อนและหลังการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันของโมเดลเพนเด็ก.....	35
2.30 PDC ก่อนและหลังการปรับปรุงสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	36
2.31 guumic ก่อนและหลังการปรับปรุงสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	36
2.32 โมเดล x-y ของหม้อแปลง.....	37
2.33 พิกัดแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้ากับโครงสร้างฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า.....	37
2.34 การประมาณกระแส PDC เพื่อหาค่าความนำของน้ำมัน.....	38
2.35 การจำลองกระแส PDC เพื่อหาค่าความชื้นของกระดาษ.....	39
2.36 ค่าความชื้นในกระดาษและค่าความนำในน้ำมันที่ส่งผลต่อการวัด PDC.....	40
3.1 ชุดทดสอบวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านเนื้อฉนวนแข็ง.....	42
3.2 อิเล็กโทรดสำหรับวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านเนื้อฉนวนเพรสเซอร์.....	43
3.3 เส้นสนามไฟฟ้าภายในฉนวนที่เกิดขึ้นจากการวัด โดยอิเล็กโทรด 3 ชนิด.....	43
3.4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า δA , h/g , g และ d_1	44
3.5 อิเล็กโทรดที่ได้ทำการออกแบบสำหรับวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านเนื้อฉนวนแข็ง.....	45
3.6 ก) วงแหวนการ์ดและอิเล็กโทรดสำหรับวัดกระแส ข) ชุดทดสอบวัดค่ากระแส.....	45
3.7 ชุดทดสอบวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านเนื้อฉนวนแข็งผสมน้ำมัน.....	46
3.8 ค่าความเก็บประจุรบกวนจากแหล่งอื่นๆ.....	47
3.9 การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้า ก) "ไม่ได้"ต่อวงแหวนการ์ด ข) ต่อวงแหวนการ์ด.....	47
3.10 การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้า ก) ลักษณะมิติของอิเล็กโทรดที่ไม่ได้ต่อกับวงแหวนการ์ด ข) ลักษณะมิติของอิเล็กโทรดที่ต่อกับวงแหวนการ์ด ค) รูปแบบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดไม่ได้ต่อกับวงแหวนการ์ด ง) รูปแบบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดต่อกับวงแหวนการ์ด.....	48
3.11 อิเล็กโทรดสำหรับทดสอบหาค่าความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวนเพรสเซอร์ผสมน้ำมัน.....	49
3.12 ชุดทดสอบหาค่าความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวนแข็งผสมน้ำมัน.....	49
3.13 ถึงสุญญากาศ.....	50
4.1 ฉนวนเพรสเซอร์ขนาดหนา 2 มิลลิเมตรและการอิมตัวของเพรสเซอร์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 61-70 %.....	52
4.2 การอบเพรสเซอร์เพื่อไล่ความชื้นและการทิ้งเพรสเซอร์ให้เย็นตัวภายในกล่องดูดความชื้น.....	52

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 เครื่องที่ใช้ปรับปรุงสภาพน้ำมัน.....	53
4.4 การทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงตามมาตรฐาน ASTM D 877-02.....	54
4.5 การวัดค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์ดและน้ำมัน.....	55
4.6 ขอบเขตการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าของฉนวนเพรสบอร์ด.....	57
4.7 รูปแบบสนามไฟฟ้าของเพรสบอร์ด($\epsilon_r=2.81$) กับอากาศ ($\epsilon_r=1$).....	57
4.8 รูปแบบสนามไฟฟ้าของเพรสบอร์ด($\epsilon_r=3.12$) กับอากาศ ($\epsilon_r=1$).....	58
4.9 รูปแบบสนามไฟฟ้าของเพรสบอร์ด($\epsilon_r=10.16$) กับอากาศ ($\epsilon_r=1$).....	58
4.10 รูปแบบสนามไฟฟ้าของเพรสบอร์ด($\epsilon_r=2.81$) กับน้ำมัน($\epsilon_r=2.2$).....	59
4.11 รูปแบบสนามไฟฟ้าของเพรสบอร์ด($\epsilon_r=3.12$) กับน้ำมัน($\epsilon_r=2.2$).....	59
4.12 รูปแบบสนามไฟฟ้าของเพรสบอร์ด($\epsilon_r=10.16$) กับน้ำมัน($\epsilon_r=2.2$).....	60
4.13 วงจรการทดสอบคิซซาร์จบางส่วนของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน.....	62
4.14 แรงดันคิซซาร์จเริ่มเกิดของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน 1.7 % _ new oil.....	63
4.15 แรงดันคิซซาร์จเริ่มเกิดของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน 3.7% _ new oil.....	63
4.16 แรงดันคิซซาร์จเริ่มเกิดของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน 5.5 % _ new oil.....	63
4.17 แรงดันคิซซาร์จเริ่มเกิดของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน 1.7 % _ old oil.....	64
4.18 แรงดันคิซซาร์จเริ่มเกิดของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน 3.7 % _ old oil.....	64
4.19 แรงดันคิซซาร์จเริ่มเกิดของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน 5.5 % _ old oil.....	64
4.20 วงจรการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน....	65
4.21 ไคอะแกรมและวงจรวัด PDC ของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน.....	68
4.22 ค่า PDC ของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อเพรสบอร์ดมีความชื้นแตกต่างกัน.....	69
4.23 ค่าเก็บประจุจริงของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อเพรสบอร์ดมีความชื้นแตกต่างกัน.....	69
4.24 ค่าเก็บประจุจินตภาพของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อเพรสบอร์ดมีความชื้นแตกต่างกัน..	70
4.25 ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อเพรสบอร์ดมีความ ชื้นแตกต่างกัน.....	70
4.26 แรงดันย้อนกลับของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อเพรสบอร์ดมีความชื้นแตกต่างกัน.....	71
4.27 การให้ความร้อนแก่น้ำมัน.....	73
4.28 กระแสโพลาริซเซชันของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อความชื้นในน้ำมันแตกต่างกัน....	73
4.29 กระแสดีโพลาริซเซชันของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อความชื้นในน้ำมันแตกต่างกัน...73	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.30 ค่าเก็บประจุจริงของฉนวนเพรสเซอร์คัม น้ำมัน เมื่อความชื้นในน้ำมันแตกต่างกัน.....	74
4.31 ค่าเก็บประจุจินตภาพของฉนวนเพรสเซอร์คัม น้ำมัน เมื่อความชื้นในน้ำมันแตกต่างกัน.....	74
4.32 ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนเพรสเซอร์คัม น้ำมัน เมื่อความชื้นในน้ำมันแตกต่าง กัน.....	75
4.33 แรงดันย้อนกลับของฉนวนเพรสเซอร์คัม น้ำมัน เมื่อความชื้นในน้ำมันแตกต่างกัน.....	76
4.34 การเปรียบเทียบสีของน้ำมันที่ติดตั้งภายในชุดทดสอบ.....	77
4.35 กระแสโพลาริเซชันของฉนวนเพรสเซอร์คัม น้ำมัน เมื่อความเป็นกรดในน้ำมัน แตกต่างกัน.....	77
4.36 กระแสดี โพลาริเซชันของฉนวนเพรสเซอร์คัม น้ำมัน เมื่อความเป็นกรดในน้ำมัน แตกต่างกัน.....	78
4.37 ค่าเก็บประจุจริงของฉนวนเพรสเซอร์คัม น้ำมัน เมื่อความเป็นกรดในน้ำมันแตกต่างกัน.....	78
4.38 ค่าเก็บประจุจินตภาพของฉนวนเพรสเซอร์คัม น้ำมัน เมื่อความเป็นกรดในน้ำมัน แตกต่างกัน.....	79
4.39 ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนเพรสเซอร์คัม น้ำมัน เมื่อความเป็นกรดในน้ำมัน แตกต่างกัน.....	79
4.40 แรงดันย้อนกลับของฉนวนเพรสเซอร์คัม น้ำมัน เมื่อความเป็นกรดในน้ำมันแตกต่างกัน.....	80
4.41 ค่า PDC ของฉนวนเพรสเซอร์คัม น้ำมัน ที่ได้รับความชื้นที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจาก ความชื้นในบรรยากาศ.....	82
4.42 ค่าเก็บประจุจริงของฉนวนเพรสเซอร์คัม น้ำมัน ที่ได้รับความชื้นที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจาก ความชื้นในบรรยากาศ.....	83
4.43 ค่าเก็บประจุจินตภาพของฉนวนเพรสเซอร์คัม น้ำมัน ที่ได้รับความชื้นที่เพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากความชื้นในบรรยากาศ.....	83
4.44 ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนเพรสเซอร์คัม น้ำมัน ที่ได้รับความชื้นที่เพิ่มขึ้นอัน เนื่องมาจากความชื้นในบรรยากาศ.....	84
4.45 แรงดันย้อนกลับของฉนวนเพรสเซอร์คัม น้ำมัน ที่ได้รับความชื้นที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจาก ความชื้นในบรรยากาศ.....	85
4.46 กระแสโพลาริเซชันของฉนวนเพรสเซอร์คัม น้ำมัน ที่ระดับแรงดันกระแสตรงค่า ต่างๆ.....	86

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.47 กระแสดีโพลาไรซ์เซชันของฉนวนเพรสเซอร์คุ่มน้ำมัน ที่ระดับแรงดันกระแสตรงค่า ต่าง ๆ.....	86
4.48 โครงสร้างฉนวนเพรสเซอร์ที่ได้จำลองแบบที่มีช่องน้ำมันและแบบที่ไม่มีช่องน้ำมัน.....	87
4.49 ผลของความชื้นต่อฉนวนเพรสเซอร์.....	87
4.50 การวัด PDC ของหม้อแปลงไฟฟ้า 500 kVA 33kV/380 V.....	89
4.51 PDC ของหม้อแปลงไฟฟ้า 500 kVA 33kV/380 V.....	90
4.52 ค่าเก็บประจุจริงของหม้อแปลงไฟฟ้า 500 kVA 33kV/380 V.....	91
4.53 ค่าเก็บประจุจินตภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า 500 kVA 33kV/380 V.....	91
4.54 ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกของหม้อแปลงไฟฟ้า 500 kVA 33kV/380 V.....	92
4.55 โพลาริเซชันสเปกตรัมของหม้อแปลงไฟฟ้า 500 kVA 33kV/380 V.....	92
4.56 guuinic ของหม้อแปลงไฟฟ้า 500 kVA 33kV/380 V.....	92
4.57 การวัด PDC ของหม้อแปลงไฟฟ้า 600 kVA 22kV/380 V.....	94
4.58 PDC ของหม้อแปลงไฟฟ้า 600 kVA 22kV/380 V.....	95
4.59 ค่าเก็บประจุจริงของหม้อแปลงไฟฟ้า 600 kVA 22kV/380 V.....	95
4.60 ค่าเก็บประจุจินตภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า 600 kVA 22kV/380 V.....	96
4.61 ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกของหม้อแปลงไฟฟ้า 600 kVA 22kV/380 V.....	96
4.62 โพลาริเซชันสเปกตรัมของหม้อแปลงไฟฟ้า 600 kVA 22kV/380 V.....	97
4.63 guuinic ของหม้อแปลงไฟฟ้า 600 kVA 22kV/380 V.....	97
4.64 Oil Immersed Transformer 25 MVA 3Ø 115-22 kV.....	99
4.65 PDC ของหม้อแปลงไฟฟ้า 25 MVA 3Ø 115-22 kV.....	100
4.66 ค่าเก็บประจุจริงของหม้อแปลงไฟฟ้า 25 MVA 3Ø 115-22 kV.....	100
4.67 ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกของหม้อแปลงไฟฟ้า 25 MVA 3Ø 115-22 kV.....	101
4.68 โพลาริเซชันสเปกตรัมของหม้อแปลงไฟฟ้า 25 MVA 3Ø 115-22 kV.....	101
4.69 guuinic ของหม้อแปลงไฟฟ้า 25 MVA 3Ø 115-22 kV.....	102
ก.1 ก) คาร์ลพิชเซอร์ Metrohm รุ่น 733 ข) ผงเพรสเซอร์ผสมกับเมตทานอลและ โค โลฟอลัม สำหรับการตรวจวัดความชื้น.....	115
ค.1 การวัดค่าความเป็นกรดภายในน้ำมันด้วยเครื่องไทเทรต.....	118

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ง.1 การจำลองกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชันจนวนเพรสบอร์ดความชื้น 1.7 % จุ่มในน้ำมันใหม่ที่มีความชื้น 17.77 ppm.....	119
ง.2 การจำลองกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชันจนวนเพรสบอร์ดความชื้น 3.7 % จุ่มในน้ำมันใหม่ที่มีความชื้น 17.77 ppm.....	120
ง.3 การจำลองกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชันจนวนเพรสบอร์ดความชื้น 5.5 % จุ่มในน้ำมันใหม่ที่มีความชื้น 17.77 ppm.....	121
ง.4 การจำลองกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชันจนวนเพรสบอร์ดความชื้น 1.7 % จุ่มในน้ำมันใหม่ที่มีความชื้น 21.39 ppm.....	122
ง.5 การจำลองกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชันจนวนเพรสบอร์ดความชื้น 1.7 % จุ่มในน้ำมันใหม่ที่มีความชื้น 23.43 ppm.....	123
ง.6 การจำลองกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชันจนวนเพรสบอร์ดความชื้น 5.5 % จุ่มในน้ำมันเก่าที่มี Total acid number = 0.09.....	124
ง.7 การจำลองกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชันจนวนเพรสบอร์ดความชื้น 3.7% จุ่มในน้ำมันเก่าที่มี Total acid number = 0.09	125
ง.8 การจำลองกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชันจนวนเพรสบอร์ดความชื้น 1.7 % จุ่มในน้ำมันเก่าที่มี Total acid number = 0.09	126
ง.9 การจำลองกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชัน จนวนเพรสบอร์ดความชื้น 1.7 % จุ่มในน้ำมันเก่าทิ้งไว้ให้ได้รับความชื้นในบรรยากาศเป็น 48 ชั่วโมง.....	127
ง.10 การจำลองกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชัน จนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 500 kVA 33kV/380 V	128
ง.11 การจำลองกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชัน จนวนหม้อแปลงไฟฟ้า 600 kVA 22kV/380 V.....	129
จ.1 การวัดความชื้นจนวนเพรสบอร์ดความชื้น 1.7 % จุ่มในน้ำมันใหม่ที่มีความชื้น 17.77 ppm ด้วย PDC- analyserพบว่ามีความชื้นในเพรสบอร์ดประมาณ 1-1.5 %.....	130
จ.2 การวัดความชื้นจนวนเพรสบอร์ดความชื้น 3.7 % จุ่มในน้ำมันใหม่ที่มีความชื้น 17.77 ppm ด้วย PDC- analyserพบว่ามีความชื้นในเพรสบอร์ดประมาณ 2.5-3.5 %.....	130
จ.3 การวัดความชื้นจนวนเพรสบอร์ดความชื้น 5.5 % จุ่มในน้ำมันใหม่ที่มีความชื้น 17.77 ppm ด้วย PDC- analyser พบว่ามีความชื้นในเพรสบอร์ดมากกว่า 4.9 %.....	131

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
จ.4 การวัดความชื้นฉนวนเพรสบอร์ดความชื้น 1.7 % จุ่มในน้ำมันใหม่ที่มีความชื้น 21.39 ppm ด้วย PDC- analyser พบว่ามีความชื้นในเพรสบอร์ดประมาณ 2.5-3 %.....	131
จ.5 การวัดความชื้นฉนวนเพรสบอร์ดความชื้น 1.7 % จุ่มในน้ำมันใหม่ที่มีความชื้น 21.39 ppm ด้วย PDC- analyser พบว่ามีความชื้นในเพรสบอร์ดประมาณ 2.5-3 %.....	132
จ.6 การวัดความชื้นฉนวนเพรสบอร์ดความชื้น 5.5 % จุ่มในน้ำมันเก่าที่มี Total acid number = 0.09 ด้วย PDC- analyser พบว่ามีความชื้นในเพรสบอร์ด มากกว่า 4.9 %.....	132
จ.7 การวัดความชื้นฉนวนเพรสบอร์ดความชื้น 3.7 % จุ่มในน้ำมันเก่าที่มี Total acid number = 0.09 ด้วย PDC- analyser พบว่ามีความชื้นในเพรสบอร์ด ประมาณ 3.5-4 %.....	133
จ.8 การวัดความชื้นฉนวนเพรสบอร์ดความชื้น 1.7 % จุ่มในน้ำมันเก่าที่มี Total acid number = 0.09 ด้วย PDC- analyser พบว่ามีความชื้นในเพรสบอร์ด ประมาณ 2-2.5 %.....	133
จ.9 การวัดความชื้นต่อฉนวนเพรสบอร์ด(โครงสร้าง X = 67%, Y = 25 %) พบว่ามีความชื้นใน เพรสบอร์ด 4 %.....	134
จ.10 การวัดความชื้นฉนวนเพรสบอร์ดความชื้น 1.7 % จุ่มในน้ำมันเก่าทิ้งไว้ให้ได้รับ ความชื้นในบรรยากาศเป็น 48 ชั่วโมง ด้วย PDC - analyser พบว่ามีความชื้นใน เพรสบอร์ดประมาณ 2.5-3 %.....	134
จ.11 การวัดความชื้นฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 500 kVA 33kV/380 V PDC- analyser พบว่ามีความชื้นในเพรสบอร์ดประมาณ 3-3.5 %.....	135
จ.12 การวัดความชื้นฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 600 kVA 22kV/380 V PDC- analyser พบว่ามีความชื้นในเพรสบอร์ดประมาณ 3-3.5 %.....	135

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่มีมีความสำคัญมากอย่างหนึ่งในระบบไฟฟ้ากำลัง การเกิดความเสียหายขึ้นกับตัวหม้อแปลงนั้น ส่งผลต่อความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าและความเสียหายต่อเศรษฐกิจอย่างมาก ปัญหาความผิดปกติของหม้อแปลงนั้น สาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากความผิดปกติของระบบฉนวน [1] การตรวจวินิจฉัยฉนวนหม้อแปลงก่อนที่หม้อแปลงจะชำรุดเสียหายจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงได้มาก [2-4] ฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด oil immersed นั้น ประกอบด้วยฉนวนผสมซึ่งประกอบไปด้วย กระดาษเพอร์สบอร์ดและน้ำมันเป็นหลัก การเสื่อมสภาพหรือชำรุดของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ามาจากหลายปัจจัย ได้แก่ ทางไฟฟ้า ทางกล ทางเคมี ความร้อน และ สิ่งเจือปนต่างๆ [5-13]

น้ำที่อยู่ภายในตัวฉนวนกระดาษ หรือน้ำที่ผสมอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ความเป็นฉนวนลดลง เป็นตัวเร่งการแตกตัวของเซลลูโลส ลดความเป็นโพลีเมอร์ของโมเลกุลเซลลูโลส ทำให้ความสามารถในการรับแรงทางกลของกระดาษต่ำลง [14-19] ก่อเกิดค่าความนำซึ่งเกิดจากการส่งและรับไอออนระหว่างน้ำกับกรด และลดความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของทั้งฉนวนกระดาษและน้ำมัน [20]

เทคนิคที่ใช้ในการวินิจฉัยหม้อแปลงไฟฟ้าได้แก่ การวัดความต้านทานฉนวน(IR) การวัดดิสชาร์จบางส่วน (PD) [21-23] การวัดคุณภาพน้ำมัน การวิเคราะห์แก๊ส (DGA)[24-25] การวัดความชื้นของน้ำมันและกระดาษด้วยเครื่องดูดอิมมิเตอร์ เทคนิคที่ได้กล่าวมานี้เป็นเทคนิคที่ใช้กันมานานมาก และเป็นเทคนิคที่ต้องใช้ความสามารถของผู้ทดสอบในการวินิจฉัยปัญหาที่เกิดขึ้น ซึ่งต้องใช้ประสบการณ์ของผู้ทดสอบอย่างสูง ปัจจุบันมีเทคนิคการวินิจฉัยหม้อแปลงไฟฟ้าสมัยใหม่ ได้แก่ การวัดแรงดันย้อนกลับ (RVM) [26-27] การวัดกระแสโพลาร์ไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชัน (PDC)[29-40] และ การวัดสเปกโทรสโคปีในรูปโดเมนเวลา (FDS) [41-42] ซึ่งได้นำมาใช้กันบ้างแล้วในวงการอุตสาหกรรม แต่ยังคงขาดผู้ที่เชี่ยวชาญและความเข้าใจด้านนี้โดยตรง

1.2 ที่มาของปัญหา

ปัญหาส่วนใหญ่ในการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เกิดมาจากฉนวนเสื่อมคุณภาพ การที่ฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้าเสื่อมคุณภาพนั้นมาจากปัจจัยหลัก ได้แก่ ความร้อน ความชื้น ปัจจัยดังกล่าวทำให้เกิดกรด และทำให้เกิดการเสื่อมอายุของฉนวน การปล่อยให้ฉนวนเสื่อมไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

คุณภาพโดยไม่รับการซ่อมบำรุง อาจส่งผลให้หม้อแปลงไฟฟ้าเกิดระเบิดขึ้น และส่งผลกระทบต่อระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ การปรับปรุงสภาพให้สามารถนำฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากลับมาใช้ใหม่นั้น เป็นการลดต้นทุนในการซื้อหม้อแปลงใหม่ สามารถใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างคุ้มค่า และเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้ากำลัง

สำหรับเทคโนโลยีการปรับปรุงสภาพฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในประเทศไทยนั้น ในกรณีความชื้นในกระดาษสามารถปรับปรุงสภาพได้โดยการอบฉนวนกระดาษด้วยเตาอบ ส่วนฉนวนน้ำมันนั้นสามารถปรับปรุงสภาพได้โดยการกรองฝุ่นผง และดูดความชื้นออก แต่ยังคงเหลือกรดในน้ำมันที่ยังไม่สามารถเอาออกไปได้

การศึกษาพฤติกรรมของกรด และความชื้นที่มีต่อฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อที่จะใช้ในการประเมินคุณภาพของฉนวน จากผลตอบสนองไดอิเล็กตริก ค่าความชื้นในกระดาษและค่าความนำด้วยเครื่อง PDC Analyser ได้อย่างถูกต้อง เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการปรับปรุงสภาพหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

1.3 ผลงานการศึกษาในอดีต

วิวัฒนาการของการวินิจฉัยหม้อแปลงแบบสมัยใหม่ เริ่มขึ้นจากทฤษฎีของไดอิเล็กตริก และทฤษฎีทางเคมีเชิงฟิสิกส์

ทฤษฎีของไดอิเล็กตริกเริ่มขึ้นในปี 1891 โดยแมกเวลล์ (Max well) ได้รวมสมการ และตั้งเป็นกฎการเคลื่อนที่ของกระแส (displacement current) [43] ในปี 1983 เอเคจอนเซอร์ (A.K. Jonsher) ได้นำเสนอกระแสผ่อนคลาย (Relaxation current) ในฉนวนแข็ง [46] ต่อมาในปี 1990 เอเคจอนเซอร์ (A.K. Jonsher) ยังได้นำเสนอผลตอบสนองของไดอิเล็กตริก [47-49]

ทฤษฎีของเคมีเชิงฟิสิกส์ในปี 1960 โดยเฟเบอร์พ็ทอน (Fabre-Pichon) ได้นำเสนอเส้นโค้ง แสดงสมดุลความชื้น (moisture equilibrium) ระหว่างกระดาษ และน้ำมัน [19]

การวินิจฉัยหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังโดยทำการรวมเทคนิคการวิเคราะห์ไดอิเล็กตริก และเส้นโค้งแสดงสมดุลความชื้นเข้าด้วยกัน โดยเริ่มขึ้นเมื่อปี 1996 วี เดอ ฮูสฮานิสเซีย (V. Der Houhanessian) และวอลเทอร์ เอส ไชเงา (Walter S. Zaengl) ได้นำเสนอการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของฉนวนกระดาษผสมน้ำมันในรูปโดเมนเวลา [28] และในปีเดียวกัน ยูกัฟเวอร์ค (U. Gäfvert) ได้นำเสนอเงื่อนไขการประเมินระบบฉนวนโดยใช้วิธีผลตอบสนองไดอิเล็กตริก

1.4 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งขอบเขตการวิจัย ตามลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) ศึกษาทฤษฎีผลตอบสนองไดอิเล็กตริก และ นำทฤษฎีผลตอบสนองไดอิเล็กตริกไปใช้ประเมินคุณภาพของฉนวนกระดาษผสมน้ำมัน

- 2) ทำการออกแบบและสร้างชุดทดสอบ วัดคุณสมบัติของฉนวนแข็งผสมน้ำมันตามมาตรฐาน IEC [50] และ ASTM [51] โดยจะทำการทดสอบฉนวนเพรสเซอร์คัมในน้ำมัน
- 3) ทำการทดสอบรูปแบบสนามไฟฟ้าของฉนวนเพรสเซอร์คัมกับอากาศ และเพรสเซอร์คัมกับน้ำมัน ด้วยโปรแกรมไฟไนติเอลิเมนต์
- 4) ทำการวัดแรงดันดิสชาร์จเริ่มเกิด และศึกษาการเกิดรูปแบบดิสชาร์จบางส่วนของกระดาษฉนวนน้ำมัน
- 5) ทำการทดสอบเพื่อหาผลตอบสนองไดอิเล็กตริก ความชื้น และค่าความนำของฉนวนกระดาษฉนวนน้ำมัน
- 6) ทำการทดสอบฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง
- 7) ทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง
- 8) สรุปผลงานและข้อเสนอแนะ

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมา ที่มาของปัญหา ผลงานการศึกษาในอดีต ขอบเขตการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัยและการวิเคราะห์ระบบของฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบชุดทดสอบฉนวนแข็งผสมน้ำมัน

บทที่ 4 กล่าวถึงการทดสอบฉนวนกระดาษฉนวนน้ำมันและฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

บทที่ 5 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

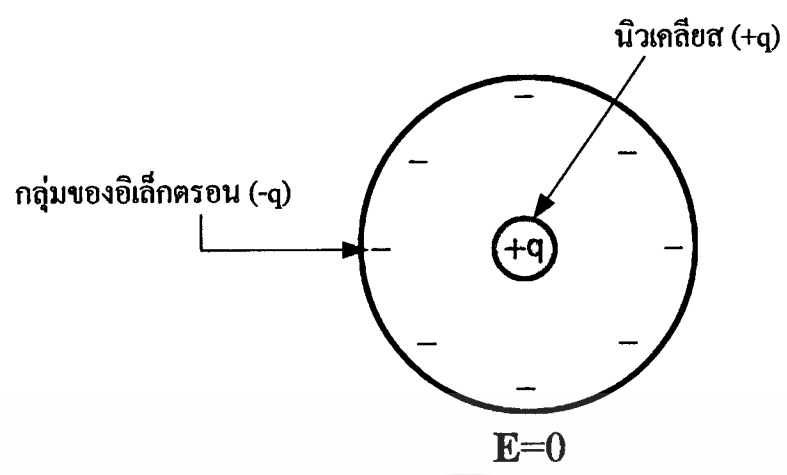
บทที่ 2

ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัยและการวิเคราะห์ ระบบฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

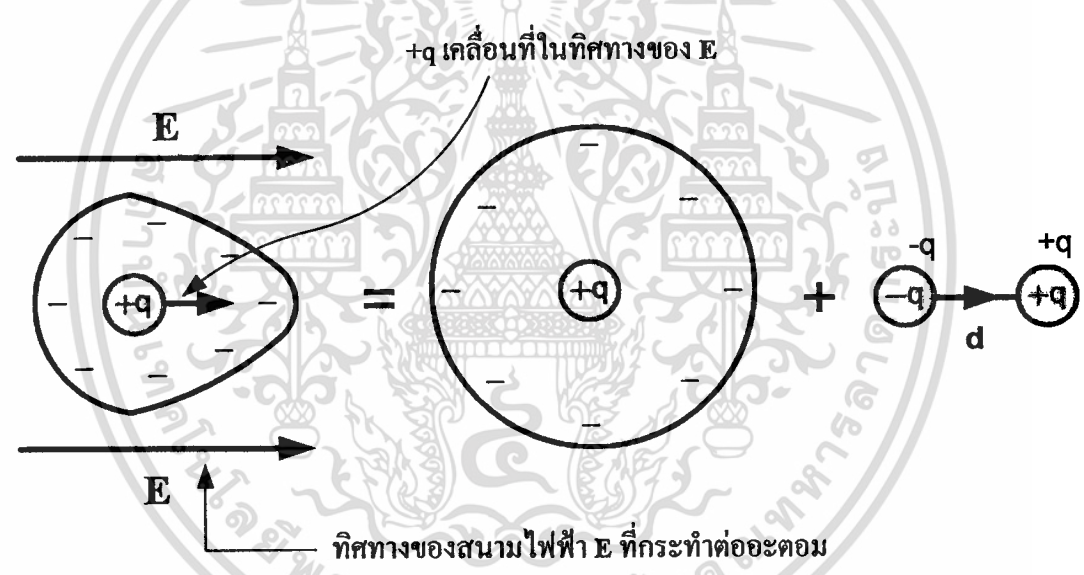
ในหัวข้อนี้กล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย และ การวิเคราะห์ระบบฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึง การโพลาริซ์ในไดอิเล็กตริก ไดอิเล็กตริกในสนามไฟฟ้าสถิต ผลตอบสนองไดอิเล็กตริกในรูปโดเมนเวลา ผลตอบสนองไดอิเล็กตริกในรูปโดเมนความถี่ และการวิเคราะห์ระบบฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

2.1 การโพลาริซ์ในไดอิเล็กตริก

ปรากฏการณ์แบบมาโครสโคปิก (macroscopic effect) ของสนามไฟฟ้าที่กระทำบนไดอิเล็กตริก เราจะพิจารณาอะตอมของไดอิเล็กตริกซึ่งประกอบด้วยประจุลบ $-q$ (กลุ่มอิเล็กตรอน) $+q$ (นิวเคลียส : nucleus) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2 ซึ่งรูปภาพในลักษณะที่คล้ายกันนี้สามารถนำมาใช้กับโมเลกุลของไดอิเล็กตริก ทั้งนี้เราสามารถที่จะทำให้นิวเคลียสทั้งหลายในโมเลกุลกลายเป็นประจุแบบจุด และสามารถทำให้โครงสร้างทางอิเล็กตรอนิกส์กลายเป็นกลุ่มของประจุลบเพียงกลุ่มเดียว เนื่องจากเรากำหนดให้จำนวนประจุบวกเท่ากับจำนวนประจุลบ อะตอมหรือโมเลกุลทั้งหมดจึงเป็นกลางทางไฟฟ้า และเมื่ออนุภาคหรือโมเลกุลอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า E จะมีแรงกระทำต่อประจุบวกด้วยแรง $F_+ = qE$ ในขณะที่ประจุลบเคลื่อนย้ายในทิศทางตรงข้ามด้วยแรง $F_- = qE$ ดังนั้นไดโพล (dipole) เป็นผลลัพธ์ที่เกิดจากการกระจัดของประจุในไดอิเล็กตริก ซึ่งกล่าวได้ว่าประจุถูกทำให้เป็นขั้วหรือถูกแยกขั้ว หรือเรียกว่าเป็น โพลาริซ์ (polarize) ซึ่งในสภาวะโพลาริซ์ กลุ่มอิเล็กตรอนจะผิดเพี้ยนไปจากเดิมตามสนามไฟฟ้า E ที่กระทำต่อมัน ซึ่งโดยหลักการของการทับซ้อน (superposition) ประจุที่กระจายผิดเพี้ยนไปนี้จะสมดุลกับการกระจายเริ่มต้น (original distribution) รวมกับไดโพล ซึ่งมีโมเมนต์ [51]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างอะตอม



รูปที่ 2.2 การโพลาริซซ์ของอะตอมไม่มีขั้ว หรือ โมเลกุล

$$p = qd \tag{2.1}$$

เมื่อ d คือเวกเตอร์ระยะทาง (distance vector) ของไดโพล $-q$ ไปยัง $+q$

ผลกระทบที่สำคัญของสนามไฟฟ้า E ที่กระทำบนไดอิเล็กทริกจะเป็นการสร้างโมเมนต์ไดโพลซึ่งวางตัวอยู่ในทิศทาง E ไดอิเล็กทริกชนิดนี้ถูกเรียกว่า ไม่มีขั้ว (nonpolar) ตัวอย่างเช่น เอกสารนี้เขียนขึ้นโดย... ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และแก๊สที่หาได้ยากทั้งหลาย โมเลกุลของไดอิเล็กตริกแบบไม่มีขั้ว (nonpolar dielectric molecules) จะไม่มีไดโพลถาวรกว่าจะมีสนามมากกระทำตามที่ไดกล่าวไว้ข้างต้น โมเลกุลของไดอิเล็กตริกอีกชนิดหนึ่งเช่น น้ำ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และกรดไฮโดรคลอริก มีไดโพลถาวร (permanent dipole) อยู่ในตัว ซึ่งมันจะหันเหอย่างไม่เป็นทิศเป็นทาง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และถูกเรียกว่า มีขั้ว หรือเชิงขั้ว (polar) เมื่อมีสนามไฟฟ้า E มากกระทำต่อโมเลกุลเชิงขั้ว (polar molecule) ไดโพลถาวรจะทำให้เกิดแรงบิด (torque) ที่คอยจัดเรียงโมเมนต์ไดโพลของมันให้ขนานกับ E ดังแสดงในรูปที่ 2.3 [52]

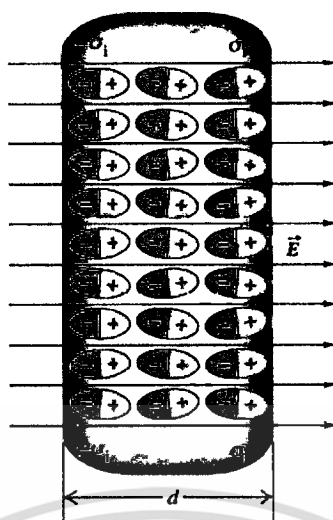


(ก) ไดโพลถาวร ($E = 0$) (ข) การจัดเรียงของไดโพลถาวรภายใต้สนามไฟฟ้า ($E \neq 0$)

รูปที่ 2.3 การโพลาไรซ์ของ โมเลกุลเชิงขั้ว

2.2 ไดอิเล็กตริกในสนามไฟฟ้าสถิต

ตัวกลางวัสดุทุกชนิดจะประกอบไปด้วยอะตอมที่มีนิวเคลียสประจุบวกถูกล้อมรอบด้วยอิเล็กตรอนประจุลบ ถึงแม้ว่าโมเลกุลของไดอิเล็กตริกจะเป็นไปแบบมาโครสโคปิก (macroscopically neutral) แต่การที่มีสนามไฟฟ้าอยู่ภายนอกจะเป็นเหตุทำให้เกิดแรงกระทำบนแต่ละอนุภาคประจุ และเป็นเหตุทำให้เกิดการเข้าแทนที่กันของประจุบวกและประจุลบในระยะสั้นๆ ในทิศทางข้ามกัน ซึ่งประจุเหล่านี้คือ ประจุผูกพัน (bound charge) การเข้าแทนที่กันถึงแม้ว่าจะเป็นระยะสั้นๆ เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของอะตอม การเป็นขั้วหรือโพลาไรซ์ (polarize) ของวัสดุไดอิเล็กตริกจะเข้ามาเกี่ยวข้อง และไดโพลไฟฟ้า (electric dipole) จะเกิดขึ้นเสมอ ตำแหน่งในการเคลื่อนที่ดังกล่าวแสดงไว้ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งในขณะที่ไดโพลไฟฟ้าเกิดขึ้นนั้นศักย์ไฟฟ้าและความเข้มสนามไฟฟ้าจะปรากฏขึ้นด้วย โดยทั้งนี้เราสามารถที่จะคาดคะเนได้ว่า ไดโพลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induced electric dipole) จะประกอบไปด้วยสนามไฟฟ้าที่อยู่ภายในและภายนอกวัสดุไดอิเล็กตริก



รูปที่ 2.4 ภาพตัดขวางของตัวกลางไดอิเล็กตริก โพลาริซ์ [52]

โมเลกุลของไดอิเล็กตริกบางชนิดจะมีขบวน โมเมนต์ไดโพลถาวร (permanent dipole moments) ถึงแม้ว่าไม่มีสนามโพลาริซ์ภายนอกก็ตาม ซึ่งโมเลกุลโดยปกติจะประกอบด้วย อะตอมที่ไม่เหมือนกันสองหรือสามอะตอม และเรียกโมเลกุลเหล่านี้ว่า โมเลกุลเชิงขั้ว (polar molecules) ในทางกลับกัน ถ้าไม่มีโมเมนต์ไดโพลถาวร เราเรียกโมเลกุลเหล่านี้ว่า โมเลกุลไม่เชิงขั้ว (nonpolar molecules) ตัวอย่างเช่น โมเลกุลน้ำ H_2O ซึ่งประกอบไปด้วยไฮโดรเจนสองอะตอม และออกซิเจนหนึ่งอะตอม อะตอมเหล่านี้ไม่ได้จัดการตัวมันเองในแบบที่ทำให้โมเลกุลมีโมเมนต์ ไดโพลเป็นศูนย์ นั่นคือ การจัดเรียงของอะตอมของน้ำเป็นลักษณะ โมเลกุลที่เป็นเชิงขั้ว โดยที่ อะตอมของไฮโดรเจนทั้งสองที่มีอะตอมของออกซิเจนอยู่ตรงกลาง ไม่ได้อยู่ตรงกันข้ามโดยตรง อย่างสมดุล [51]

โมเมนต์ไดโพลของโมเลกุลเชิงขั้วจะอยู่ในลำดับที่ 10^{-30} C.m ซึ่งเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้า ภายนอก แต่ละไดโพลในไดอิเล็กตริกเชิงขั้วจะเกิดการหันเหทิศทางการอย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งเป็นผลทำให้ไม่เกิด โมเมนต์ไดโพลสุทธิ และเมื่อปล่อยสนามไฟฟ้า E ให้กับไดอิเล็กตริก มันก็จะออก กำลังบิดไดโพลแต่ละตัวให้จัดวางตัวตามเส้นสนามไฟฟ้าดังในลักษณะคล้ายคลึงกับในรูปที่ 2.4

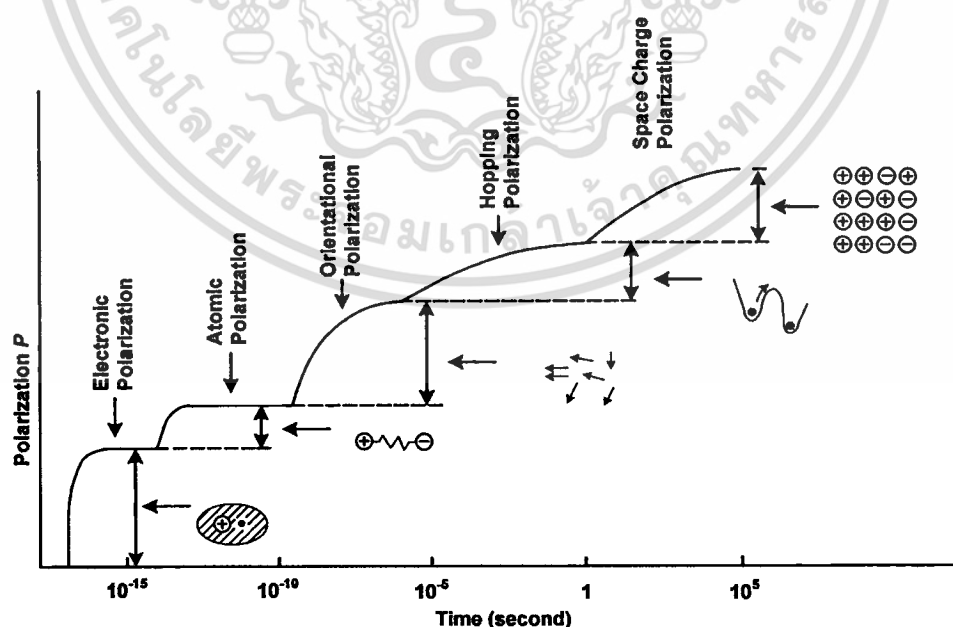
กลไกการเกิดของมาโครสโคปิก โพลาริซ์ (macroscopic polarization) P ได้แก่ [43],[53]

- อิเล็กตรอนิกส์โพลาริซ์ (Electronic Polarization) เป็นผลเนื่องจากอะตอมหรือ โมเลกุลบริเวณศูนย์กลางของอะตอม และมีอิเล็กตรอนอยู่รอบๆ ซึ่งแกนของอะตอมถูก ทำให้เคลื่อนโดยสนามไฟฟ้า E ปฏิกิริยาการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นนี้เกิดขึ้นได้เร็วมาก และอาจมาก จนเท่ากับความถี่ของแสง (optical frequencies)

• ไอออนิกส์โพลาริซ์ (Ionic Polarization) วัสดุที่มีโมเลกุลซึ่งภายในประกอบไปด้วยไอออน ไม่สามารถแยกออกด้วยสนามไฟฟ้าหรืออุณหภูมิที่ต่ำๆ เมื่อเกิด

อิเล็กทรอนิกส์โพลาไรซ์เซชัน (Electronic Polarization) โดยสนามไฟฟ้า จะถูกทำให้เคลื่อนที่ได้ช้าลง โมเลกุลก่อเกิดขั้วและเกิดโพลาไรซ์ (Polarize) ที่ความถี่อินฟราเรด (infra-red frequencies)

- ไดโพลโพลาไรซ์เซชัน (Dipolar polarization) หรือ อริเทชันโพลาไรซ์เซชัน (Orientational Polarization) วัสดุที่ประกอบไปด้วยโมเลกุลมีขั้ว เมื่อเกิดการหมุนตัวจนก่อให้เกิดพลังงานความร้อน และถ้าอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า E ขั้วของโมเลกุลจะเคลื่อนที่เป็นบางส่วน ไอออนิกส์และไดโพลเป็นปรากฏการณ์ตามความถี่สลับ (ac frequencies) จนถึง MHz หรือ GHz
- อินเตอร์เฟเชียลโพลาไรซ์เซชัน (Interfacial Polarization) มีผลกับวัสดุที่เป็นฉนวน โดยเฉพาะฉนวนที่มีความต่างชนิดกัน ได้แก่ ฉนวนกระดาษผสมน้ำมัน (oil impregnated paper/cellulose) ฉนวนผสมนี้จะมีค่าต่างในเรื่องเปอร์มิตติวิตี (permittivity) เวลา และความต้านทาน (resistivity) เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า ประจุบวกและประจุลบจะเกิดการเคลื่อนที่ และสะสมเกิดเป็นขั้วที่ผิวหน้าของวัสดุต่างชนิดกัน ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นได้ช้า โดยทั่วไปจะเกิดขึ้นในช่วงความถี่กำลัง (power frequency) และ ความถี่ต่ำๆ
- แทปปี้งและฮอปปี้งของประจุ (Trapping and hopping of charge carriers) ระหว่างพื้นที่ของประจุสร้างโพลาไรเซชัน (polarization) ขึ้นมาอย่างช้าๆ โดยจะขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิ และส่วนใหญ่จะเกิดกับของแข็ง



รูปที่ 2.5 กลไกการเกิดของมาโครสโคปิกโพลาไรซ์เซชัน [52]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปได้ว่า การเกิดโพลาไรซ์ (polarization) ในไดอิเล็กตริก (dielectric) เกิดขึ้นเนื่องจากความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ประจุบวกและประจุลบในวัสดุ ในระหว่างกระบวนการ ประจุจะไม่สามารถหลุดออกไปด้วยสนามไฟฟ้าได้หมด เนื่องจากวัสดุจะมีค่าความนำไฟฟ้าอยู่ (electric conduction)

วิธีการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริก (Dielectric Response Methods) โดยใช้ความสัมพันธ์ของปริมาณไฟฟ้า (electric quantities) ในฉนวนไฟฟ้าแรงสูง (HV insulation) หรืออาจจะเรียกว่าไดอิเล็กตริก (dielectric) ซึ่งคุณสมบัติทางฟิสิกส์เหมือนกันก็มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน เขียนแทนสัญลักษณ์เวกเตอร์ของโพลาไรซ์เซชัน (polarization) เป็น P และ เวกเตอร์สนามไฟฟ้า E ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการดังนี้

$$P = \chi \epsilon_0 E \quad (2.2)$$

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าจะเกิดการเหนี่ยวนำประจุทำให้เกิดกระบวนการโพลาไรซ์เซชัน (polarization processes) โดย χ คือ อัตราสภาพยอมรับได้ทางไฟฟ้า (electric susceptibility) ของวัสดุจะมีค่าเป็นศูนย์ในสุญญากาศอย่างแท้จริง ซึ่ง χ เป็นตัวแปรที่ทำให้เกิดกระบวนการโพลาไรเซชัน (polarization processes) ในวัสดุ ส่วน ϵ_0 คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี (permittivity) ของฟรีสเปส (Free space) หรือ สุญญากาศ (8.85419×10^{-12} [As/Vm]) เทียบกับจำนวนหนึ่งหน่วยสำหรับสนามไฟฟ้า [V/m] และ ค่าการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า [As/m²]

จากสมการที่ 2.2 เนื่องจากโพลาไรซ์เซชัน (polarization) P เปลี่ยนแปลงและหายไปตามค่าสนามไฟฟ้า E ที่ได้ทำการชาร์จจนถึงค่าขีดหรือดิสชาร์จให้เป็นศูนย์ในไดอิเล็กตริกใดๆ ($\chi > 0$) ซึ่งการดิสชาร์จสนามไฟฟ้า E เป็นกระบวนการที่เรียกว่าดีโพลาไรซ์เซชัน (depolarization หรือ relaxation) โดยต้องใช้ระยะเวลาที่ยาวนานจึงจะทำให้ค่าสนามไฟฟ้า E ลดลงไปได้หมด ดังนั้นคุณสมบัติของไดอิเล็กตริกจะมีคุณสมบัติแบบไดนามิก (Dynamic) ซึ่งขึ้นอยู่กับโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ [43]

2.3 ผลตอบสนองไดอิเล็กตริก (Dielectric Response/Spectroscopy) ในรูปโดเมนเวลา [43],[53]

ฉนวนสุญญากาศซึ่งอยู่ระหว่างอิเล็กโทรด เกิดการเปลี่ยนแปลงของไฟฟ้า (electric displacement) หรือความหนาแน่นของประจุ (dielectric flux density) หรือ การเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า (electrical induction) สามารถแทนด้วยเวกเตอร์ D ซึ่งจะเป็นสัดส่วนกับค่าสนามไฟฟ้า แทนด้วยเวกเตอร์ E และ ϵ_0 คือค่าเปอร์มิตติวิตีภายในสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} \quad (2.3)$$

หรือถ้าเขียนค่าสนามไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับเวลาและแรงดันได้ดังนี้

$$\mathbf{D}(t) = \varepsilon_0 \mathbf{E}(t) \quad (2.4)$$

เมื่อป้อนแรงดันจ่ายให้กับอิเล็กโตรดเกิดเป็นสนามไฟฟ้า \mathbf{E} และ เกิดเป็นความหนาแน่นสนามไฟฟ้า \mathbf{D} โดยค่าทั้ง 2 นั้นเกิดเป็นค่าสูงสุดในเวลาอันรวดเร็ว ซึ่งจะพิจารณาการเกิดเป็นแบบสนามไฟฟ้าสถิต (electrostatic field) อย่างไรก็ตามความหนาแน่นสนามไฟฟ้า \mathbf{D} มีทั้งชั่ววอกและชั่วพลซึ่งมีค่าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ โดยถูกเหนี่ยวนำที่ผิวของอิเล็กโตรด จำนวนประจุที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับแหล่งจ่าย และจะลดลงตามจำนวนเส้นสนามไฟฟ้า (electric field line) สำหรับการทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-varying field) $\mathbf{E}(t)$ และอาจจะเรียกว่าการเคลื่อนที่ของกระแส (displacement current) ทำให้โดยจ่ายแรงดันเพื่อรักษาความหนาแน่นประจুবริเวณอิเล็กโตรด โดยกระแสที่เกิดขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับเวลา dQ/dt เมื่อ Q คือประจุไฟฟ้ารวมที่เกิดขึ้นสะสมอยู่ที่อิเล็กโตรด

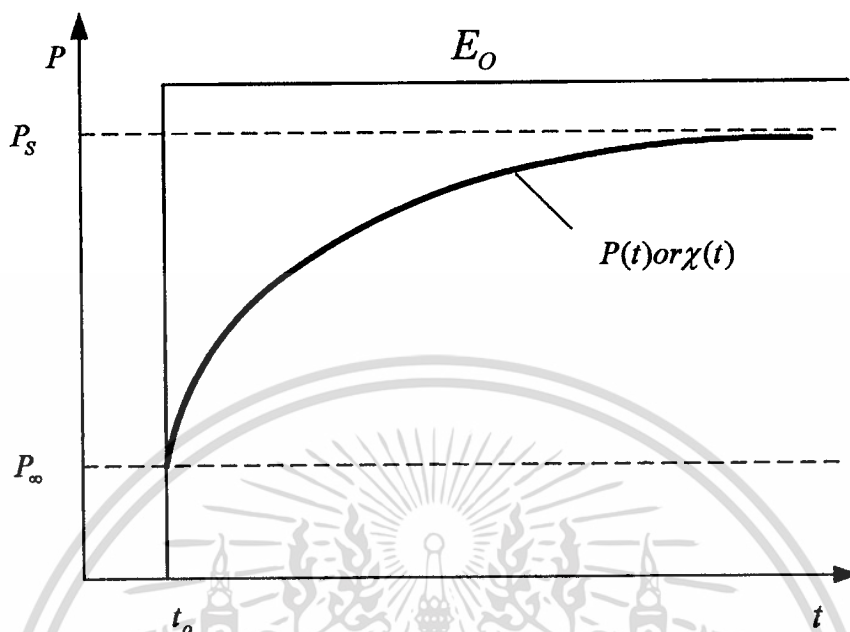
ดังนั้นเมื่อคิดผลทางฟิสิกส์ของไดอิเล็กตริก การเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า \mathbf{D} จากสมการที่ 2.3 ต้องเพิ่มพจน์ของมาโครสโคปิก (macroscopic) โพลาริเซชัน ซึ่งอยู่ในสมการที่ 2.2 เข้าไปด้วย

$$\mathbf{D}(t) = \varepsilon_0 \mathbf{E}(t) + \mathbf{P}(t) = \varepsilon_0 (1 + \chi) \mathbf{E}(t) \quad (2.5)$$

ความหมายของสมการจะประกอบไปด้วย เวกเตอร์ \mathbf{P} และ \mathbf{D} ซึ่งสัมพันธ์กับ \mathbf{E} โดยที่ความสัมพันธ์ของโพลาริเซชัน (polarization) \mathbf{P} นั้น จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาเขียนแทนด้วย $\mathbf{P}(t)$ ถึงแม้ว่าจะมีระยะเวลาไม่นานมากเหมือนกับ $\mathbf{E}(t)$ ก็ตาม ซึ่งความแตกต่างระหว่างกระบวนการโพลาริเซชัน (polarization processes) เกิดจากการหน่วงเวลาที่สัมพันธ์กับการปรากฏขึ้นของ \mathbf{E} การหน่วงเวลาที่เกิดขึ้น สามารถอธิบายโดยพฤติกรรมอัตราค่าความยอมรับได้ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลา (time-dependent behavior of the susceptibility) $\chi = \chi(t)$

เวลาล่าช้าเข้าใจได้ว่าเกิดจากกระบวนการดังนี้ เมื่อเริ่มต้นป้อนสนามไฟฟ้าเป็นแบบขั้น (step-like electric field) ได้ค่ายอด (magnitude) E_0 ให้กับไดอิเล็กตริกที่ระยะเวลา t_0 และสนามไฟฟ้ายังคงที่เมื่อ $t \geq t_0$ เนื่องจากคุณสมบัติของไดอิเล็กตริก ที่ถูกกำหนดโดยระยะเวลาที่ขึ้นอยู่กับค่าความยอมรับได้ $\chi(t)$ ซึ่งเหมือนกับโพลาริเซชัน $\mathbf{P}(t)$ และเหมือนกับผลตอบสนองในรูปโดเมนเวลา (response in the time domain) ซึ่งก็คือการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบต่างกันในกระบวนการโพลาริเซชัน ซึ่งถ้าเกิดขึ้นในระยะเวลาที่รวดเร็วมาก ได้แก่ อิเล็กทรอนิกส์โพลาริเซชัน ถ้าระยะเวลาที่นานขึ้น ได้แก่ ไดโพลโพลาริเซชัน และเมื่อ

ระยะเวลาสั้นขึ้นอีกได้แก่ อินเตอร์เฟเชียลโพลาริเซชัน สำหรับ $t \leq t_0$ ค่าสูงสุดของอัตราความยอมรับได้ หรือ โพลาริเซชันมีค่าเป็นศูนย์



รูปที่ 2.6 การเกิดโพลาริเซชันในไดอิเล็กตริกเมื่อป้อนสนามไฟฟ้า E_0 อย่างทันทีทันใดที่ $t = t_0$

รูปที่ 2.6 แสดงการเกิดขึ้นของกระบวนการโพลาริเซชันในรูปโดเมนเวลา ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 2.2 แสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$P(t)/E_0 = \epsilon_0 \chi(t) 1(t) \quad (2.6)$$

ในที่นี้ $\chi(t)$ และ $P(t)$ นั้นอยู่ในรูปฟังก์ชันผลตอบสนองแบบขั้น 1 หน่วย (step response function) ซึ่งจะแทนด้วยตัวประกอบ $1(t)$ สำหรับใช้แสดงฟังก์ชัน 1 หน่วยในอุดมคติ (ideal step) โดยการทำให้เกิดกระบวนการโพลาริเซชันที่เร็วมาก ได้แก่ โพลาริเซชันแบบทันทีทันใด (instantaneous polarization) $P(t = t_0) = P_\infty$ (สัญลักษณ์ “ ∞ ” ของ P_∞ เป็นความสัมพันธ์ของโดเมนความถี่) โดยไม่รวมผลของอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นกระบวนการที่เร็วมาก และมีเพียงจำนวนเล็กน้อยในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงขนาดใหญ่ และไม่สามารถบันทึกในรูปของโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ ขอบเขตของกระบวนการโพลาริเซชันจะถูกกำหนดโดยขนาดและระยะเวลาที่นาน ในกระบวนการสุดท้ายของโพลาริเซชันเมื่อเวลาเข้าใกล้อินฟินิตี $P(t \rightarrow \infty)$ จะเป็นค่าคงที่คือ P_s ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 2.6 และสามารถเขียนผลตอบสนองแบบขั้น 1 หน่วย ของโพลาริเซชันดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P(t) = P_{\infty} + (P_s - P_{\infty})g(t - t_0), \quad (2.7)$$

โดย $g(t)$ นั้นไม่มีขนาด เป็นเพียงฟังก์ชันที่แสดงให้เห็นความต่อเนื่อง ดังนั้นจากสมการที่ 2.6 สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$P(t) = \varepsilon_0 [\chi_{\infty} + (\chi_s - \chi_{\infty})g(t - t_0)]E_0 \quad (2.8)$$

ถ้าค่าเปอร์มีตติวิตี คือ $\varepsilon = 1 + \chi$ สามารถเขียน ใหม่ได้ดังนี้

$$P(t) = \varepsilon_0 [(\varepsilon_{\infty} - 1) + (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty})g(t - t_0)]E_0. \quad (2.9)$$

จากทฤษฎีวงจรไฟฟ้า (circuit theory) สามารถคำนวณ โพลาริซเซชัน $P(t)$ ที่ระยะเวลาใดๆ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อวัสดุทดสอบได้รับสนามไฟฟ้า $E(t)$ โดยวิธีการแก้ปัญหาที่ ด้วยวิธี Duhamel's Integral หรือ คอนโวลูชัน (Convolution) ในรูปของโดเมนเวลา ดังนั้นจากสมการ 2.8 สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$P(t) = \varepsilon_0 \chi_{\infty} E(t) + \varepsilon_0 \int_{-\infty}^t f(t - \tau) E(\tau) d\tau, \quad (2.10)$$

เมื่อ $f(t)$ คือ ฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กตริก (dielectric response function)

$$f(t) = (\chi_s - \chi_{\infty}) \partial g(t) / \partial t = (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}) \partial g(t) / \partial t. \quad (2.11)$$

จาก $f(t)$ ที่กำหนดในสมการที่ 2.11 แสดงให้เห็นการลดลงของฟังก์ชันอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญในการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมตามธรรมชาติของ ไดอิเล็กตริก

โดยโพลาริซเซชัน $P(t)$ เป็นตัวหลักที่ทำให้เกิดกระแสโพลาริซเซชัน (polarization current) ในวัสดุทดสอบ เมื่อได้ทำการป้อนสนามไฟฟ้า $E(t)$ อย่างทันทีทันใด ซึ่งยังไม่ได้คำนึงค่าความนำกระแสตรง (dc conductivity) σ_0 โดยค่าความนำกระแสตรงนั้น เป็นปรากฏการณ์ที่ประจุอิสระเกิดการเคลื่อนที่ในไดอิเล็กตริก และไม่เกี่ยวข้องกับโพลาริซเซชัน

จากหลักการของแมกเวลล์ (Maxwell) ในปี 1891 อธิบายไว้ว่าสนามไฟฟ้า $E(t)$ ก่อให้เกิดความหนาแน่นกระแสรวม (total current density) $j(t)$ สามารถเขียนเป็นผลบวกของค่าความนำ (conduction) สูญญากาศ (vacuum) และการเคลื่อนที่ของกระแสโพลาริซเซชัน (polarization displacement current) ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 j(t) &= \sigma_0 E(t) + \frac{\partial D(t)}{\partial t} \\
 &= \sigma_0 E(t) + \varepsilon_0 \frac{\partial E(t)}{\partial t} + \frac{\partial P(t)}{\partial t} \quad (2.12)
 \end{aligned}$$

และจากสมการ (2.10) เมื่อ $E(t) =$ ค่าคงที่

$$j(t) = \sigma_0 E(t) + \varepsilon_0 [\varepsilon_\infty \delta(t) + f(t)] E(t) \quad (2.13)$$

เมื่อ $\varepsilon_\infty = 1 + \chi_\infty$

จากสมการที่ (2.13) สามารถที่จะพิจารณา สมการพื้นฐานสำหรับการวัดฟังก์ชันผลตอบสนองของไดอิเล็กตริก (dielectric response function) $f(t)$ หรือ วัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นไดอิเล็กตริก ซึ่งอยู่ในรูปโดเมนเวลา (TD) ตามวิธีของ AK Josher [45-48] ดังสมการที่ 2.14

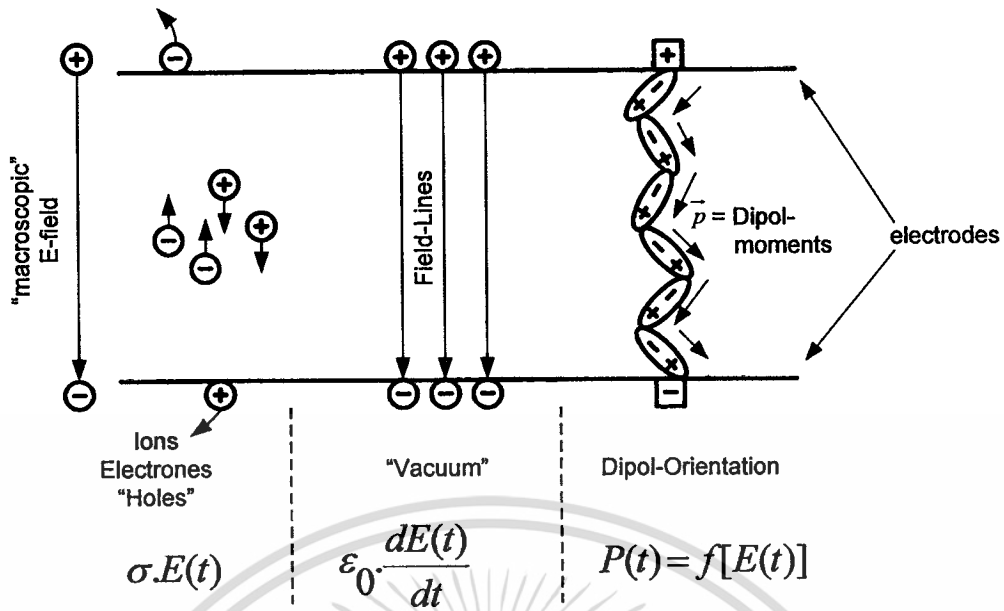
เริ่มจากป้อนแรงดันกระแสตรงรูปขั้น (step dc) ที่มีขนาด U_c ให้กับวัสดุทดสอบ ทำให้เกิดกระแสโพลาริเซชัน (polarization current) ดังสมการที่ 2.14

$$i_{pol}(t) = C_0 U_c \left[\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} + \varepsilon_\infty \delta(t) + f(t) \right] \quad (2.14)$$

เมื่อ C_0 คือ ค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ และ $\delta(t)$ คือ ฟังก์ชันเดลต้า เป็นผลจากการป้อนแรงดันรูปขั้น ที่ $t = t_0$

(หมายเหตุ C_0 คือ geometric capacitor ที่เกิดจากค่าความเก็บประจุในสุญญากาศของระบบอิเล็กโตรด ซึ่งมีไดอิเล็กตริกคั่นกลาง หรือ ค่าความเก็บประจุที่ความถี่สูง ณ เวลาเริ่มต้น t_0 โดยเกิดจากการวัดกระแสตอนเริ่มต้น)

จากการเปลี่ยนแปลงรูปจากสมการ (2.13) ถึง (2.14) และรูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นถึงกระแสที่ประกอบด้วยทอม 3 ทอม ได้แก่ ทอมแรก คือ ความสัมพันธ์ของค่าความนำไฟฟ้า (conductivity) ภายในอุปกรณ์ทดสอบ ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับการโพลาริเซชัน ทอมสุดท้ายแสดงให้เห็นกระบวนการโพลาริเซชัน เมื่อได้ทำการป้อนแรงดัน ส่วนทอมกลางเป็นเดลต้าฟังก์ชัน ซึ่งไม่สามารถบันทึกได้ในทางปฏิบัติ เนื่องจากเป็นย่านที่กระแสเคลื่อนที่เร็วมาก เพราะภายในไดอิเล็กตริกเกิดกระบวนการโพลาริเซชันที่เร็วมาก



รูปที่ 2.7 การก่อเกิดของกระแสโพลาริเซชัน

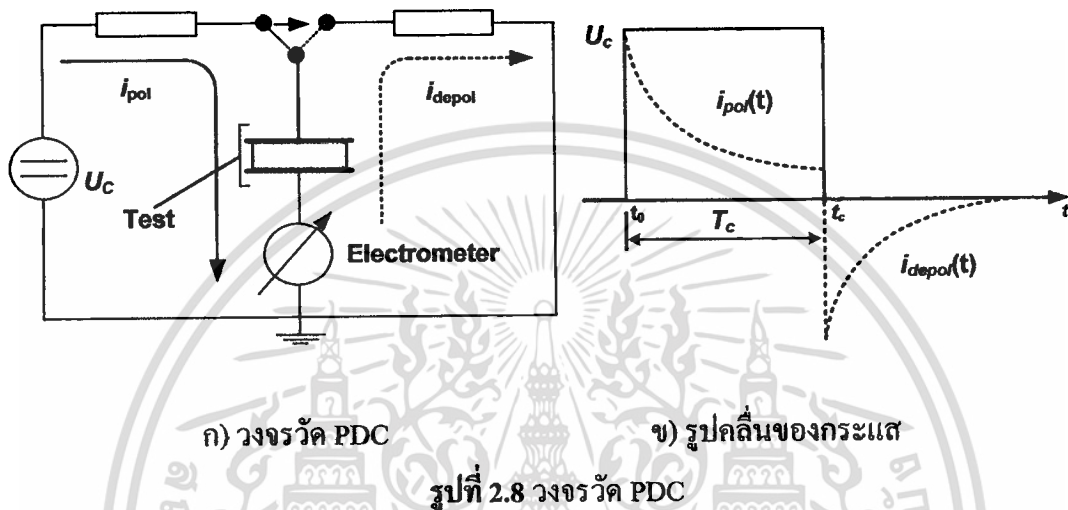
จากกระแสโพลาริเซชัน (polarization current) i_{pol} ที่ได้ทำการวัดมีค่ากระแสคงที่ หรือ ลดลงอย่างช้ามาก อันเนื่องมาจากผลของ dc หลังจากนั้น ทำการลัดวงจรวัสดุทดสอบ ที่เวลา $t = t_c$ เรียกกระแสที่เกิดจากการวัดนี้ว่าดีโพลาริเซชัน (depolarization current) i_{depol} ดังแสดงได้ ในรูปที่ 2.8 สามารถอธิบายได้ด้วยหลักการซ้อนทับ โดยเมื่อลดแรงดัน U_c จนมีค่าเท่ากับศูนย์ อย่างทันทีทันใด เปรียบเสมือนแรงดันรูปขั้นตรงกันข้ามกับการป้อนแรงดัน ที่เวลา $t = t_c$ ค่า - และเครื่องหมายติดลบในเทอมที่ 2 ของสมการที่ 2.14 เมื่อ $t \geq (t_0 + T_C)$ จะเกิดเป็นพัลส์ ซึ่งเกิดจากการลัดวงจรในระยะเวลาอันสั้น

$$i_{depol}(t) = -C_0 U_c [f(t) - f(t + T_C)] \quad (2.15)$$

เมื่อ T_C คือระยะเวลาที่ป้อนแรงดันรูปขั้น ทำให้กระแสมีทิศทางตรงกันข้าม ในเทอมที่สอง แสดงให้เห็นว่าสมการมีค่าติดลบ ถ้าระยะเวลา T_C มีพอสำหรับกระบวนการโพลาริเซชันเสร็จสมบูรณ์ โดยกระแสโพลาริเซชันจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กตริก (dielectric response function) $f(t)$ ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับค่าความนำไฟฟ้ากระแสตรง (dc conductivity) σ_0 ภายในไดอิเล็กตริก จึงทำให้การคำนวณความต่างกันระหว่างกระแสโพลาริเซชัน และ กระแสดีโพลาริเซชันทำได้ง่ายขึ้น จากสมการที่ 2.15 แสดงให้เห็น ฟังก์ชัน 2 ส่วน สำหรับการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริก $f(t)$ หรือ คุณสมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริก ในรูปของ

เอกสารได้เเมนเวลา ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ อย่างไรก็ตามถ้าระยะเวลาในการชาร์จไม่เพียงพอ เทอมที่สองจะกลายเป็นศูนย์ เนื่องจากผลของ memory effect ในไดอิเล็กตริก มีสาเหตุมาจากกระบวนการโพลาไรซ์เซชัน (polarization processes) ที่ยังไม่สมบูรณ์ หรือระยะเวลาในการชาร์จ T_c ไม่เพียงพอ ในรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นค่าสูงสุดของกระแส มีลักษณะเกิดขึ้นอย่างกะทันหัน ซึ่งเกิดจากฟังก์ชันเคลต้า $\delta(t)$ ในสมการที่ 2.14 และ 2.15



ในทางปฏิบัติ กระแสโพลาไรซ์เซชัน และ กระแสดีโพลาไรซ์เซชัน สามารถวัดได้โดยใช้อิเล็กโตรดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.8 ความต้านทานที่ต่อภายในวงจรมีไว้เพื่อป้องกันเครื่องมือวัด ในกรณีที่วัสดุทดสอบเป็นฉนวน ทำให้เกิดความแตกต่างภายในวงจร ดังนั้นกระแสโพลาไรซ์เซชัน และ กระแสดีโพลาไรซ์เซชัน มีค่าตามลักษณะอิเล็กโตรดและกราวด์เสมือน (virtual ground) ในกรณีที่เป็นฉนวนผสม ได้แก่ ฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง สามารถทำได้โดยวางวัสดุทดสอบเข้ากับวงแหวนการ์ด (guard ring)

2.4 ผลตอบสนองไดอิเล็กตริก (Dielectric Response/Spectroscopy) ในรูปโดเมนความถี่ [43],[53]

การวิเคราะห์ผลที่อยู่ในรูปของโดเมนเวลา สามารถแปลงให้อยู่ในรูปโดเมนความถี่ โดยใช้วิธีการแปลงลาปลาซ (Laplace Transform) หรือ การแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) ทำการแปลงรูปสมการที่ 2.10 และ 2.11 สำหรับผลรวมความหนาแน่นของกระแสที่มีฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กตริก และมีผลตอบสนองที่เป็นสเตป สามารถพิจารณากระบวนการโพลาไรซ์เซชัน อย่างทันทีทันใดได้ดังนี้

$$j(t) = \sigma_0 E(t) + \varepsilon_0 \frac{dE(t)}{dt} + \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \int_0^t f(t-\tau) E(\tau) d\tau \quad (2.16)$$

โดยสามารถเขียนแทนสัญลักษณ์

$$j(t) \Rightarrow j(p); E(t) \Rightarrow E(p); E'(t) \Rightarrow pE(p); f(t) \Rightarrow F(p);$$

และพิจารณาเทอมสุดท้ายที่ติดอยู่ในรูปการคอนโวลูชัน ให้อยู่ในรูปลาปลาซซึ่งสามารถแทนด้วยตัว p (Laplace Operator)

$$j(p) = \sigma_0 E(p) + \varepsilon_0 pE(p) + \varepsilon_0 pF(p)E(p). \quad (2.17)$$

ตัว p คือ ความถี่เชิงซ้อน (complex frequency) $i\omega$, ดังนั้น สามารถลดรูปสมการได้ดังนี้

$$\underline{j}(\omega) = \underline{E}(\omega) [\sigma_0 + i\omega\varepsilon_0 (1 + \underline{F}(\omega))]. \quad (2.18)$$

โดย $\underline{E}(\omega)$ คือ การแปลงฟูเรียร์ของฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กตริก $f(t)$ หรือความสามารถยอมรับได้เชิงซ้อน (complex susceptibility):

$$\begin{aligned} \underline{\chi}(\omega) &= \underline{F}(\omega) = \chi'(\omega) - i\chi''(\omega) \\ &= \int_0^\infty f(t) \exp(-i\omega t) dt. \end{aligned} \quad (2.19)$$

หมายเหตุ สเกลความถี่อยู่ในช่วง $0 \leq \omega \leq \infty$ สามารถรวมสมการ (2.18) และ (2.19) และเขียนเป็นผลรวมความหนาแน่นของกระแส

$$\underline{j}(\omega) = \{\sigma_0 + \varepsilon_0 \omega \chi''(\omega) + i\omega\varepsilon_0 [1 + \chi'(\omega)]\} \underline{E}(\omega). \quad (2.20)$$

จากทฤษฎีพื้นฐานเดิม เมื่อพิจารณาจากค่าความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าในรูปเชิงซ้อน (complex dielectric permittivity) $\underline{\varepsilon}(\omega)$ ซึ่งแสดงเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\underline{D}(\omega) = \varepsilon_0 \underline{\varepsilon}(\omega) \underline{E}(\omega) \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เมื่อ

$$\underline{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega) = (1 + \chi'(\omega)) - i\chi''(\omega). \quad (2.22)$$

การวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริก (dielectric response) ในรูปโดเมนความถี่นั้น เป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ เนื่องจากเป็นย่านความถี่ที่อยู่ในช่วงกว้าง ซึ่งมีการใช้กันน้อยในทางวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง โดยปกติจะวัด "C - tan δ " เพียงความถี่เดียวเท่านั้น อย่างไรก็ตามการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริกในรูปโดเมนความถี่ ก็ยังมีการทดสอบบ้างสำหรับห้องปฏิบัติการต่างๆ จากสมการที่ 2.20 แสดงให้เห็นค่ากระแสที่ก่อให้เกิดความนำไฟฟ้ากระแสตรง (dc conductivity) σ_0 และ ค่าการสูญเสียของไดอิเล็กตริก (dielectric loss) $\chi''(\omega)$ ไม่มีความแตกต่างจากการวัดจริง ส่งผลให้ค่าจากการวัด จากสมการที่ (2.21) และ (2.22) นั้น สามารถนำมาอธิบาย เพื่อให้สอดคล้องกับผลการวัดค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของไดอิเล็กตริก (relative dielectric permittivity) $\underline{\varepsilon}_r(\omega)$ โดยสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\underline{j}(\omega) = i\omega\varepsilon_0 \underline{\varepsilon}_r(\omega) \underline{E}(\omega). \quad (2.23)$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \underline{\varepsilon}_r(\omega) &= \varepsilon'_r(\omega) - i\varepsilon''_r(\omega) \\ &= \varepsilon'(\omega) - i[\varepsilon''(\omega) + \sigma_0 / \varepsilon_0\omega] \\ &= 1 + \chi'(\omega) - i[\chi''(\omega) + \sigma_0 / \varepsilon_0] \end{aligned} \quad (2.24)$$

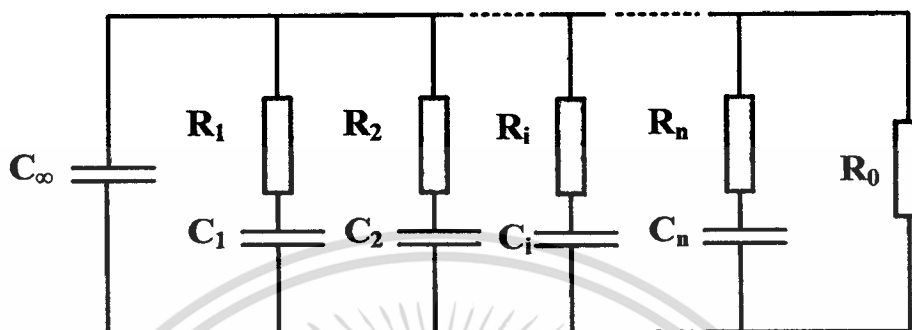
และค่าตัวประกอบความสูญเสียของ ไดอิเล็กตริก (dissipation factor) $\tan \delta(\omega)$,

$$\tan \delta(\omega) = \frac{\varepsilon''_r(\omega)}{\varepsilon'_r(\omega)} = \frac{\varepsilon''(\omega) + \sigma_0 / \varepsilon_0\omega}{\varepsilon'_r(\omega)} \quad (2.25)$$

จากค่าจริงของสมการที่ 2.24 แสดงให้เห็นค่าเก็บประจุจริงของวัสดุทดสอบ ส่วนค่าจินตภาพแสดงให้เห็นถึงค่าความสูญเสีย ซึ่งอยู่ในรูปโดเมนความถี่ และจะไม่พบความแตกต่างถ้าหากทำการวัด C - tan δ ที่ย่านความถี่ความถี่เดียว ดังนั้นการวัด C - tan δ ที่ความถี่ในย่านต่างๆ เพื่อให้เห็นถึงผลการเสื่อมอายุของฉนวน นับว่าเป็นวิธีวินิจฉัยวิธีใหม่สำหรับเฟ้าระวัง และตรวจพบปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับฉนวนไฟฟ้า

2.5 โมเดลไดอิเล็กตริก

โมเดล ไดอิเล็กตริก รูปที่ 2.9 เป็นโมเดลที่แสดงกระบวนการโพลาไรซ์เซชัน โดยนำ R-C ต่อขนานกันอยู่เพื่อใช้ในการหาผลตอบสนองของฉนวน [54]



รูปที่ 2.9 โมเดลลิเนียร์ไดอิเล็กตริก

รูปที่ 2.9 ประกอบไปด้วย $R_i C_i$ ซึ่งเกิดจากการจำลองกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน [56] โดย C_0 หรือ C_∞ เป็นค่าเก็บประจุความถี่สูงหาได้จากการวัดด้วยวงจรบริดจ์ ส่วน $R_0 (= C_0 \sigma_0 / \epsilon_0)$ คือความต้านทานกระแสตรง สามารถเขียนสมการที่ใช้จำลองกระแสดีโพลาไรซ์เซชันได้ดังนี้

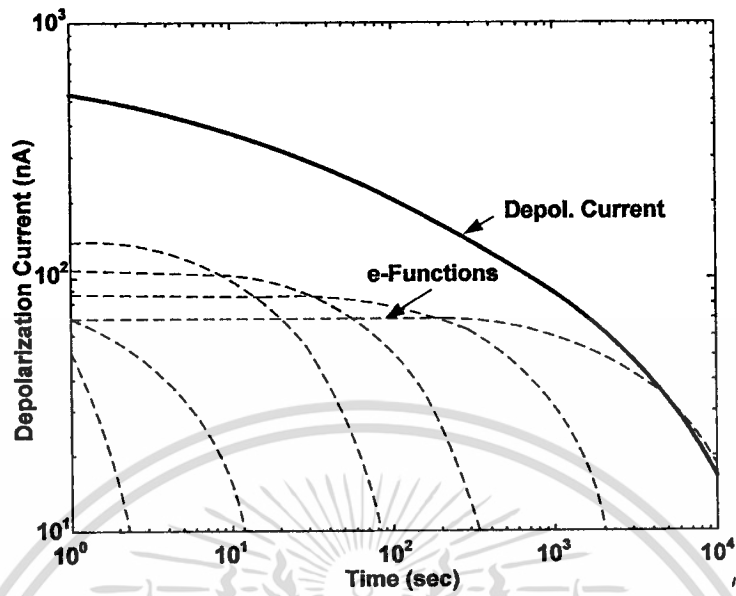
$$i_{depol}(t) = \sum_{i=1}^n A_i \exp(-t/T_i), \quad (2.26)$$

เมื่อ

$$A_i = U_c [1 - \exp(-T_c / \tau_i)] / R_i, \text{ for } i = 1 \dots n. \quad (2.27)$$

ในสมการที่ 2.27 T_c คือคาบเวลาที่ใช้ในการป้อนแรงดัน U_c

ค่า A_i คือ กระแสที่ได้จำลองขึ้นมา T_i คือ เวลาคงตัว (time constant) ในการจำลองจะจำลองค่าเวลาที่อยู่ในสเกลล็อก ทำการวัดในหลายๆค่าช่วงเวลา ผลรวมที่ได้พยายามให้มีค่าใกล้เคียงกับกระแสดีโพลาไรซ์เซชันมากที่สุด



รูปที่ 2.10 ผลของระยะเวลาต่อการวัดกระแสดีโพลาริเซชัน หม้อแปลงไฟฟ้า 45 MVA [55]

พิจารณาในรูปโดเมนความถี่ สามารถทำโดยอาศัยสมการที่ (2.23) ซึ่งเป็นความแตกต่างระหว่างกระแสสลับ $I(\omega)$ และแรงดันสลับ $U(\omega)$ ที่เกิดจากการวัด

$$I(\omega) = i\omega C(\omega)U(\omega) \tag{2.28}$$

เมื่อ $C(\omega)$ คือ คาปาซิเตอร์เชิงซ้อน (complex capacitance) มีความสัมพันธ์กับเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ จากสมการที่ 2.24

$$\begin{aligned} C(\omega) &= C'(\omega) - iC''(\omega) \\ &= C_0 \{ \epsilon'_r(\omega) - i[\epsilon''_r(\omega) + \sigma_0 / \epsilon_0] \}. \end{aligned} \tag{2.29}$$

เมื่อ C_0 และ σ_0 คือค่าเก็บประจุ (geometric capacitance) และค่าความนำของวัสดุ จากสมการที่ 2.25 สามารถคำนวณค่าสูญเสีย (dissipation factor) $\tan \delta$ ได้ดังนี้

$$\tan \delta(\omega) = \frac{C''(\omega)}{C'(\omega)} \tag{2.30}$$

โดย $C'(\omega)$ แสดงค่าเก็บประจุจริงของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 $C''(\omega)$ แสดงผลการสูญเสียจากค่าความนำไฟฟ้ากระแสตรง
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อผู้อื่น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวงจรสมมูลย์ในรูปที่ 2.9 สามารถคำนวณหาค่าเก็บประจุเชิงซ้อน (complex capacitance) $\underline{C}(\omega)$ จากสมการที่ 2.28 สามารถแสดงในรูปแอดมิตแตนซ์เชิงซ้อน (complex admittance) $\underline{Y}(\omega)$ ได้ดังสมการที่ 2.31

$$C(\omega) = \frac{\underline{Y}(\omega)}{i\omega} = C_\infty + \frac{1}{i\omega R_0} + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{1+i\omega R_i C_i}. \quad (2.31)$$

ซึ่ง $\underline{C}(\omega)$ สามารถแยกออกเป็น ส่วนจริงและส่วนจินตภาพได้ดังนี้

$$C'(\omega) = C_\infty + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{1+(\omega R_i C_i)^2} \quad (2.32)$$

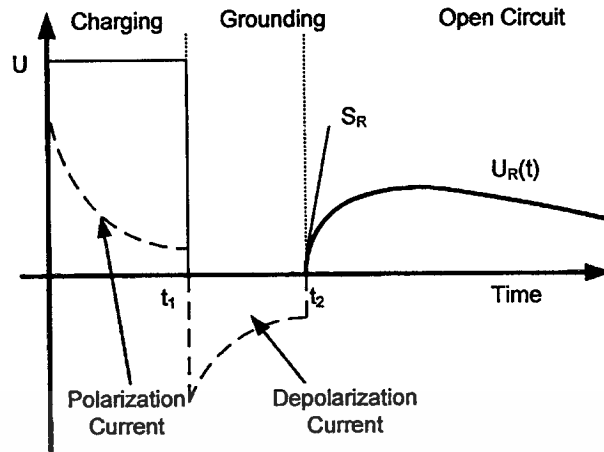
และ

$$C''(\omega) = \frac{1}{\omega R_0} + \sum_{i=1}^n \frac{\omega R_i C_i^2}{1+(\omega R_i C_i)^2}. \quad (2.33)$$

ส่วนค่า $\tan \delta(\omega)$ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\tan \delta(\omega) = \frac{\frac{1}{\omega R_0} + \sum_{i=1}^n \frac{\omega R_i C_i^2}{1+(\omega R_i C_i)^2}}{C_\infty + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{1+(\omega R_i C_i)^2}}. \quad (2.34)$$

จากรูปที่ 2.11 แสดงให้เห็นแรงดันย้อนกลับ (return voltage) $U_R(t)$ ซึ่งเกิดจากการวัดแรงดันตอนเปิดวงจร ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้ หลังจากป้อนแรงดัน U_C ให้แก่วัดทดสอบ โดยมีความเวลาในการป้อนแรงดัน $T_C = t_1$, และหยุดป้อนแรงดัน (grounding) ที่ $T_d = t_2 - t_1$ สำหรับแรงดันย้อนกลับจะเริ่มวัดที่เวลา $t \geq t_2$ โดยที่ S_R เป็นค่าความชันของแรงดันย้อนกลับ



รูปที่ 2.11 แรงดันย้อนกลับ (return voltage)

สามารถกำหนดค่า U_R ตามเงื่อนไขที่เวลา $t = t_2$ และเมื่อแก้สมการดิฟเฟอเรนเชียล (differential equation) จะได้ว่า

$$u_R(t_2) = 0, \quad (2.35)$$

โดยแรงดันเริ่มต้นถูกกำหนดโดย $R_i C_i$

$$u_i(t_2) = U_c [1 - \exp(-T_c / R_i C_i)] \exp(-T_d / R_i C_i). \quad (2.36)$$

แรงดันย้อนกลับสามารถคำนวณตามสมการดิฟเฟอเรนเชียล

$$\frac{du_i(t)}{dt} = \frac{1}{R_i C_i} [u_r(t) - u_i(t)], \text{ for } i = 1 \dots n \quad (2.37)$$

และ

$$\frac{du_R(t)}{dt} = \frac{1}{R_i C_i} \left[-\frac{u_r(t)}{R_0} - \sum_{i=1}^n \frac{u_r(t) - u_i(t)}{R_i} \right]. \quad (2.38)$$

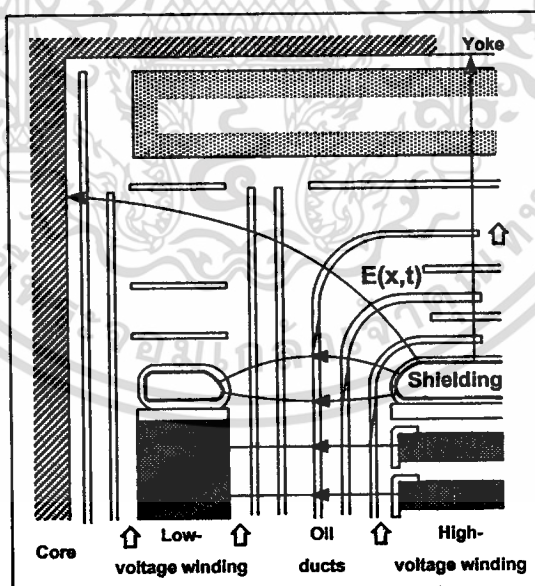
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การวิเคราะห์ระบบฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

ในหัวข้อการวิเคราะห์ระบบฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง จะประกอบไปด้วยฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด oil immersed ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างเพรสบอร์ดและน้ำมัน การเสื่อมสภาพของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า และการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วย PDC Analyzer

2.6.1 ฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด oil immersed

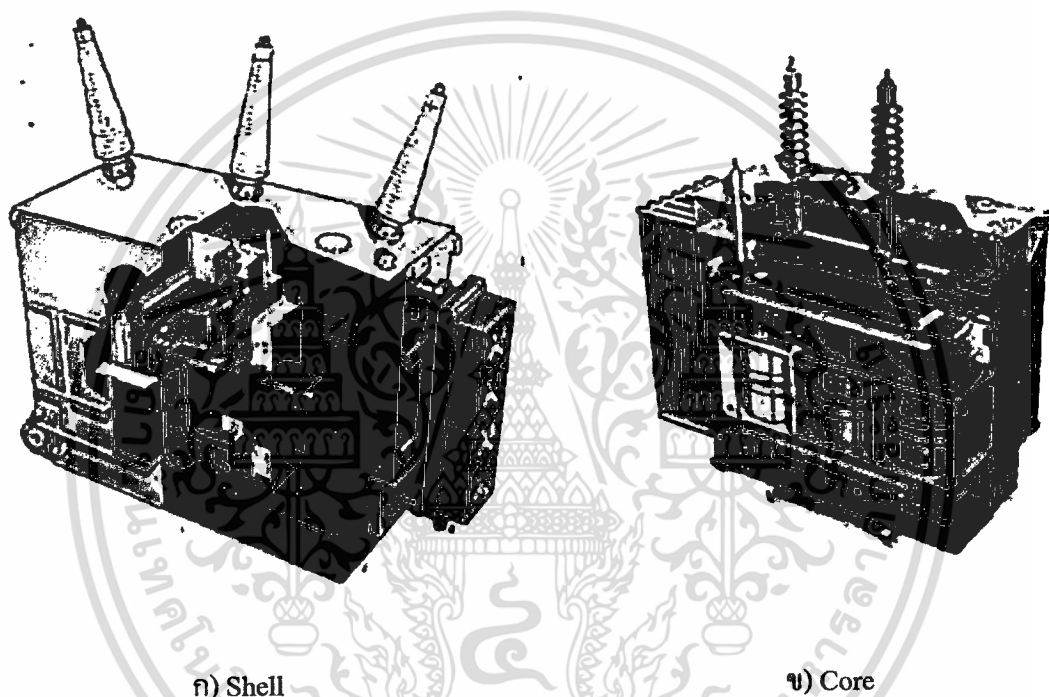
ฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด oil immersed นั้น ประกอบด้วยฉนวนซึ่งผสมจะประกอบไปด้วย กระดาษเพรสบอร์ดและน้ำมันเป็นหลัก [56] ส่วนน้ำมันหม้อแปลงทำหน้าที่เป็นฉนวนของเหลวแทรกซึมระหว่างตัวนำและเพรสบอร์ด (press board) เพื่อควบคุมสนามไฟฟ้านอกจากนั้นน้ำมันหม้อแปลงยังทำหน้าที่ระบายความร้อนให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า ส่วนฉนวนของแข็งจะทำหน้าที่รองรับแรงทางกล ซึ่งแบ่งโครงสร้างฉนวนเพรสบอร์ดออกเป็นส่วนย่อย ๆ มีลักษณะเป็นชั้นๆ (Barrier) เพื่อใช้สำหรับควบคุมความเครียดของสนามไฟฟ้าภายในช่องน้ำมัน (oil channels) โครงสร้างของฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด oil immersed แสดงได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด oil immersed

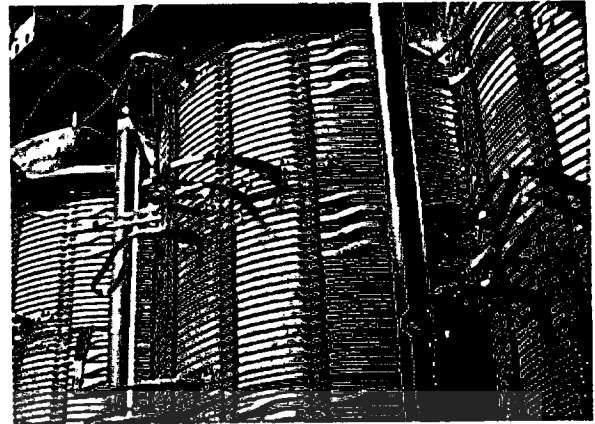
2.6.1.1 ฉนวนเซลลูโลส ในหม้อแปลงไฟฟ้า

ฉนวนเซลลูโลสเป็นฉนวนหลักในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยมีน้ำมันเป็นฉนวนร่วม (oil-filled transformers) การใช้งานฉนวนเซลลูโลสมีทั้งหม้อแปลงในระบบจำหน่ายที่ติดตั้งตามเสาไฟฟ้าพิกัดตั้งแต่ 10 kVA ถึง 1500 MVA และ อาจมีใช้ได้ถึงจนถึงระดับแรงดัน 1000 kV และในกรณีที่เป็นหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานีไฟฟ้า (substation) จะต้องมีฉนวนเซลลูโลส (กระดาษและเพรสบอร์ด) ปริมาณหลายตันร่วมกับน้ำมัน 40,000 ถึง 100,000 ลิตร รูปที่ 2.13 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง



รูปที่ 2.13 โครงสร้างภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแบบชนิด Shell และ ชนิด Core [59]

ตัวโครงสร้างของฉนวนกระดาษมีหน้าที่คั่นออกระหว่าง HV และ LV และสามารถแยกเป็นส่วนประกอบต่าง ๆ ดังนี้ ท่อพันขดลวด (winding tube) สเปซเซอร์ (spacer blocks) และส่วนประกอบต่าง ๆ ที่ใช้ปิดขอบและมุม (end closing) โดยรูปที่ 2.14 ก) แสดงเพรสบอร์ดส่วนต่าง ๆ ที่เตรียมไว้สำหรับใช้งาน ส่วนรูปที่ 2.14 ข) แสดงการพันขดลวดแรงสูงของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังชนิด Core ด้วยฉนวนกระดาษ

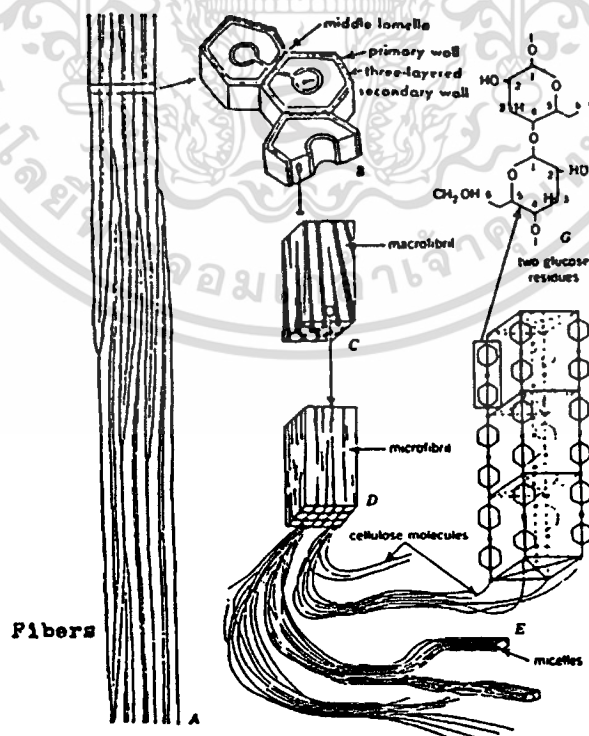


ก) ฉนวนกระดาษ

ข) โครงสร้างหือแปลงแบบ Core

รูปที่ 2.14 ฉนวนกระดาษและ การพันขดลวดแรงสูงด้วยฉนวนกระดาษ [59]

ฉนวนกระดาษและเพรสบอร์ดที่มีคุณภาพดีส่วนใหญ่ทำมาจากเยื่อไม้ โดยกระบวนการผลิตเริ่มจากนำไม้ธรรมชาติ(ทั้งไม้อ่อนและไม้แข็ง) ที่มีส่วนประกอบของทอเซลลูโลสถูกเชื่อมต่อกันด้วยลิกนิน (lignin) หลังจากนั้นนำมาผ่านกระบวนการแยกเยื่อไม้ออกจากกัน และผ่านกระบวนการทางเคมี จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเรียกว่ากระดาษคราฟ (kraft paper) และคราฟบอร์ด (kraft board) โครงสร้างของเยื่อไม้แสดงดังรูปที่ 2.15

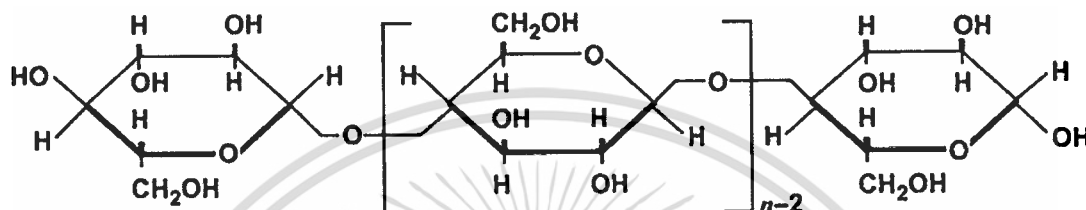


รูปที่ 2.15 โครงสร้างเซลลูโลส [59]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลลูโลสเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของกระดาษและเพอร์สบอร์ด ซึ่งเกิดจากกลูโคสหลาย ๆ ตัวมาเชื่อมต่อกัน แสดงดังรูปที่ 2.16 ซึ่งมีสูตรเคมีอย่างง่าย คือ $[C_5H_{10}O_5]_n$ เมื่อ n คือ degree of polymerization (DP)

สำหรับ DP ของตัวอย่างสามารถหาได้โดยมาตรฐาน ASTM D-4243 ซึ่ง DP ของเยื่อกระดาษกราฟอยู่ในช่วง 1100 – 1600 เมื่อเชื่อมต่อกันเป็นไฟเบอร์ DP จะมามากขึ้น (1400 – 1600)



รูปที่ 2.16 สูตรเคมีของเซลลูโลส [59]

2.6.1.2 ฉนวนน้ำมัน ในหม้อแปลงไฟฟ้า

ฉนวนน้ำมันในหม้อแปลงไฟฟ้า เกิดมาจากการแยกส่วนประกอบของน้ำมันดิบทางกายภาพ โดยใช้หลักความแตกต่างของจุดเดือดของสารประกอบ Hydrocarbon ชนิดต่าง ๆ ซึ่งรวมอยู่ในน้ำมันดิบออกมาได้ ด้วยการให้น้ำมันดิบกลั่นตัวที่อุณหภูมิต่างกัน ความร้อนที่จะทำให้กับน้ำมันดิบซึ่งอยู่ในเตาเผาอยู่ที่ประมาณ 315-371°C (600-700°F) จากนั้นน้ำมันดิบที่ร้อน รวมทั้งไอร้อนจะลอยขึ้นไปส่วนบนของหอกลั่น เมื่อได้รับความเย็นก็จะกลั่นตัวเป็นของเหลวบนถาดที่เรียงกันเป็นชั้น ๆ หลายสิบชั้นในหอกลั่น ส่วนบนสุดของหอกลั่นมีอุณหภูมิต่ำสุด คือ ก๊าซ ถัดลงมาจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็นลำดับ ประกอบด้วย น้ำมันเบนซิน น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล น้ำมันหม้อแปลง น้ำมันเตา และ Asphalt [60]

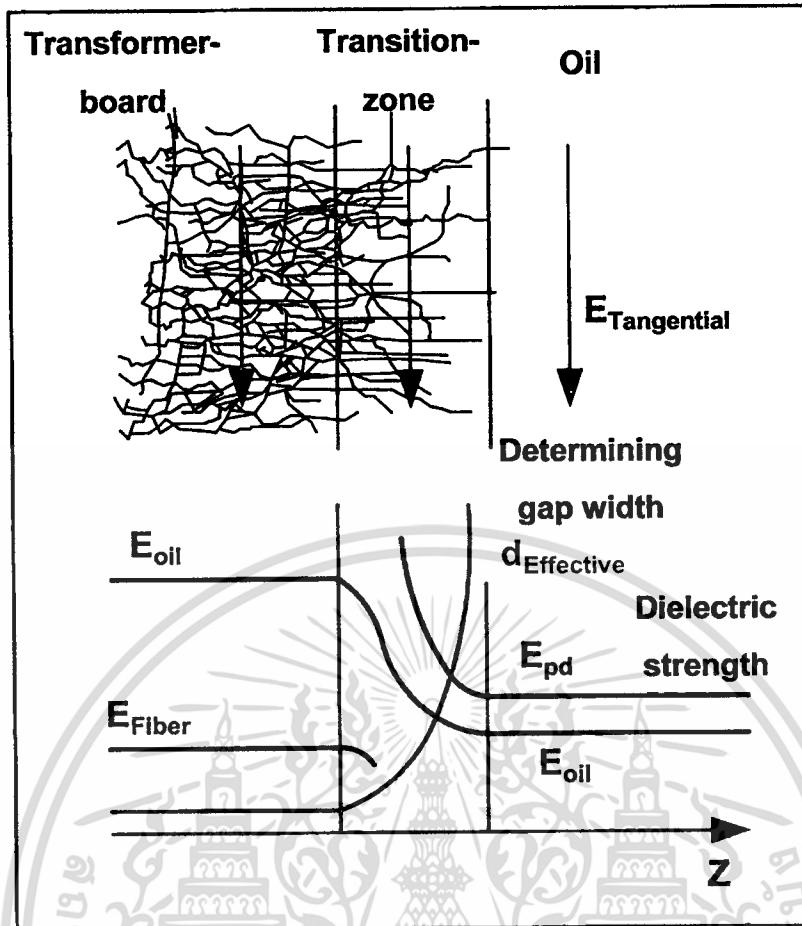
ผลิตภัณฑ์ที่ได้รับจากกรรมวิธีการกลั่นลำดับส่วน และการเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีส่วนใหญ่ยังมีคุณภาพไม่เหมาะสมกับสภาพการใช้งานและความต้องการของตลาด เพราะอาจมีสิ่งไม่พึงประสงค์เจือปนอยู่ สิ่งไม่พึงประสงค์นี้อาจเจือปนอยู่ในน้ำมันดิบหรืออาจเป็นผลที่เกิดจากกรรมวิธีการกลั่น เช่น กำมะถัน และสารแปลกปลอมต่าง ๆ ซึ่งจำเป็นต้องขจัดออก ด้วยกรรมวิธีการปรับปรุงคุณภาพเสียก่อน[60] โดยน้ำมันแร่ตามมาตรฐาน IEC 60296 มีคุณสมบัติต่างๆดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของน้ำมันแร่ [56]

Properties	Unit	Mineral oil (IEC 60296)
Density 25 °C	[kg/m ³]	860
Kinematic viscosity at 20 °C	[mm ² /s]	20
Burning point (ASTM D 92)	[°C]	150...175
Pour point (ASTM D 97)	[°C]	-40
Breakdown voltage	[kV]	60
Dielectric constant ϵ_r		2.2
Dissipation factor at 90 °C, 50 Hz		$<5 \times 10^{-3}$
Coefficient of expansion	[K ⁻¹]	0.7×10^{-3}
Water solubility at saturation, 25 °C	[ppm]	50
Water hazard class WGK		1

2.6.2 ความคงทนต่อสนามไฟฟ้าของฉนวนเพรสบอร์ดผสมน้ำมัน [56]

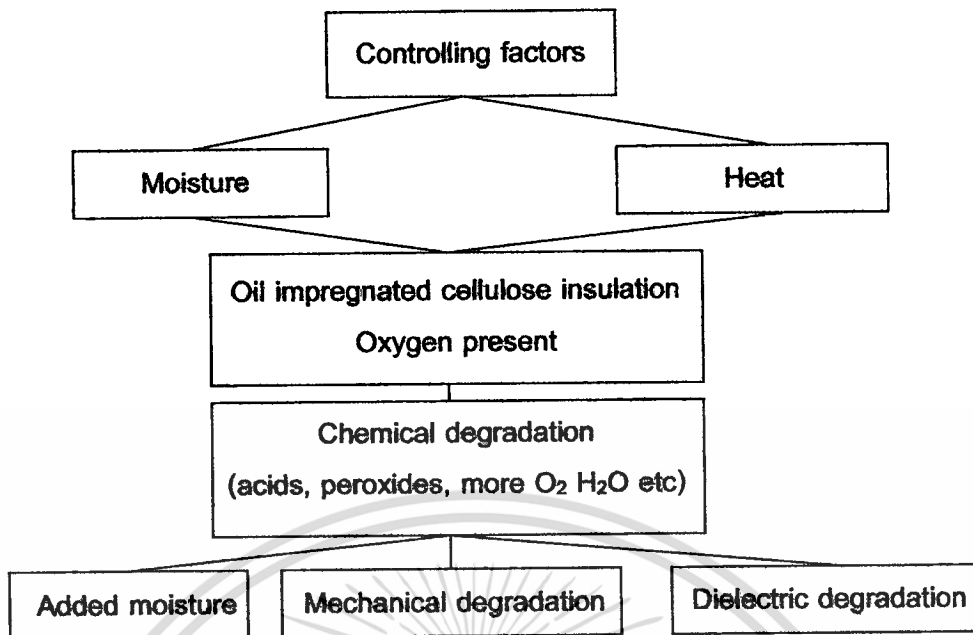
ความคงทนของฉนวนเพรสบอร์ดผสมน้ำมันจะมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งเกิดจากความแตกต่างระหว่างวัสดุได้แก่ เพรสบอร์ดที่มีใยเซลลูโลสอัดอยู่อย่างหนาแน่น (Transformer board) เพรสบอร์ดที่มีใยเซลลูโลสอัดอยู่อย่างเบาบางหรือเพรสบอร์ดที่มีรูพรุน (Transition zone) และ ส่วนของน้ำมัน (oil) จากรูปที่ 2.17 แสดงให้เห็นว่า เมื่อมีสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉาก (E Tangential) พุ่งผ่าน ส่วนของเพรสบอร์ด (Transformer board) ส่วนของรูพรุนของเพรสบอร์ด (Transition zone) และส่วนของน้ำมัน (oil) โดยสมมุติว่าน้ำมันได้แทรกซึมภายในใยเซลลูโลสอย่างสมบูรณ์ด้วยการทำสุญญากาศ จึงทำให้ไม่มีรอยต่อระหว่างส่วนประกอบทั้งสามส่วนดังที่กล่าวมาข้างต้น ดังนั้น ความคงทนต่อสนามไฟฟ้าของน้ำมันจะเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำมันผสมอยู่ในใยเซลลูโลส และ เมื่อน้ำมันผสมอยู่ในใยเซลลูโลสที่อัดกันอยู่อย่างหนาแน่นมาก ความคงทนต่อสนามไฟฟ้าของน้ำมันจะมีค่ามากที่สุด ส่วนฉนวนบางส่วนจะเกิดได้ง่ายสุดในน้ำมันที่ไม่มีใยเซลลูโลส และ บริเวณที่มีใยเซลลูโลสอัดอยู่อย่างเบาบางหรือรูพรุนของเพรสบอร์ด โดยที่ d Effect เปรียบเสมือนช่องว่างมีความกว้างมากขึ้น [56-58]



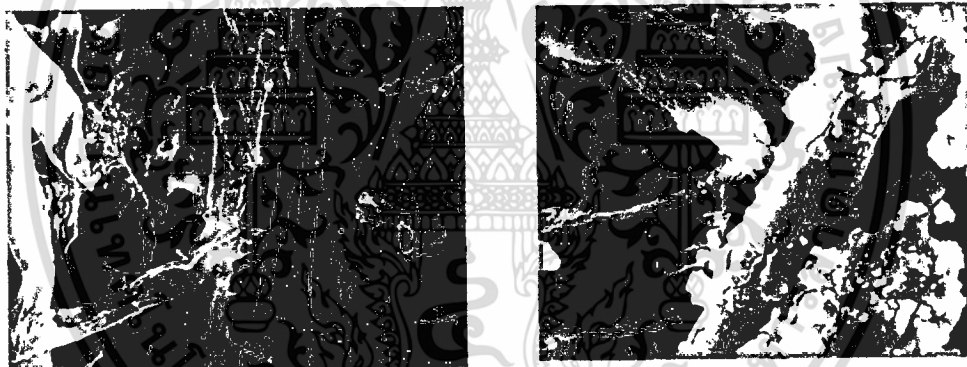
รูปที่ 2.17 ความคงทนต่อสนามไฟฟ้าของฉนวนเพรสบอร์ดผสมน้ำมัน [56]

2.6.3. การเสื่อมสภาพของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า

น้ำและความร้อนเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้ความเป็นฉนวนลดลง เป็นตัวเร่งการแตกตัวของเซลลูโลส ลดความเป็นพอลิเมอร์ (polymer) ของโมเลกุลเซลลูโลส ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงกลของกระดาษลดต่ำลง ก่อให้เกิดค่าความนำ ซึ่งมีสาเหตุมาจากการส่งและรับไอออนระหว่างน้ำและกรด และลดความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนกระดาษและน้ำมัน ซึ่งสามารถแสดงเป็น ไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การเสื่อมสภาพของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า [61]



ก) น้ำมันใหม่

ข) น้ำมันที่มี Total acid number = 0.15

รูปที่ 2.19 การเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษจุ่มน้ำมัน [62]

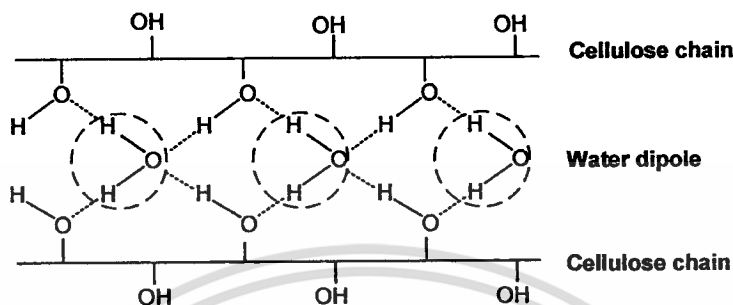
จากรูปที่ 2.19 ก) ฉนวนกระดาษจุ่มอยู่ในน้ำมันใหม่ที่กำลังขาย 750 เท่า ส่วน 2.19 ข) จากภาพเราจะเห็นการเสื่อมอายุของฉนวนกระดาษอันเนื่องมาจากกรดในน้ำมันที่มี Total acid number = 0.15 โดยเนื้อกระดาษเริ่มแยกออกจากกันและมี Sludge มากะมากขึ้น [62]

2.6.3.1 วัสดุเซลลูโลสและความชื้นที่เกิดขึ้นในวัสดุเซลลูโลส

วัสดุที่เป็นฉนวนที่มีส่วนประกอบเป็นเซลลูโลส ได้แก่ กระดาษเพรสบอร์ด (press paper) โมลด์พาร์ท (molded parts) วัสดุที่เป็นบอร์ด (board) หรือลามิเนตบอร์ด (laminated board) วัสดุเหล่านี้จะซึมซับน้ำได้ดีมาก คุณสมบัติของไดโพลโมเลกุลของวัสดุดังกล่าวประกอบกันอย่างง่าย ๆ โดยจะประกอบด้วย กลุ่มของ $-OH$ ของโมเลกุลเซลลูโลส และ กลุ่ม OOH สำหรับ โมเลกุล

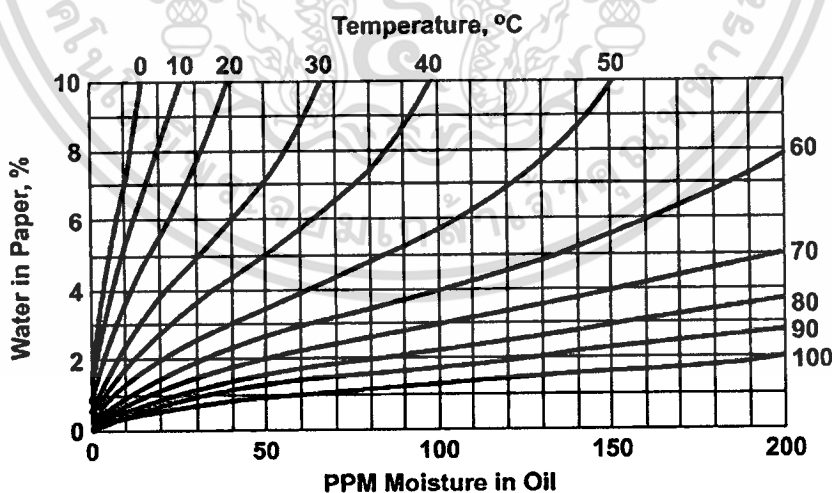
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่น ๆ ได้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เกิดขึ้นใหม่จากกระบวนการเสื่อมอายุของฉนวน ความชื้นที่เกิดขึ้นในวัสดุฉนวนนั้นจะมีความเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ เพื่อที่รักษาสภาพสมดุลของความชื้นเอาไว้ โดยภายใต้สภาวะปกติที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส (°C) ความชื้นสัมพัทธ์ 50 % จะมีปริมาณน้ำอยู่ในวัสดุเซลลูโลส 5-8 % [56]



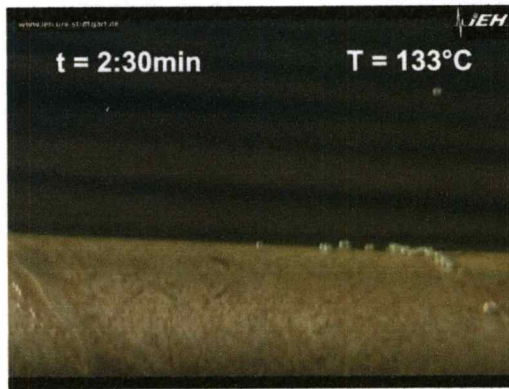
รูปที่ 2.20 กลุ่มของ-OH ของเซลลูโลสซึ่งมีการเชื่อมต่อกับ โมเลกุลของน้ำ [56]

กลไกการเปลี่ยนแปลงระหว่างน้ำในกระดาษและน้ำในน้ำมันที่สภาวะสมดุลนั้น เกิดมาจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง จากรูปที่ 2.21 แสดงให้เห็นเส้นโค้งสมดุลความชื้นของฉนวนกระดาษจุ่มน้ำมัน ซึ่งถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นน้ำจากกระดาษจะออกมาสู่น้ำมัน และเมื่ออุณหภูมิต่ำลงน้ำในน้ำมันจะกลับเข้าไปสู่กระดาษ ในอัตราที่ช้ากว่าตอนที่น้ำออกมาจากกระดาษ ในกรณีที่น้ำออกมาจากกระดาษนั้น อาจะออกมาในรูปของฟองอากาศแสดง ได้ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.21 โค้งสมดุลความชื้นของฉนวนกระดาษจุ่มน้ำมัน [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) อุณหภูมิ 123 °C

ข) อุณหภูมิ 133 °C



ค) อุณหภูมิ 141 °C

ง) อุณหภูมิ 142 °C

รูปที่ 2.22 ฟองอากาศจากกระดาษออกมาสู่น้ำมัน เมื่อป้อนความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ [63]

2.6.3.2 การเสื่อมอายุและความนำไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง [20]

โครงสร้างของน้ำมันหม้อแปลงนั้นประกอบไปด้วยไฮโดรคาร์บอนชนิดอิ่มตัว (saturated hydrocarbons) เช่น พาราฟิน (paraffin) และ แนบทีน (naphtene) ดังนั้นน้ำมันจะไม่นำกระแสไฟฟ้า และไม่ละลายกับน้ำได้ง่าย สิ่งเจือปนจากกระบวนการผลิต เช่น กำมะถัน และสารแปลกปลอมต่าง ๆ ทำให้คุณภาพน้ำมันลดลง โดยเฉพาะการเสื่อมอายุของน้ำมันแสดงได้ดังรูปที่ 2.23 เป็นสาเหตุให้น้ำมันสามารถนำกระแสไอออน (ionic current) โดยการเสื่อมอายุของน้ำมัน ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) นั้นจะก่อให้เกิดกรดคาร์บอนิก ซึ่งกรดคาร์บอนิกและน้ำสามารถแตกตัวเป็นไอออน และทำให้น้ำมันมีค่านำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



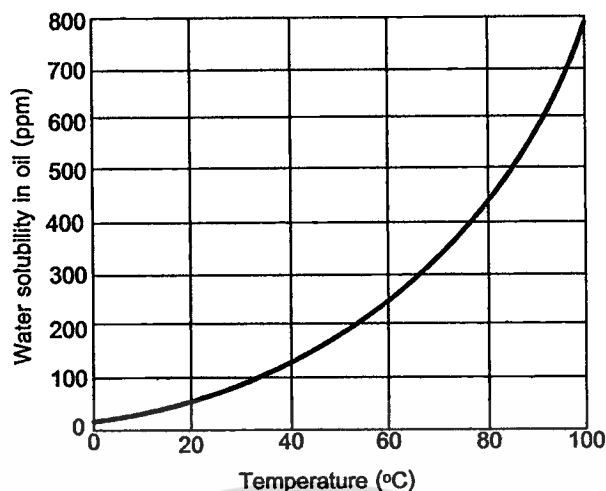
รูปที่ 2.23 การเสื่อมสภาพทำให้สีของน้ำมันเปลี่ยนแปลงไป [61]

จากรูปที่ 2.23 น้ำมันหม้อแปลงใหม่นั้นจะใสไม่มีสี กระบวนการเสื่อมอายุของน้ำมันหม้อแปลงจะทำให้ปริมาณกรดในน้ำมันเพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้สีของน้ำมันมีสีเหลือง สีส้ม แดง น้ำตาล และเข้มขึ้นเรื่อยๆจนเป็นสีดำ ซึ่งสีของน้ำมันจะเป็นตัวบ่งชี้เงื่อนไขของน้ำมันดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณลักษณะของน้ำมันหม้อแปลงเปรียบเทียบจากสีของน้ำมันหม้อแปลง [64]

Color comparator number	ASTM color	Oil condition
0.0-0.5	Clear	New oil
0.5-0.1	Pale yellow	Good oil
1.0-2.5	Yellow	Service-aged oil
2.5-4.0	Bright yellow	Marginal condition
4.0-5.5	Amber	Bad condition
5.5-7.0	Brown	Severe condition (reclaim oil)
7.0-8.5	Dark brown	Extreme condition (scrap oil)

ซึ่งความสามารถละลายน้ำได้นั้น จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยที่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการละลายน้ำก็จะมากขึ้น แสดงได้ดังรูป 2.24



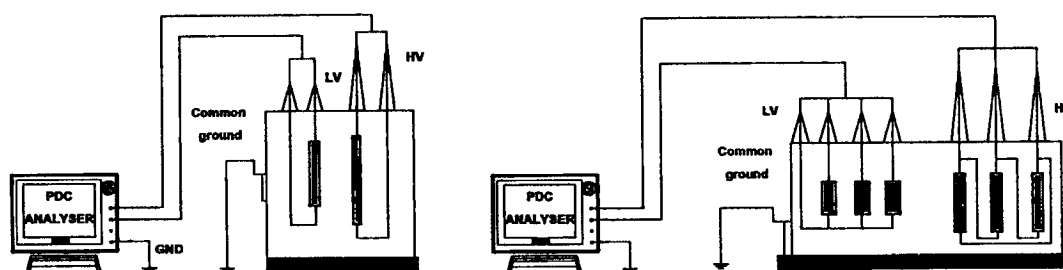
รูปที่ 2.24 การละลายของน้ำในน้ำมันที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป [65]

2.6.4 การวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วย PDC Analyzer

การวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของหม้อแปลงไฟฟ้า จำเป็นที่จะต้องทราบองค์ต่างๆ ดังต่อไปนี้ วงจรการวัดที่เหมาะสมสำหรับชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้า การวิเคราะห์ผลที่ได้ในรูปแบบโดเมนความถี่ ได้แก่ การหาค่าเก็บประจุที่ 50 Hz การหาอัตราค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าเก็บประจุจริงที่ความถี่ 0.001 Hz เทียบกับค่าเก็บประจุที่ 50 Hz และการหาค่าความสูญเสียของฉนวน (Dielectric Dispition factor, DDF) หรือ ($\tan \delta$) การวิเคราะห์ผลที่วัดได้ในรูปแบบเวลา ได้แก่ การวัด PDC การทำโพลาไรเซชันอินเด็คทีฟที่ 1 และ 10 (PI) การหาแรงดันย้อนกลับ โพลาไรซ์สเปกตรัม และค่าที่เกิดจากการเปรียบเทียบระหว่างค่าความชันกับค่าแรงดันสูงสุด

2.6.4.1 วงจรการวัด PDC ของหม้อแปลงไฟฟ้า

ในกรณีหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานทั่วไป ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส และ 3 เฟส แสดงได้ดังรูปที่ 2.25 สามารถต่อไดอะแกรมได้โดย ทำการรวมขั้วแรงสูงของหม้อแปลงเข้าด้วยกันและต่อเข้าจุดป้อนไฟของ PDC หลังจากนั้นทำการรวมขั้วแรงต่ำของหม้อแปลงเข้าด้วยกัน และต่อเข้าจุดรับกระแส โดยที่จะต้องกราวด์ของหม้อแปลงเข้ากับกราวด์ของระบบ



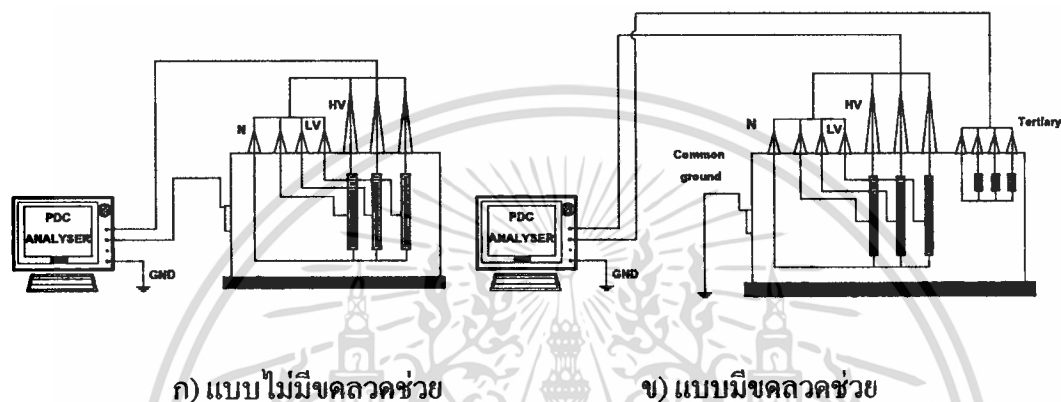
ก) 1 เฟส

ก) 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.25 วงจรการวัด PDC ของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส และ 3 เฟส

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นเหตุสุดวิสัย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีหม้อแปลงออโตแบบไม่มีขดลวดช่วย (tertiary winding) การต่อวงจรสามารถทำได้โดยรวมขั้วแรงสูง แรงต่ำ และนิวตรอนเข้าด้วยกัน แล้วต่อเข้าจุดป้อนแรงดันของ PDC ส่วนจุดต่อกราวด์ของหม้อแปลงจะต่อเข้าจุดรับกระแส ในกรณีหม้อแปลงออโตแบบมีขดลวดช่วย (tertiary winding) การต่อวงจรสามารถทำได้โดยรวมขั้วแรงสูง แรงต่ำ และนิวตรอนเข้าด้วยกัน แล้วต่อเข้าจุดป้อนแรงดันของ PDC หลังจากนั้นทำการรวมขดลวดช่วยเข้าด้วยกัน และต่อเข้าจุดรับกระแส ส่วนจุดต่อกราวด์ของหม้อแปลงจะต่อกับกราวด์ของระบบ

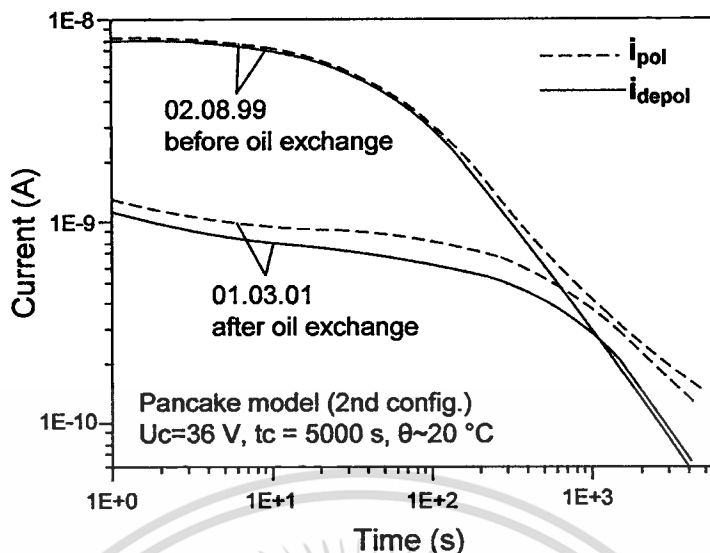


รูปที่ 2.26 วงจรการวัด PDC ของหม้อแปลงออโต

2.6.4.2 การวิเคราะห์ผลที่วัดได้ในรูปโดเมนความถี่

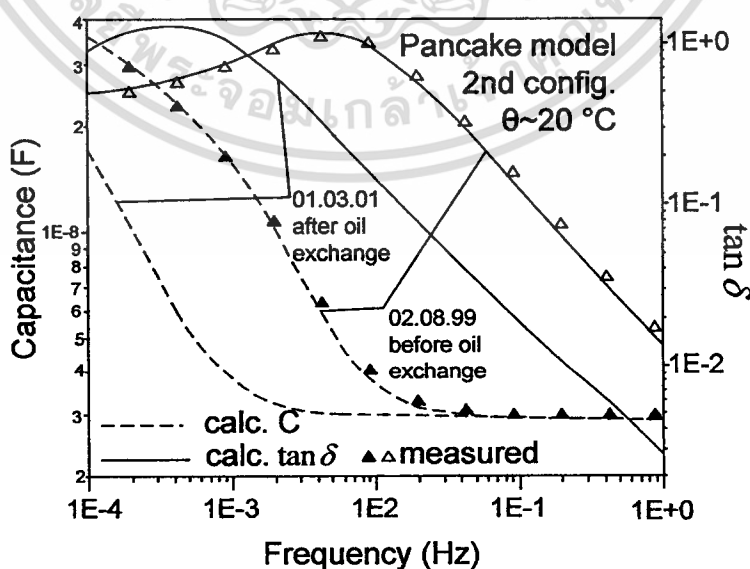
การวิเคราะห์ผลที่ได้ในรูปโดเมนความถี่ ได้แก่ การหาค่าเก็บประจุที่ 50 Hz การวัดค่าเก็บประจุจริงที่ความถี่ 0.001 Hz เทียบกับค่าเก็บประจุที่ 50 Hz และการวัดค่า $\tan \delta$ ที่ 1 Hz เพื่อใช้ประเมินคุณภาพฉนวน ซึ่งปัจจุบันใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์คุณสมบัติของฉนวนซึ่งยังไม่ได้มีกำหนดไว้ในมาตรฐาน [34-37], [43-44]

จากผลการวิจัยที่ปรากฏในบทความต่างๆพบว่า การวัดค่าความเก็บประจุและค่าความสูญเสีย ควรวัดที่ความถี่ต่ำ (10^{-3} Hz) แสดงดังรูปที่ 2.27 เพราะเป็นช่วงที่เกิดอินเตอร์เฟรียลโพลาร์ไรซ์เซชัน ส่วนการวัดค่าความเก็บประจุ และ DDF ของหม้อแปลงไฟฟ้านั้นที่ความถี่ 1 Hz จะแสดงให้เห็นถึงคุณภาพของน้ำมันในช่องน้ำมัน (main duct) และที่ความถี่ 10^{-4} Hz จะแสดงให้เห็นถึงคุณภาพของฉนวนแข็ง [34-37], [43-44]



รูปที่ 2.27 PDC ก่อนและหลังการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันของโมเดลแพนเค้ก

จากรูปที่ 2.27 การศึกษาอิทธิพลของค่าความนำ เป็นการวัด PDC ของฉนวนลักษณะแพนเค้กโมเดล (Pancake model) [39], [44] ซึ่งก็คือโมเดลของฉนวนหม้อแปลงที่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของน้ำมันและกระดาษได้ โดยที่มีอัตราส่วนของกระดาษต่อน้ำมันอยู่ที่ 2/10 ซึ่งจะวัด PDC ก่อนและหลังการเปลี่ยนน้ำมัน น้ำมันเก่าก่อนที่จะเปลี่ยนใช้น้ำมันชนิด โนนัสไนโตร 10 GBN (Nynas Nytro 10 GBN) มีค่าความนำ 2 pS/m (20 °C) โดยน้ำมันใหม่ที่ทำกรเปลี่ยนมาแทนได้แก่ เซลล์ไดอาลาดี (Shell Diala D) มีค่าความนำ 0.24 pS/m (20 °C) ผลปรากฏว่ากระแสช่วงเริ่มต้น และค่าความนำของน้ำมันลดลงอย่างชัดเจน



รูปที่ 2.28 ค่าเก็บประจุและความสูญเสีย ก่อนและหลังการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันของโมเดลแพนเค้ก

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.28 แสดงผลของค่าเก็บประจุและความสูญเสียของโมเดลแพนเค้ก ก่อนและหลังการเปลี่ยนน้ำมัน โดยเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณจาก การวัดด้วย PDC และการวัดด้วย เครื่องวัดไดอิเล็กตริกสเปกโตรมิเตอร์ (dielectric spectrometer) “IDA 200” ผลการวัดและการคำนวณ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก ส่วนค่าเก็บประจุที่ความถี่ต่ำหลังจากการเปลี่ยนน้ำมันจะมีค่าสูงขึ้น

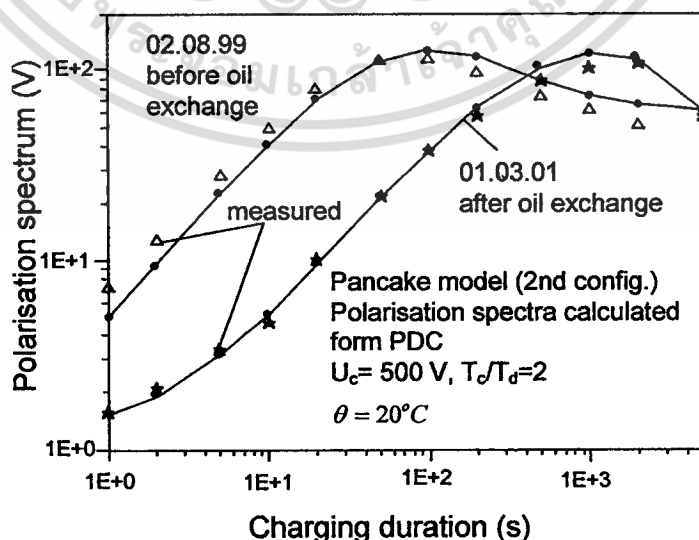
2.6.4.3 การวิเคราะห์ผลที่วัดได้ในรูปโดเมนเวลา

การวิเคราะห์คุณสมบัติการฉนวนในรูปโดเมนเวลา ได้แก่การวิเคราะห์ผลจาก การวัด PDC การหาค่าโพลาริเซชันอินเตกเรชันที่ t_1 และ $10 (PI)$ การหาแรงดันย้อนกลับ และโพลาริเซชันสเปกตรัม [34-37], [43-44]

แรงดันย้อนกลับและโพลาริเซชันสเปกตรัม นั้น ยังไม่มีมาตรฐานที่กำหนดไว้อย่างแน่นอนมีเพียงข้อแนะนำจากบทความวิจัยเกี่ยวกับฉนวนซึ่งเริ่มทำกันมากพอสมควร[34-37], [43-44]

การวินิจฉัยคุณภาพของฉนวนจากแรงดันย้อนกลับ และ โพลาริเซชันสเปกตรัม นั้น ถ้าฉนวนมีคุณภาพที่ดี ค่าแรงดันสูงสุดของ โพลาริเซชันสเปกตรัมจะเกิดขึ้นเมื่อเวลาชาร์จประจุผ่านไปไม่น้อยกว่า 500 วินาที โดยที่ค่าที่เกิดจากการเปรียบเทียบระหว่างค่าความชันกับค่าแรงดันสูงสุดนั้น ควรจะมีค่าน้อยๆ[34-37]

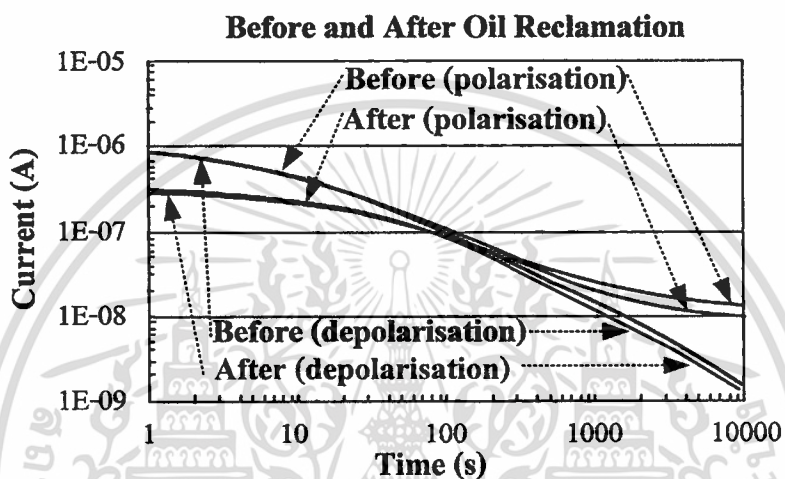
จากรูปที่ 2.11 ซึ่งสามารถอธิบายคำจำกัดความของคำว่าโพลาริเซชันสเปกตรัมได้ดังนี้ โพลาริเซชันสเปกตรัม คือ การกำหนดคสเตรปในการเพิ่มแรงดันโดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้ ที่เวลา $t_1 = T_c$ หลังจากนั้นทำการลัดวงจร ($t_2 - t_1$) = T_d กำหนดอัตราส่วน $(T_c/T_d) = 2$ โดยทำการวัดแรงดันย้อนกลับสูงสุด U_R ในทุก ๆ รอบของเวลา นำค่าแรงดันสูงสุดของแต่ละรอบมาต่อกันจนกลายเป็นเส้นที่เชื่อมต่อเนื่องกัน เรียกเส้นนี้ว่า โพลาริเซชันสเปกตรัม [43-44]



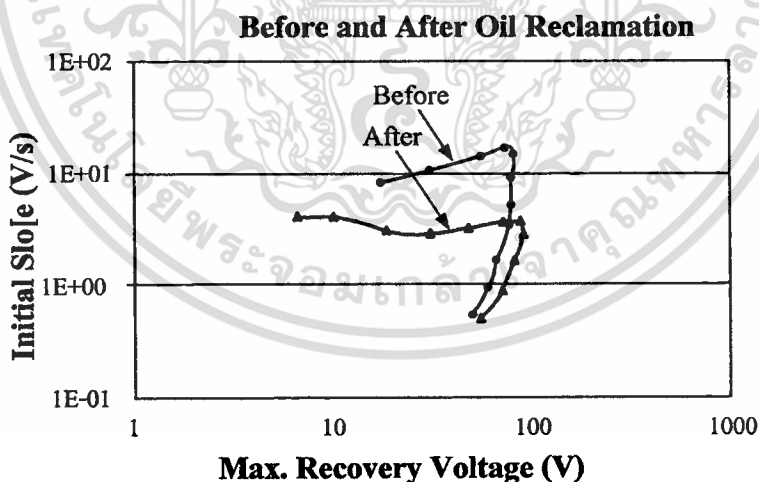
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้า
รูปที่ 2.29 โพลาริเซชันสเปกตรัมก่อนและหลังการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันของ โมเดลแพนเค้ก
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.29 แสดงเส้น โพลาริซเซชันสเปกตรัม 2 เส้นที่คำนวณ โดยจากการวัด PDC ด้วย PDC Analyzer การทดสอบโดยการป้อนแรงดัน 500 V และเปรียบเทียบกับผลการวัดของมิเตอร์ RVM ผลการทดสอบพบว่าโพลาริซเซชันสเปกตรัมจากการคำนวณด้วย PDC Analyzer และวัดโดยมิเตอร์ RVM มีค่าตรงกัน

โดยถ้านำความชันของแรงดันสูงสุดของแต่ละรอบ(โพลาริซเซชันสเปกตรัม) มาเทียบกับค่าแรงดันสูงสุด(โพลาริซเซชันสเปกตรัม)ของแต่ละรอบ และต่อกันจนกลายเป็นเส้นที่เชื่อมต่อเนื่องกัน เรียกเส้นนี้ว่า “guuinic” [34-37]



รูปที่ 2.30 PDC ก่อนและหลังการปรับปรุงสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า [35]



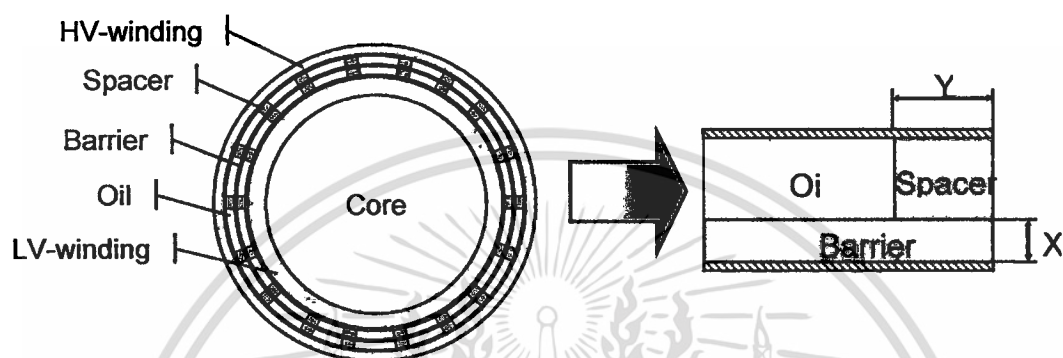
รูปที่ 2.31 guuinic ก่อนและหลังการปรับปรุงสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า [35]

รูปที่ 2.31 แสดงให้เห็น guuinic (คำนวณจากผลการวัด PDC ด้วย PDC Analyzer ดังรูปที่ 2.30) ก่อนและหลังการปรับปรุงสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า 250 MVA ,330/132/16 kV 3- ϕ ซึ่งเกิดจากการนำหม้อแปลง 1- ϕ มาต่อเบงค์กัน โดยที่ความชันของแรงดันสูงสุดหลังการปรับปรุงสภาพจะมีค่าน้อยกว่าก่อนการปรับปรุงสภาพ [35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

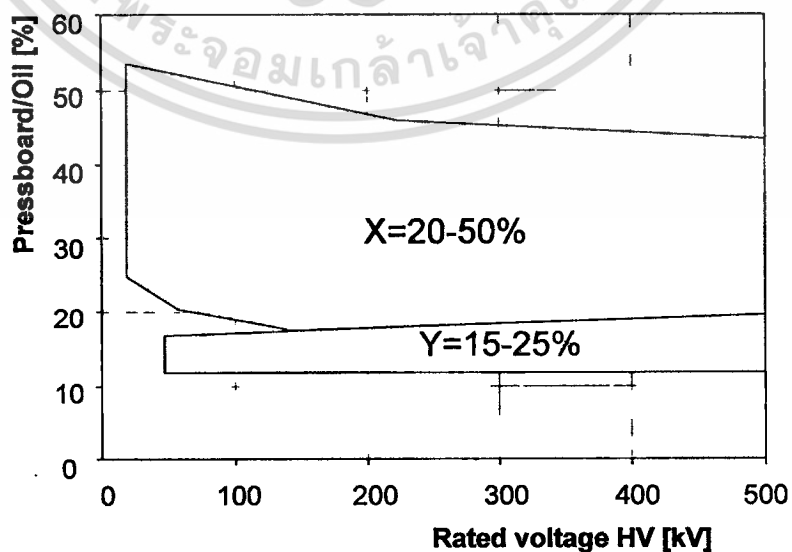
2.6.4.4 การประเมินค่าความชื้นในเพรสบอร์ด และค่าความนำในน้ำมัน

การวัดความชื้นของ PDC Analyzer นั้นต้องอาศัยอัตราส่วนโครงสร้างของฉนวนได้แก่ บริเวณช่องน้ำมัน (oil duct), แบร์เรียร์(Barriers) และสเปซเซอร์(Spacer) ซึ่งเมื่อแยกออกมา บางส่วนจะได้ว่า x คือ อัตราส่วนของแบร์เรียร์ต่อน้ำมัน (Barriers / oil) และ y คือ อัตราส่วนของสเปซเซอร์ต่อน้ำมัน (Spacer/oil) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า x - y โมเดล [32], [34], [39] แสดงได้ดัง รูป 2.30



รูปที่ 2.32 โมเดล x - y ของหม้อแปลง[66]

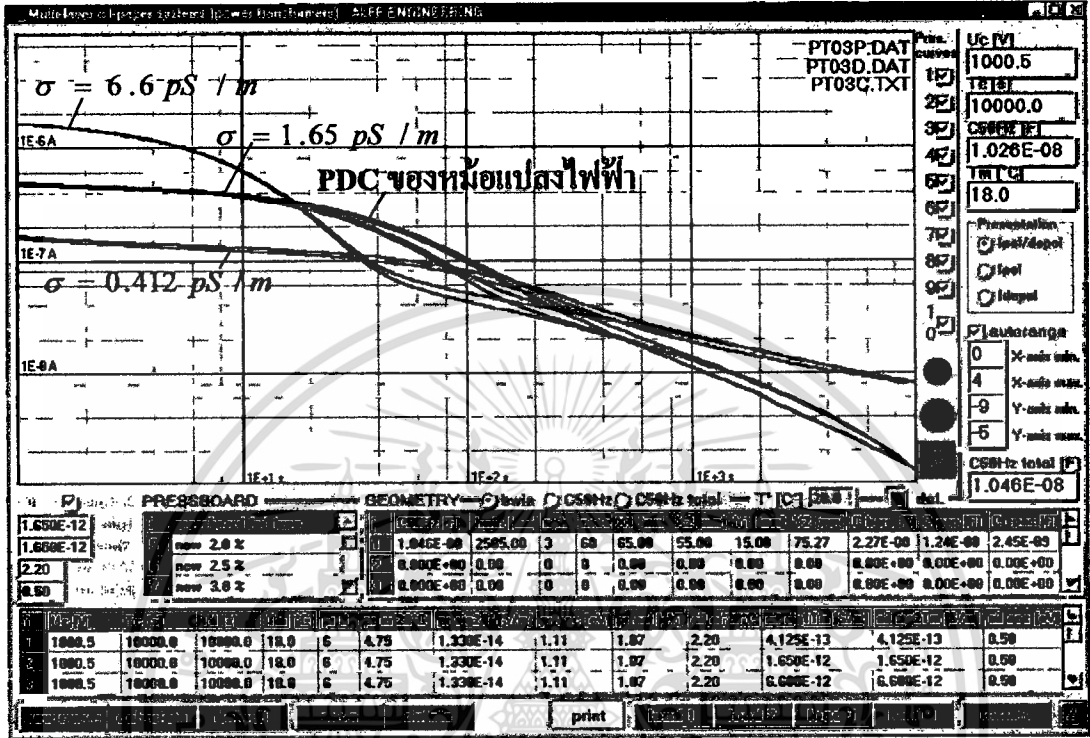
โมเดล x - y ของหม้อแปลงของแต่ละบริษัทจะไม่เหมือนกัน ขึ้นอยู่กับขนาดของหม้อแปลง ยกตัวอย่างเช่นหม้อแปลงพิกัดตั้งแต่ 24 – 500 kV ถ้าเป็นหม้อแปลงเก่าค่าอัตราส่วนแบร์เรียร์ต่อน้ำมัน ได้แก่ x อยู่ในช่วง 20 – 50% และค่าสเปซเซอร์ต่อน้ำมัน y มีค่าอยู่ในช่วง 15 – 25% แสดงดังรูป 2.33 ถ้าไม่ทราบ x - y โมเดลในการวิเคราะห์จะต้องทำการจำลองโมเดล x - y จนกว่าค่าที่ได้จะตรงกับค่าที่ได้จากการวัด PDC



รูปที่ 2.33 พิกัดแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้ากับ โครงสร้างฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า [66]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากโครงสร้างแล้วต้องทราบค่าความนำของน้ำมัน ซึ่งเกิดจากการวัดด้วยเครื่องวัดความนำ ในกรณีที่ไม่มีทราบให้ประมาณค่าโดยการประมาณค่ากระแส PDC เทียบกับกระแสที่ได้วัดมา แสดงดังรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 การประมาณกระแส PDC เพื่อหาค่าความนำของน้ำมัน [67]

จากรูปที่ 2.34 การประมาณกระแส PDC ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (ลีด้า) เพื่อหาค่าความนำของน้ำมัน ทำได้โดยประมาณค่าความนำให้เท่ากับผลการวัด PDC ช่วงต้น ได้แก่ 0.412 , 1.65 และ 6.6 pS/m แสดงให้เห็นเป็นสี ได้แก่ 0.412 pS/m (แดง), 1.65 pS/m (เขียว) และ 6.6 pS/m (น้ำเงิน) ผลการประมาณค่าความนำของน้ำมันคือ 1.65 pS/m ซึ่งให้ผลตรงกับค่าความนำที่เกิดจากผลการวัด PDC ช่วงต้น (การประมาณค่าความขึ้นของเพรสบอร์ดให้เท่ากับผลการวัด PDC ช่วงปลาย พบว่ามีความขึ้นในเพรสบอร์ด 2.5 %)

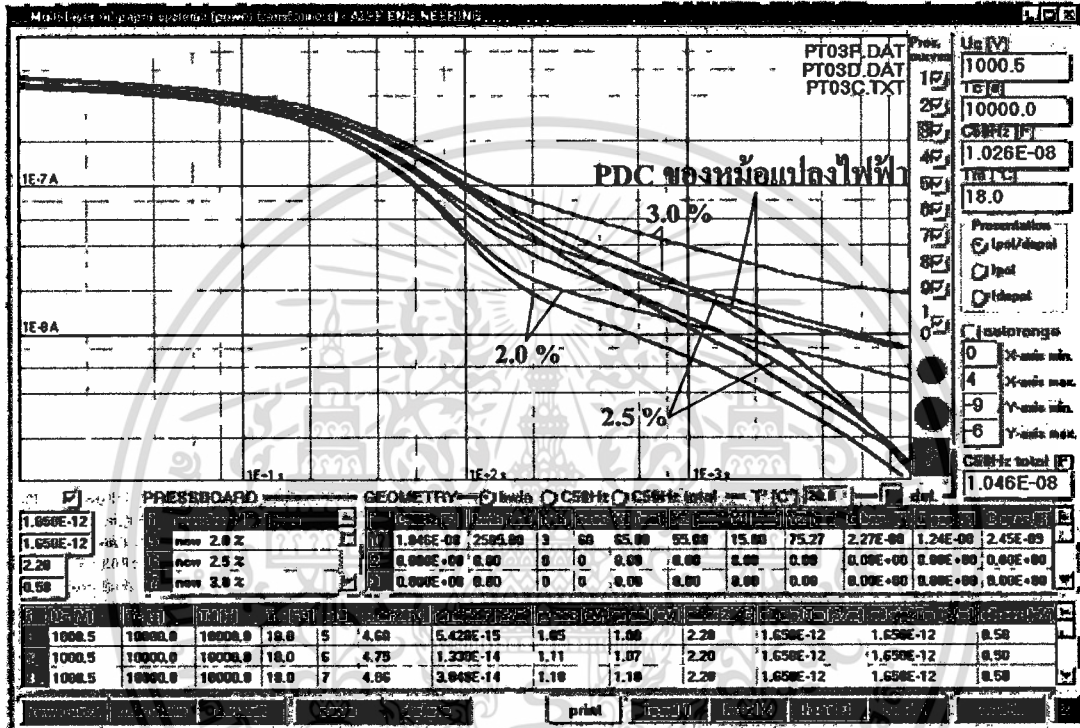
ในกรณีที่ไม่สามารถจำลองค่าความนำของน้ำมันให้พอดี ดังนั้นจากสมการที่ 2.14 และสมการที่ 2.15 สามารถประมาณเป็นค่าความนำน้ำมันได้ [30], [40]

$$\sigma_0 \approx \frac{\epsilon_0}{C_0 U_C} (i_{pol}(t) - i_{depol}(t)) \tag{2.39}$$

โดยช่วงเริ่มต้นเป็นการประมาณค่าความนำของน้ำมัน ส่วนเมื่อเวลาผ่านไปหลัง 1000 วินาที [33-34] เป็นการประมาณค่าความนำของกระดาษ

ไม่ว่าวิธีใดก็ตาม สิ่งที่ต้องระวังคือต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประมาณกระแส PDC ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (ลิต้า) เพื่อหาค่าความชื้นของเพรสบอร์ดคังรูปที่ 2.33 ทำได้โดยประมาณค่าความชื้นให้เท่ากับผลการวัด PDC ช่วงปลาย ได้แก่ 2.0, 2.5 และ 3 % แสดงให้เห็นเป็นสี ได้แก่ 2 % (แดง), 2.5% (เขียว) และ 3 % (น้ำเงิน) ผลการประมาณค่าความชื้นของเพรสบอร์ดคือ 2.5 % ซึ่งให้ผลตรงกับค่าความชื้นของเพรสบอร์ดที่เกิดจากผลการวัด PDC ช่วงปลาย (การประมาณค่าความนำของน้ำมันให้เท่ากับผลการวัด PDC ช่วงต้น พบว่ามีความค่าความนำของน้ำมัน 0.165 pS/m)

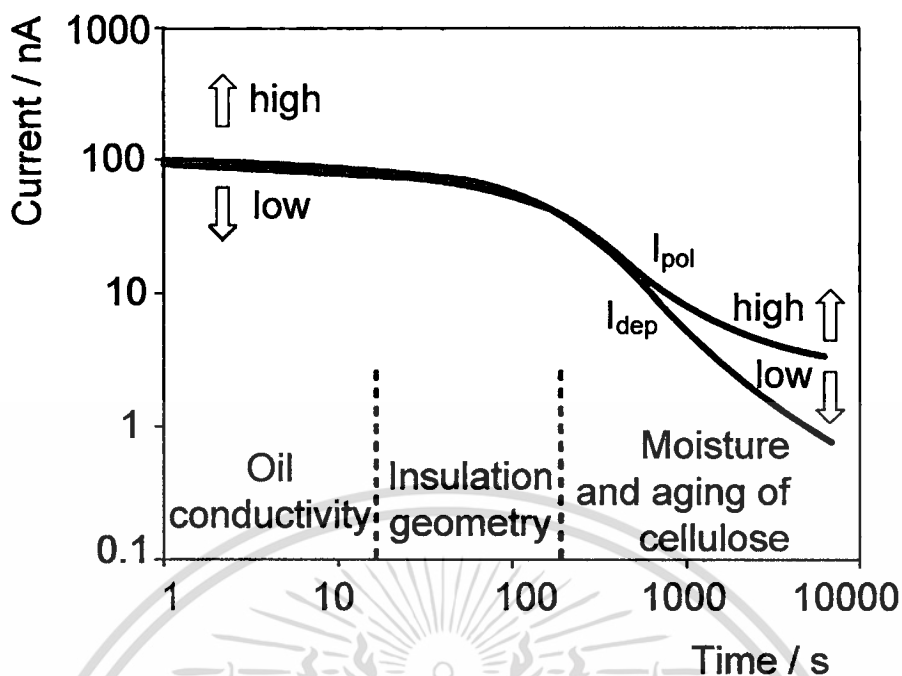


รูปที่ 2.35 การจำลองกระแส PDC เพื่อหาค่าความชื้นของกระดาษ [67]

ในกรณีที่ไม่สามารถจำลองความชื้นให้พอดีได้ ดังนั้นให้ประมาณค่าเป็นช่วงความชื้น เช่น อยู่ในช่วง 2% ถึง 3% เป็นต้น

การวัด PDC ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังช่วงเวลาเริ่มต้นนั้น จะเป็นผลของค่าความนำในน้ำมันฉนวน ในช่วงเวลาตั้งแต่ 1000 วินาทีขึ้นไปจะเป็นผลของค่าความชื้นในกระดาษ แสดงได้คังรูปที่ 2.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.36 ค่าความชื้นในกระดาษและค่าความนำในน้ำมันที่ส่งผลต่อการวัด PDC [66]

ซึ่งข้อแนะนำจากมาตรฐาน IEEE 62-1995 [64] ได้กำหนดความชื้นภายในกระดาษเทียบกับน้ำหนักกระดาษแห้ง (% Moisture by dry Weight in paper) แสดงได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของกระดาษต่อความชื้นที่เกิดขึ้น [64]

% Moisture by dry Weight in paper	Condition
0-2	Dry paper
2-4	Wet paper
>4.4	Excessively wet paper

สำหรับข้อแนะนำจากมาตรฐาน IEEE 62-1995 [64] ได้กำหนดปริมาณน้ำในน้ำมัน (% Moisture saturation of oil) แสดงได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 คุณลักษณะของน้ำมันต่อความชื้นที่เกิดขึ้น [64]

% Moisture saturation of oil	Condition
0-5	Dry insulation
6-20	Moderate to wet
21-30	Wet
>30	Extremely wet



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบชุดทดสอบฉนวนเพรสเซอร์ผสมน้ำมัน

การออกแบบชุดทดสอบฉนวนเพรสเซอร์ผสมน้ำมันนั้นสามารถแบ่งการออกแบบออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ชุดทดสอบคุณสมบัติของฉนวนแข็งผสมน้ำมัน ชุดทดสอบหาค่าความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวนน้ำมัน และ ถึงสัญญาภาค ชุดทดสอบบางชุดทดสอบยังไม่มีมาตรฐานรองรับที่แน่นอนเพียงแต่ได้อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60093 [49] และ ASTM D150-98 [50] มาดัดแปลงใช้งาน รายละเอียดในการออกแบบจะได้อธิบายภายในบทนี้

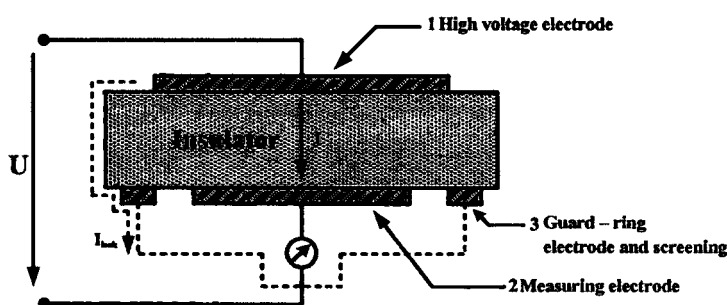
3.1 ชุดทดสอบวัดคุณสมบัติของฉนวนเพรสเซอร์ผสมน้ำมัน [68]

ในการออกแบบชุดทดสอบ จะออกแบบให้สามารถนำไปใช้วัดค่ากระแสที่ไหลผ่านเนื้อฉนวน วัดค่าความเก็บประจุและวัดค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวน

3.1.1 ชุดทดสอบวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านเนื้อฉนวนเพรสเซอร์ผสมน้ำมัน

ชุดทดสอบสำหรับวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านเนื้อฉนวนเพรสเซอร์แข็งผสมน้ำมัน ยังไม่มีมาตรฐานที่แน่นอน เพียงแต่มีผู้นำชุดทดสอบวัดคุณสมบัติของฉนวนแข็งตาม IEC 60093 [49] มาดัดแปลงใช้งาน [28], [43], [45]

ในการวัดกระแสที่ไหลผ่านเนื้อฉนวน ค่าที่วัดได้จะมีความคลาดเคลื่อนหากใช้แผ่นตัวนำอิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดที่เท่ากันทั้งด้านแรงดันสูงและด้านแรงดันต่ำในการวัด เนื่องมาจากกระแสที่วัดได้เกิดจากกระแสที่ผิวฉนวน (Surface leakage current) และภายในเนื้อฉนวน (volumn leakage current) รวมกัน จากรูปที่ 3.1 แสดงให้เห็นกระแสที่ไหล 2 เส้นทาง ได้แก่ บริเวณเนื้อฉนวนและผิวของฉนวน จะใช้วงแหวนการ์ด (guard ring) [43], [45] จะทำหน้าที่นำกระแสที่ผิวของเนื้อฉนวนลงสู่กราวด์ กระแสที่ผ่านชุดวัดจะเป็นกระแสที่ไหลผ่านเนื้อฉนวนอย่างแท้จริง



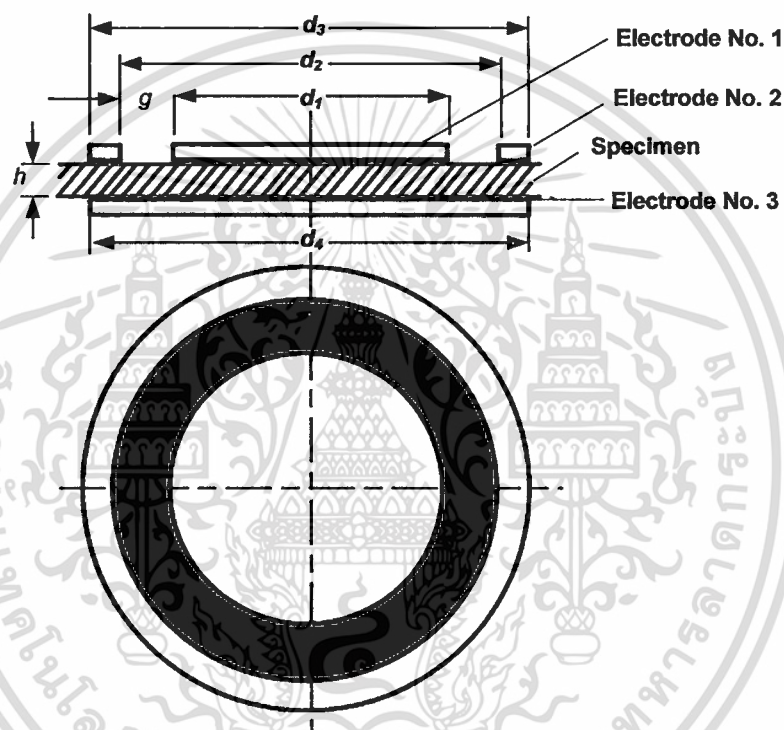
รูปที่ 3.1 ชุดทดสอบวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านเนื้อฉนวนแข็ง [52]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 ขั้นตอนการออกแบบชุดทดสอบวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านเนื้อฉนวนเพรสอรัคผสมน้ำมัน

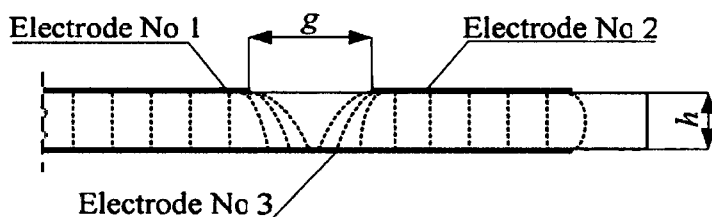
การออกแบบชุดทดสอบวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านเนื้อฉนวนเพรสอรัคผสมน้ำมันมีวิธีการดังนี้

1) ตามมาตรฐาน IEC 60093 [49] กำหนดส่วนของอิเล็กโทรด ซึ่งจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ อิเล็กโทรดป้อนแรงดัน (Electrode No. 3) อิเล็กโทรดชุดวัด (Electrode No. 1) และวงแหวนการ์ด (Electrode No. 2) โดย g คือ ระยะห่างระหว่างแก๊ป h คือ ความหนาของฉนวน



รูปที่ 3.2 อิเล็กโทรดสำหรับวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านเนื้อฉนวนเพรสอรัค

2) การออกแบบความกว้างของแก๊ปของอิเล็กโทรดชุดวัด [69] ในการออกแบบช่องว่างแก๊ป (g) ถ้าหากออกแบบให้มีความกว้างมากเกินไป สนามไฟฟ้าภายในฉนวนจะผิดเพี้ยนไป แสดงได้ดังรูปที่ 3.3

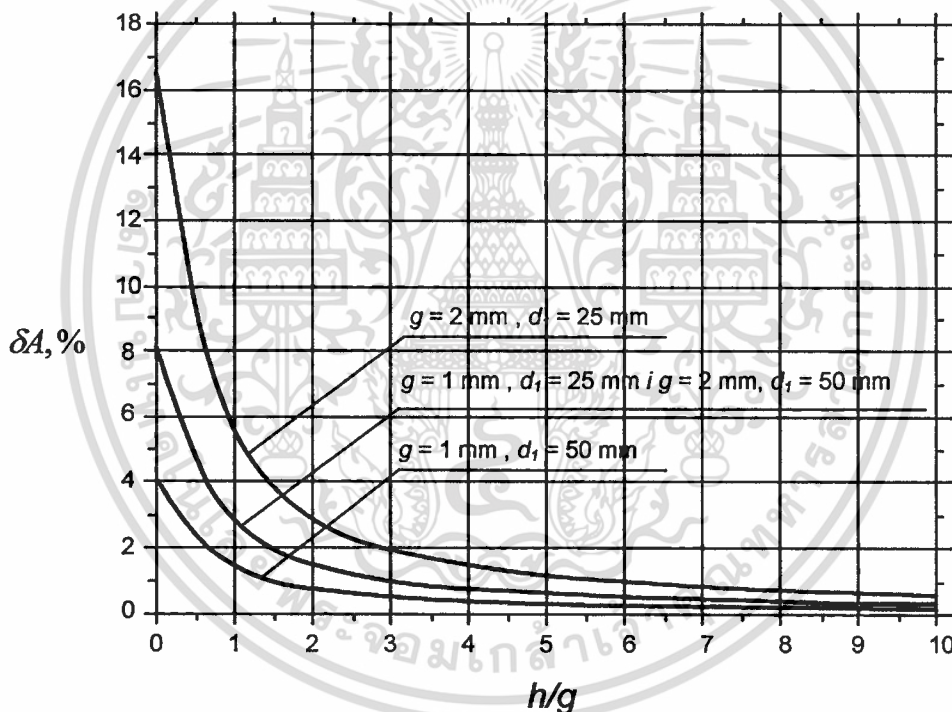


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดรูปที่ 3.3 เส้นสนามไฟฟ้าภายในฉนวนที่เกิดขึ้นจากการวัด โดยอิเล็กโทรด 3 ชนิด [69] นำไปใช้

3) การออกแบบความกว้างแกลบ (g) และอิเล็กโตรดชุดวัดที่เหมาะสม เพื่อลดความผิดพลาดอันเนื่องมาจากสนามที่เปลี่ยนไป (δA) ซึ่งค่าความผิดพลาดอันเนื่องมาจากสนามที่เปลี่ยนไปสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\delta A = \frac{8h}{\pi d_1} \ln \cosh \left[\frac{\pi g}{4 h} \right] \times 100(\%) \quad (3.1)$$

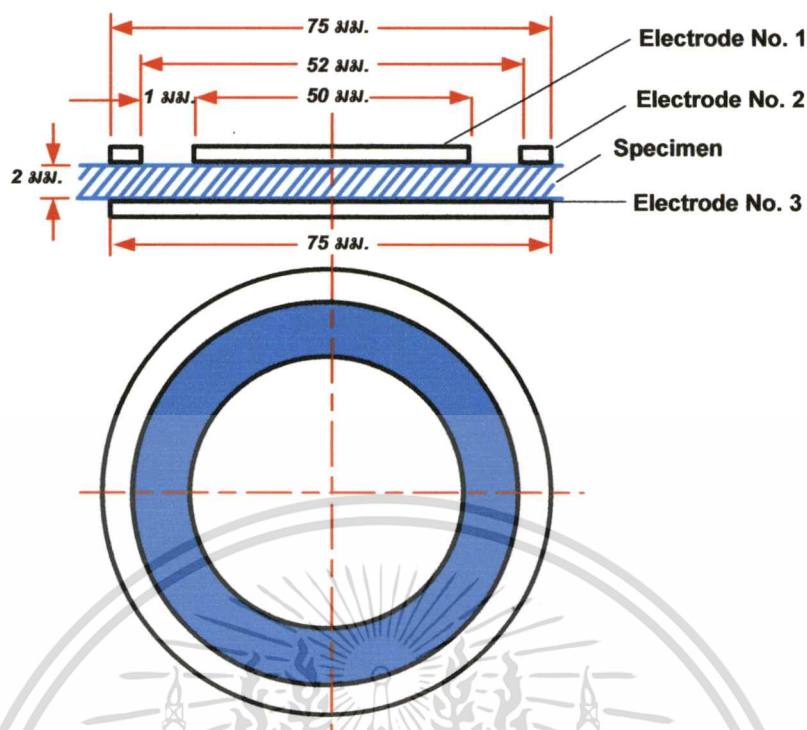
เมื่อนำค่าความกว้างแกลบ (g) ความหนาของชั้นงาน (h) และความกว้างของอิเล็กโตรดชุดวัด (d_1) มาคำนวณ โดยใช้สมการที่ 3.1 จะสามารถเขียนเป็นรูปกราฟ ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า δA , h/g , g และ d_1 [69]

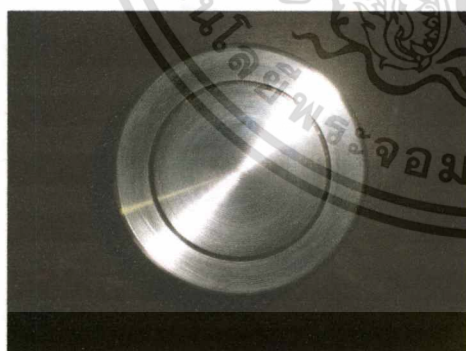
จากรูปที่ 3.4 สรุปได้ว่ายิ่งแกลบ (g) กว้างค่าความผิดพลาดอันเนื่องมาจากสนามที่เปลี่ยนไป (δA) ก็จะมากขึ้น ส่วนค่าความกว้างของอิเล็กโตรดชุดวัด (d_1) ถ้ายิ่งกว้างค่าความผิดพลาดสนามที่เปลี่ยนไปก็จะน้อยลง และถ้ายิ่งความหนาของชั้นงานน้อย ($h \ll g$) ค่าความผิดพลาดอันเนื่องมาจากสนามที่เปลี่ยนไป จะมีค่าสูง

4) สรุปการออกแบบ จะกำหนดให้ขนาดต่างๆมีค่าดังนี้ $d_1 = 50$ มม., $d_2 = 52$ มม., $d_3 = 52$ มม., $d_4 = 75$ มม., $h = 2$ มม., และ $g = 1$ มม. เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 อิเล็กโทรดที่ได้ทำการออกแบบสำหรับวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านเนื้อฉนวนแข็ง

5) วัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรดจะเป็นสแตนเลส และมีฉนวนกันภายในระหว่างวงแหวนการ์ด (guard ring) และอิเล็กโทรดสำหรับวัด อิเล็กโทรดที่ได้ทำการออกแบบและสร้างสามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 3.6



ก)

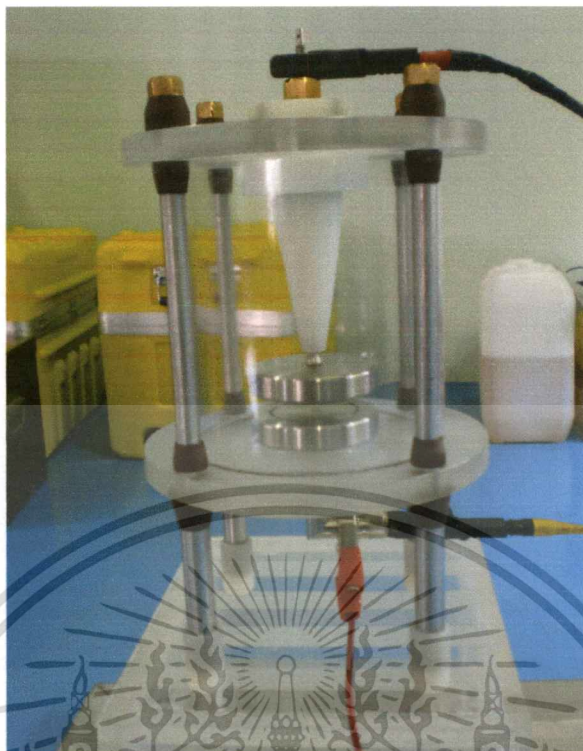


ข)

รูปที่ 3.6 ก) วงแหวนการ์ดและอิเล็กโทรดสำหรับวัดกระแส ข) ชุดทดสอบวัดค่ากระแส

6) ตัวถัง ทำหน้าที่ ครอบคลุมชิ้นงานทำจากท่ออะคริลิก ซึ่งภายในบรรจุน้ำมันได้ ตัวถังมีขนาดความกว้าง 15 ซม. และมีความสูง 25 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ชุดทดสอบวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านเนื้อฉนวนแข็งผสมน้ำมัน

3.1.3 ชุดทดสอบวัดค่าเก็บประจุและค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวนพอร์ซเลนผสมน้ำมัน

ในการวัดค่าเก็บประจุและค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวน ค่าทั้งสองเกิดจากความสัมพันธ์ของค่าเก็บประจุของฉนวน และค่าความเก็บประจุของตัวอิเล็กโทรด ถ้าหากใช้แผ่นตัวนำอิเล็กโทรดที่มีขนาดที่เท่ากันทั้งด้านแรงดันสูงและด้านแรงดันต่ำในการวัด จะเกิดค่าความเก็บประจุแฝงจากแหล่งอื่นๆ แสดงได้ดังรูปที่ 3.8 โดย [50]

C_f คือ ค่าเก็บประจุที่ขอบ (fringing)

C_g คือ ค่าเก็บประจุของกราวด์กับอิเล็กโทรด

C_L คือ ค่าเก็บประจุระหว่างสายตัวนำ

C_{Lg} คือ ค่าเก็บประจุระหว่างสายตัวนำกับกราวด์

C_{Lc} คือ ค่าความเก็บประจุระหว่างสายตัวนำกับอิเล็กโทรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ชุดทดสอบวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านเนื้อฉนวนแข็งผสมน้ำมัน

3.1.3 ชุดทดสอบวัดค่าเก็บประจุและค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวนเพชรบอร์ดผสมน้ำมัน

ในการวัดค่าเก็บประจุและค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวน ค่าทั้งสองเกิดจากความสัมพันธ์ของค่าเก็บประจุของฉนวน และค่าความเก็บประจุของตัวอิเล็กทรอนิกส์ โทรค ถ้าหากใช้แผ่นตัวนำอิเล็กทรอนิกส์ ที่มีขนาดที่เท่ากันทั้งด้านแรงดันสูงและด้านแรงดันต่ำในการวัด จะเกิดค่าความเก็บประจุแฝงจากแหล่งอื่นๆ แสดงได้ดังรูปที่ 3.8 โดย [50]

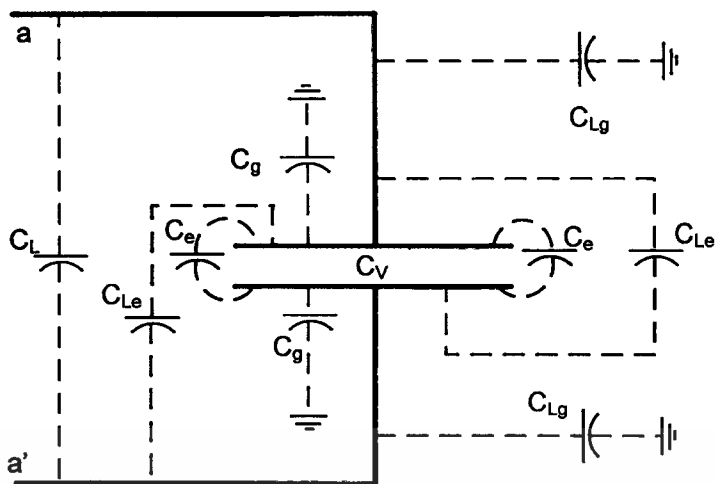
C_f คือ ค่าเก็บประจุที่ขอบ (fringing)

C_g คือ ค่าเก็บประจุของกราวด์กับอิเล็กทรอนิกส์ โทรค

C_L คือ ค่าเก็บประจุระหว่างสายตัวนำ

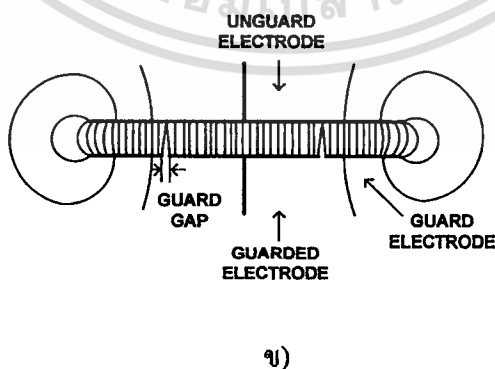
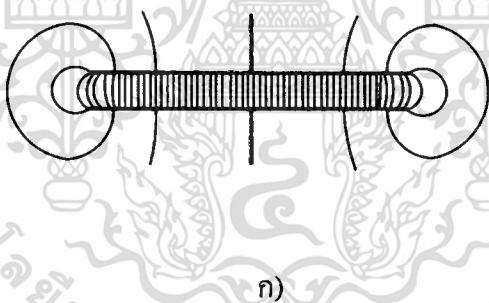
C_{Lg} คือ ค่าเก็บประจุระหว่างสายตัวนำกับกราวด์

C_{Lc} คือ ค่าความเก็บประจุระหว่างสายตัวนำกับอิเล็กทรอนิกส์ โทรค



รูปที่ 3.8 ค่าความเก็บประจุรบกวนจากแหล่งอื่นๆ [50]

เพื่อลดปัญหาที่เกิดจากค่าเก็บประจุแฝงแสดงได้ดังรูปที่ 3.9 (ก) วิธีแก้ไขคือการใส่วงแหวนการ์ด (guard ring) แสดงได้ดังรูปที่ 3.9 (ข) เพื่อควบคุมสนามไฟฟ้าที่เป็นต้นเหตุของตัวเก็บประจุแฝง

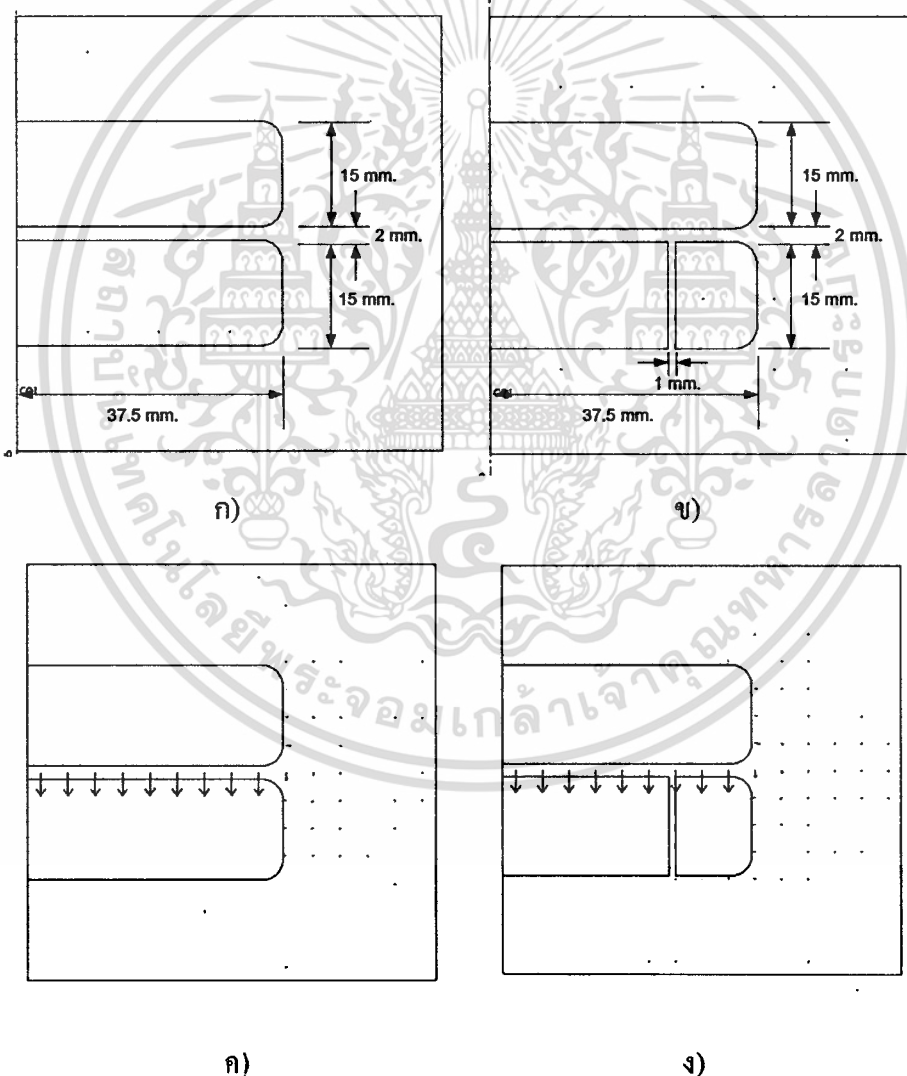


รูปที่ 3.9 การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้า ก) ไม่ได้ต่อวงแหวนการ์ด ข) ต่อวงแหวนการ์ด [50]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3.1.4 ขั้นตอนการออกแบบชุดทดสอบวัดค่าเก็บประจุและค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวน
เพรสอรัคผสมน้ำมัน**

จะเหมือนกับการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์โทรคสำหรับวัดค่ากระแสรั่วไหล โดยได้ทำการจำลองชุดอิเล็กทรอนิกส์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์อิเลเมนต์ (FEM) เพื่อดูพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของสนามไฟฟ้า ผลการจำลอง พบว่าหากไม่ต่อวงแหวนการ์ดแสดงได้ดังรูปที่ 3.10 ก) จะเกิดเส้นสนามไฟฟ้าที่รั่วไหลโดยไม่ผ่านเนื้อฉนวนจะรบกวนผลการวัดแสดงได้ดังรูปที่ 3.10 ค) แต่ถ้าต่อวงแหวนการ์ดแสดงได้ดังรูปที่ 3.10 ข) จะเกิดเส้นสนามไฟฟ้าที่รั่วไหลโดยไม่ผ่านเนื้อฉนวน มีทิศทางพุ่งเข้าที่วงแหวนการ์ด (guard ring) แสดงได้ดังรูปที่ 3.10 ง) ทำให้วงแหวนการ์ด (guard ring) สามารถลดค่าเก็บประจุแฝงได้



รูปที่ 3.10 การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้า ก) ลักษณะมิติของอิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่ได้ต่อกับวงแหวนการ์ด

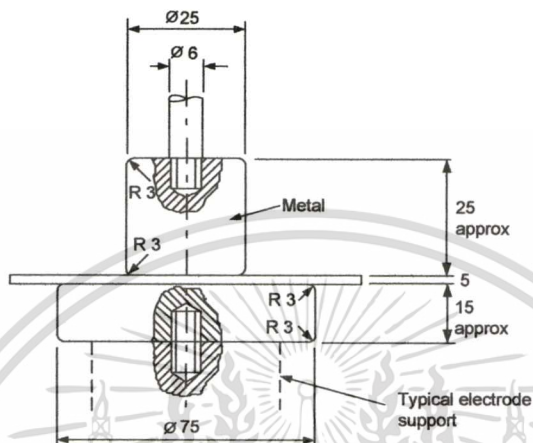
ข) ลักษณะมิติของอิเล็กทรอนิกส์ที่ต่อกับวงแหวนการ์ด ค) รูปแบบสนามไฟฟ้าของ

อิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่ได้ต่อกับวงแหวนการ์ด ง) รูปแบบสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์ต่อกับวง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ชุดทดสอบหาค่าความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวนแข็งผสมน้ำมัน

การออกแบบชุดทดสอบหาค่าความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวนแข็งผสมน้ำมัน ได้ทำการออกแบบตามมาตรฐาน IEC 60243-1 [70] ซึ่งตัวมาตรฐานได้กำหนดลักษณะหัวอิเล็กโทรด ดังรูปที่ 3.11 กับ 3.12



รูปที่ 3.11 อิเล็กโทรดสำหรับทดสอบหาค่าความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวนเพรสเซอร์ผสมน้ำมัน

3.2.1 ขั้นตอนการออกแบบชุดทดสอบหาค่าความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวนแข็งผสมน้ำมัน

การออกแบบชุดทดสอบหาค่าความคงทนฉนวนเพรสผสมน้ำมันมีวิธีการดังนี้

- 1) ออกแบบหัวอิเล็กโทรดตามมาตรฐาน IEC 60243-1 [70]
- 2) วัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรดจะเป็นสแตนเลส
- 3) ตัวถัง ทำหน้าที่ ครอบคลุมชิ้นงานทำจากท่ออะคริลิก ซึ่งภายในบรรจุน้ำมันได้

ตัวถังมีขนาดความกว้าง 15 ซม. และมีความสูง 25 ซม.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.12 ชุดทดสอบหาค่าความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวนแข็งผสมน้ำมัน

3.3 ถึงสุญญากาศ

ในการทดสอบหาค่า PDC ของกระดาษฉนวนผสมน้ำมันจะใช้เวลาในการทดสอบที่นาน ซึ่งฉนวนกระดาษผสมน้ำมันนั้น จะมีปริมาณความชื้นในกระดาษที่เปลี่ยนแปลงตามความชื้นของบรรยากาศมาก หากทิ้งฉนวนกระดาษผสมน้ำมันไว้ในบรรยากาศนาน ๆ ความชื้นจะเข้าไปในเข้าไปในน้ำมันและกระดาษ และส่งผลให้การทดสอบผิดพลาดได้ ข้อดีของถึงสุญญากาศอีกประการหนึ่ง ได้แก่ สามารถป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอกได้

3.3.1 ขั้นตอนการออกแบบถึงสุญญากาศ

- 1) เพื่อลดสัญญาณรบกวนที่มาจากภายนอก ดังนั้นจึงใช้โลหะในการทำตัวถัง โดยมี ความกว้าง 32 เซนติเมตร และความสูง 68 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.13
- 2) ต่อท่อเพื่อทำสุญญากาศให้กับตัวถัง ซึ่งสามารถนำมาต่อกับเครื่องทำสุญญากาศได้
- 3) ต่อขั้วป้อนแรงดันไฟฟ้า ขั้ววัดกระแสไฟฟ้า และชุดกราวด์ เข้ากับตัวถัง



รูปที่ 3.13 ถึงสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบฉนวนเพรสบอร์คจุ่มน้ำมัน และฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

การทดสอบฉนวนเพรสบอร์คจุ่มน้ำมัน สามารถแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน ส่วนแรกเป็นการทดสอบทางด้านไฟฟ้า ได้แก่ การทดสอบเพื่อหาผลตอบสนองไดอิเล็กตริกและความชื้นของฉนวนเพรสบอร์คจุ่มน้ำมัน การทดสอบคิซาร์จบางส่วนและความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเพรสบอร์คจุ่มน้ำมัน

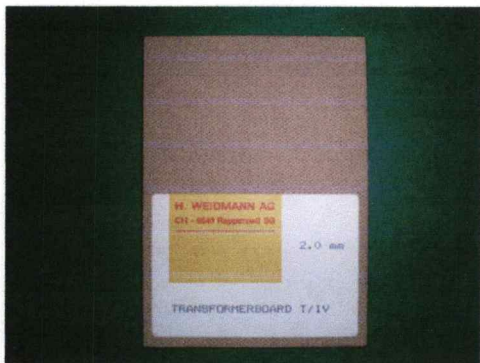
การทดสอบฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เพื่อหาผลตอบสนองไดอิเล็กตริกและความชื้นที่อยู่ภายในฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

4.1 การทดสอบฉนวนเพรสบอร์คจุ่มน้ำมัน

ปัญหาของฉนวนเพรสบอร์คจุ่มน้ำมัน ส่วนใหญ่เกิดจากความชื้นที่มีอยู่ภายในตัวเพรสบอร์คเอง และส่งผ่านมาจากน้ำมันที่มีความชื้น การทดสอบฉนวนเพรสบอร์คจุ่มน้ำมันนั้น ทดสอบเพื่อวัดสภาพความเป็นฉนวนเพรสบอร์คจุ่มน้ำมัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในเพรสบอร์คและมีการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดในน้ำมัน

4.1.1 การเตรียมฉนวนเพรสบอร์ค

ฉนวนเพรสบอร์คที่ใช้จะเป็นกระดาษเพรสบอร์คของ weidmann (ภาคผนวก ก) มีขนาดความหนา 2 มิลลิเมตร ตัดเป็นทรงกลมด้วยเครื่องปั๊มซึ่งออกแบบให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร หลังจากนั้นนำกระดาษเพรสบอร์คทิ้งไว้ให้ได้รับความชื้นภายในห้องทดสอบที่อุณหภูมิ 25-30 °C มีความชื้นสัมพัทธ์ 61-70 % เป็นเวลา 1 สัปดาห์ เพื่อให้ความชื้นที่อยู่ภายในกระดาษเกิดการอิ่มตัว (ความชื้นที่อยู่ภายในกระดาษสามารถตรวจวัดด้วยเครื่องคูโลเมตริกคาร์ล ฟิตเชอร์ไครเทชัน(Coulometric Karl Fischer Titration) โดยทำตามมาตรฐาน ASTM D 3277-65 [71] (ภาคผนวก ก)



(ก) เพรสบอร์ดขนาดหนา 2 มิลลิเมตร

(ข) ความชื้นสัมพัทธ์ 61.3 %

รูปที่ 4.1 ฉนวนเพรสบอร์ดขนาดหนา 2 มิลลิเมตรและการอิมตัวของเพรสบอร์ดที่ความชื้นสัมพัทธ์ 61-70 %

หลังจากนั้นทำการแบ่งตัวอย่างออกเป็น 3 ตัวอย่าง ได้แก่ ตัวอย่างที่ 1 เป็นเพรสบอร์ดในสภาวะความชื้นภายในกระดวยอิมตัว ตัวอย่างที่ 2 เป็นเพรสบอร์ดที่ทิ้งไว้ในสภาวะปกติ ควบคุมความชื้นของเพรสบอร์ดด้วยการอบไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นระยะเวลา 5 นาที และตัวอย่างที่ 3 เป็นเพรสบอร์ดที่ทิ้งไว้ในสภาวะปกติ ควบคุมความชื้นของเพรสบอร์ดด้วยการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100°C เป็นระยะเวลา 10 นาที (เมื่อทำการอบเสร็จแล้ว จะนำเพรสบอร์ดทิ้งไว้ 5 นาทีภายในกล่องดูดความชื้น ซึ่งภายในกล่องจะใส่ซิลิกาเจล ป้องกันไม่ให้อากาศเข้าไปภายในกล่อง และเพื่อให้อุณหภูมิของเพรสบอร์ดลดลง)



ก) หม้ออบ

ข) กล่องดูดความชื้น

รูปที่ 4.2 การอบเพรสบอร์ดเพื่อไล่ความชื้นและการทิ้งเพรสบอร์ดให้เย็นตัวภายในกล่องดูดความชื้น

ค่าความชื้นภายในเพรสบอร์ด Moisture content (%) สามารถตรวจวัดได้ โดยใช้เอกสารนี้เป็น เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เครื่องเครื่องคูโลเมตริกคาร์ลฟิชเชอร์ ไตรเทชั่น (Coulometric Karl Fischer Titration) และทำตามไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

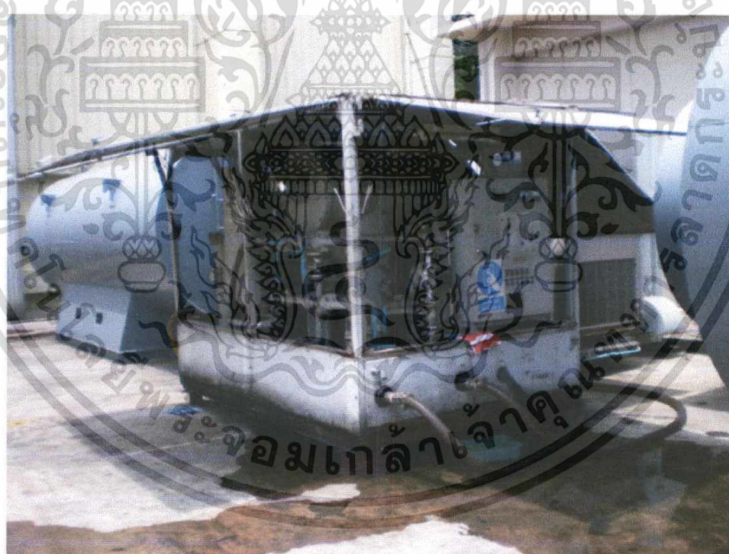
มาตรฐาน ASTM D 3277-65 [71] (ภาคผนวก ก) ค่าความชื้นของเพรสบอร์คแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่า Moisture content (%) ของเพรสบอร์ค

Sample	Moisture content (%)
1	5.51
2	3.65
3	1.69

4.1.2 การเตรียมน้ำมันหม้อแปลง

การเตรียมจนวนน้ำมันหม้อแปลงนั้น จะใช้น้ำมันหม้อแปลง 2 ตัวอย่าง ได้แก่ ตัวอย่างที่ 1 เป็นน้ำมันใหม่ยี่ห้อ total และ ตัวอย่างที่ 2 เป็นน้ำมันเก่าที่ผ่านการปรับปรุงสภาพโดยการดึงความชื้นและกรองฝุ่นผงออก แต่ยังไม่ได้ดึงกรดที่อยู่ในน้ำมันออก



รูปที่ 4.3 เครื่องที่ใช้ปรับปรุงสภาพน้ำมัน

ปริมาณน้ำในน้ำมัน (water content) สามารถตรวจวัดได้ โดยใช้คูโลเมตริกคาร์ลฟิชเชอร์ ไตรเทชัน (Coulometric Karl Fischer Titration) และทำตามมาตรฐาน ASTM D 1533-00 [72] (รายละเอียดดูได้จากภาคผนวก ข) ปริมาณน้ำในน้ำมันแสดงได้ดังตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่า Moisture content (ppm) ของน้ำมัน

Sample	Water content (ppm)
1	17.77
2	10

ค่าความเป็นกรดในน้ำมัน Total acid number สามารถตรวจวัดได้ โดยใช้เครื่อง Potentiometric titration และทำตามมาตรฐาน ASTM D 664-01 [72] (ภาคผนวก ค)

ตารางที่ 4.3 ค่า Total acid number ของน้ำมัน

Sample	Total acid number
1	<0.001
2	0.09

ค่าแรงดันเบรกคาวาน์ของน้ำมันหม้อแปลง สามารถทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 877-02 (2007) [73] ซึ่งแบ่งการทดสอบน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ออกเป็น 2 ตัวอย่าง ได้แก่ ตัวอย่างที่ 1 เป็นน้ำมันใหม่ water content = 18 ppm, Total acid number น้อยกว่า 0.001 และตัวอย่างที่ 2 water content = 10 ppm, Total acid number = 0.09



ก) เครื่องทดสอบ



ข) หัวอิเล็กโทรด

รูปที่ 4.4 การทดสอบแรงดันเบรกคาวาน์ของน้ำมันหม้อแปลงตามมาตรฐาน ASTM D 877-02 [7]

แรงดันเบรกคาวาน์ของน้ำมันหม้อแปลง สามารถทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 877-02 (2007) [7] ซึ่งกำหนดไว้ว่าผลการทดสอบต้องเกิดจากผลเฉื่อยของการเบรกคาวาน์ของน้ำมัน 5 แม้ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

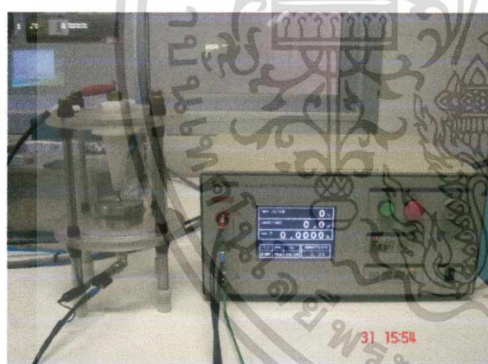
ถึง 10 ครั้ง ในการทดสอบครั้งนี้สภาพแวดล้อมห้องทดสอบอุณหภูมิ 26 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 64.8 %

ตารางที่ 4.4 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลง

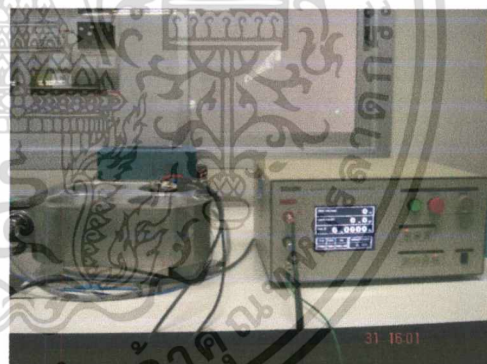
Sample(oil)	Breakdown voltage (kV)
new oil	32
old oil	30

4.1.3 การทดสอบหาค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ_r) ของเพอร์สโพรดและน้ำมัน

ในการทดสอบค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ_r) ของกระดาษ ซึ่งเกิดจากผลการเตรียมฉนวน กระดาษ(หัวข้อ 4.1.1) และการทดสอบค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ_r) ของน้ำมัน ซึ่งเกิดจากผลการเตรียมน้ำมันหม้อแปลง(หัวข้อ 4.1.2) โดยค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ_r) ของเพอร์สโพรดและน้ำมันที่สามารถตรวจวัดได้ด้วยเครื่องวัดความเป็นฉนวน โดยใช้ร่วมกับชุดทดสอบวัดค่าเก็บประจุและค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวนเพอร์สโพรดที่ได้ออกแบบขึ้น (หัวข้อ 3.1.3)



ก) เพอร์สโพรด



ข) น้ำมัน

รูปที่ 4.5 การวัดค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของเพอร์สโพรดและน้ำมัน

ตารางที่ 4.5 ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ_r) ของเพอร์สโพรด

Sample	Dielectric constant (ϵ_r)
1	10.16
2	3.12
3	2.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ_r) ของน้ำมัน

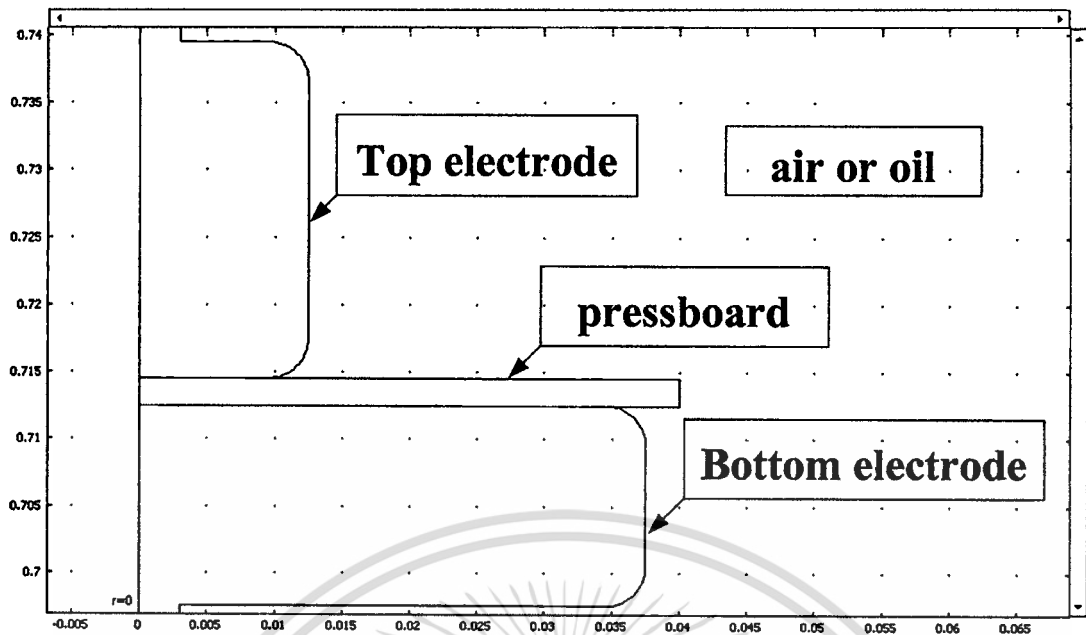
Sample	Dielectric constant (ϵ_r)
1	2.21
2	2.25

การทดสอบวัดค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเพรสเซอร์ที่มีความชื้นแตกต่างกัน พบว่าความชื้นที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเพรสเซอร์เพิ่มขึ้นด้วย ส่วนค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของน้ำมันระหว่างน้ำมันใหม่และน้ำมันเก่าจะมีค่าที่ไม่ค่อยแตกต่างกันมากนัก

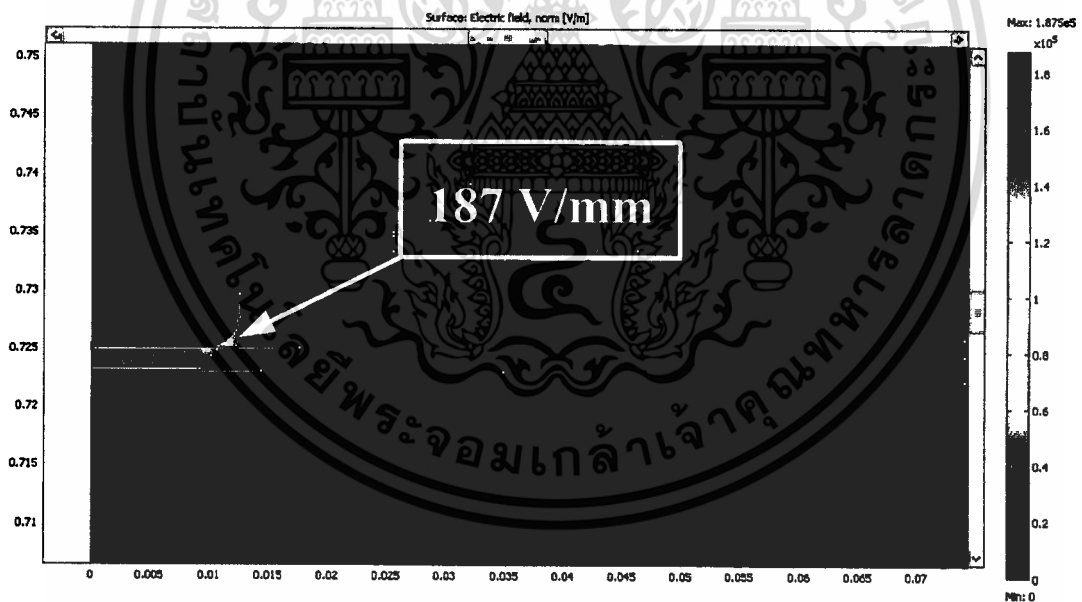
4.1.4 การจำลองรูปแบบสนามไฟฟ้าของฉนวนเพรสเซอร์ค้อน้ำมัน

ในการจำลองรูปแบบสนามไฟฟ้าสนามไฟฟ้าของฉนวนเพรสเซอร์ค้อน้ำมัน โดยเริ่มจากการจำลองรูปแบบสนามไฟฟ้าสนามไฟฟ้าของฉนวนกระดาษกับอากาศ (ค่าคงตัวของไดอิเล็กตริกของเพรสเซอร์ได้มาจากการทดลองหัวข้อ 4.1.3 และ การจำลองรูปแบบสนามไฟฟ้าสนามไฟฟ้าของฉนวนกระดาษกับน้ำมัน ซึ่งใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการวิเคราะห์ และมีขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้

- 1) กำหนดลักษณะมิติของปัญหา และทำการจำลองรูปร่างของปัญหาลงในโปรแกรม
- 2) กำหนดค่าคงตัวของไดอิเล็กตริก (ϵ_r) ให้แก่วัสดุ ได้แก่ ฉนวนกระดาษ ($\epsilon_r=2.81$, 3.12, 10.16) อากาศ ($\epsilon_r=1$) และสแตนเลส ($\epsilon_r=1$)
- 3) กำหนดขอบเขตจากรูปที่ 4.5 โดยป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรดด้านบน 100 V อิเล็กโตรดล่างเป็นกราวด์
- 4) ทำการคำนวณค่าสนามไฟฟ้า
- 5) ทำตามลำดับขั้นตอนที่ 1-4 เพียงแต่เปลี่ยนค่าคงตัวของไดอิเล็กตริกของอากาศ ($\epsilon_r=1$) ไปเป็นน้ำมัน ($\epsilon_r=2.2$)

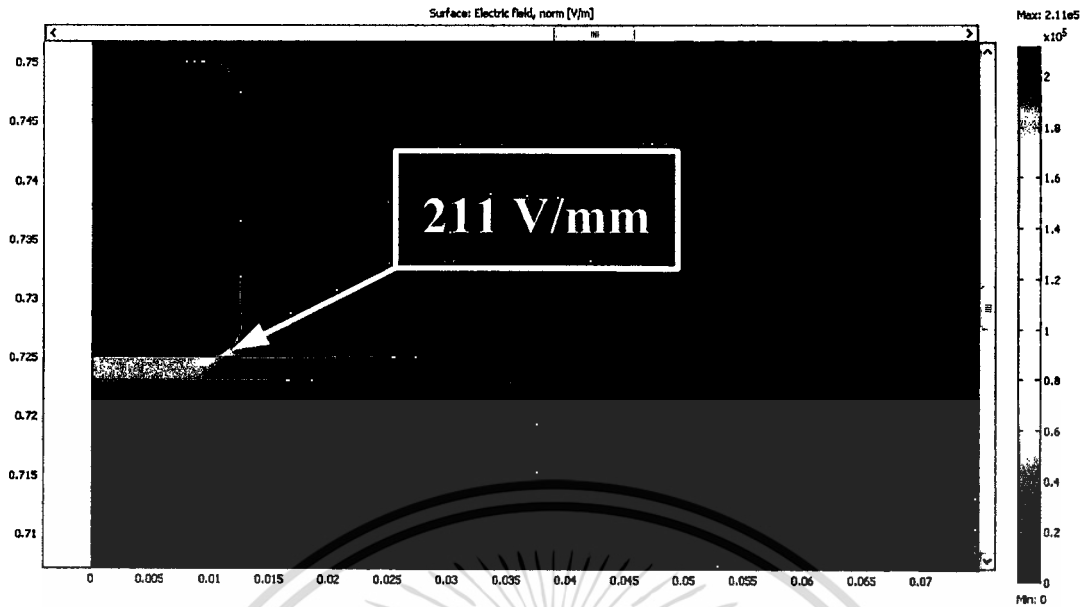


รูปที่ 4.6 ขอบเขตการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าของฉนวนเพรสบอร์ด

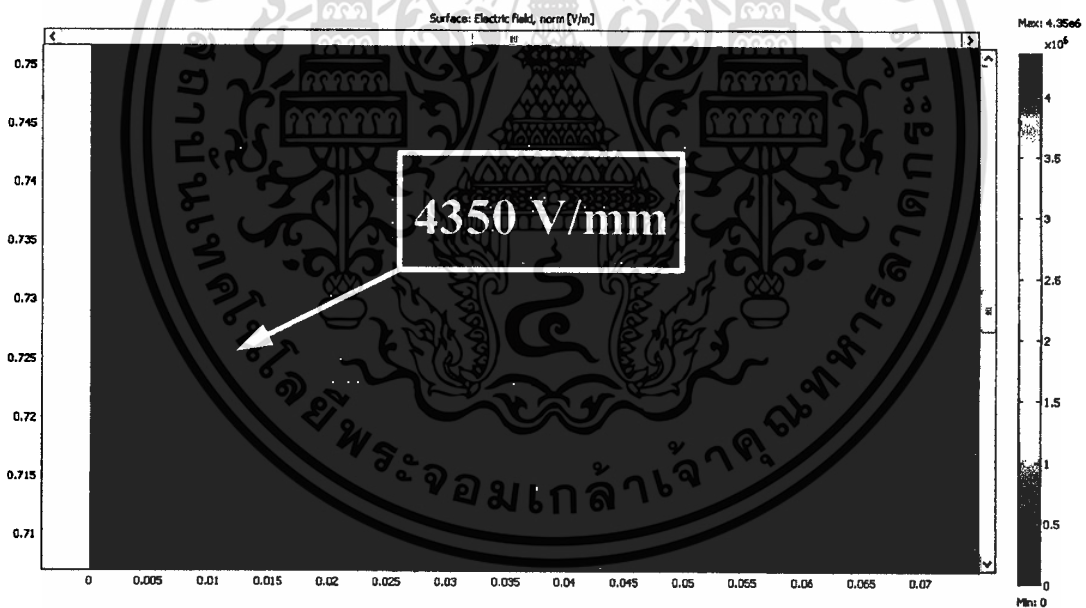


รูปที่ 4.7 รูปแบบสนามไฟฟ้าของเพรสบอร์ด ($\epsilon_r=2.81$) กับอากาศ ($\epsilon_r=1$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

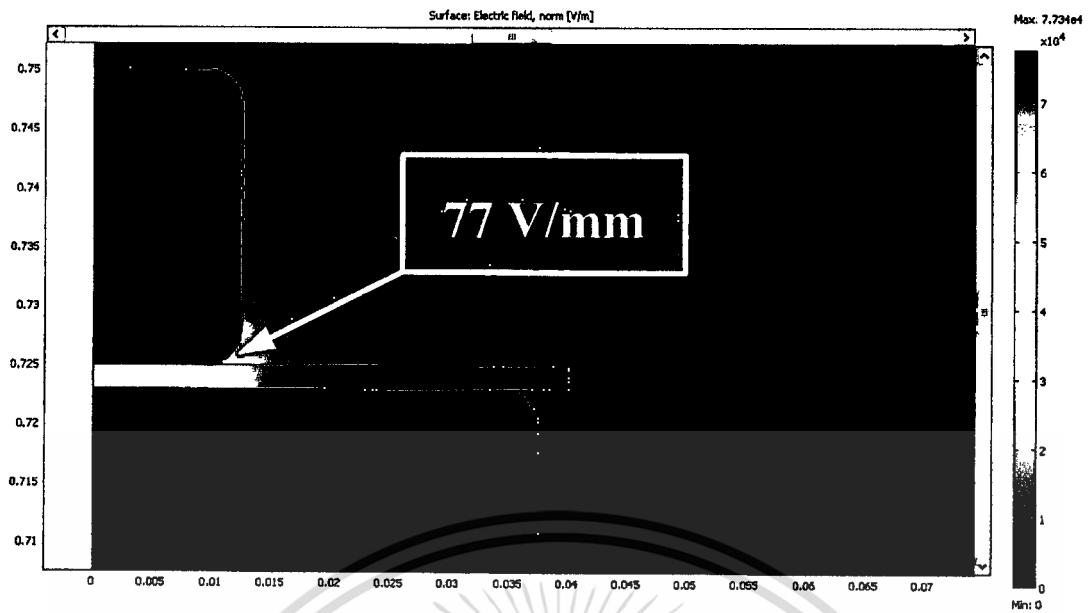


รูปที่ 4.8 รูปแบบสนามไฟฟ้าของเพอร์สโบริด ($\epsilon_r=3.12$) กับอากาศ ($\epsilon_r=1$)

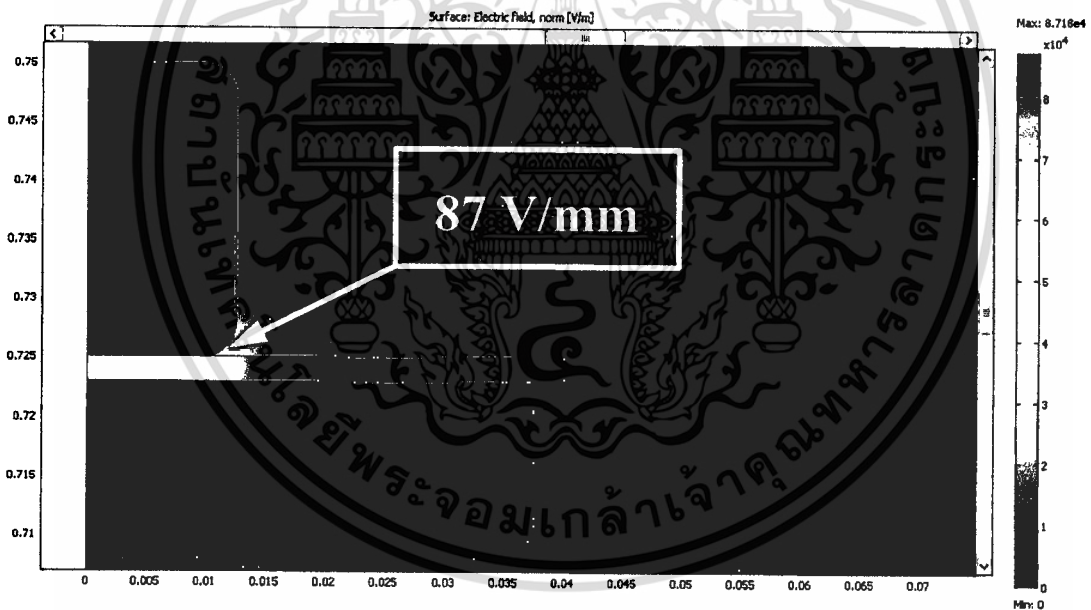


รูปที่ 4.9 รูปแบบสนามไฟฟ้าของเพอร์สโบริด ($\epsilon_r=10.16$) กับอากาศ ($\epsilon_r=1$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

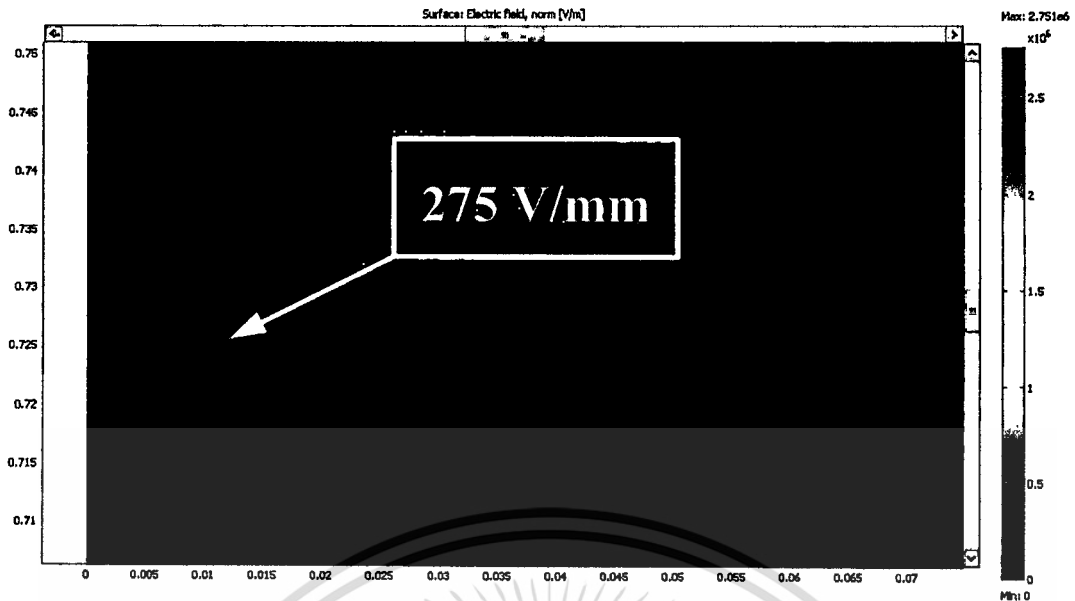


รูปที่ 4.10 รูปแบบสนามไฟฟ้าของเพอร์สบอร์ด($\epsilon_r=2.81$) กับน้ำมัน($\epsilon_r=2.2$)



รูปที่ 4.11 รูปแบบสนามไฟฟ้าของเพอร์สบอร์ด($\epsilon_r=3.12$) กับน้ำมัน($\epsilon_r=2.2$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 รูปแบบสนามไฟฟ้าของเพรสบอร์ด ($\epsilon_r = 10.16$) กับน้ำมัน ($\epsilon_r = 2.2$)

ตารางที่ 4.7 รูปแบบสนามไฟฟ้าของฉนวนเพรสบอร์ดกับอากาศ

Dilectric constant* (pressboard)	Electric Field [V/mm]
2.81	187
3.12	211
10.16	4350

* air = 1

ตารางที่ 4.8 รูปแบบสนามไฟฟ้าของฉนวนเพรสบอร์ดกับน้ำมัน

Dilectric constant* (pressboard)	Electric Field [V/mm]
2.81	77
3.12	87
10.16	275

* oil = 2.2

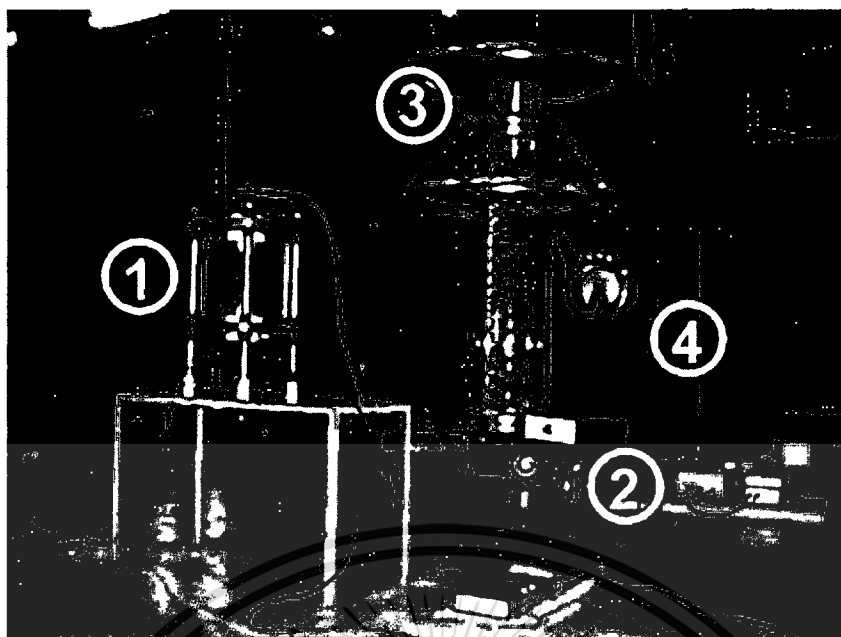
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองรูปแบบสนามไฟฟ้าของฉนวนเพรสเซอร์กับอากาศ และการจำลองรูปแบบสนามไฟฟ้าของฉนวนเพรสเซอร์กับน้ำมัน โดยการป้อนให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของเพรสเซอร์มีค่าแตกต่างกัน (ค่าคงตัวของไดอิเล็กตริกได้มาจากการทดลองหัวข้อ 4.1.3 ผลการจำลองพบว่าเมื่อค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเพรสเซอร์เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้สนามไฟฟ้าสูงสุดตรงบริเวณผิวของอิเล็กโตรดกับรอยต่อของเพรสเซอร์มีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยที่รูปแบบสนามไฟฟ้าของฉนวนเพรสเซอร์กับอากาศจะสูงกว่า รูปแบบสนามไฟฟ้าของฉนวนเพรสเซอร์กับน้ำมัน อันเนื่องจากฉนวนที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีต่ำจะมีเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าหนาแน่นกว่าบริเวณอื่นๆ ซึ่งหมายถึงว่าบริเวณนั้นจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง [74]

4.1.5 การวัดแรงดันดิสชาร์จเริ่มเกิดและการศึกษาการเกิดรูปแบบดิสชาร์จบางส่วนของฉนวนเพรสเซอร์จุ่มน้ำมัน

การวัดแรงดันดิสชาร์จเริ่มเกิดและการศึกษาการเกิดรูปแบบดิสชาร์จบางส่วนของฉนวนเพรสเซอร์จุ่มน้ำมัน เพื่อศึกษาคุณสมบัติของฉนวนเพรสเซอร์จุ่มน้ำมัน ในกรณีที่ความชื้นภายในเพรสเซอร์ซึ่งเกิดจากผลการเตรียมฉนวนเพรสเซอร์(หัวข้อ 4.1.1) และ ความเป็นกรดในน้ำมันแตกต่างกัน(หัวข้อ 4.1.2) ขั้นตอนในการวัดแรงดันดิสชาร์จเริ่มเกิดและการศึกษาการเกิดรูปแบบดิสชาร์จบางส่วนมีดังต่อไปนี้

- 1) ทำการบันทึกสภาพแวดล้อมห้องทดสอบ โดยวัดอุณหภูมิและความชื้น ได้อุณหภูมิ 26°C ความชื้น 64.8 %
- 2) นำตัวอย่างกระดาษเพรสเซอร์ออกจากกล่องดูดความชื้น หลังจากนั้นติดตั้งภายในชุดทดสอบ แล้วเติมน้ำมัน 1 ลิตร ลงในชุดทดสอบ
- 3) ทำการต่อวงจรทดสอบดังรูปที่ 4.13
- 4) ทำการป้อนแรงดันทดสอบเป็นสเตปให้กับชุดทดสอบสเตปละ 1 kV จนกระทั่งตรวจวัดเจอดิสชาร์จบางส่วน
- 5) ทำการบันทึกแรงดันดิสชาร์จเริ่มเกิด โดยมีระดับสัญญาณรบกวนในวงจรทดสอบน้อยกว่า 0.4 pC (ตัวอย่างที่นำมาทดสอบกำหนดเป็นสัญลักษณ์ เช่น 1.7 % _ new oil คือ เพรสเซอร์มีความชื้น 1.7 % และน้ำมันที่ใช้เป็นน้ำมันใหม่)



รูปที่ 4.13 วงจรการทดสอบดิสซาร์จบางส่วนของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน

- โดยที่
- 1 คือ วัสดุทดสอบ
 - 2 คือ Coupling Device
 - 3 คือ Coupling Capacitor 100 kV
 - 4 คือ หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง 75 kV, 40 kVA , PD < 2pC

ตารางที่ 4.9 ผลการวัดแรงดันดิสซาร์จเริ่มเกิดของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน

Sample(oil/pressboard)	UPD(kV)	Q_{IEC} (pC)
1.7 % _ new oil	22	130
3.7 % _ new oil	7	79
5.5 % _ new oil	2	39
1.7 % _ old oil	20	110
3.7 % _ old oil	5	65
5.5 % _ old oil	2	40

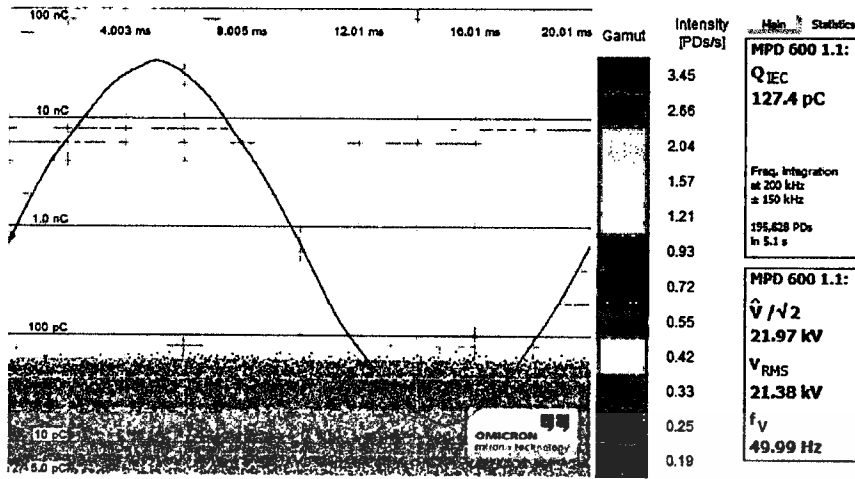
หมายเหตุ การตรวจวัดดิสซาร์จเริ่มเกิดพบว่า เมื่อถึงระดับแรงดันที่พบดิสซาร์จเริ่มเกิด ประจุ Q_{IEC}

(pC) จะมีค่าไม่คงที่ (โดยที่ Q_{IEC} (pC) ในตารางเป็นค่าประจุเริ่มเกิด แต่ Q_{IEC} (pC) ที่

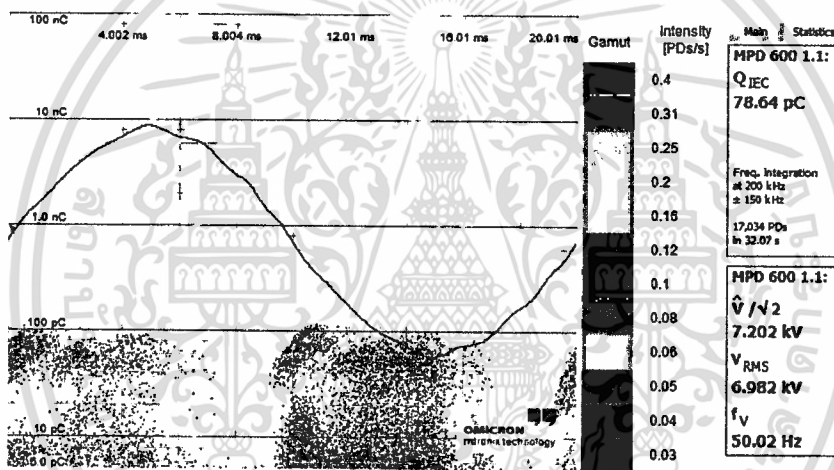
เห็นในรูปที่ 4.14-4.19 เป็นค่าประจุที่เวลา 30 วินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

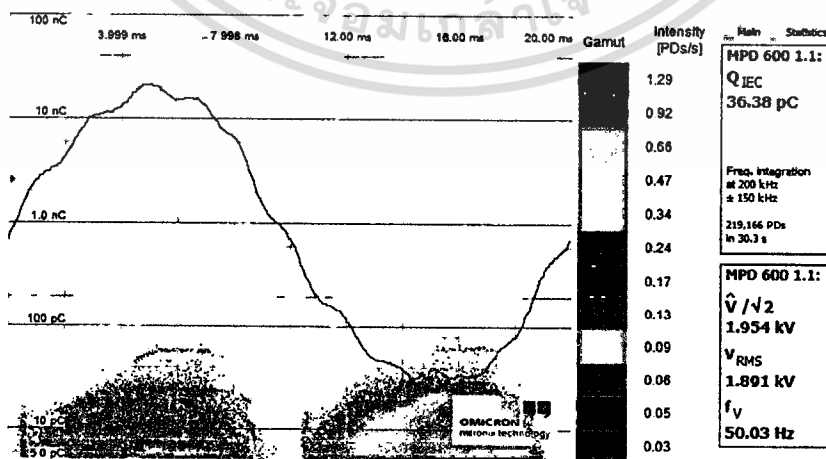
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แรงดันคิซาร์จเริ่มเกิดของฉนวนเพรสอร์คุ่มน้ำมัน 1.7%_ new oil

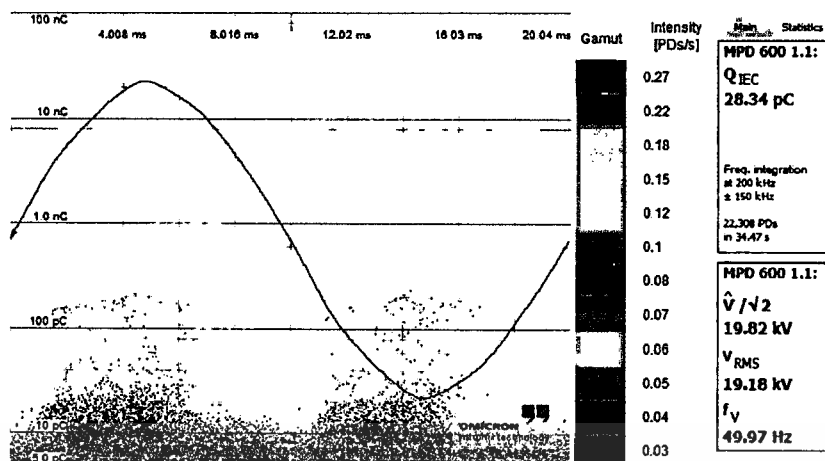


รูปที่ 4.15 แรงดันคิซาร์จเริ่มเกิดของฉนวนเพรสอร์คุ่มน้ำมัน 3.7%_ new oil

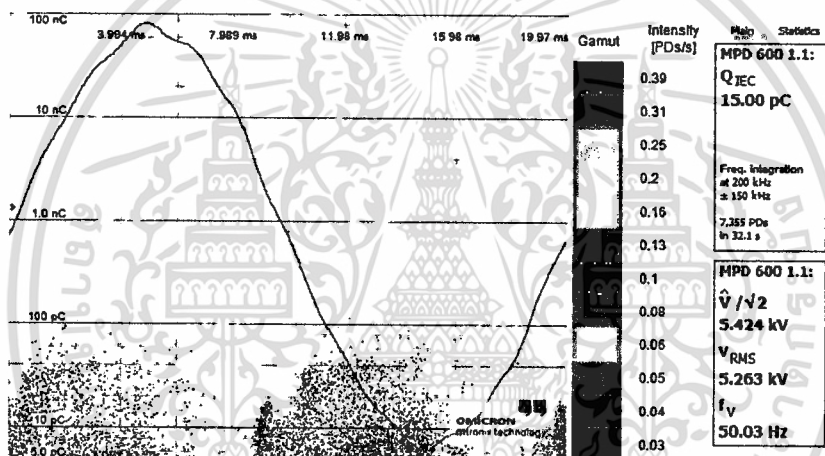


รูปที่ 4.16 แรงดันคิซาร์จเริ่มเกิดของฉนวนเพรสอร์คุ่มน้ำมัน 5.5%_ new oil

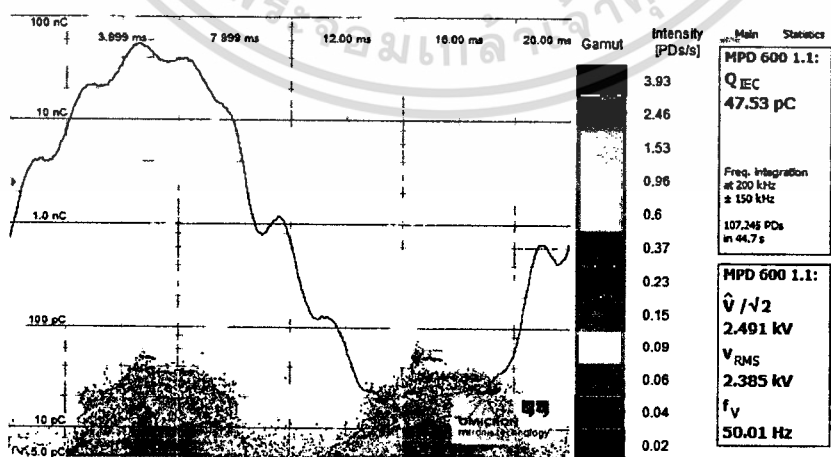
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 แรงดันดิซาร์จเริ่มเกิดของฉนวนเพรสอร์คั่มน้ำมัน 1.7 % _ old oil



รูปที่ 4.18 แรงดันดิซาร์จเริ่มเกิดของฉนวนเพรสอร์คั่มน้ำมัน 3.7 % _ old oil



รูปที่ 4.19 แรงดันดิซาร์จเริ่มเกิดของฉนวนเพรสอร์คั่มน้ำมัน 5.5 % _ old oil

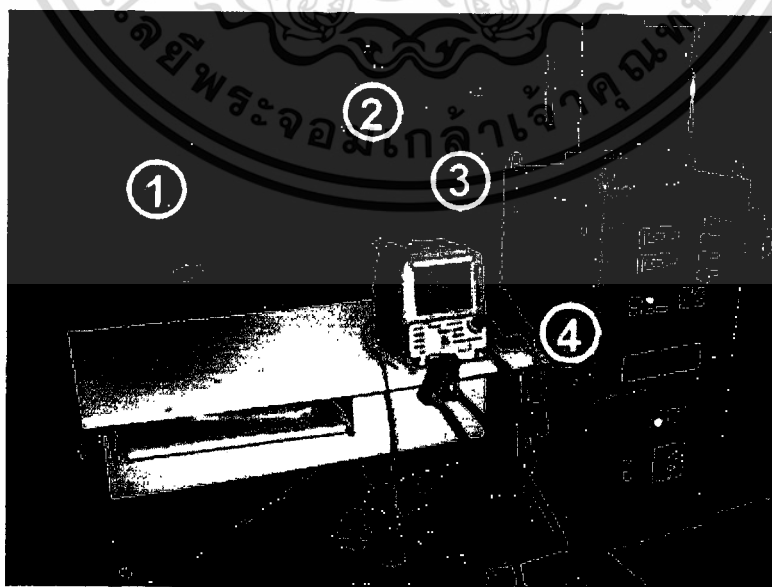
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวัดแรงดันดิสชาร์จเริ่มเกิดและการศึกษาการเกิดรูปแบบดิสชาร์จบางส่วน พบว่า เมื่อเพรสบอร์คจุ่มน้ำมันที่มีความชื้นมากๆ แรงดันดิสชาร์จเริ่มเกิดจะมีค่าต่ำ และ เมื่อเพรสบอร์คจุ่มน้ำมันที่มีความชื้นน้อยแรงดันดิสชาร์จเริ่มเกิดจะมีค่าสูง ส่วนความแตกต่างระหว่างการใช้ น้ำมันเก่าและน้ำมันใหม่คือแรงดันดิสชาร์จเริ่มเกิดของเพรสบอร์คจุ่มน้ำมัน จะมีค่าที่ต่ำกว่าเพรสบอร์คจุ่มน้ำมัน ส่วนรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน พบว่าเป็นการเกิดดิสชาร์จภายในผสมกับดิสชาร์จตามผิว(รูปแบบการเกิดของประจูปรูปที่ 4.14-4.19) อันเนื่องมาจากตัวโครงสร้างเพรสบอร์คจุ่มน้ำมันจะมีรูพรุน เมื่อเกิดความเครียดสนามไฟฟ้า แรงดันดิสชาร์จจะเกิดขึ้นที่ภายในรูพรุนและบริเวณผิวรอยต่อระหว่างอิเล็กโทรดป้อนแรงดัน น้ำมันและเพรสบอร์ค

4.1.6 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนเพรสบอร์คจุ่มน้ำมัน

การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนเพรสบอร์คจุ่มน้ำมัน โดยทำตามมาตรฐาน IEC 60243 -1 [70] เพื่อศึกษาคุณสมบัติของฉนวนเพรสบอร์คจุ่มน้ำมัน ในกรณีที่มีความชื้นภายในเพรสบอร์คเกิดจากผลการเตรียมฉนวนเพรสบอร์ค (หัวข้อ 4.1.1) และ ความเป็นกรดในน้ำมันแตกต่างกัน (หัวข้อ 4.1.2) ขั้นตอนในการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับมีดังต่อไปนี้

- 1) ทำการต่อวงจรทดสอบดังรูปที่ 4.20
- 2) ป้อนแรงดันกระแสสลับเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆจนเกิดเบรกดาวน
- 3) ทำการบันทึกแรงดันที่เบรกดาวน



รูปที่ 4.20 วงจรการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนเพรสบอร์คจุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า
น้ำมัน

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดยที่ 1 คือ วัสดุทดสอบ
 2 คือ ความต้านทานน้ำ 6.1 M Ω
 3 คือ หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง 100 kV
 4 คือ ตู้ควบคุม

ตารางที่ 4.10 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน

Sample(oil/pressboard)	Breakdown voltage (kV)
1.7 % _ new oil	34
3.7 % _ new oil	31
5.5 % _ new oil	17
1.7 % _ old oil	33
3.7 % _ old oil	30
5.5 % _ old oil	12

ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน พบว่าเมื่อฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมันที่มีความชื้นมากขึ้น แรงดันเบรกดาวน์จะมีค่าต่ำ และ เมื่อฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมันที่มีความชื้นน้อยแรงดันเบรกดาวน์มีค่าสูง ส่วนความแตกต่างระหว่างการใช้น้ำมันเก่าและน้ำมันใหม่คือแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมันเก่า จะมีค่าที่ต่ำกว่าฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมันใหม่

4.1.7 การทดสอบเพื่อหาผลตอบสนองไดอิเล็กตริกความชื้น ค่าความนำ และความต้านทาน ของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน

การหาผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน จะต้องใช้วิธีวัด PDC ภายในฉนวน หลังจากนั้นจะใช้ทฤษฎีผลตอบสนองไดอิเล็กตริกเพื่อหาค่าความสูญเสียของฉนวน (Dielectric Dispistion factor,DDF)หรือ($\tan \delta$) ค่าความต้านทานของฉนวน (R_{dc}) ค่าความเก็บประจุของฉนวน และ ค่าแรงดันย้อนกลับของฉนวน (RVM) ส่วนค่าความนำ (σ_{dc}) จะใช้วิธีการคำนวณ และ ความชื้นของฉนวนเพรสบอร์ด(% wt.)จะใช้เทียบกับฐานข้อมูลภายในเครื่อง PDC-analyser การวัด PDC ของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน จะวัดด้วยเครื่อง PDC-analyser ซึ่งสามารถป้อนแรงดันกระแสตรง และวัดกระแสที่ไหลผ่านฉนวนได้ในตัว (ภาคผนวก ง) ขั้นตอนในการวัด PDC มีดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็น 1) จัดเตรียมการทดสอบดังรูปที่ 4.21 การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ทำการบันทึกสภาพแวดล้อมห้องทดสอบ โดยวัดอุณหภูมิและความชื้น ได้อุณหภูมิ 26°C ความชื้น 64.8 %

3) ต่อสายเชื่อมขั้วจ่ายไฟเข้ากับสายป้อนไฟของเครื่อง PDC –analyser ต่อสายเชื่อมแรงต่ำเข้ากับสายวัดกระแสของเครื่อง PDC –analyser และ ต่อสายกราวด์จากตัวเครื่อง PDC –analyser เข้ากับโครงดังสัญญาภาค

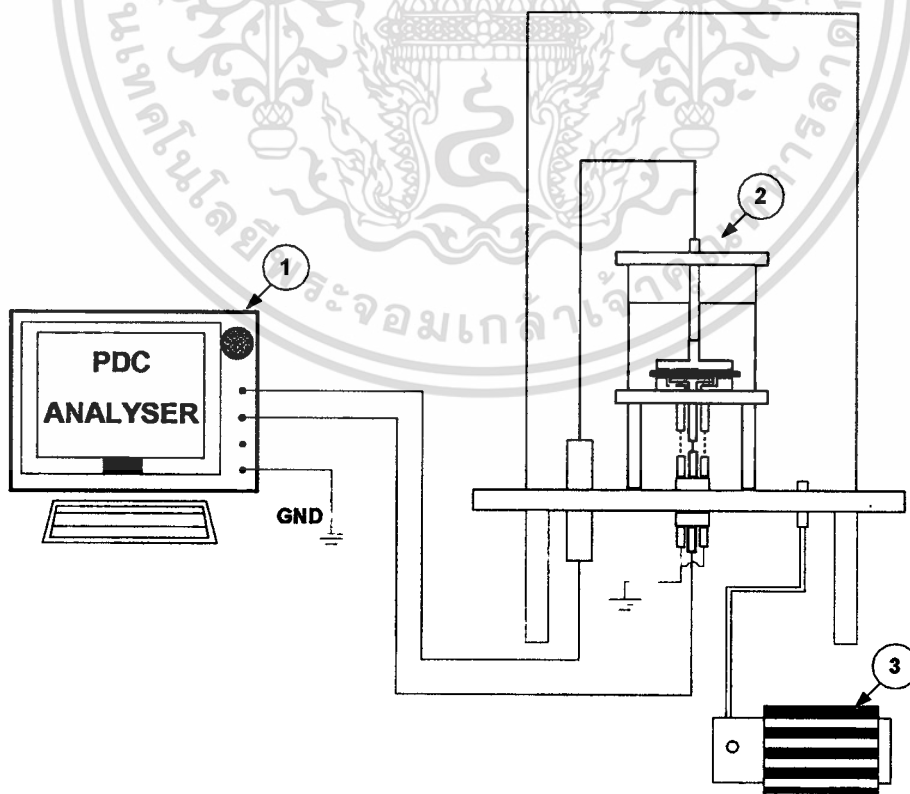
4) นำตัวอย่างกระดาษเพรสบอร์ดออกจากกล่องดูดความชื้น หลังจากนั้นติดตั้งภายในชุดทดสอบเติมน้ำมัน 1 ลิตรลงในชุดทดสอบ และทำการดูดอากาศออกด้วยเครื่องทำสุญญากาศ

5) ใช้เครื่อง PDC-analyser การป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 100 V ให้กับฉนวนตัวอย่าง ระยะเวลาที่ใช้ในการป้อนแรงดัน 1000 วินาที และระยะเวลาที่หยุดป้อนแรงดันอยู่ที่ 1000 วินาที ซึ่งเป็นระยะเวลาที่สามารถสังเกตพฤติกรรม PDC

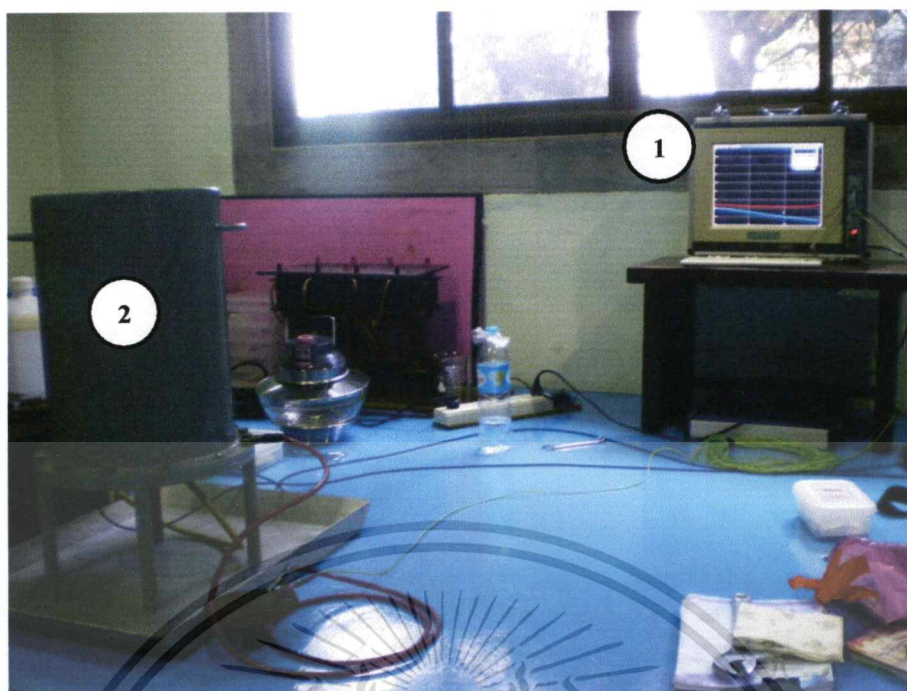
6) เลือกโหมด PDC-Evaluation ภายในเครื่อง PDC-analyser เพื่อหาค่าฉนวนค่าเก็บประจุจริง C' ค่าเก็บประจุเชิงจินตภาพ C'' ค่าสูญเสียไดอิเล็กตริก (dissipation factor) และ ค่าแรงดันย้อนกลับ (return voltage) [74]

7) คำนวณหาค่าความนำในเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน ตามสมการที่ 2.39

8) เลือกโหมด Evaluation of homogeneous insulation systems ภายในเครื่อง PDC-analyser เพื่อหาความชื้นของเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน [75]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มอบไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) วงจรการวัด PDC ของฉนวนเพรสบอรัคจุ่มน้ำมัน

รูปที่ 4.21 ไคอะแกรมและวงจรการวัด PDC ของฉนวนเพรสบอรัคจุ่มน้ำมัน

โดย 1 คือ เครื่อง PDC-analyser

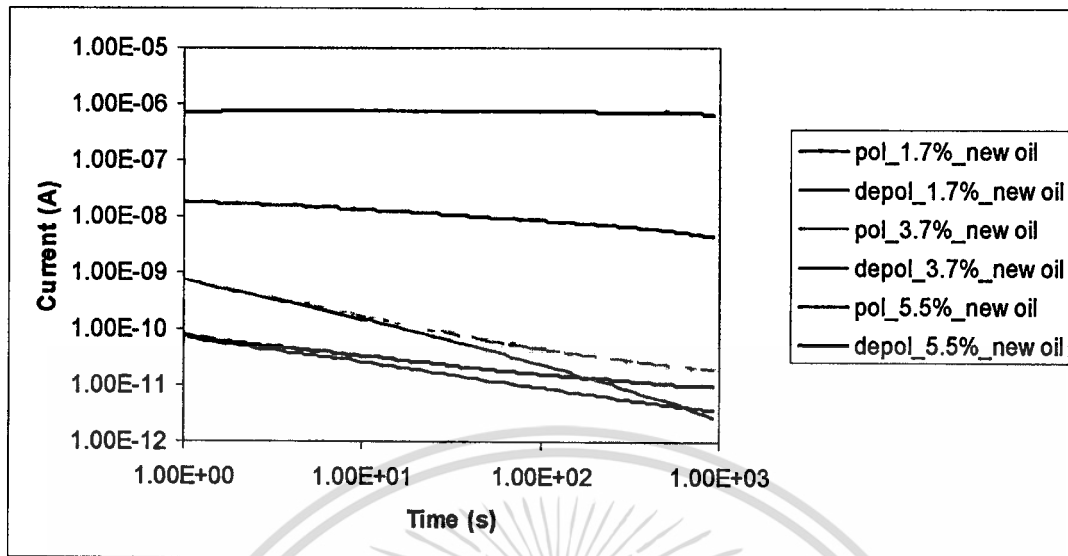
2 คือ ฉนวนเพรสบอรัคจุ่มน้ำมันถูกติดตั้งภายในถังสุญญากาศ

3 คือ เครื่องทำสุญญากาศ (หน้า 67)

การทดสอบสามารถแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 6 กรณี ได้แก่ กรณีแรก คือ ศึกษาผลของเพรสบอรัคจุ่มน้ำมันที่มีความชื้นในเพรสบอรัคแตกต่างกัน กรณีที่สอง คือ ศึกษาผลของเพรสบอรัคจุ่มน้ำมันที่มีความชื้นในน้ำมันแตกต่างกัน กรณีที่สาม คือ ศึกษาผลของเพรสบอรัคจุ่มน้ำมันที่มีความเป็นกรดในน้ำมันแตกต่างกัน และ กรณีที่สี่ คือ ศึกษาผลของความชื้นที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความชื้นในบรรยากาศที่มีผลต่อความชื้นของเพรสบอรัคจุ่มน้ำมัน ที่มีกรณีที่ห้า คือ ศึกษาผลของแรงดันที่ใช้ในการวัด PDC ของเพรสบอรัคจุ่มน้ำมัน และ กรณีที่หก คือ ศึกษาผลของความชื้นต่อฉนวนเพรสบอรัค

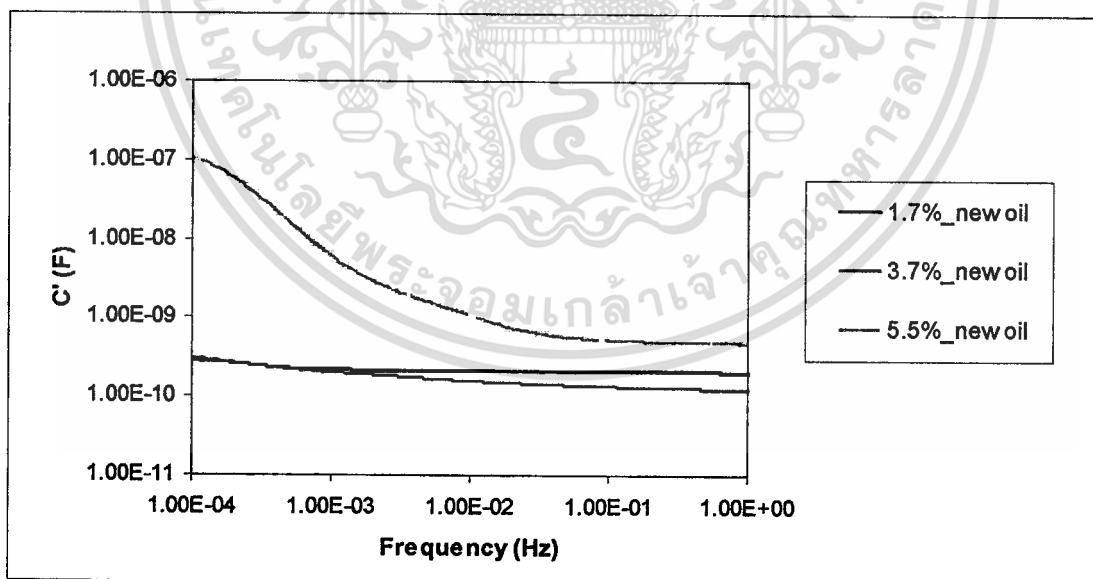
4.1.7.1 การทดสอบเพื่อหาผลตอบสนองไดอิเล็กตริก ความชื้น ค่าความนำ และค่าความต้านทาน ของฉนวนเพรสบอรัคจุ่มน้ำมัน เมื่อเพรสบอรัคมีความชื้นแตกต่างกัน

ผลการทดสอบเพรสบอรัคที่มีความชื้นแตกต่างกัน ซึ่งเกิดจากผลการเตรียมฉนวนกระดาษ(หัวข้อ 4.1.1) กับน้ำมันใหม่ โดยทำตามขั้นตอนในการวัด PDC หัวข้อที่ 4.1.7 จะมี **เอกสารต่อดังต่อไปนี้** นี้ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



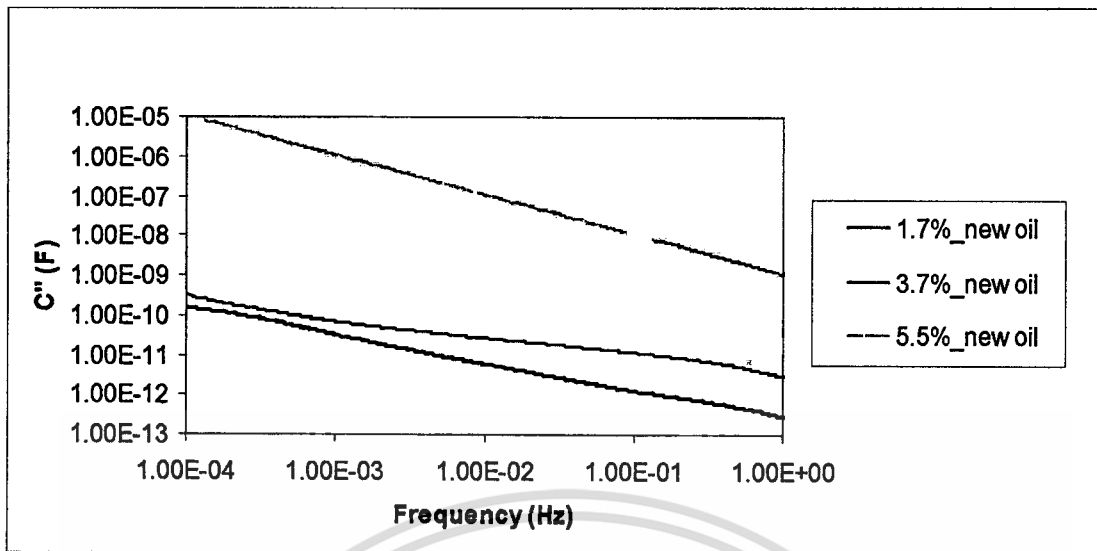
รูปที่ 4.22 ค่า PDC ของฉนวนเพรสบอร์คุ่มน้ำมัน เมื่อเพรสบอร์คมีความชื้นแตกต่างกัน

ผลการวัด PDC พบว่าเมื่อกระดาษเพรสบอร์คมีความชื้นต่ำ จะนำกระแสได้น้อยโดยสังเกตจากผลการวัดเมื่อมีระยะเวลาเพิ่มขึ้น

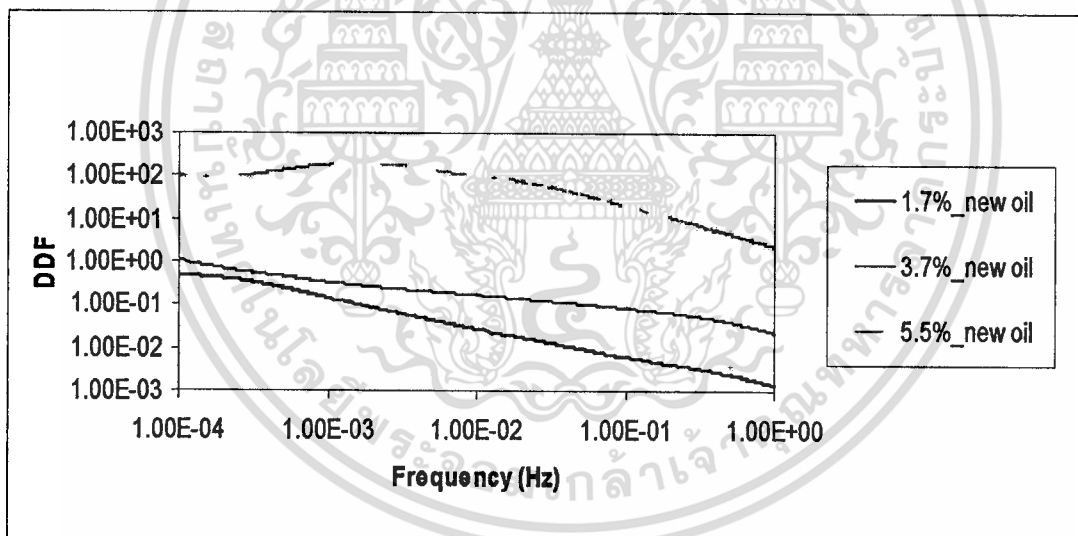


รูปที่ 4.23 ค่าเก็บประจุจริงของฉนวนเพรสบอร์คุ่มน้ำมัน เมื่อเพรสบอร์คมีความชื้นแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 ค่าเก็บประจุจินตภาพของฉนวนเพรสเบอร์ค้มน้ำมัน เมื่อเพรสเบอร์ค้มีความชื้นแตกต่างกัน



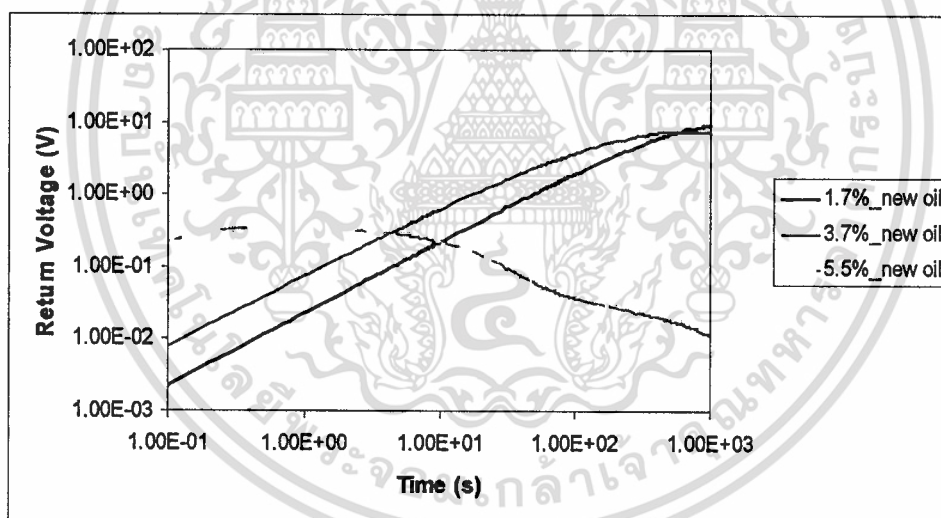
รูปที่ 4.25 ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนเพรสเบอร์ค้มน้ำมัน เมื่อเพรสเบอร์ค้มีความชื้นแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ค่าเก็บประจุและค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนเพรสบอร์คุ่มน้ำมัน เมื่อเพรสบอร์คุ่มมีความชื้นแตกต่างกัน

Description	C at 50Hz (F)	C at 10^{-4} /C at 50 Hz	DDF at 1 Hz (%)
1.7 % _new oil	2.06E-10	1.47	0.136
3.7 % _new oil	1.240E-10	2.25	2.27
5.5 % _new oil	4.740E-10	219.99	231

ผลการทดสอบหาค่าเก็บประจุและค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก ของฉนวนเพรสบอร์คุ่มน้ำมัน พบว่าเมื่อเพรสบอร์คุ่มมีความชื้นที่มีมาก ค่าเก็บประจุที่ 50 Hz (C at 50Hz) มีค่าใกล้เคียงกัน แต่อัตราส่วนระหว่างค่าเก็บประจุที่ความถี่ 10^{-4} Hz กับค่าเก็บประจุที่ความถี่ 50 Hz (C at 10^{-4} /C at 50 Hz) และค่าความสูญเสียของฉนวนที่ 1 Hz (DDF at 1 Hz) จะมีความชื้นมากขึ้น



รูปที่ 4.26 แรงดันย้อนกลับของฉนวนเพรสบอร์คุ่มน้ำมัน เมื่อเพรสบอร์คุ่มมีความชื้นแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.12 ค่าแรงดันย้อนกลับของฉนวนเพรสบอร์คุ่มน้ำมัน เมื่อเพรสบอร์คุ่มมีความชื้นแตกต่างกัน

Description	Ur max(V)	Tr max (s)	Sr (V/s)
1.7 % _new oil	9.4	1000	0.0225
3.7 % _new oil	7.7	656.2	0.0772
5.5 % _new oil	0.4	0.6	2.167

ผลการทดสอบหาค่าแรงดันย้อนกลับ ของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมันเมื่อเพรสบอร์ดมีความชื้นแตกต่างกัน พบว่าเมื่อความชื้นในเพรสบอร์ดมีมาก ค่าแรงดันย้อนกลับสูงสุด ($U_r \max$) นั้นมีค่าน้อย และ เวลาที่เกิดแรงดันย้อนกลับสูงสุดจะเกิดที่ระยะเวลาที่อันสั้น ส่วนค่าความชันของแรงดันย้อนกลับจะมีค่ามาก

ตารางที่ 4.13 ค่าความนำ ค่าความต้านทาน และความชื้นของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อเพรสบอร์ดมีความชื้นแตกต่างกัน

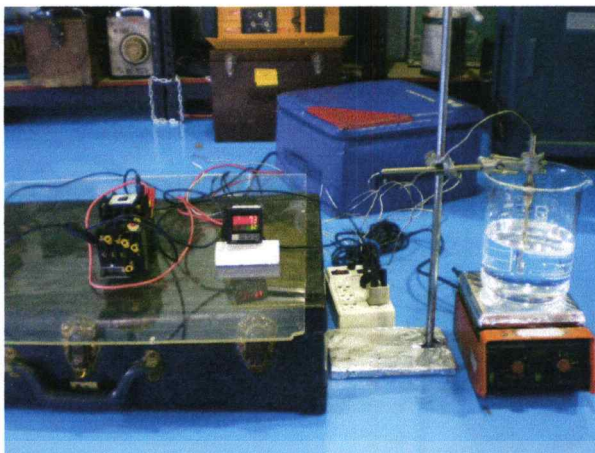
Description	σ_{paper} (S/m)	R_{dc} (Ω)	Moisture in pressboard % wt
1.7 % _ new oil	2.67E-15	1.61E+13	1-1.5
3.7 % _ new oil	1.21E-14	5.88E+12	2.5-3.5
5.5 % _ new oil	1.24E-10	1.51E+08	>4.9

ผลการทดสอบหาค่าความนำและความชื้นของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อความชื้นในกระดาษแตกต่างกัน พบว่าเมื่อความชื้นในเพรสบอร์ดมีมาก ค่าความนำในกระดาษจะมีค่ามาก และค่าความต้านทานของฉนวนเพรสบอร์ดจะมีค่าน้อย ส่วนผลความชื้นภายในกระดาษที่ได้จาก PDC – analyzer จะมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลองความชื้นและวัดด้วยเครื่องคูโลเมตริกคาร์ลพิตเซอร์ไทรเทชัน

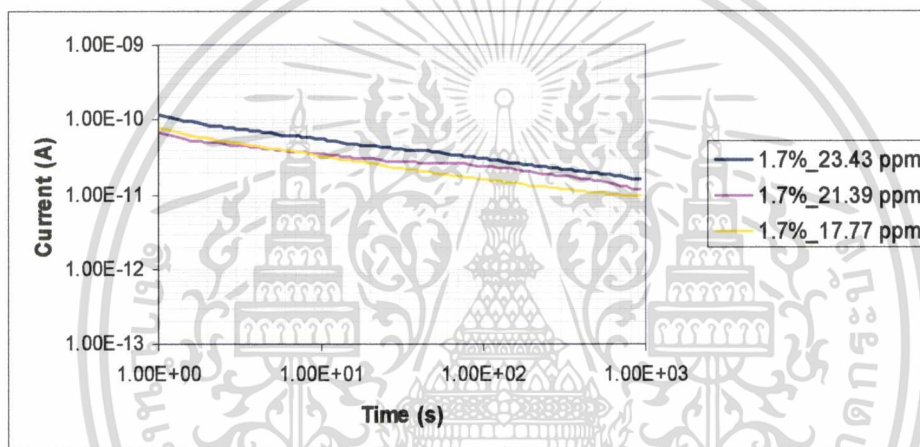
4.1.7.2 การทดสอบเพื่อหาผลตอบสนองไดอิเล็กตริกความชื้น ค่าความต้านทาน และค่าความนำ ของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมันที่มีความชื้นในน้ำมันแตกต่างกัน

กระดาษเพรสบอร์ดที่ทิ้งไว้ในสภาวะปกติ จะถูกควบคุมความชื้นของกระดาษเพรสบอร์ดด้วยการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100°C เป็นระยะเวลา 10 นาที ส่วนการควบคุมน้ำมันให้มีความชื้นแตกต่างกันจะทำได้โดยการใส่ปริมาณน้ำในน้ำมัน ในปริมาณ 50 และ 100 มิลลิลิตร ต่อน้ำมัน 1 ลิตร ด้วยไมโครปิเปตตามลำดับ และให้อุณหภูมิกับน้ำมัน 70 ถึง 80°C ด้วยเครื่องทำความร้อน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (เพื่อให้น้ำผสมกับในน้ำมัน) และพักน้ำมันเพื่อให้ลดอุณหภูมิอีก 1 ชั่วโมง (ค่า Moisture content (ppm) ของน้ำมัน มีดังนี้ เมื่อผสมน้ำ 50 มิลลิลิตรลงในน้ำมัน 1 ลิตร = 21.39 ppm และ เมื่อผสมน้ำ 100 มิลลิลิตรลงในน้ำมัน 1 ลิตร = 23.43 ppm) เปรียบเทียบกับน้ำมันใหม่ซึ่งมีความชื้น 17.77 ppm (หัวข้อ 4.1.3) หลังจากนั้น ทำตามขั้นตอนในการวัด PDC หัวข้อที่ 4.1.7 ซึ่งจะมีผลทดสอบดังต่อไปนี้

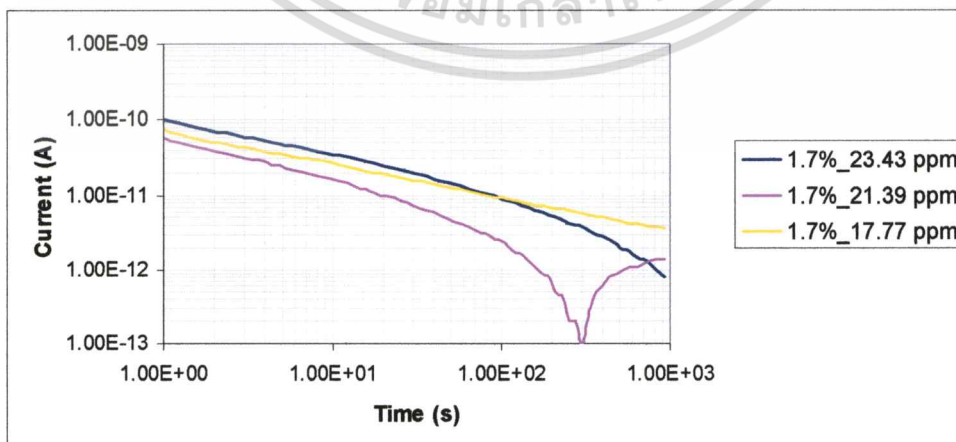
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 การให้ความร้อนแก่น้ำมัน

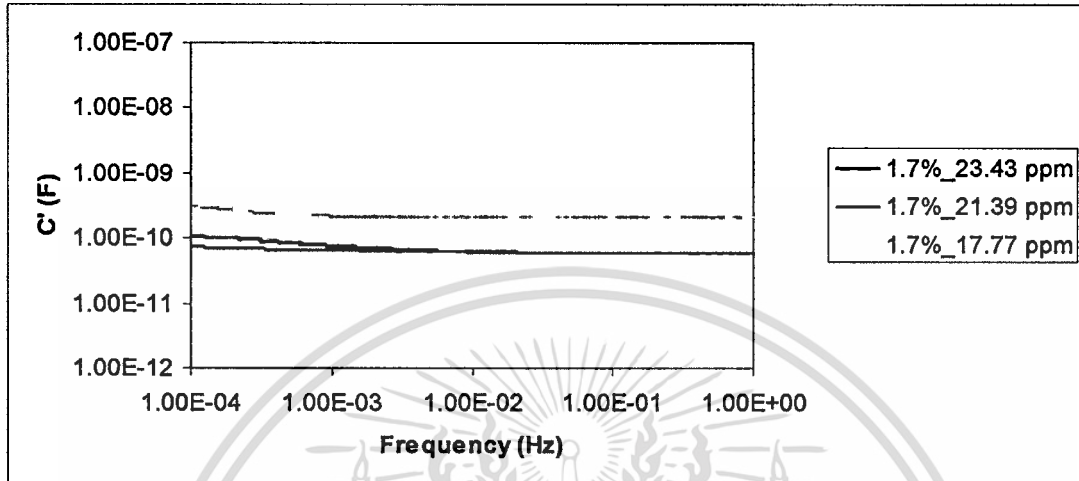


รูปที่ 4.28 กระแสโพลาริซเซชันของฉนวนเพอร์สอร์คุ่มน้ำมัน เมื่อความชื้นในน้ำมันแตกต่างกัน

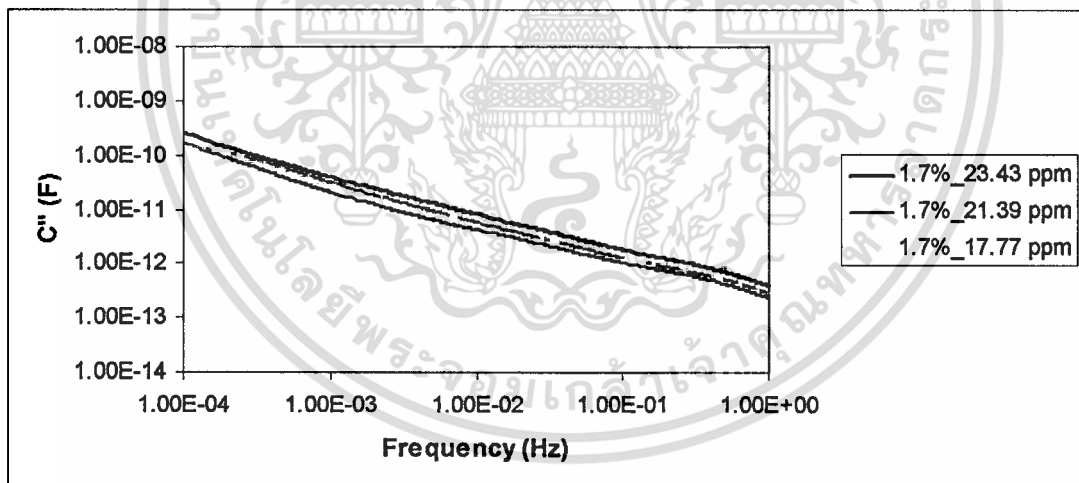


รูปที่ 4.29 กระแสดีโพลาริซเซชันของฉนวนเพอร์สอร์คุ่มน้ำมัน เมื่อความชื้นในน้ำมันแตกต่างกัน
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวัด PDC เมื่อกระดาษเพรสบอร์ดที่มีความชื้นต่ำมีค่าเท่ากัน แต่เมื่อเพิ่มความชื้นให้แก่น้ำมัน พบว่าค่ากระแสเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนกระแสดีโพราไรเซชันของ 1.7 %_{21.39 ppm} ที่ เป็นรูปเช่นนั้นอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมเชิงขั้ว

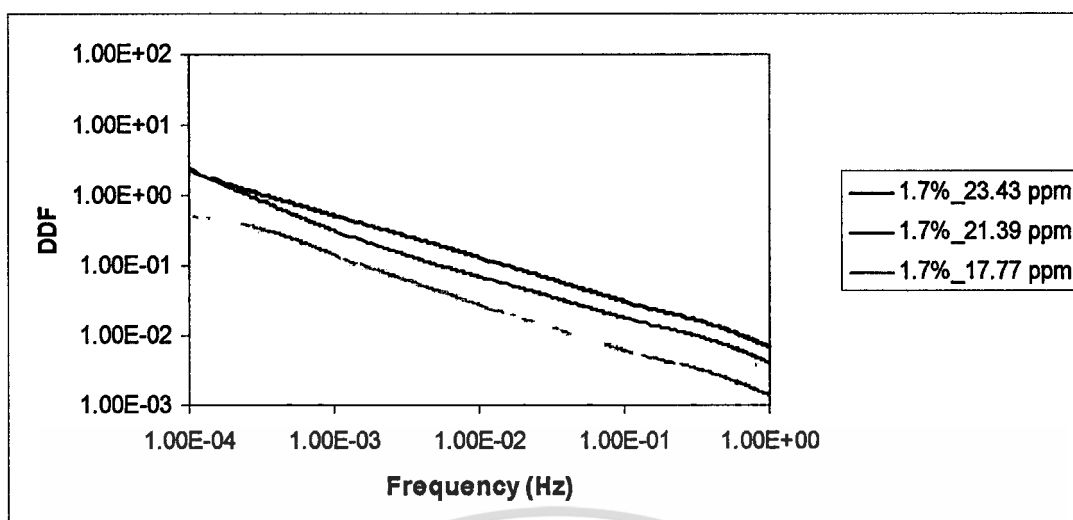


รูปที่ 4.30 ค่าเก็บประจุจริงของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อความชื้นในน้ำมันแตกต่างกัน



รูปที่ 4.31 ค่าเก็บประจุจินตภาพของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อความชื้นในน้ำมันแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

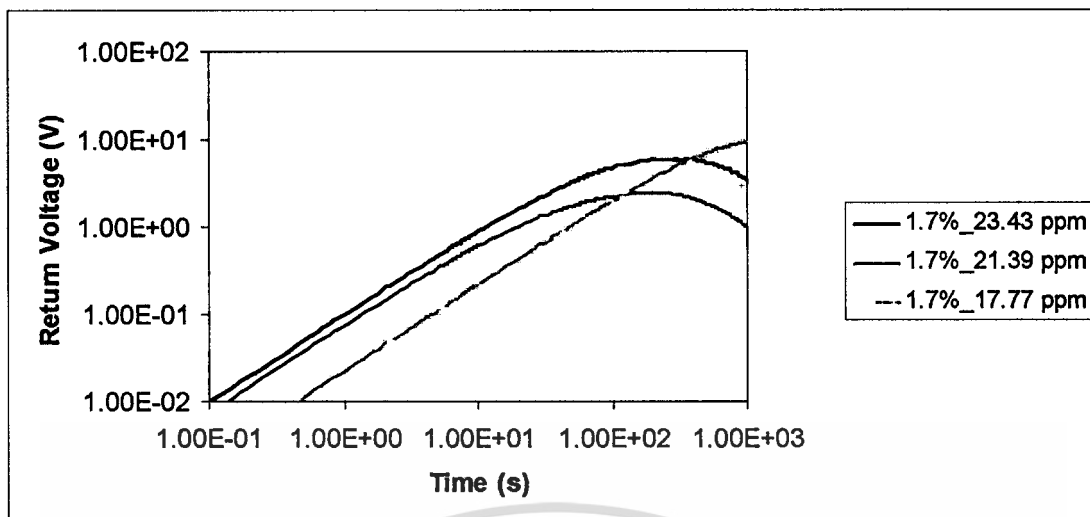


รูปที่ 4.32 ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อความชื้นในน้ำมันแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.14 ค่าเก็บประจุและค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อความชื้นในน้ำมันแตกต่างกัน

Description	C at 50Hz (F)	C at 10^{-4} /C at 50 Hz	DDF at 1 Hz (%)
1.7 % _ 17.77 ppm	2.06E-10	1.47	0.136
1.7 % _ 21.39 ppm	5.70E-11	1.28	0.405
1.7 % _ 23.43 ppm	5.70E-11	1.86	0.68

ผลการทดสอบหาค่าเก็บประจุและค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก ของ ฉนวนเพรสบอร์ดที่มีความชื้นต่ำเท่ากัน แต่เพิ่มความชื้นให้แก่ น้ำมัน พบว่าความชื้นที่เพิ่มขึ้นภายในน้ำมันมีผลทำให้ค่าเก็บประจุที่ 50 Hz (C at 50Hz) และอัตราส่วนระหว่างค่าเก็บประจุที่ความถี่ 10^{-4} Hz กับค่าเก็บประจุที่ความถี่ 50 Hz (C at 10^{-4} /C at 50 Hz) มีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ค่าความสูญเสียของฉนวนที่ 1 Hz (DDF at 1 Hz) จะมีค่ามากขึ้นเล็กน้อย



รูปที่ 4.33 แรงดันย้อนกลับของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อความชื้นในน้ำมันแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.15 ค่าแรงดันย้อนกลับของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อความชื้นในน้ำมันแตกต่างกัน

Description	Ur max (V)	Tr max (s)	Sr (V/s)
1.7 % _ 17.77 ppm	9.4	1000	0.0225
1.7 % _ 21.39 ppm	2.5	189.8	0.0760
1.7 % _ 23.43 ppm	6	277.4	0.1003

ผลการทดสอบหาค่าแรงดันย้อนกลับ ของฉนวนฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อความชื้นในน้ำมันแตกต่างกัน พบว่าเมื่อความชื้นในน้ำมันมีมาก ค่าแรงดันย้อนกลับสูงสุด (Ur max) จะมีค่าน้อยและ เวลาที่เกิดแรงดันย้อนกลับสูงสุดที่ระยะเวลาที่สั้น โดยที่ระยะเวลาที่เกิดแรงดันสูงสุดของ 1.7 % _ 21.39 ppm จะมีค่าที่ใกล้เคียงกันกับระยะเวลาที่เกิดแรงดันสูงสุดของ 1.7 % _ 23.43 ppm ส่วนค่าความชันของแรงดันย้อนกลับจะมีค่ามากตามความชื้นในน้ำมันที่มากขึ้น

ตารางที่ 4.16 ค่าความนำและความชื้นของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อความชื้นในน้ำมันแตกต่างกัน

Description	σ_{paper} (S/m)	R_{dc} (Ω)	Moisture in pressboard (% wt)
1.7 % _ 17.77 ppm	2.67E-15	1.61E+13	1-1.5
1.7 % _ 21.39 ppm	1.62E-14	6.58E+12	2.5-3
1.7 % _ 23.43 ppm	2.36E-14	9.62E+12	2.5-3

ผลการทดสอบหาค่าความนำและความชื้นของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อความชื้นในน้ำมันแตกต่างกัน พบว่าความชื้นในน้ำมันมีส่วนทำให้ความชื้น ความนำ ในเพรสบอร์ดเพิ่มมากขึ้น ส่วนค่าความต้านทานของฉนวนเพรสบอร์ดจะมีค่าน้อย

4.1.7.3 การทดสอบเพื่อหาผลตอบสนองไดอิเล็กตริกความชื้น และค่าความนำ ของเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อความเป็นกรดในน้ำมันแตกต่างกัน

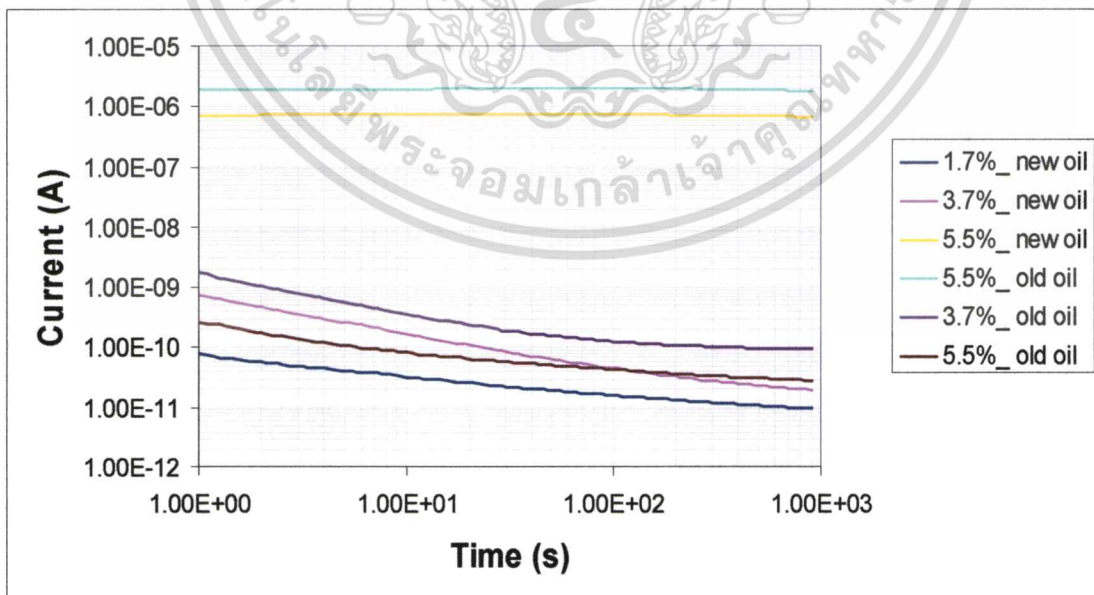
ความชื้นภายในเพรสบอร์ดที่แตกต่างกัน ซึ่งเกิดจากผลการเตรียมฉนวนเพรสบอร์ด (หัวข้อ 4.1.1) ส่วนความเป็นกรดที่แตกต่างกันเกิดจากผลการเตรียมน้ำมัน(หัวข้อ 4.1.2) หลังจากนั้น ทำตามขั้นตอนในการวัด PDC หัวข้อที่ 4.1.7 ซึ่งจะมีผลทดสอบดังต่อไปนี้



ก) เพรสบอร์ดจุ่มน้ำมันใหม่

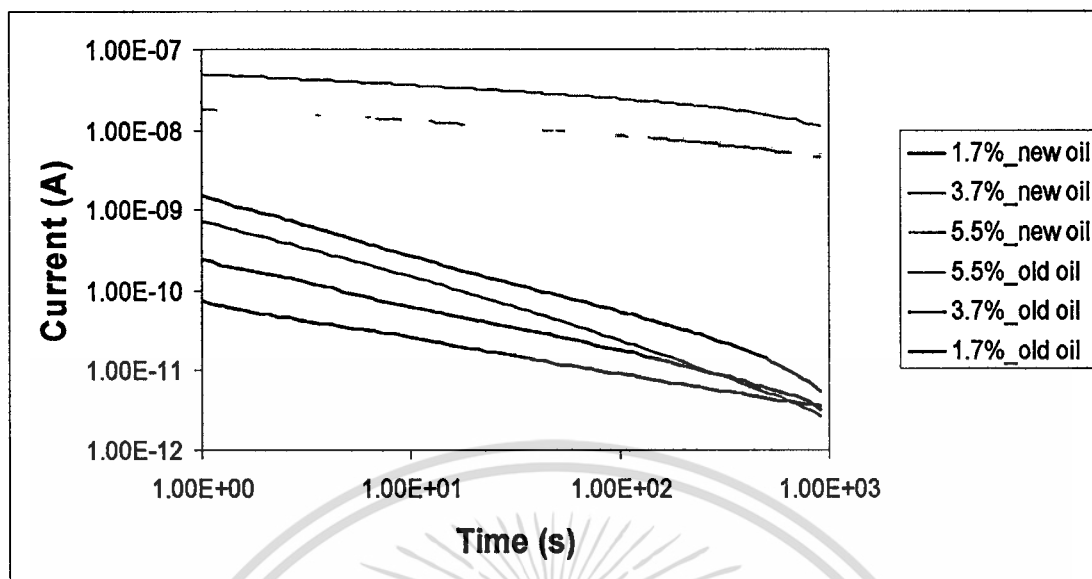
ข) เพรสบอร์ดจุ่มน้ำมันเก่า

รูปที่ 4.34 การเปรียบเทียบสีของน้ำมันที่ติดตั้งภายในชุดทดสอบ



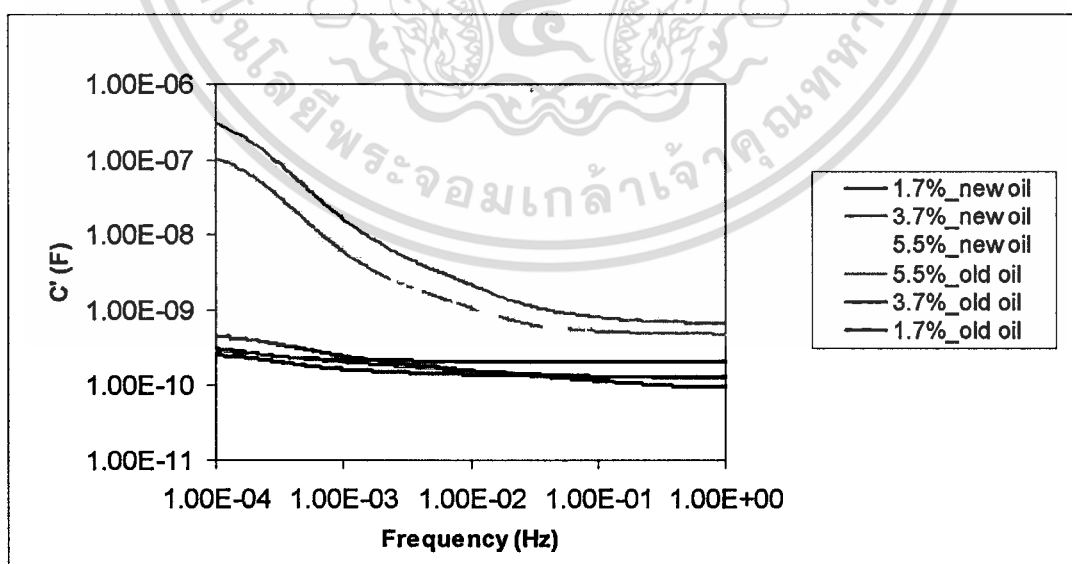
รูปที่ 4.35 กระแสโพลาไรซ์เซชันของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อความเป็นกรดในน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



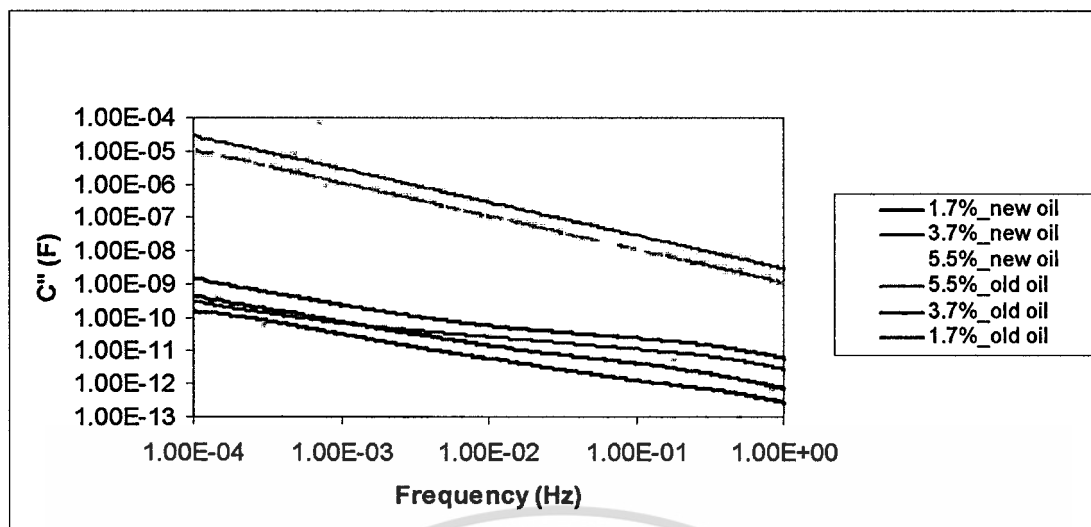
รูปที่ 4.36 กระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชันของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อความเป็นกรดในน้ำมันแตกต่างกัน

ผลการวัด PDC พบว่าเมื่อกระดาษเพรสบอร์ดมีความชื้นต่ำ จะนำกระแสได้น้อยโดยสังเกตจากผลการวัดเมื่อมีระยะเวลาเวลานานมากขึ้น ส่วนผลของความเป็นกรดในน้ำมัน มีผลทำให้กระแสที่วัดเพิ่มมากขึ้น

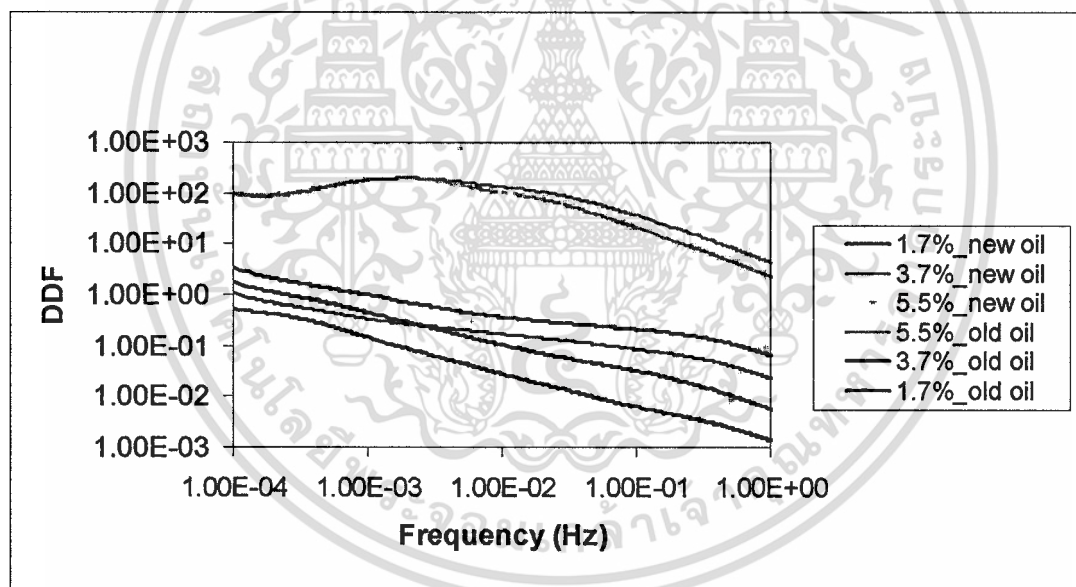


รูปที่ 4.37 ค่าเก็บประจุจริงของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อความเป็นกรดในน้ำมันแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.38 ค่าเก็บประจุจินตภาพของฉนวนเพรสเบอร์คุ่มน้ำมัน เมื่อความเป็นกรดในน้ำมันแตกต่างกัน



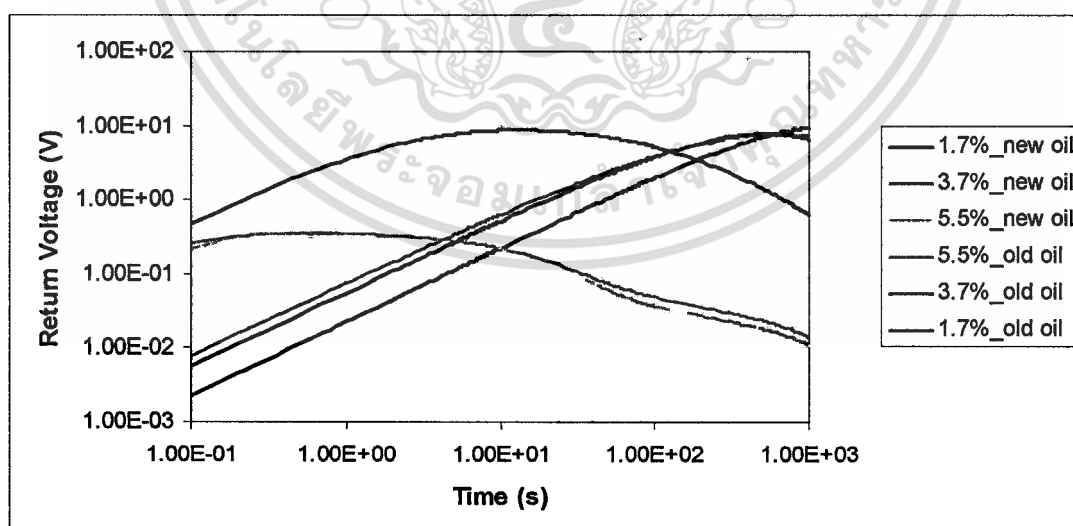
รูปที่ 4.39 ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนเพรสเบอร์คุ่มน้ำมัน เมื่อความเป็นกรดในน้ำมันแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.17 ค่าเก็บประจุและค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนเพรสเซอร์คัม น้ำมัน เมื่อความเป็นกรดในน้ำมันแตกต่างกัน

Description	C at 50Hz (F)	C at 10^{-4} /C at 50 Hz	DDF at1 Hz (%)
1.7 % _ new oil	2.06E-10	1.47	0.136
3.7 % _ new oil	1.240E-10	2.25	2.27
5.5 % _ new oil	4.740E-10	219.99	231
5.5 % _ old oil	6.610E-10	445.93	437
3.7 % _ old oil	9.400E-10	4.71	6.37
1.7 % _ old oil	1.310E-10	1.90	0.565

ผลการทดสอบหาค่าเก็บประจุและค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก ของฉนวนเพรสเซอร์คัม น้ำมัน พบว่าเมื่อความชื้นในเพรสเซอร์คัมมีมาก ค่าเก็บประจุที่ 50 Hz (C at 50Hz) มีค่าใกล้เคียงกัน แต่อัตราส่วนระหว่างค่าเก็บประจุที่ความถี่ 10^{-4} Hz กับค่าเก็บประจุที่ความถี่ 50 Hz (C at 10^{-4} /C at 50 Hz) และค่าความสูญเสียของฉนวนที่ 1 Hz (DDF at1 Hz) จะมีมากขึ้น ส่วนผลของความเป็นกรดในน้ำมัน มีผลต่ออัตราส่วนระหว่างค่าเก็บประจุที่ความถี่ 10^{-4} Hz กับค่าเก็บประจุที่ความถี่ 50 Hz (C at 10^{-4} /C at 50 Hz) และค่าความสูญเสียของฉนวนที่ 1 Hz (DDF at 1 Hz) เพิ่มมากขึ้นมากเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่กระดาษคัมอยู่ในน้ำมันที่ไม่มีกรด



รูปที่ 4.40 แรงดันย้อนกลับของฉนวนเพรสเซอร์คัม น้ำมัน เมื่อความเป็นกรดในน้ำมันแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.18 ค่าแรงดันย้อนกลับของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อความเป็นกรดในน้ำมันแตกต่างกัน

Description	Ur max (V)	Tr max (s)	Sr (V/s)
1.7 % _ new oil	9.4	1000	0.0225
3.7 % _ new oil	7.7	656.2	0.0772
5.5 % _ new oil	0.4	0.6	2.167
5.5 % _ old oil	0.4	0.4	2.628
3.7 % _ old oil	8.7	13.1	4.868
1.7 % _ old oil	7.8	527.7	0.0557

ผลการทดสอบหาค่าแรงดันย้อนกลับ ของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมันเมื่อความชื้นในกระดาษแตกต่างกัน พบว่าเมื่อความชื้นในกระดาษมีมาก ค่าแรงดันย้อนกลับสูงสุด (Ur max) จะมีค่าน้อยและ เวลาที่เกิดแรงดันย้อนกลับสูงสุดจะเกิดที่ระยะเวลาที่สั้น และค่าความชันของแรงดันย้อนกลับจะมีค่ามาก ส่วนผลของความเป็นกรดในน้ำมัน มีผลทำให้ค่าแรงดันย้อนกลับสูงสุด (Ur max) จะมีค่าน้อยลงไปอีก และ เวลาที่เกิดแรงดันย้อนกลับสูงสุดจะเกิดที่ระยะเวลาที่สั้นลงไปอีก ส่วนค่าความชันของแรงดันย้อนกลับจะมีค่ามากขึ้นไปอีก เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันที่ไม่มีกรด

ตารางที่ 4.19 ค่าความนำและความชื้นของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อความเป็นกรดในน้ำมันแตกต่างกัน

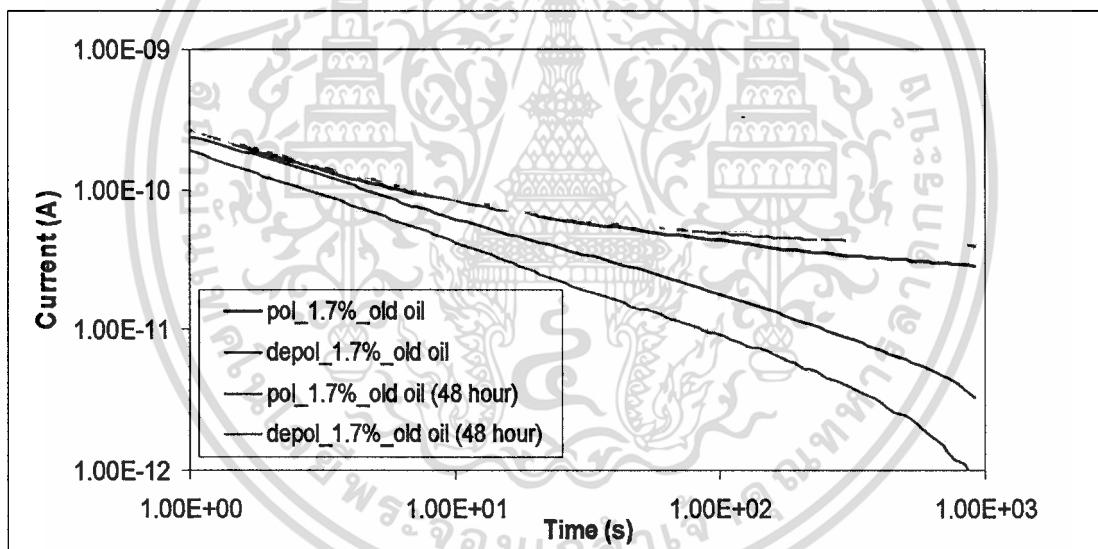
Description	σ_{paper} (S/m)	R_{dc} (Ω)	Moisture in pressboard % wt
1.7 % _ new oil	2.67E-15	1.61E+13	1-1.5
3.7 % _ new oil	1.21E-14	5.88E+12	2.5-3.5
5.5 % _ new oil	1.24E-10	1.51E+08	>4.9
5.5 % _ old oil	2.35E-10	5.71E+07	>4.9
3.7 % _ old oil	8.38E-14	1.12E+12	3.5-4
1.7 % _ old oil	1.70E-14	3.97E+12	2.5-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบหาค่าความนำและความชื้นของฉนวนเพอร์สโพรคัม น้ำมัน เมื่อความชื้นในกระดาษแตกต่างกัน พบว่าเมื่อความชื้นในเพอร์สโพรคัมมีมาก ค่าความนำในเพอร์สโพรคัมจะมีค่ามาก และความต้านทานจะมีค่าน้อย ส่วนผลของความชื้นในน้ำมัน มีผลทำให้ค่าความนำในเพอร์สโพรคัมเพิ่มขึ้น ความต้านทานจะมีค่าน้อยลง และผลความชื้นภายในเพอร์สโพรคัมที่ได้จากวัดด้วย PDC-analyzer ก็เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับน้ำมันที่ไม่มีกรด

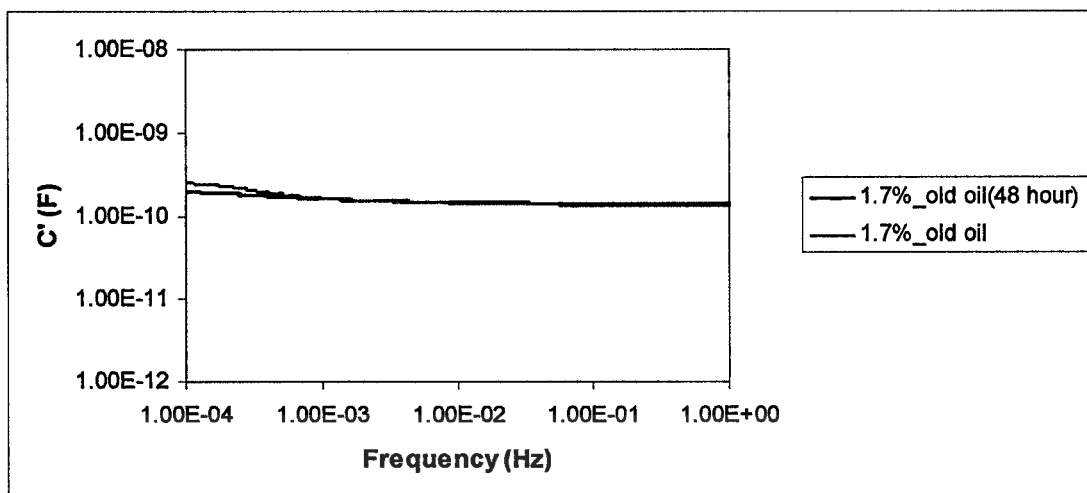
4.1.7.4 การทดสอบเพื่อหาผลตอบสนองไดอิเล็กตริกความชื้น และค่าความนำ ของฉนวนเพอร์สโพรคัม น้ำมัน เมื่อความชื้นที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความชื้นในบรรยากาศ

การทดสอบจะใช้กระดาษเพอร์สโพรคัมที่ผ่านการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นระยะเวลา 10 นาที ส่วนน้ำมันที่ใช้จะใช้น้ำมันเก่าที่ผ่านการปรับปรุงสภาพ หลังจากการทดสอบ PDC ตามขั้นตอน 4.1.5 แล้ว ทิ้งไว้ให้ความชื้นในบรรยากาศเข้าไปในชุดทดลองเป็นเวลา 48 ชั่วโมง และทำการวัดด้วย PDC ซ้ำเพื่อดูผลที่เกิดขึ้น

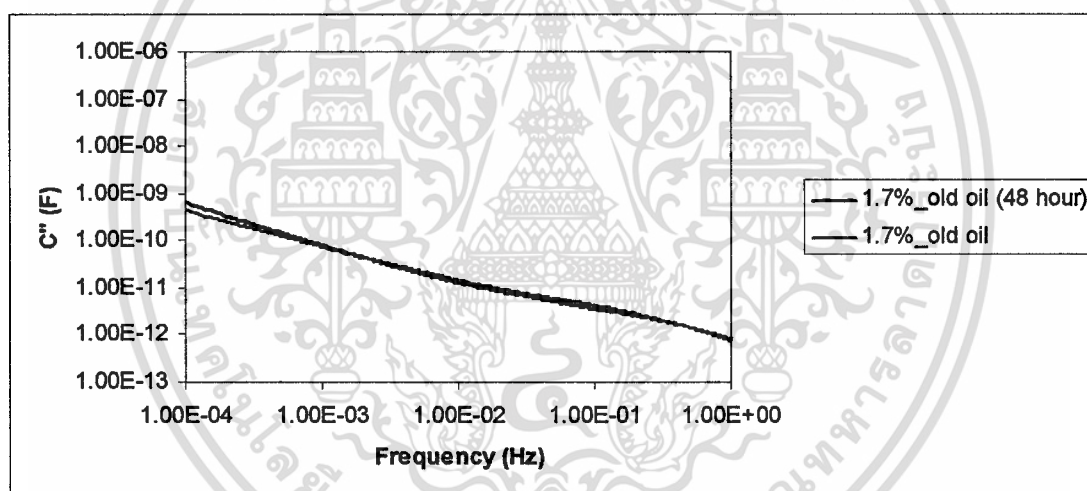


รูปที่ 4.41 ค่า PDC ของฉนวนเพอร์สโพรคัม น้ำมัน ที่ได้รับความชื้นที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความชื้นในบรรยากาศ

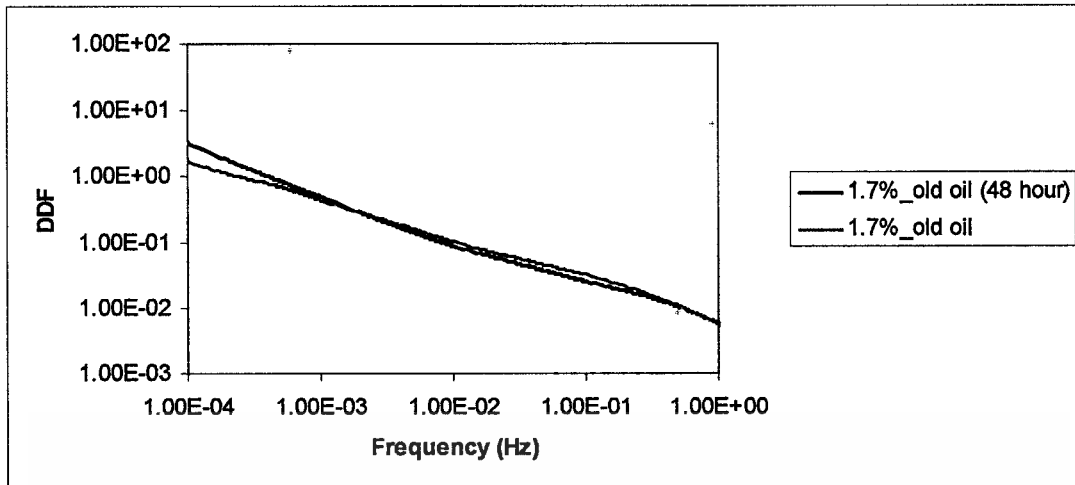
ผลการวัด PDC หลังทิ้งไว้ให้ความชื้นในบรรยากาศเข้าไปในชุดทดลองเป็นเวลา 48 ชั่วโมงพบว่า ช่วงต้นและช่วงปลายของ PDC มีความห่างกันมากอย่างชัดเจนขึ้น เมื่อเทียบกับผลเดิมก่อนที่จะทิ้งไว้ 48 ชั่วโมง



รูปที่ 4.42 ค่าเก็บประจุจริงของฉนวนเพรสเตอร์คุ่มน้ำมัน ที่ได้รับความชื้นที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความชื้นในบรรยากาศ



รูปที่ 4.43 ค่าเก็บประจุจินตภาพของฉนวนเพรสเตอร์คุ่มน้ำมัน ที่ได้รับความชื้นที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความชื้นในบรรยากาศ

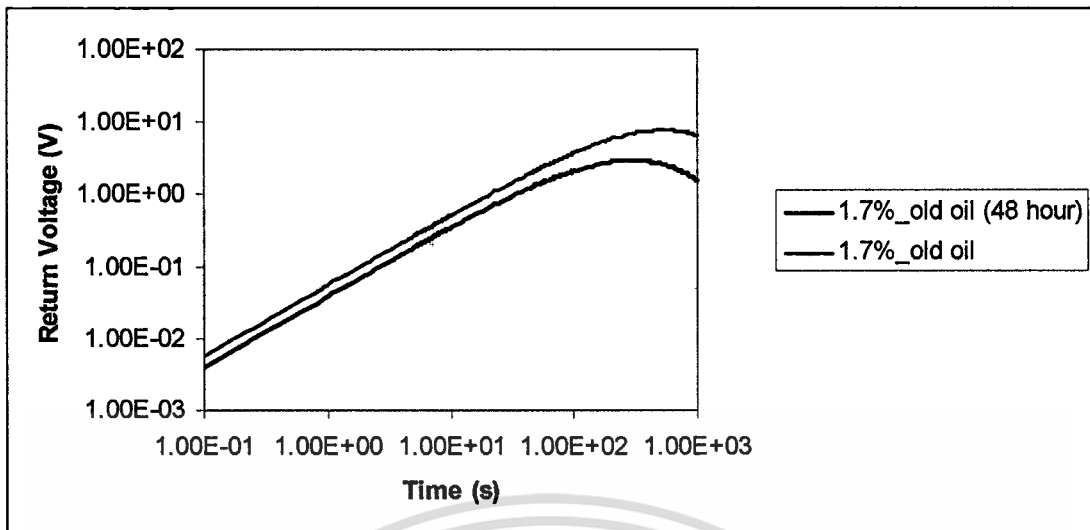


รูปที่ 4.44 ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนเพรสบอร์คุ่มน้ำมัน ที่ได้รับความชื้นที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความชื้นในบรรยากาศ

ตารางที่ 4.20 ค่าเก็บประจุและค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนเพรสบอร์คุ่มน้ำมัน ที่ได้รับความชื้นที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความชื้นในบรรยากาศ

Description	C at 50Hz (F)	C at 10-4/C at 50Hz	DDF at 1 Hz
1.7%_old oil	1.31E-10	1.9	0.565
1.7%_old oil (48 hour)	1.37E-10	1.41	0.568

ผลการทดสอบหาค่าเก็บประจุและค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก ของฉนวนเพรสบอร์คุ่มน้ำมัน ที่ได้รับความชื้นที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความชื้นในบรรยากาศ พบว่า ค่าเก็บประจุที่ 50 Hz (C at 50Hz) และอัตราส่วนระหว่างค่าเก็บประจุที่ความถี่ 10^{-4} Hz กับค่าเก็บประจุที่ความถี่ 50 Hz (C at 10^{-4} /C at 50 Hz) มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ส่วนค่าความสูญเสียของฉนวนที่ 1 Hz (DDF at 1 Hz) มีค่ามากขึ้นเล็กน้อย เมื่อเทียบกับผลเดิมก่อนที่จะทิ้งไว้ 48 ชั่วโมง



รูปที่ 4.45 แรงดันย้อนกลับของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน ที่ได้รับความชื้นที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความชื้นในบรรยากาศ

ตารางที่ 4.21 ค่าแรงดันย้อนกลับของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน ที่ได้รับความชื้นที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความชื้นในบรรยากาศ

Description	Ur max (V)	Tr max (s)	Sr (V/s)
1.7%_old oil	7.8	527.7	0.0557
1.7%_old oil (48 hour)	3.0	302.2	0.0386

ผลการทดสอบหาค่าแรงดันย้อนกลับของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน ที่ได้รับความชื้นที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความชื้นในบรรยากาศพบว่า ค่าแรงดันย้อนกลับสูงสุด (Ur max) จะมีค่าน้อยลง เวลาที่เกิดแรงดันย้อนกลับสูงสุดจะเกิดที่ระยะเวลาที่สั้นลง และ ค่าความชันของแรงดันย้อนกลับจะมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อเทียบกับผลเดิมก่อนที่จะทิ้งไว้ 48 ชั่วโมง

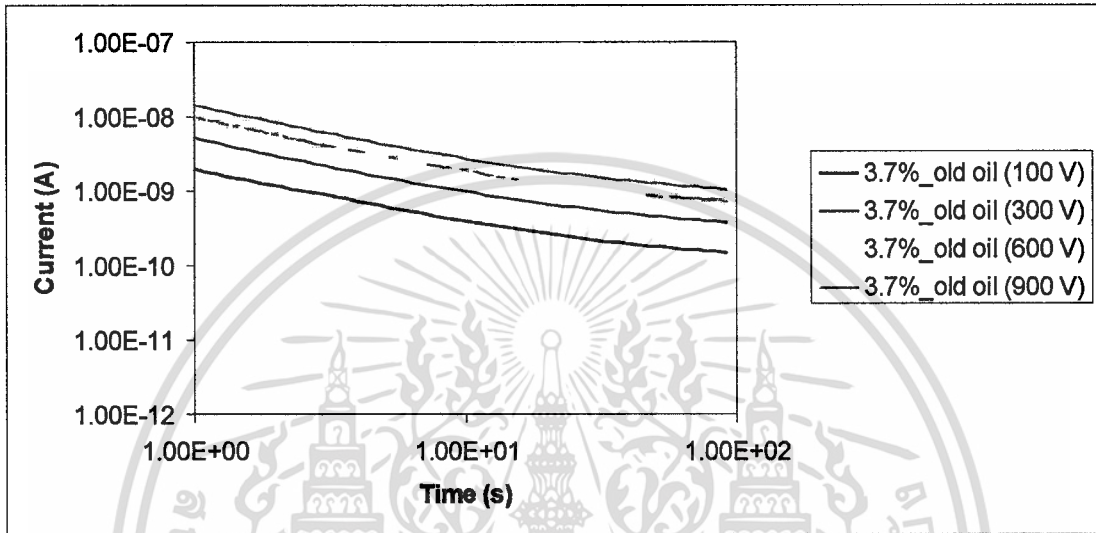
ตารางที่ 4.22 ค่าความนำและความชื้นของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน ที่ได้รับความชื้นที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความชื้นในบรรยากาศ

Description	σ_{paper} (S/m)	R_{dc} (Ω)	Moisture in pressboard % wt
1.7%_old oil	4.53E-14	3.97E+12	2-2.5
1.7%_old oil (48 hour)	2.51E-14	2.57E+12	2.5-3

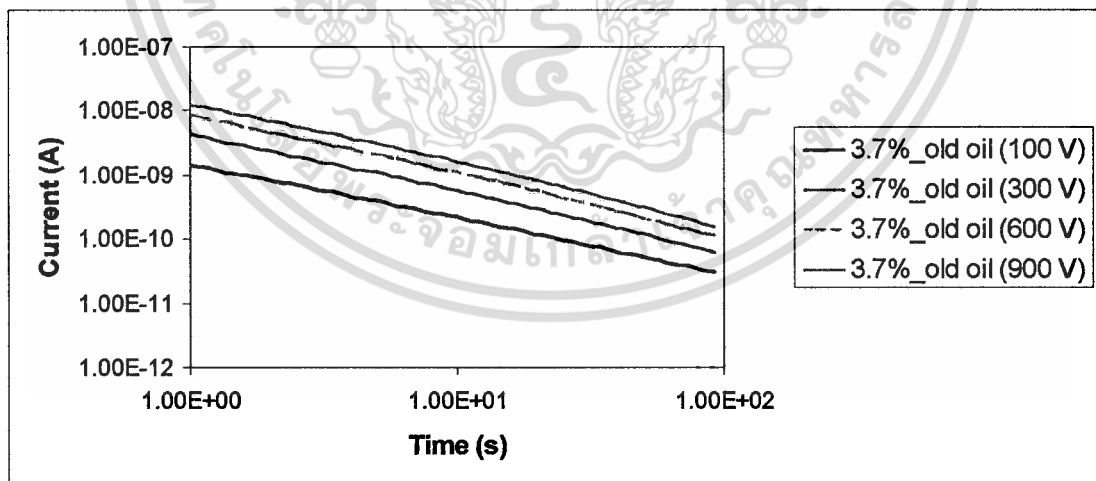
ผลการทดสอบหาค่าความนำและความชื้นของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน เมื่อความชื้นที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความชื้นในบรรยากาศ ค่าความนำและความชื้นของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมันจะเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความต้านทานของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมันจะลดลง เมื่อเทียบกับผลเดิมก่อนที่จะทิ้งไว้ 48 ชั่วโมง

4.1.7.5 การทดสอบผลของแรงดันที่ใช้ในการวัด PDC ของเพรสบอร์คจุ่มน้ำมัน

การทดสอบจะใช้กระดาษเพรสบอร์คที่ผ่านการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นระยะเวลา 5 นาที ส่วนน้ำมันที่ใช้จะใช้น้ำมันเก่าที่ผ่านการปรับปรุงสภาพ ทำการติดตั้งลงในชุดทดสอบ และป้อนแรงดันกระแสตรงที่ต่างระดับกัน ได้แก่ 100 V, 300 V, 600V, และ 900 V ให้แก่ชุดทดสอบ วัดผลของ PDC ที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.46 กระแสโพลาริซเซชันของฉนวนเพรสบอร์คจุ่มน้ำมัน ที่ระดับแรงดันกระแสตรงค่าต่างๆ

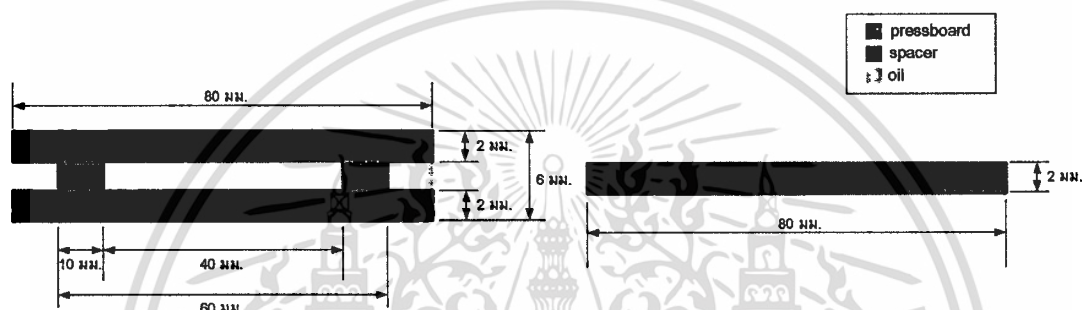


รูปที่ 4.47 กระแสดีโพลาริซเซชันของฉนวนเพรสบอร์คจุ่มน้ำมัน ที่ระดับแรงดันกระแสตรงค่าต่างๆ

ผลการทดสอบแรงดันที่ใช้ในการวัด PDC ของเพรสบอร์คจุ่มน้ำมัน พบว่าเมื่อปรับระดับแรงดันกระแสตรง 100 V, 300 V, 600V, และ 900 V ให้แก่ชุดทดสอบ ทำให้ระดับกระแสมีค่าเพิ่มสูงขึ้นทั้งโพลาริซเซชันและดีโพลาริซเซชัน แต่ลักษณะรูปร่างกระแสวิงเหมือนเดิม ไม่วาร์กมิดๆ หงสั่น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.7.6 การทดสอบผลของความชื้นต่อฉนวนเพรสบอร์ด

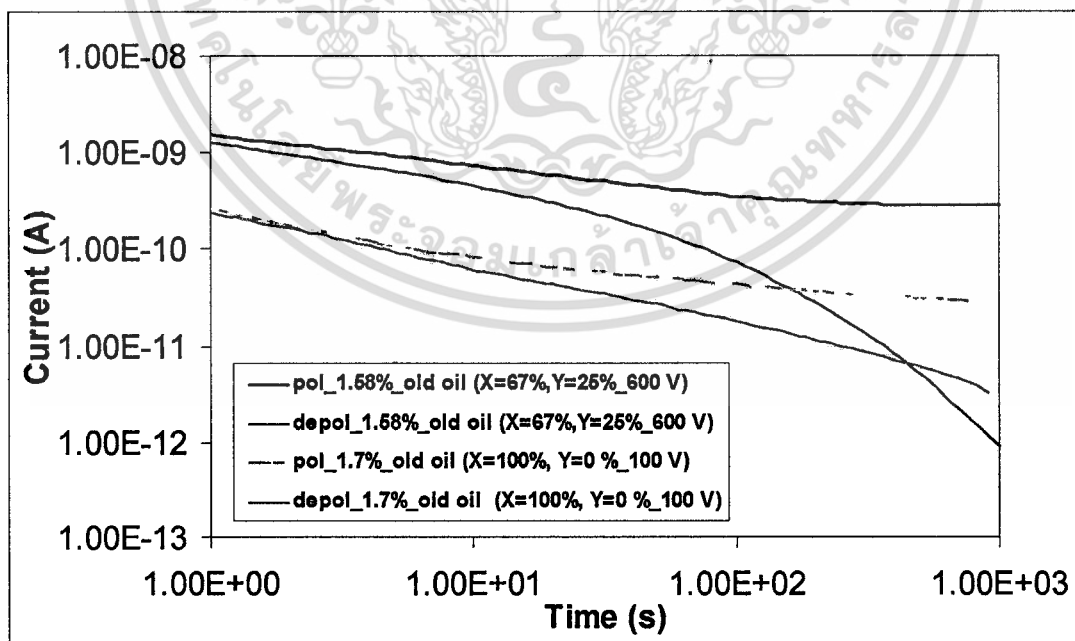
การทดสอบผลของความชื้นต่อฉนวนเพรสบอร์ด ประกอบไปด้วยเพรสบอร์ดที่อบได้ความชื้นด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 15 นาที มีความชื้น 1.58 % มีโครงสร้าง $X = 67\%$ (ความกว้างของเพรสบอร์ดรวม 4 มม. ต่อ ความกว้างของช่องน้ำมัน 2 มม. คิดเป็นอัตราส่วนของความกว้างของเพรสบอร์ด 67 % ต่อความกว้างของช่องน้ำมัน 33 %), $Y = 25\%$ (ความยาวของสเปซเซอร์รวม 20 มม. ต่อ ความยาวของช่องน้ำมันรวม 60 มม. คิดเป็นอัตราส่วนของความยาวของสเปซเซอร์ 25 % ต่อความยาวของช่องน้ำมัน 75 %), ดังรูปที่ 4.43 และ เพรสบอร์ดที่ผ่านการอบได้ความชื้นที่อุณหภูมิ 100°C เป็นระยะเวลา 10 นาที มีความชื้น 1.7 % มีโครงสร้าง $X = 100\%$, $Y = 0\%$ ทำการติดตั้งลงในชุดทดสอบและวัดผลของ PDC ที่เกิดขึ้น



ก) $X = 67\%$, $Y = 25\%$

ข) $X = 100\%$, $Y = 0\%$

รูปที่ 4.48 โครงสร้างฉนวนเพรสบอร์ดที่ได้จำลองแบบที่มีช่องน้ำมันและแบบที่ไม่มีช่องน้ำมัน



รูปที่ 4.49 ผลของความชื้นต่อฉนวนเพรสบอร์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.23 ค่าความนำและความชื้นของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน ซึ่งเกิดจากความชื้นต่อฉนวนเพรสบอร์ด

Description	σ_{paper} (S/m)	R_{dc} (Ω)	Moisture in pressboard % wt
1.58%_old oil (X=67%, Y=25%)	2.75E-13	1.98E+12	4
1.7%_old oil (X=100%, Y=0%)	4.53E-14	3.97E+12	2-2.5

ผลการทดสอบฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมันเก่าที่มีความชื้น 1.58 % (โครงสร้าง X = 67%, Y = 25 %) ผลการวัดความชื้นภายในเพรสบอร์ด โดยวัดด้วย PDC -analyzer พบว่าความชื้นของฉนวนเพรสบอร์ดเพิ่มขึ้นมาก เมื่อเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองความชื้นและวัดด้วยเครื่องคูโลเมตริกคาร์ลฟิชเชอร์ไทรเทชัน (Coulometric Karl Fischer Titration) ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความนำของน้ำมันในช่องน้ำมัน(oil duct) ในขณะที่เมื่อฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมันมีความชื้น 1.7 % (โครงสร้าง X = 100%, Y = 0 %) ผลการวัดความชื้นภายในเพรสบอร์ด โดยวัดด้วย PDC -analyzer พบว่าความชื้นของฉนวนเพรสบอร์ดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองความชื้นและวัดด้วยเครื่องคูโลเมตริกคาร์ลฟิชเชอร์ไทรเทชัน (Coulometric Karl Fischer Titration) ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความนำของน้ำมันที่ผสมอยู่ในเพรสบอร์ด

4.2 การทดสอบฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

การหาผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจะใช้วิธีวัด PDC ภายในฉนวน หลังจากนั้นจะใช้ทฤษฎีผลตอบสนองไดอิเล็กตริกเพื่อหาค่าความสูญเสียของฉนวน ($\tan \delta$) ค่าความต้านทานของฉนวน (R_{dc}) ค่าความเก็บประจุของฉนวน และ ค่าแรงดันย้อนกลับของฉนวน (RVM) ส่วนค่าความนำ (σ_{dc}) จะใช้วิธีการคำนวณ และ ความชื้นของฉนวน กระดาษจะใช้การเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลภายในเครื่อง PDC-analyser การวัด PDC ของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน จะวัดด้วยเครื่อง PDC-analyser ซึ่งสามารถป้อนแรงดันกระแสตรง และวัดกระแสที่ไหลผ่านฉนวนได้ (ภาคผนวก ง) ขั้นตอนในการวัด PDC มีดังต่อไปนี้

- 1) ปิดคัทหม้อแปลงทั้งทางด้านแรงสูงและทางด้านแรงต่ำออกจากระบบ
- 2) จัดเตรียมการทดสอบตามไดอะแกรมของแต่ละหม้อแปลงไฟฟ้า
- 3) ต่อสายเชื่อมระหว่างขดลวดแรงสูงเข้ากับสายป้อนไฟของเครื่อง PDC -analyser ต่อสายเชื่อมระหว่างขดลวดแรงต่ำเข้ากับสายวัดกระแสของเครื่อง PDC -analyser และ ต่อสายกราวด์ของเครื่อง PDC -analyser เข้ากับโครงหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

- 4) ใช้เครื่อง PDC-analyser ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 100 V ให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า

กำลัง ระยะเวลาที่ใช้ในการป้อนแรงดัน 10000 วินาที และระยะเวลาที่หยุดป้อนแรงดันอยู่ที่การคำนวณค่า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10000 วินาที ซึ่งเป็นระยะเวลาที่สามารถสังเกตพฤติกรรม PDC (มีระยะเวลา ตั้งแต่ 1000 วินาที เป็นต้นไป)

5) เลือกโหมด PDC-Evaluation ภายในเครื่อง PDC-analyser เพื่อหาคำนวณค่าเก็บประจุจริง C' ค่าเก็บประจุเชิงจินตภาพ C'' ค่าสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric Dissipation factor) ค่าแรงดันย้อนกลับ (return voltage) ค่าโพลาไรซ์อินเด็กที่นาที่ที่ 1 เทียบกับที่นาที่ที่ 10 (Polarisation Index (P.I.): R_{600}/R_{60}) [74]

6) คำนวณหาค่าความนำในเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน ตามสมการที่ 2.39

7) เลือกโหมด Evaluation of multi-layer insulation systems ภายในเครื่อง PDC-analyser เพื่อหาความชื้นของเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน [75]

การทดสอบฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจะแบ่งการทดสอบออกเป็นประเภทได้ 2 ประเภท ได้แก่ การทดสอบฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่มีสภาพปกติ และการทดสอบฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังก่อนและหลังปรับปรุงสภาพการฉนวน

4.2.1 การทดสอบฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสภาวะการใช้งานตามปกติ

การทดสอบฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสภาวะการใช้งานตามปกติ โดยใช้เครื่อง PDC-analyser ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่นำมาทดสอบได้แก่ หม้อแปลงฉนวนไทย 500 kVA 33kV/380 V และ หม้อแปลงฉนวน 600 kVA 22kV/380 V โดยมีขั้นตอนการวัด PDC ตามหัวข้อที่ 4.2

4.2.1.1 การทดสอบฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 500 kVA 33kV/380 V

วงจรการวัด PDC ของหม้อแปลงไฟฟ้าฉนวนไทย 500 kVA 33kV/380 V ดังรูปที่ 4.44 ซึ่งการต่อขดลวดภายในนั้น ทางด้านแรงสูงเป็นแบบเดลต้า ส่วนทางด้านแรงต่ำจะเป็นแบบสตาร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ก) วงจรการวัด PDC ของหม้อแปลงไฟฟ้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.23 ค่าความนำและความชื้นของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน ซึ่งเกิดจากความชื้นต่อฉนวนเพรสบอร์ด

Description	σ_{paper} (S/m)	R_{dc} (Ω)	Moisture in pressboard % wt
1.58%_old oil (X=67%, Y=25%)	2.75E-13	1.98E+12	4
1.7%_old oil (X=100%, Y=0%)	4.53E-14	3.97E+12	2-2.5

ผลการทดสอบฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมันเก่าที่มีความชื้น 1.58 % (โครงสร้าง X = 67%, Y = 25 %) ผลการวัดความชื้นภายในเพรสบอร์ด โดยวัดด้วย PDC –analyzer พบว่าความชื้นของฉนวนเพรสบอร์ดเพิ่มขึ้นมาก เมื่อเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองความชื้นและวัดด้วยเครื่องคูโลเมตริกคาร์ลฟิชเชอร์ไตเทชัน (Coulometric Karl Fischer Titration) ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความนำของน้ำมันในช่องน้ำมัน(oil duct) ในขณะที่เมื่อฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมันมีความชื้น 1.7 % (โครงสร้าง X = 100%, Y = 0 %) ผลการวัดความชื้นภายในเพรสบอร์ด โดยวัดด้วย PDC –analyzer พบว่าความชื้นของฉนวนเพรสบอร์ดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองความชื้นและวัดด้วยเครื่องคูโลเมตริกคาร์ลฟิชเชอร์ไตเทชัน (Coulometric Karl Fischer Titration) ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความนำของน้ำมันที่ผสมอยู่ในเพรสบอร์ด

4.2 การทดสอบฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

การหาผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจะใช้วิธีวัด PDC ภายในฉนวน หลังจากนั้นจะใช้ทฤษฎีผลตอบสนองไดอิเล็กตริกเพื่อหาค่าความสูญเสียของฉนวน ($\tan \delta$) ค่าความต้านทานของฉนวน (R_{dc}) ค่าความเก็บประจุของฉนวน และ ค่าแรงดันย้อนกลับของฉนวน (RVM) ส่วนค่าความนำ (σ_{dc}) จะใช้วิธีการคำนวณ และ ความชื้นของฉนวน กระดาษจะใช้การเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลภายในเครื่อง PDC-analyser การวัด PDC ของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมัน จะวัดด้วยเครื่อง PDC-analyser ซึ่งสามารถป้อนแรงดันกระแสตรง และวัดกระแสที่ไหลผ่านฉนวนได้ (ภาคผนวก ง) ขั้นตอนในการวัด PDC มีดังต่อไปนี้

- 1) ปลดหม้อแปลงทั้งทางด้านแรงสูงและทางด้านแรงต่ำออกจากระบบ
- 2) จัดเตรียมการทดสอบตามไดอะแกรมของแต่ละหม้อแปลงไฟฟ้า
- 3) ต่อสายเชื่อมระหว่างขดลวดแรงสูงเข้ากับสายป้อนไฟของเครื่อง PDC –analyser ต่อสายเชื่อมระหว่างขดลวดแรงต่ำเข้ากับสายวัดกระแสของเครื่อง PDC –analyser และ ต่อสายกราวด์ของเครื่อง PDC –analyser เข้ากับโครงหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

- 4) ใช้เครื่อง PDC-analyser ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 100 V ให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ใช้นโยบายการป้องกันข้อมูลภายในของหน่วยงานนี้ ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ใช้นโยบายการป้องกันข้อมูลภายในของหน่วยงานนี้ ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10000 วินาที ซึ่งเป็นระยะเวลาที่สามารถสังเกตพฤติกรรม PDC (มีระยะเวลา ตั้งแต่ 1000 วินาที เป็นต้นไป)

5) เลือกโหมด PDC-Evaluation ภายในเครื่อง PDC-analyser เพื่อหาคำนวณค่าเก็บประจุจริง C' ค่าเก็บประจุเชิงจินตภาพ C'' ค่าสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric Dissipation factor) ค่าแรงดันย้อนกลับ (return voltage) ค่าโพลาไรซ์อินเด็กที่นาที่ที่ 1 เทียบกับที่นาที่ที่ 10 (Polarisation Index (P.I.): R_{600}/R_{60}) [74]

6) คำนวณหาค่าความนำในเพอร์สอร์คจุ่มน้ำมัน ตามสมการที่ 2.39

7) เลือกโหมด Evaluation of multi-layer insulation systems ภายในเครื่อง PDC-analyser เพื่อหาความชื้นของเพอร์สอร์คจุ่มน้ำมัน [75]

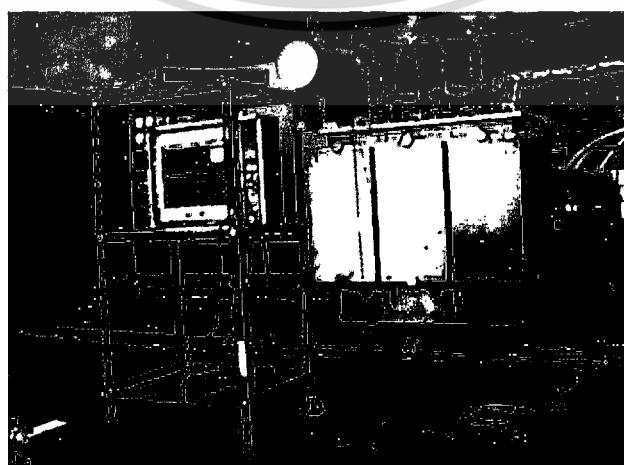
การทดสอบฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจะแบ่งการทดสอบออกเป็นประเภทได้ 2 ประเภท ได้แก่ การทดสอบฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่มีสภาพปกติ และการทดสอบฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังก่อนและหลังปรับปรุงสภาพการฉนวน

4.2.1 การทดสอบฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานะการใช้งานตามปกติ

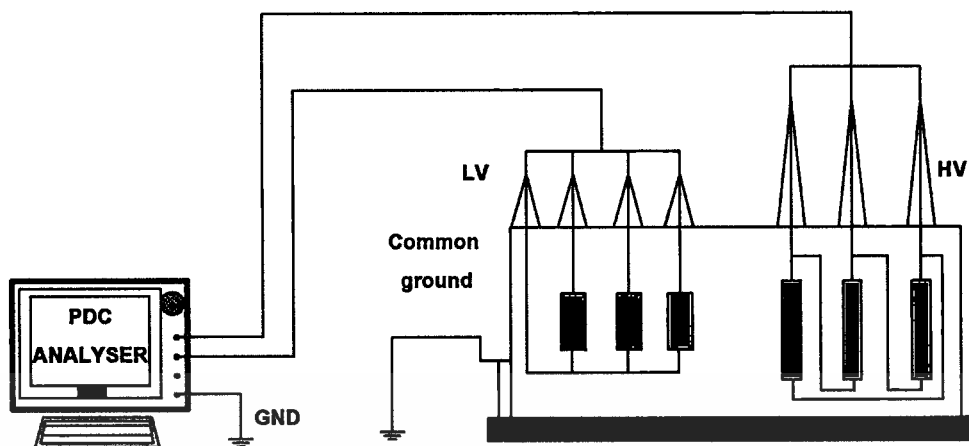
การทดสอบฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานะการใช้งานตามปกติ โดยใช้เครื่อง PDC-analyser ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่นำมาทดสอบได้แก่ หม้อแปลงฉนวนไทย 500 kVA 33kV/380 V และ หม้อแปลงฉนวน 600 kVA 22kV/380 V โดยมีขั้นตอนการวัด PDC ตามหัวข้อที่ 4.2

4.2.1.1 การทดสอบฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 500 kVA 33kV/380 V

วงจรการวัด PDC ของหม้อแปลงไฟฟ้าฉนวนไทย 500 kVA 33kV/380 V ดังรูปที่ 4.44 ซึ่งการต่อขดลวดภายในนั้น ทางด้านแรงสูงเป็นแบบเดลต้า ส่วนทางด้านแรงต่ำจะเป็นแบบสตาร์

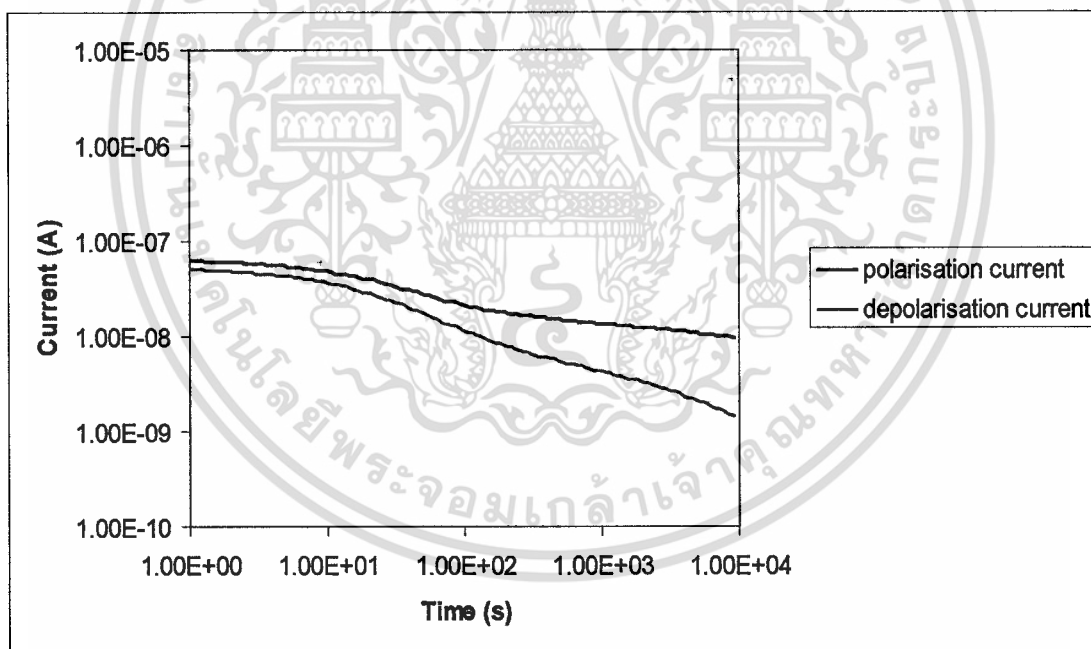


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ก) วงจรการวัด PDC ของหม้อแปลงไฟฟ้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



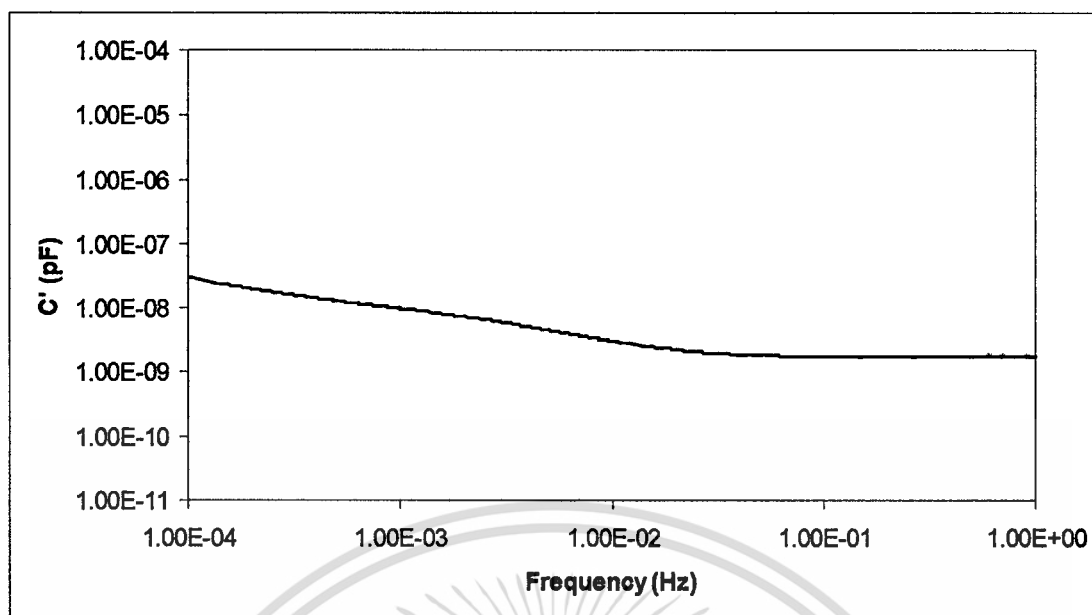
ข) ไดอะแกรมการวัด PDC ของหม้อแปลงไฟฟ้า

รูปที่ 4.50 การวัด PDC ของหม้อแปลงไฟฟ้า 500 kVA 33kV/380 V

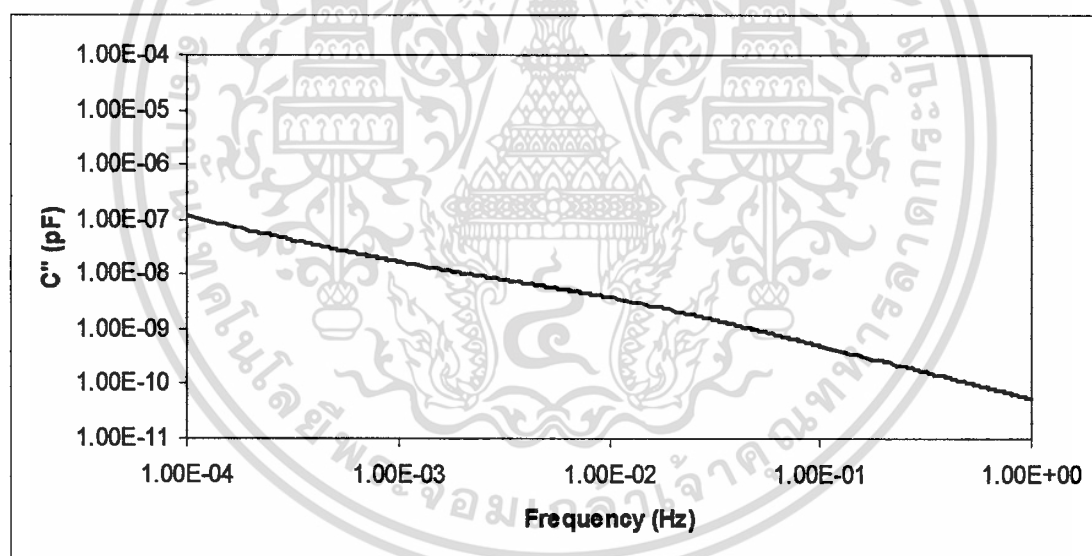


รูปที่ 4.51 PDC ของหม้อแปลงไฟฟ้า 500 kVA 33kV/380 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

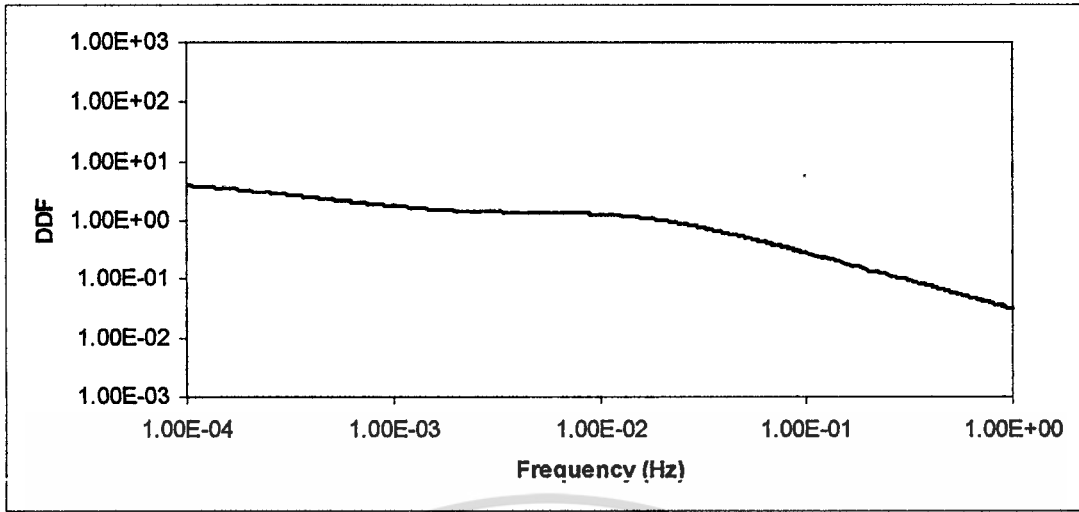


รูปที่ 4.52 ค่าเก็บประจุจริงของหม้อแปลงไฟฟ้า 500 kVA 33kV/380 V

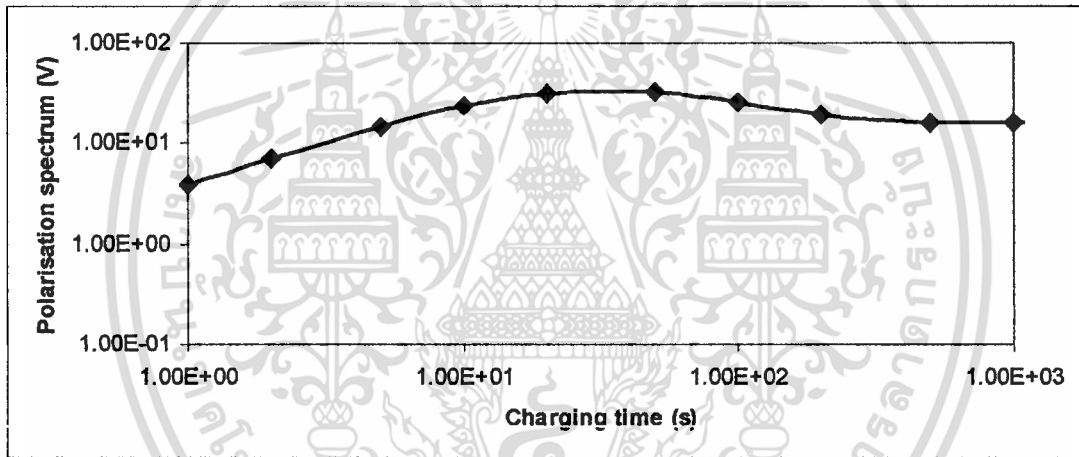


รูปที่ 4.53 ค่าเก็บประจุจินตภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า 500 kVA 33kV/380 V

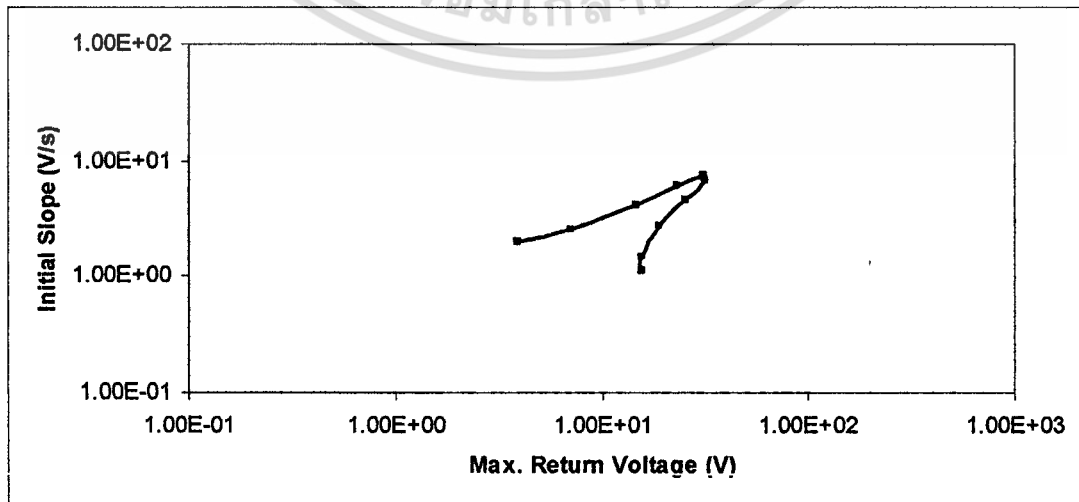
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.54 ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกของหม้อแปลงไฟฟ้า 500 kVA 33kV/380 V



รูปที่ 4.55 โพลาริเซชันสเปกตรัมของหม้อแปลงไฟฟ้า 500 kVA 33kV/380 V



รูปที่ 4.56 guinics ของหม้อแปลงไฟฟ้า 500 kVA 33kV/380 V

ตารางที่ 4.24 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า 500 kVA 33kV/380 V

Description	Tirathai 500 kVA	Acceptable
Charging voltage (V)	200	
Test Temperature ($^{\circ}$ C)	31	
Moisture content in Pressboard (% weight)	3-3.5	< 2*
Oil conductivity at 20 $^{\circ}$ C (pS/m)	2.84	< 5**
Capacitance at 50 Hz (nF)	1.731	
C at 10 ⁻⁴ Hz / C at 50 Hz (Polarization)	17.98	< 10**
C at 10 ⁻⁴ Hz / C at 50 Hz (Depolarization)	17.14	< 10**
DDF or tan δ at 1 Hz...Polarization (%)	3.17	< 1**
DDF or tan δ at 1 Hz...Depolarization (%)	3.07	< 1**
Insulation Resistance at 60s (G Ω)	7.78	
Insulation Resistance at 600s (G Ω)	19.7	
Polarization Index (between 60s and 600s)	1.77	> 2***
Charging time at 1 st peak of Polarization Spectrum (s)	3.9	
Maximum Return Voltage at 1 st peak (V)	10.6	
Time to peak at the Maximum Return Voltage (s)	18.0	
Initial slope at the Maximum Return Voltage (V/s)	7.49	

*IEEE Std 62-1995, **KEA Consultant, ***ABB Service Handbook for Transformer

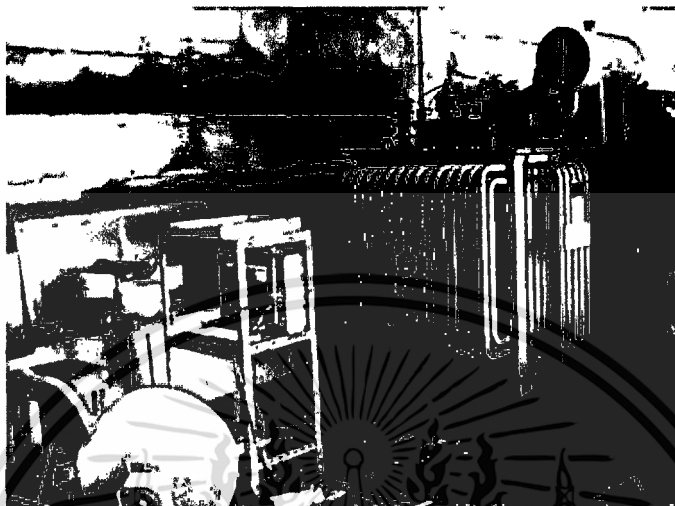
ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า 500 kVA 33kV/380 V พบว่า หม้อแปลงยังอยู่ในสภาพที่พอใช้ โดยดูได้จากค่าความชื้นในฉนวนกระดาษเริ่มมีมาก (3-3.5 %) แต่ความนำน้ำมันมีน้อยกว่า 5 pS/m (2.84 pS/m) ตัวที่บอกได้อีกคือค่า Polarization Index (between 60s and 600s) ซึ่งในกรณีนี้คือ 1.77 ซึ่งถือว่าพอใช้ ส่วนค่าอื่นๆ ได้แก่ C at 10⁻⁴ Hz / C at 50 Hz มีค่ามากกว่า 10 (17.14) ซึ่งถือว่าไม่ดี ส่วน DDF or tan δ at 1 Hz มีค่ามากกว่า 1% (3.07%) ซึ่งถือว่าไม่ดี ส่วน Maximum Return Voltage at 1st peak (V) , Time to peak at the Maximum Return Voltage (s) และ Initial slope at the Maximum Return Voltage (V/s) จะใช้พิจารณาเปรียบเทียบกับผลการวัด

ในครั้งต่อไป ซึ่งถ้า Maximum Return Voltage at 1st peak (V) มีค่าลดลง Time to peak at the Maximum Recovery Voltage (s) มีเวลาสั้นลง และ Initial slope at the Maximum Return Voltage (V/s) มีความชันเพิ่มขึ้น แสดงว่าการฉนวนมีค่าต่ำลง

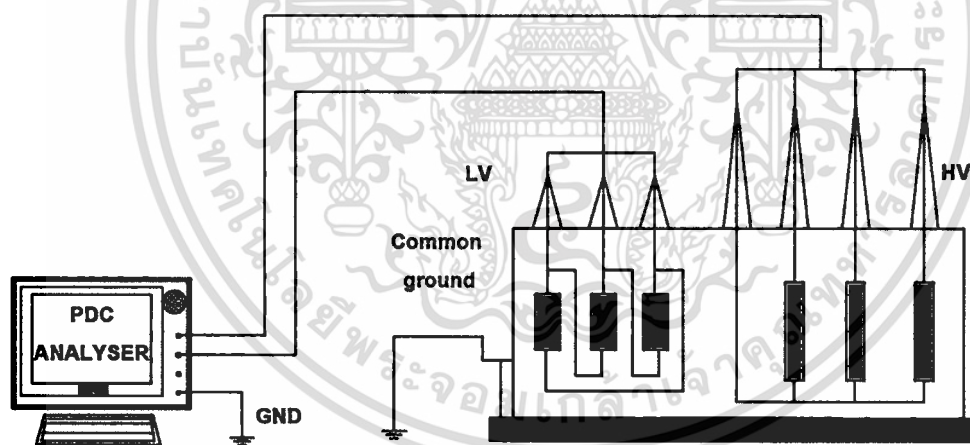
ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.2 การทดสอบฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 600 kVA 22kV/380 V

วงจรการวัด PDC ของหม้อแปลงไฟฟ้าสิริวิวัฒน์ 600 kVA 22kV/380 V ดังรูปที่ 4.51 ซึ่งการต่อขดลวดภายในนั้น ทางด้านแรงสูงเป็นแบบสตาร์ ส่วนทางด้านแรงต่ำจะเป็นแบบเดลต้า



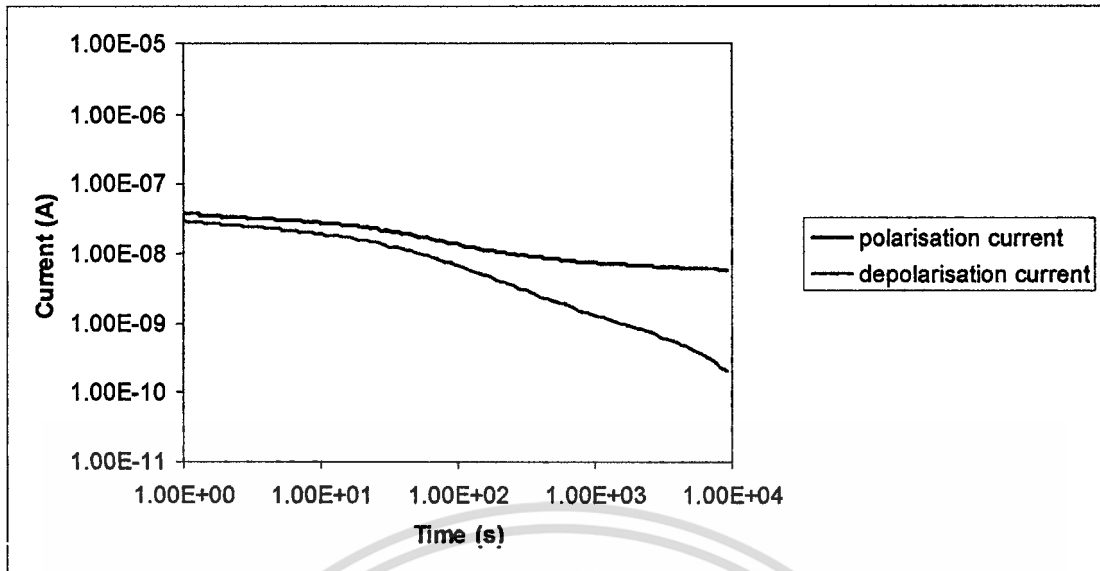
ก) วงจรการวัด PDC ของหม้อแปลงไฟฟ้า



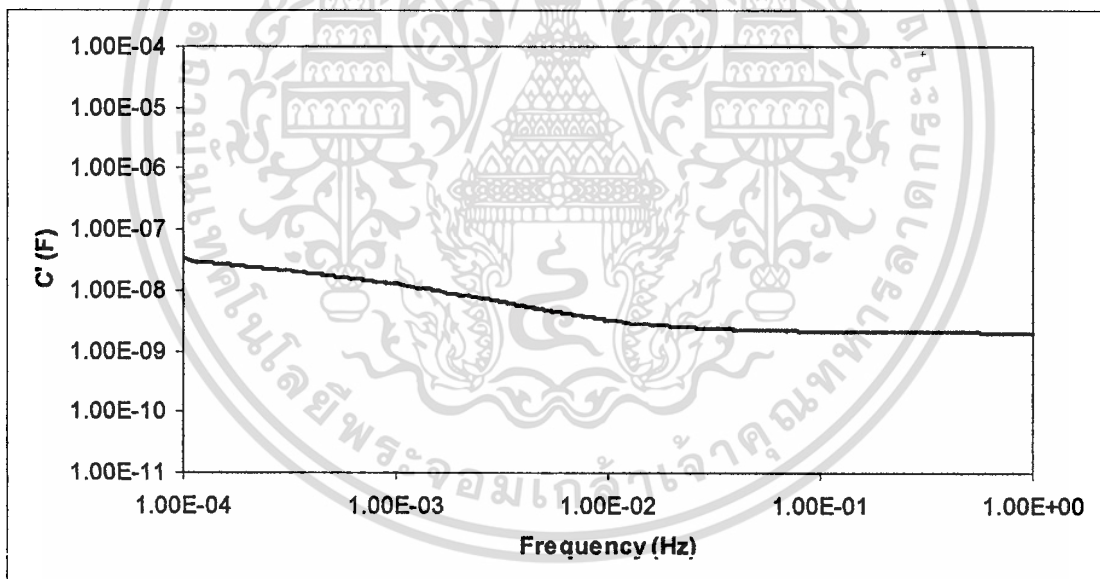
ข) โค้ดอะแกรมการวัด PDC ของหม้อแปลงไฟฟ้า

รูปที่ 4.57 การวัด PDC ของหม้อแปลงไฟฟ้า 600 kVA 22kV/380 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

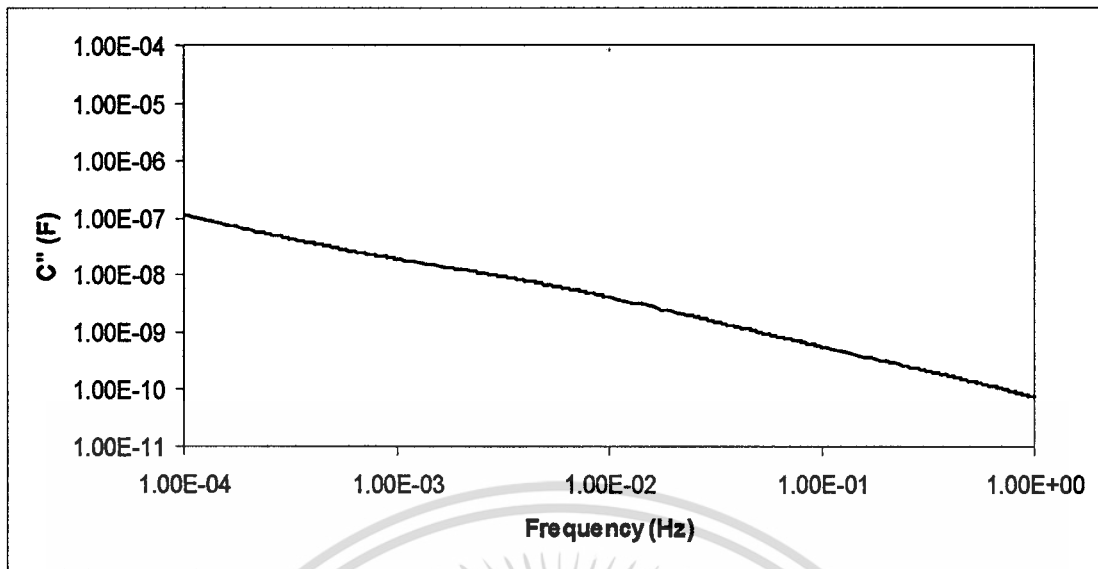


รูปที่ 4.58 PDC ของหม้อแปลงไฟฟ้า 600 kVA 22kV/380 V

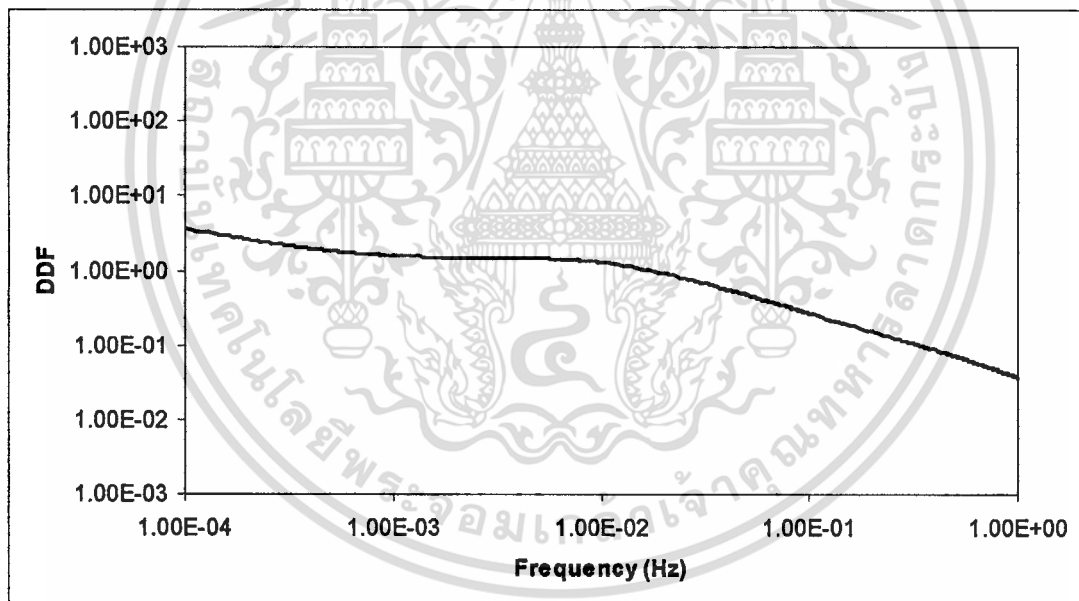


รูปที่ 4.59 ค่าเก็บประจุจริงของหม้อแปลงไฟฟ้า 600 kVA 22kV/380 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

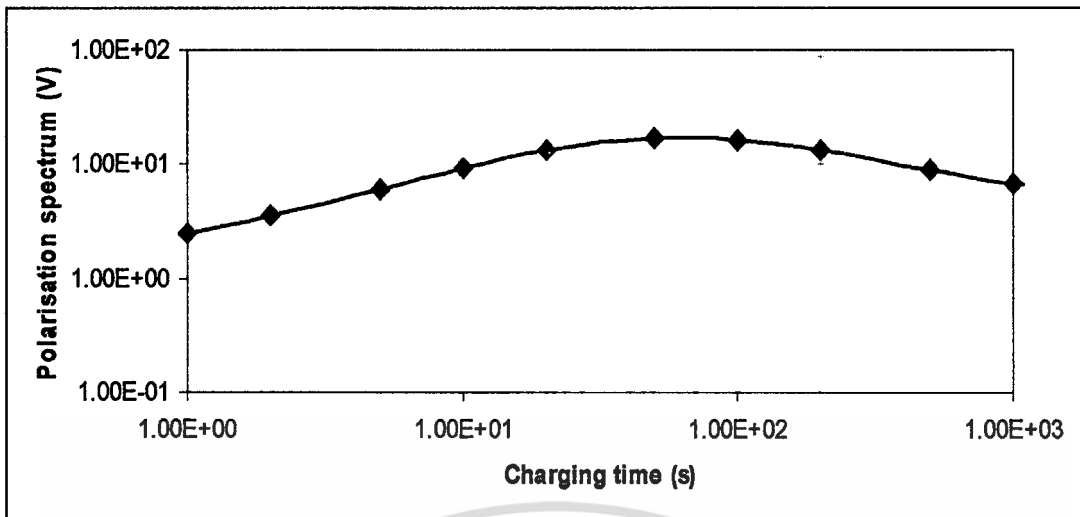


รูปที่ 4.60 ค่าเก็บประจุจินตภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า 600 kVA 22kV/380 V

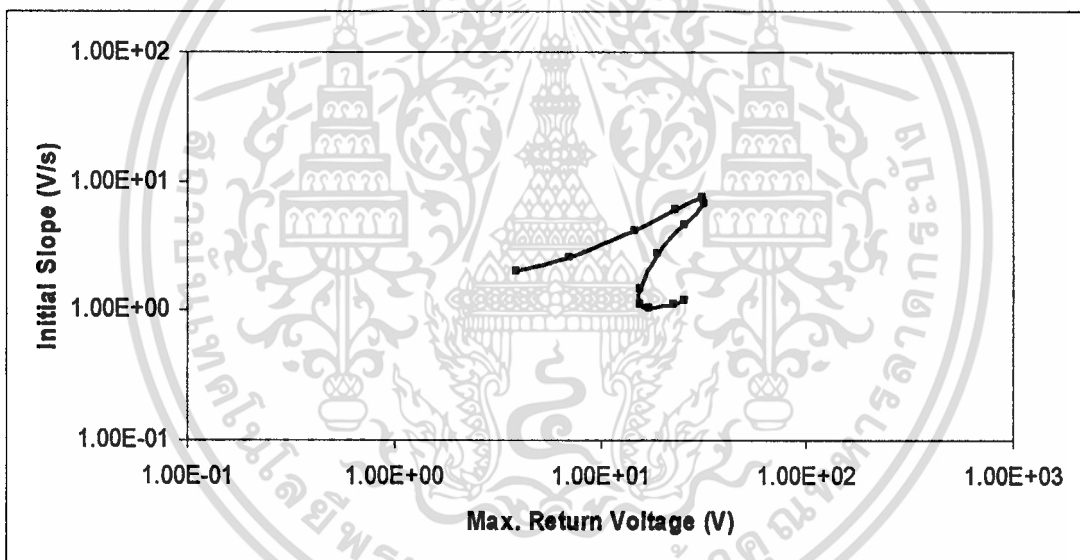


รูปที่ 4.61 ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกของหม้อแปลงไฟฟ้า 600 kVA 22kV/380 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.62 โพลลาไรซ์สเปกตรัมของหม้อแปลงไฟฟ้า 600 kVA 22kV/380 V



รูปที่ 4.63 guinier ของหม้อแปลงไฟฟ้า 600 kVA 22kV/380 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.25 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า 600 kVA 22kV/380 V

Description	Sirivivat 600kVA	Acceptable
Charging voltage (V)	100	
Test Temperature ($^{\circ}$ C)	31	
Moisture content in Pressboard (% weight)	3-3.5	< 2*
Oil conductivity at 20 $^{\circ}$ C (pS/m)	3.47	< 5**
Capacitance at 50 Hz (nF)	1.987	
C at 10 ⁻⁴ Hz / C at 50 Hz (Polarization)	19.74	< 10**
C at 10 ⁻⁴ Hz / C at 50 Hz (Depolarization)	16.06	< 10**
DDF or tan δ at 1 Hz...Polarization (%)	3.92	< 1**
DDF or tan δ at 1 Hz...Depolarization (%)	3.74	< 1**
Insulation Resistance at 60s (G Ω)	5.93	
Insulation Resistance at 600s (G Ω)	12.3	
Polarization Index (between 60s and 600s)	2.08	> 2***
Charging time at 1 st peak of Polarization Spectrum (s)	2.44	
Maximum Return Voltage at 1 st peak (V)	4.9	
Time to peak at the Maximum Return Voltage (s)	27.4	
Initial slope at the Maximum Return Voltage (V/s)	3.03	

*IEEE Std 62-1995, **KEA Consultant, ***ABB Service Handbook for Transformer

ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า 600 kVA 22kV/380 V พบว่า หม้อแปลงยังอยู่ในสภาพที่พอใช้ โดยดูได้จากค่าความชื้นในฉนวนกระดาษเริ่มมีมาก (3-3.5 %) แต่ความนำน้ำมันมีน้อยกว่า 5 pS/m (3.47 pS/m) ตัวที่บอกได้อีกคือค่า Polarization Index (between 60s and 600s) ซึ่งในกรณีนี้คือ 2.08 ซึ่งถือว่าดี ส่วนค่าอื่นๆ ได้แก่ C at 10⁻⁴ Hz / C at 50 Hz มีค่ามากกว่า 10 (16.06) ซึ่งถือว่าไม่ดี ส่วน DDF or tan δ at 1 Hz มีค่ามากกว่า 1% (3.47%) ซึ่งถือว่าไม่ดี ส่วน Maximum Return Voltage at 1st peak (V) , Time to peak at the Maximum Return Voltage (s) และ Initial slope at the Maximum Return Voltage (V/s) จะใช้พิจารณาเปรียบเทียบกับผลการวัดในครั้งต่อไป

ซึ่งถ้า Maximum Return Voltage at 1st peak (V) มีค่าลดลง Time to peak at the Maximum Return Voltage (s) มีเวลาสั้นลง และ Initial slope at the Maximum Return Voltage (V/s) มีความชันเพิ่มขึ้น แสดงว่าการฉนวนมีค่าต่ำลง

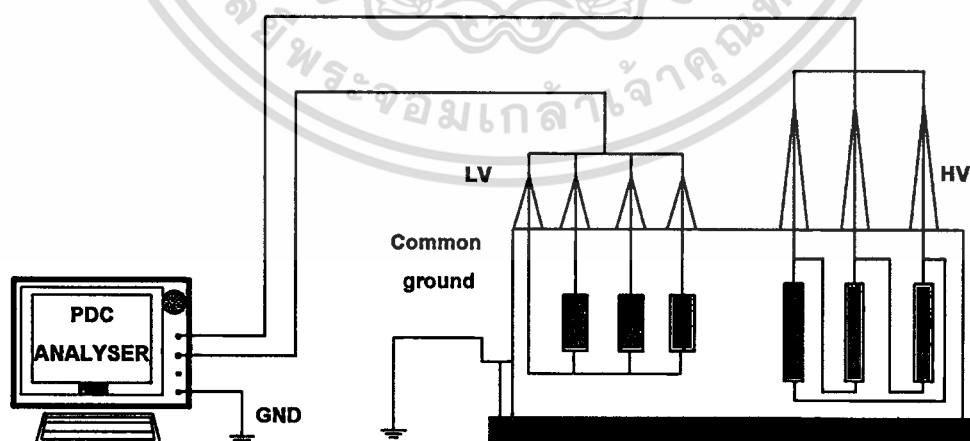
ไม่ว่าการฉนวนใดๆ พังสน ออกจากหม้อแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การทดสอบฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังก่อนและหลังปรับปรุงสภาพการฉนวน

ทำการทดสอบเพื่อหาความชื้นในกระดาษของหม้อแปลงและความนำของน้ำมันฉนวนของ Oil Immersed Transformer 25 MVA 3 ϕ 115-22 kV Serial No. 5A1592001 (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย) แสดงดังรูปที่ 4.58 ก่อนปรับปรุงสภาพและหลังปรับปรุงสภาพฉนวน (ทำการอบฉนวนเพอร์สอร์คและทำการดึงความชื้นและกรองฝุ่นผงของน้ำมัน) หลังจากนั้นใช้เครื่อง PDC-analyser -1 MOD วัด PDC ซึ่งมีขั้นตอนการวัด PDC ตามหัวข้อที่ 4.2



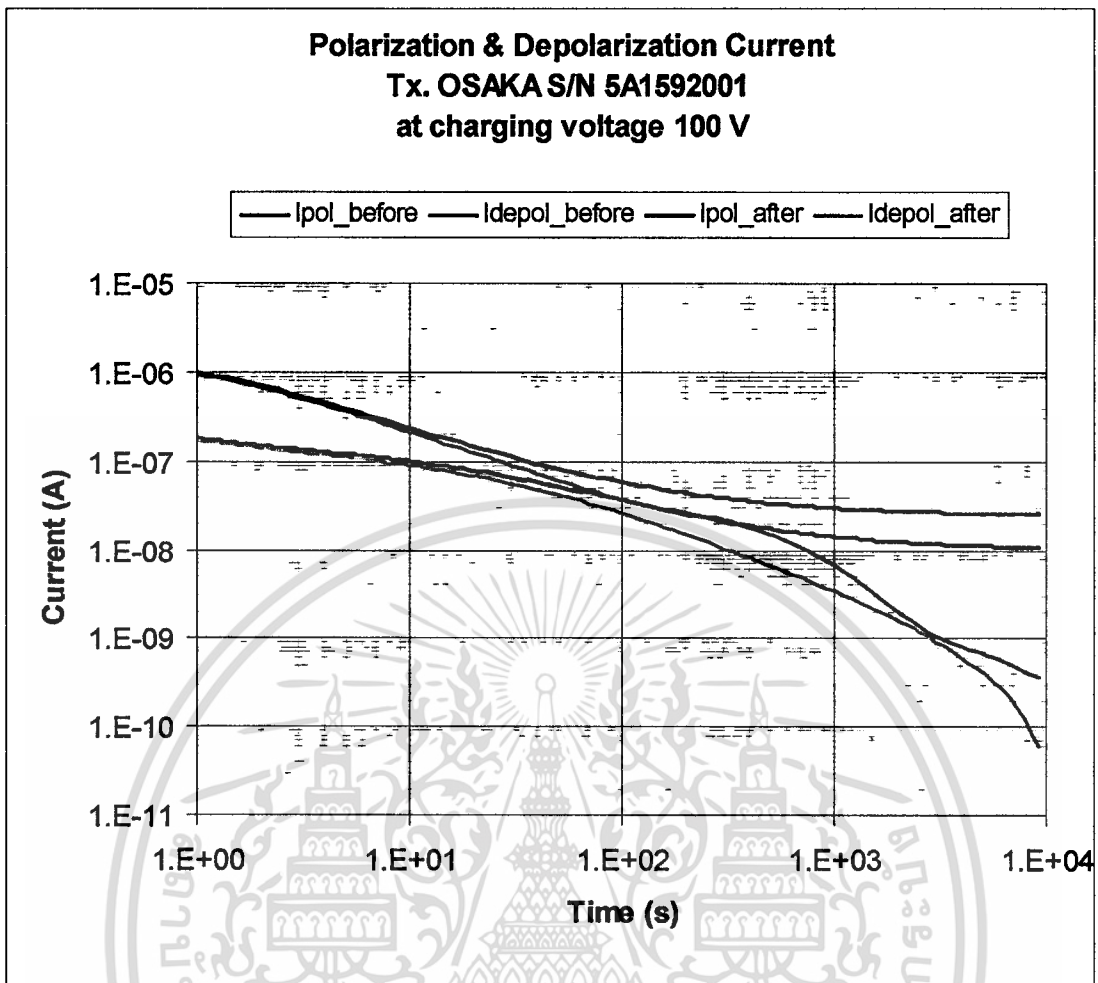
ก) วงจรการวัด PDC ของหม้อแปลงไฟฟ้า



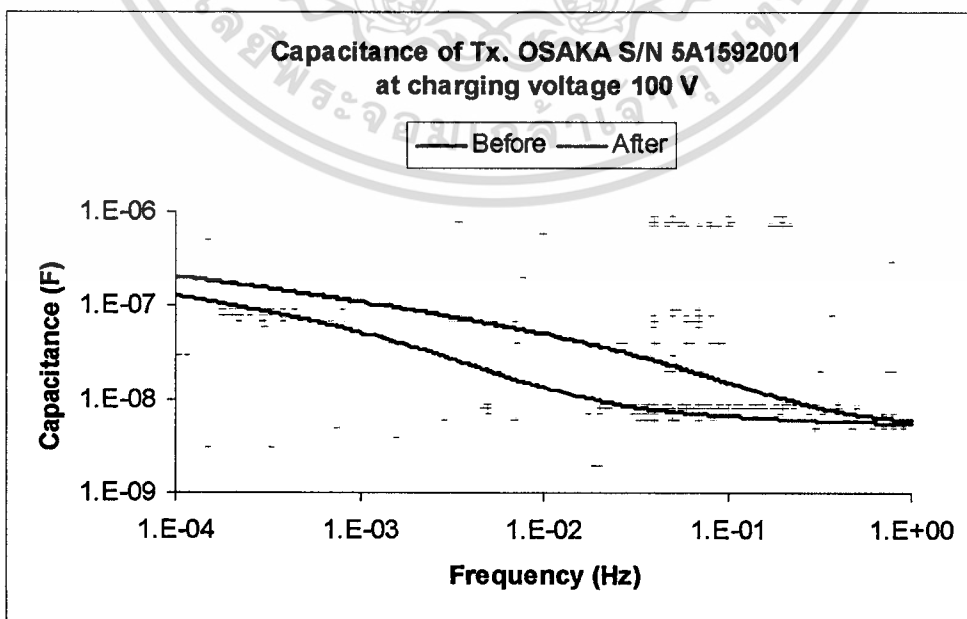
ข) ไลอะแกรมการวัด PDC ของหม้อแปลงไฟฟ้า

รูปที่ 4.64 Oil Immersed Transformer 25 MVA 3 ϕ 115-22 kV

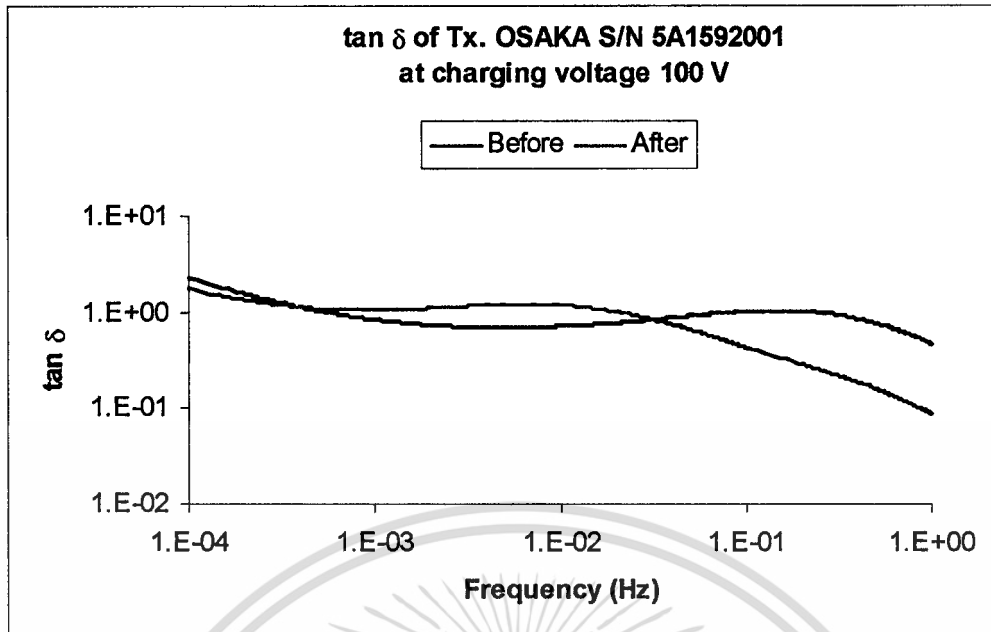
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



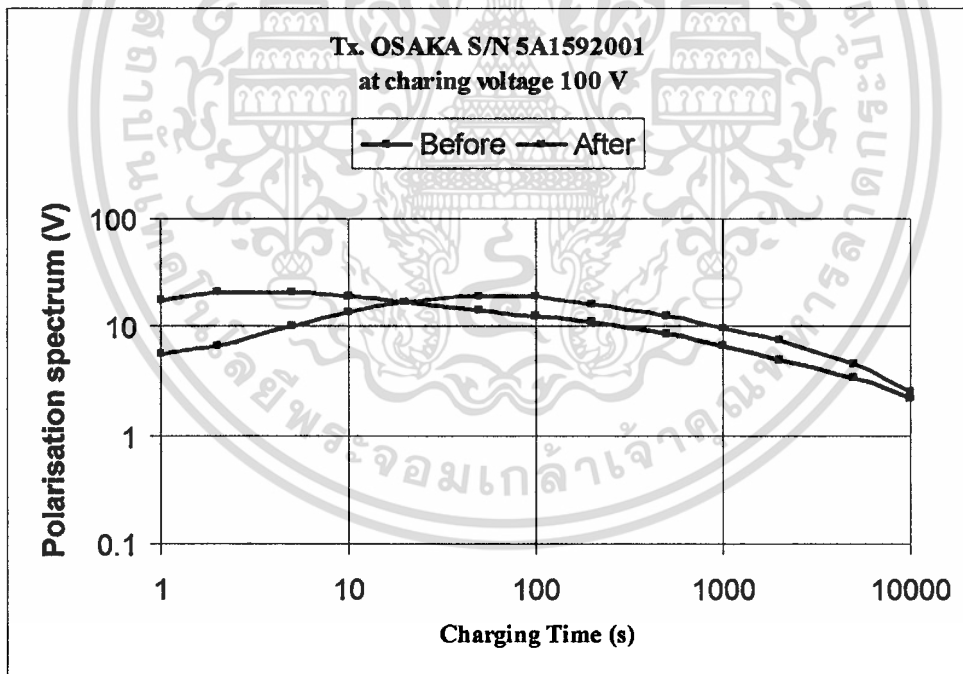
รูปที่ 4.65 PDC ของหม้อแปลงไฟฟ้า 25 MVA 3 ϕ 115-22 kV



รูปที่ 4.66 ค่าเก็บประจุจริงของหม้อแปลงไฟฟ้า 25 MVA 3 ϕ 115-22 kV

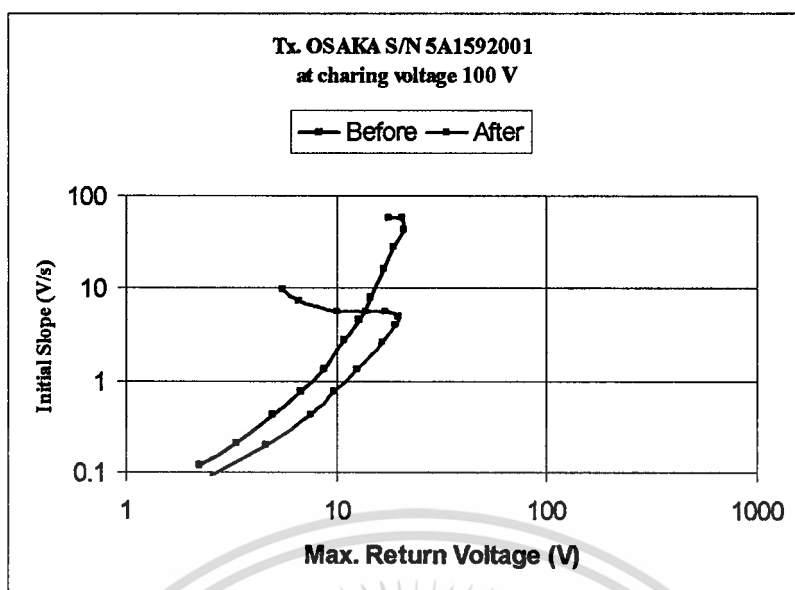


รูปที่ 4.67 ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกของหม้อแปลงไฟฟ้า 25 MVA 3 ϕ 115-22 kV



รูปที่ 4.68 โพลาริเซชันสเปกตรัมของหม้อแปลงไฟฟ้า 25 MVA 3 ϕ 115-22 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.69 guinicของหม้อแปลงไฟฟ้า 25 MVA 3Ø 115-22 kV

ตารางที่ 4.26 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า 25 MVA 3Ø 115-22 kV

Description	Before	After 1 st	Acceptable
	HV-LV	HV-LV	
Charging voltage (V)	100	100	
Test Temperature (°C)	28	29	
Moisture content in Pressboard (% weight)	3.5	3	< 2*
Oil conductivity at 20 °C (pS/m)	106.2	11.4	< 5**
Capacitance at 50 Hz (nF)	5.648	5.481	
C at 10 ⁻⁴ Hz / C at 50 Hz (Polarization)	36.39	23.45	< 10**
C at 10 ⁻⁴ Hz / C at 50 Hz (Depolarization)	46.96	23.87	< 10**
DDF or tan δ at 1 Hz...Polarization (%)	47.1	8.8	< 1**
DDF or tan δ at 1 Hz...Depolarization (%)	44.9	8.7	< 1**
Insulation Resistance at 60s (GΩ)	1.33	2.1	
Insulation Resistance at 600s (GΩ)	3.07	6.1	
Polarization Index (between 60s and 600s)	2.32	2.91	> 2***
Charging time at 1 st peak of Polarization Spectrum (s)	3	50	
Maximum Return Voltage at 1 st peak (V)	21.2	19.5	
Time to peak at the Maximum Return Voltage (s)	2.6	32.0	
Initial slope at the Maximum Return Voltage (V/s)	51.6	5.0	

*IEEE Std 62-1995, **KEA Consultant, ***ABB Service Handbook for Transformer

ในการพิจารณาผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของหม้อแปลง พบว่าหลังจากการปรับปรุงสภาพ Polarization Index (between 60s and 600s) มีค่า 2.91 ซึ่งถือว่าดี ส่วนค่าอื่นๆ ได้แก่ C at 10^{-4} Hz / C at 50 Hz มีค่ามากกว่า 10 (23.87) ซึ่งถือว่าไม่ดี ส่วน DDF or $\tan \delta$ at 1 Hz มีค่ามากกว่า 1% (8.7%) ซึ่งถือว่าไม่ดี ส่วน Time to Maximum Return Voltage at 1" peak (V) เมื่อเทียบกับก่อนปรับปรุงสภาพพบว่ามีค่ามากขึ้น ส่วน peak at the Maximum Return Voltage (s) หลังการปรับปรุงมีค่าเพิ่มขึ้น และความชันของแรงดันย้อนกลับมีค่าลดลง

ความชื้นในกระดาษหม้อแปลงก่อนปรับปรุงสภาพวัดด้วย PDC-analyser มีค่าความชื้นเท่ากับ 3.5 % จะถูกพิจารณาว่ามีค่าสูงเกินไป ซึ่งกระดาษฉนวนที่มีคุณสมบัติดี ค่าความชื้นที่ยอมรับได้คือ ไม่เกิน 3 % ค่าความนำของน้ำมันที่อุณหภูมิที่ 20 °C มีค่าเท่ากับ 106.2 pS/m ความนำในน้ำมันที่วัดได้นี้มีค่าสูงกว่าที่ยอมรับได้ซึ่งไม่ควรเกิน 5 pS/m

หลังปรับปรุงสภาพฉนวนแล้ว พบว่าความชื้นในกระดาษหม้อแปลงมีค่าเท่ากับ 3 % มีค่าน้อยกว่าตอนยังไม่ปรับปรุงสภาพฉนวนและค่าความนำของน้ำมันที่ 20 °C เท่ากับ 11.4 pS/m การปรับปรุงคุณภาพของการฉนวนทำให้น้ำมันมีค่าความเป็นฉนวนที่ดีขึ้น แต่ยังคงมีค่าความนำสูงอยู่

เปรียบเทียบผลที่ได้จากคูโลเมตริกคาร์ลฟิชเชอร์ไตรเทชัน (Coulometric Karl Fischer Titration) โดยการเก็บตัวอย่างกระดาษหลายๆ ตำแหน่งภายในหม้อแปลง ค่าความชื้นก่อนการปรับปรุงสภาพอยู่ระหว่าง 2.4-2.8 % และค่าความชื้นหลังปรับปรุงสภาพอยู่ระหว่าง 1.8-2.4 % ความแตกต่างของค่าความชื้นในฉนวนกระดาษที่เกิดขึ้น จากการวัดด้วย PDC และคูโลเมตริกคาร์ลฟิชเชอร์ไตรเทชัน (Coulometric Karl Fischer Titration) นั้น เกิดจากผลของกระบวนการเก็บตัวอย่างที่ไม่เหมือนกัน ก่อนที่จะนำกระดาษหม้อแปลงไปวัดค่าความชื้น

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

การศึกษาผลของความชื้นในเพรสบอร์คบอร์ด ผลของน้ำมันที่มีความเป็นกรดที่มีผลต่อ
จำนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าทางไฟฟ้า และ การวิเคราะห์คุณภาพการฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้า
โดยใช้ PDC-analyser พบว่า

1) ความชื้นที่เพิ่มขึ้นในเพรสบอร์คบอร์ด มีผลทำให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเพรสบอร์คเพิ่มขึ้น
และเมื่อทำการจำลองเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าระหว่างฉนวนที่เป็นเพรสบอร์คกับอากาศ และ
ฉนวนที่เป็นเพรสบอร์คกับน้ำมันด้วย โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการจำลองพบว่าเมื่อค่าคงตัว
ของไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์คมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น
ด้วย โดยที่ฉนวนที่เป็นเพรสบอร์คกับอากาศจะมีค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่มากกว่าฉนวนที่เป็นเพรส
บอร์คกับน้ำมัน

2) ความชื้นที่เพิ่มขึ้นในเพรสบอร์คและน้ำมันที่มีความเป็นกรด มีผลทำให้แรงดัน
ดิสชาร์จเริ่มเกิดของเพรสบอร์คจุ่มน้ำมันมีค่าต่ำ โดยที่รูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนเป็นการ
เกิดดิสชาร์จภายใน อันเนื่องมาจากตัวโครงสร้างเพรสบอร์คจุ่มน้ำมันจะมีรูพรุน เมื่อเกิด
ความเครียดสนามไฟฟ้า แรงดันดิสชาร์จจะเกิดขึ้นที่ภายในรูพรุนเหล่านั้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการ
ทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนเพรสบอร์คจุ่มน้ำมัน ได้แก่ ความชื้นที่
เพิ่มขึ้นในเพรสบอร์คและความเป็นกรดในน้ำมัน มีผลทำให้แรงดันเบรกดาวน์ของเพรสบอร์คจุ่ม
น้ำมันจะมีค่าต่ำ

3) ความชื้นที่เพิ่มขึ้นในเพรสบอร์คและน้ำมันที่มีความเป็นกรด มีผลทำให้การวัด PDC
ของเพรสบอร์คจุ่มน้ำมันช่วงเวลาเริ่มต้นเพิ่มขึ้น (ผลของค่าความนำในน้ำมัน) และ PDC ของ
เพรสบอร์คจุ่มน้ำมันช่วงเวลาตั้งแต่ 1000 วินาทีขึ้นไปจะเพิ่มขึ้น (ผลของค่าความชื้นในกระดาษ)

4) ความชื้นที่เพิ่มขึ้นในเพรสบอร์คและน้ำมันที่มีความเป็นกรด มีผลทำให้ผลตอบสนอง
ไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์คจุ่มน้ำมันซึ่งได้จากเครื่อง PDC-analyser ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างค่า
เก็บประจุที่ความถี่ 10^{-4} Hz กับค่าเก็บประจุที่ความถี่ 50 Hz (C at 10^{-4} /C at 50 Hz) และค่าความ
สูญเสียของฉนวนที่ 1 Hz (DDF at 1 Hz) ของเพรสบอร์คจุ่มน้ำมันจะมีเพิ่มขึ้น ส่วนค่าแรงดัน
ย้อนกลับสูงสุด ($U_r \max$) ของเพรสบอร์คจุ่มน้ำมันนั้นมีค่าน้อย เวลาที่เกิดแรงดันย้อนกลับสูงสุด
จะเกิดที่ระยะเวลาที่อันสั้น และค่าความชันของแรงดันย้อนกลับของเพรสบอร์คจุ่มน้ำมันจะมีค่า
มาก

5) ความชื้นที่เพิ่มขึ้นในเพรสบอร์คและน้ำมันที่มีความเป็นกรด มีผลทำให้ค่าความนำ
การนำไฟฟ้าและค่าความชื้นของเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานของฉนวนเพรสบอร์คจุ่มน้ำมันมีค่าลดลง
ที่มีการนำไปใช้

6) น้ำมันที่มีความเป็นกรดจะก่อให้เกิดค่าความนำในน้ำมันและเมื่อน้ำมันผสมอยู่และใน จนวนเพรสบอร์ด ส่งผลทำให้ผลการวัดความชื้นภายในเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมันด้วย PDC –analyzer คลาดเคลื่อนไปจากค่าความชื้นภายในจนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมันที่มีอยู่จริง ซึ่งวัดด้วยวิธี มาตรฐาน (เครื่องคูโลเมตริกคาร์ลพิคเซอร์โรเตรชัน)

7) การวิเคราะห์คุณภาพการจนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยใช้ PDC-analyser จะมี เกณฑ์ยอมรับผลการทดสอบดังนี้ ความชื้นในกระดาษหม้อแปลงต้องมีน้อยกว่า 2 % [64] ค่า ความนำของน้ำมันที่อุณหภูมิที่ 20 °C ต้องมีน้อยกว่า 5 pS/m อัตราส่วนระหว่างค่าเก็บประจุที่ ความถี่ 10⁻⁴ Hz กับค่าเก็บประจุที่ความถี่ 50 Hz (C at 10⁻⁴/C at 50 Hz) ต้องมีค่าน้อยกว่า 10 [34-37] ค่าความสูญเสียของจนวนที่ 1 Hz (DDF at 1 Hz) ต้องมีค่าไม่เกิน 1 % [34-37] และ ค่า Polarization Index (between 60s and 600s) ต้องมีค่ามากกว่า 2 [77]

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ในการวิเคราะห์จนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วย PDC –analyzer ควรเริ่มจากการ วิเคราะห์ผลของน้ำมัน (ค่าความนำของน้ำมันที่อุณหภูมิที่ 20 °C ต้องมีน้อยกว่า 5 pS/m) เพราะ ความเป็นกรดในน้ำมันจะก่อให้เกิดค่าความนำ และส่งผลทำให้ผลการวัดความชื้นภายในเพรส บอร์ดจุ่มน้ำมันด้วย PDC –analyzer คลาดเคลื่อนไปจากค่าความชื้นภายในจนวนเพรสบอร์ดจุ่ม น้ำมันที่มีอยู่จริง

2) ในการวัดจนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วย PDC –analyzer เพื่อไม่ให้เกิดความคลาด เคลื่อนที่เกิดจากอุณหภูมิ [2], [78] ในกรณีที่หม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ภายในสถานีจ่ายไฟย่อยหรือ บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากๆ ควรที่จะทำการวัดในช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิน้อยๆ อย่างเช่น ช่วงเวลากลางคืน เป็นต้น

3) ในปัจจุบันเทคโนโลยีการทำ Oil Regeneration [62] เป็นเทคโนโลยีที่ใช้กันมากใน ต่างประเทศ และเริ่มใช้กันบ้างแล้วภายในประเทศไทย ซึ่งข้อดีของการทำ Oil Regeneration มี ดังต่อไปนี้ ตัวเครื่องสามารถดึงความเป็นกรดและความชื้นออกจากน้ำมัน ได้โดยไม่ต้องหยุดจ่าย ไฟฟ้า โดยที่ของเสียซึ่งเกิดจากกระบวนการทำ Oil Regeneration มีน้อยมากๆเมื่อเทียบกับ เทคโนโลยีการสกัดน้ำมันในอดีต ควรจะมีผู้ทำการศึกษาในเรื่องนี้ต่อไป

บรรณานุกรม

- [1] M. Wang, A.J. Vandermaar and K.D. Srivastava, **“Review of Condition Assessment of Power Transformers in Service.”** IEEE Elect. Insul. Mag., vol. 18, no. 6, pp. 12–25, 2002.
- [2] C. Homagk and T. Leibfried, **“Practical Experience on Transformer Insulation Condition Assessment,”** in Proc. 8th Int. Conf. Properties Appl. Dielect. Mater., pp.238–241, June 2006.
- [3] T. K. Saha, **“Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers,”** IEEE Trans. Electr. Insul., vol. 10, no. 5, pp. 903–917, 2003.
- [4] D. Stephen, J. McArthur, et al., **“The Design of a Multi-Agent Transformer Condition Monitoring System,”** IEEE Trans. Power Syst., vol. 19, no. 4, pp. 1845–1852, 2004.
- [5] Lars E.Lundgaard, Walter Hansen, Dag Linhjell, and Terence J.Painter, **“Aging of Oil-Impregnated in Power Transformers Paper ,”** IEEE Trans. Power delivert , Vol.19, No.1, January 2004.
- [6] L. E. Lundgaard, W. Hansen and S. Ingebrigtsen, **“Ageing of Mineral Oil impregnated Cellulose by Acid Catalysis,”** IEEE Trans. Dielectric and Electrical Insulation, Vol.15,No.2; April 2008
- [7] T. V. Oommen and T. A. Prevost, **“Cellulose insulation in oil-filled power transformers: part II maintaining insulation integrity and life,”** IEEE Elect. Insul. Mag., vol. 22, no. 2, pp. 5–14, 2006.
- [8] M. K. Pradhan, **“Assessment of the status of insulation during thermal stress accelerated experiments on transformer prototypes,”** IEEE Trans. Electr. Insul., vol. 13, no. 1, pp. 227–237, 2006.
- [9] A. J. Kachler and I. Hohlein, **“Aging of cellulose at transformer service temperatures. Part 1: Influence of type of oil and air on the degree of polymerization of pressboard, dissolved gases, and furanic compounds in oil,”** IEEE Elect. Insul. Mag., vol. 21, no. 2, pp. 15–21, 2005.
- [10] T. K. Saha, M. Darveniza, et al., **“Investigating the effects of oxidation and thermal degradation on electrical and chemical properties of power transformers insulation,”** IEEE Trans. Power Deliv., vol. 14, no. 4, pp. 1359–1367, 1999.

- [11] I. Hohlein and A. J. Kachler, "Aging of cellulose at transformer service temperatures. Part 2. Influence of moisture and temperature on degree of polymerization and formation of furanic compounds in free-breathing systems," *IEEE Elect. Insul. Mag.*, vol. 21, no. 5, pp. 20–24, 2005.
- [12] P. M. Mitchinson, I. L. Hosier, et al., "An Experiment to Evaluate the Benefits of Processing Aged Transformer Oil," in *Conf. Record IEEE Int. Symp. Elect. Insul.*, pp. 89–92, June 2006.
- [13] R. Ferguson, A. Lobeiras, et al., "Suspended particles in the liquid insulation of aging power transformers," *IEEE Elect. Insul. Mag.*, vol. 18, no. 4, pp. 17–23, 2002.
- [14] T. Leibfried, A. J. Kachler, et al., "Aging and Moisture Analysis of Power Transformer Insulation Systems," paper 12–1001, Presented at Int. Council Large Electric Syst. (CIGRE), Paris, 2002.
- [15] P. M. Mitchinson, P. L. Lewin, et al., "An Experiment for Evaluating the Scale Effect of Moisture on High Voltage Transformer Insulation," in *Conf. Record IEEE Int. Symp. Elect. Insul.*, pp. 218–221,
- [16] S. Itahashi, H. Mitsui, et al., "Analysis of water in oil-impregnated kraft paper and its effect on conductivity," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 2, no. 6, pp. 1111–1116, 1995.
- [17] B. Garcia, J.C. Burgos et al., "A moisture-in-oil model for power transformer monitoring - Part I: Theoretical foundation," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 2, Part 2, pp. 1417–1422, 2005.
- [18] B. Garcia, J.C. Burgos et al., "A moisture-in-oil model for power transformer monitoring - Part II: Experimental verification," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 2, Part 2, pp. 1423–1429, 2005.
- [19] Y. Du, M. Zahn, et al., "Moisture equilibrium in transformer paper oil systems," *IEEE Elect. Insul. Mag.*, vol. 15, no. 1, pp. 11–20, 1999.
- [20] Mail Koch, Stefan Tenbohlen "Diagnostics of Oil-Paper-Insulations Using Relaxation Current" Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, August 25-29, 2005
- [21] J. Fuhr, "PD-Source Localization in the Insulating System of Large Power Transformers," in *Conf. Record IEEE Int. Symp. Elect. Insul.*, pp. 424–427, June 2006.

- [22] J. Fuhr, **“Procedure for identification and localization of dangerous PD sources in power transformers,”** IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul., vol. 12, no. 5, pp. 1005–1014, 2005.
- [23] A. Mazhab Jafari , A. Akbari , H.R. Mirzaei , M. Kharezi and M. Allahb akhshi **“Investigating Practical Experiments of Partial Discharge Localization in Transformers using Winding Modeling;”** ,” IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul., Vol. 15, No. 4; August 2008
- [24] M. Duval and J. Dukarm, **“Improving the reliability of transformer gas-in-oil diagnosis,”** IEEE Elect. Insul. Mag., vol. 21, no. 4, pp. 21–27, 2005.
- [25] M. Duval, **“New techniques for dissolved gas-in-oil analysis,”** IEEE Elect. Insul. Mag., vol. 19, no. 2, pp. 6–15, 2003.
- [26] P. R. S. Jota, S. M. Islam, et al., **“Modeling the polarization spectrum in composite oil/paper insulation systems,”** IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul., vol. 6, no. 2, pp. 145–151, 1999.
- [27] J. P. van Bolhuis, E. Gulski, et al., **“Interpretation of RVM measurements, beyond the polarisation spectrum,”** in Conf. Record IEEE Int. Symp. Elect. Insul., pp. 179–182, April 2002.
- [28] Vahe Der Houhanessian and Walter S. Zaengl, **“Time Domain Measurements of Dielectric Response in Oil-Paper Insulation Systems”** Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, Quebec, Canada, June 16-19, 1996
- [29] Alff, J.J., Der Houhanessian V., Zaengl W.S. and Kachler A.J. **“A Novel, Compact Instrument for the Measurement and Evaluation of Relaxation Currents conceived for On-Site Diagnosis of Electrical Power Apparatus”**, 2000 IEEE ISEI, Anaheim, USA, pp. 161-167.
- [30] T. K. Saha and P. Purkait, **“Investigation of polarization and depolarization current measurements for the assessment of oil-paper insulation of aged transformers,”** IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul., vol. 11, no. 1, pp. 144–154, 2004.
- [31] T. K. Saha and P. Purkait, **“Investigation of an expert system for the condition assessment of transformer insulation based on dielectric response measurements,”** IEEE Trans. Power Deliv., vol. 19, no. 3, pp. 1127–1134, 2004.

- [32] T.K.Saha and P. Purkait, **“Understanding the Impacts of Moisture and Thermal Ageing on Transformer’s Insulation by Dielectric Response and Molecular Weight Measurements,”** IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul., vol. 15, no. 2, pp. 568–582, 2008.
- [33] T. Leibfried and A.J. Kachler **“Insulation Diagnostics on Power Transformer using the Polarisation and Depolarisation Current (PDC) Analysis,”** in 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, MA, USA, April 7-10, 2002, pp. 170-173.
- [34] S. Bhumiwat, P. Statmann **“Quality assurance after transformer refurbishment by means of polarisation depolarisation currents analysis,”** in 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference, Bologna, Italy, June 23-26, 2003 p. 90.
- [35] S. A. Bhumiwat, P. Phillips, **“Verification of on-site oil reclamation process by means of polarisation depolarisation currents analysis,”** in 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, IN, USA, September 19-22, 2004 pp 5-11.
- [36] S. A. Bhumiwat, **“Insulation condition assessment of transformer bushings by means of polarisation / depolarisation current analysis,”** in 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, IN, USA, September 19-22, 2004 pp 22-03.
- [37] S. A. Bhumiwat, **“The latest on-site non-destructive technique for insulation analysis of electrical power apparatus,”** 2004 Weidmann-ACTI annual technical conference, Sacramento, USA, November 8-10, 2004.
- [38] Dag Linhjell, Lars Lundgaard and Uno Gafvert **“ Dielectric Response of Mineral Oil Impregnated Cellulose and the Impact of Aging,”** IEEE Trans. Dielectric and Electrical Insulation, Vol. 14, No. 1; February 2007
- [39] CIGRE Task Force 15.01.09, **“Dielectric response methods for diagnostics of power transformers,”** IEEE Elect. Insul. Mag., vol. 19 no. 3, May/June 2003, pp. 12-17.
- [40] A. Setayeshmehr , I. Fofana , C. Eichler , A. Akbari , H. Borsi and E. Gockenbach **“Dielectric Spectroscopic Measurements on Transformer Oil-paper Insulation under Controlled Laboratory Conditions,”** IEEE Trans. Dielectric and Electrical Insulation, Vol. 15, No. 4; August 2008
- [41] Jorgen Blennow, Chandima Ekanayake, Kzysztof Walczak, Belen Garcia, and Stanislaw M. Gubanski, **“Field Experiences With Measurements of Dielectric Response in**

- Frequency Domain for Power Transformer Diagnostics,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 21, no. 2, April 2006.**
- [42] Chandima Ekanayake, Stanislaw M. Gubanski, Andrzej Graczkowski, and Krzysztof Walczak, **“Frequency Response of oil Impregnated Pressboard and Paper Samples for Estimating Moisture in Transformer Insulation,” IEEE Trans. Dielectric and Electrical Insulation, Vol. 21, No. 3; July 2006.**
- [43] W. S. Zaengl, **“Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for power equipment - theoretical considerations,” IEEE Elect. Insul. Mag., vol. 19, no. 5, pp. 5–19, 2003.**
- [44] W. S. Zaengl, **“Applications of dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment,” IEEE Elect. Insul. Mag., vol. 19, no. 6, pp. 9–22, 2003.**
- [45] A.K.Jonscher, **Dielectric Relaxation in Solids.** Chelsea Dielectric Press, 1983.
- [46] A.K.Jonscher, **“The ‘universal’ dielectric response: part I,” IEEE Elect. Insul. Mag., vol. 6, no. 2, 1990.**
- [47] A.K.Jonscher, **“The ‘universal’ dielectric response: part II,” IEEE Elect. Insul. Mag., vol. 6, no. 3, 1990.**
- [48] A.K.Jonscher, **“The ‘universal’ dielectric response: part III,” IEEE Elect. Insul. Mag., vol. 6, no. 4, 1990**
- [49] IEC Standard 60093, **“Methods of Test for Volume Resistivity and surface Resistivity of Electrical Insulating Material,” International Electrotechnical Commission, 1980.**
- [50] ASTM D150-98, **“Standard Test Methods for AC Loss Characteristics and Permittivity (Dielectric Constant) of Solid Electrical Insulation” American Society for Testing and Materials, 1998.**
- [51] นิรันดร์ คำประเสริฐ, **วิศวกรรมไฟฟ้าสถิต.** ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ, 2008
- [52] นรเศรษฐ พัฒนเดช, **“High Voltage Insulation maintenance, Examination and Diagnosis”**เอกสารประกอบการเรียนการสอนรายวิชา Selected Topics in High Voltage Engineering, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.
- [53] E.Kuffel, W.S.Zaengl and J.Kuffel, **High Voltage Engineering: Fundamentals.** Buterworth-Heinemann, 2000

- [54] V. DerHouhanessian and W.S. Zaengl, “Application of relaxation current measurements to on-site diagnosis of powertransformers,” in 1997 CEIDP, Minneapolis, MN, 1997, IEEE Publication 97CH36046, pp. 45-51
- [55] T. K. Saha, P. Purkait, et al., “Deriving an equivalent circuit of transformers insulation for understanding the dielectric response measurements,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 20, no. 1, pp. 149–157, 2005.
- [56] Weidmann Compendium Version 1.1 e/d English Edition
- [57] H.P.Moser, Transformerboard. Weidmann, 1979
- [58] H.P.Moser and V.Dahinden, Transformerboard II. Weidmann, 1987
- [59] T. V. Oommen and T. A. Prevost, “Cellulose insulation in oil-illed power transformers: Part I - history and development,” IEEE Elect. Insul. Mag., vol. 22, no. 1, pp. 28–35, 2006.
- [60] แผนกทดสอบสภาพฉนวนและวิเคราะห์, “การกำนัคของบิโตรเดียม” เอกสารประกอบการบรรยาย, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- [61] S.D.Myers, J.J.Kelly and R.H.Parrish, A Guide To Transformer Maintenance. America, Transformer Maintenance Institute,1981.
- [62] TXM SERVICES SDN. BHD.and POWER INTEGRATION Co.Ltd.“TRANSFORMER LIFE EXTENSION SERVICES(TLES)” เอกสารประกอบการบรรยาย
- [63] <http://www.ieh.uni-stuttgart.de>
- [64] IEEE Std 62-1995, “IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatuso Part 1: Oil Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors,” Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1995
- [65] Sivaji Chakravorti, “Condition Mornitoring of Oil-Paper Composite Insulation System of Transformers,”เอกสารประกอบการบรรยาย
- [66] Omicron , “DIRANA Dielectric Response Analyzer,” เอกสารประกอบการบรรยาย
- [67] ALFF Engineering, “Quality Assessment of Power Transformer Insulation,” คู่มือประกอบการใช้เครื่อง PDC-analyser-1MOD
- [68] อภิชาติ นิมเทียบ, นรเศรษฐ พัฒนเดช, กฤษวัฒน์ ทองแกมแก้ว, และ ประภาส ไพรสุวรรณ “เทคนิคตรวจวัดความชื้นของกระดาษฉนวนของหม้อแปลง โดยใช้กระแสโพลาริซเซชันและกระแสดีโพลาริซเซชัน” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31 29-31 ตุลาคม 2551 ณ รอยลฮิวส์ จังหวัด นครนายก หน้า 315-318

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [69] Michal Lisowski and Ryszard Kacprzyk, **“Changes Proposed for the IEC 60093 Standard Concerning Measurements of the Volume and Surface Resistivities of Electrical Insulating Materials,”** IEEE Trans. Dielectric and Electrical Insulation, Vol. 13, No. 1; February 2006
- [70] IEC 60243-1, **“Electrical strength of insulating materials-part 1: Test at power frequencies”** International Electrotechnical Commission, 1998.
- [71] ASTM D 3277-95, **“Standard Test Methods for Moisture Content of Oil-Impregnated Cellulosic Insulation”** American Society for Testing and Materials, 1995.
- [72] ASTM D1533-00, **“Standard Test Method for Water in Insulating Liquids by Coulometric Karl Fischer”** American Society for Testing and Materials, 2000.
- [73] ASTM D 877-02, **“Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of insulating Liquids Using Disk Electrode”** American Society for Testing and Materials, 2000.
- [74] สำรวย สังข์สะอาด, **“วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง”** ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549
- [75] ALFF Engineering, **“User's Guide (for the Standard Version),”** คู่มือประกอบการใช้เครื่อง PDC-analyser-1MOD
- [76] ALFF Engineering, **“User's Guide (for the Input of Geometry Parameters in the Advanced Evaluation Tools),”** คู่มือประกอบการใช้เครื่อง PDC-analyser-1MOD
- [77] ABB Service Handbook for Transformer
- [78] T.K.Saha and P. Purkait, **“Investigation of Temperature Effects on the Dielectric Response Measurements of Transformer Oil-Paper Insulation System,”** IEEE Trans. Power Deliv., vol. 23, no. 1, pp.252–260, 2008.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.
การวัดค่าความชื้นภายในเพรสบอร์ค
ตามมาตรฐาน ASTM D 3277-65

ก.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ

1. เมทานอล
2. คลอโรฟอร์ม (Chloroform)
3. น้ำยาคาร์ลฟิชเชอร์

ก.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่อง Coulometric Karl Fischer Titration
2. เครื่องกวนแห้งแม่เหล็ก และแห้งแม่เหล็ก
3. เครื่องดูดสูญญากาศ และตัวกรองพอร์ชเลน
4. ขวดแก้ว ขนาด 250 มิลลิลิตร
5. บีกเกอร์ ขนาด 100 มิลลิลิตร
6. เข็มฉีดยา ขนาด 10 มิลลิลิตร
7. ตู้อบ
8. เคสซิเคเตอร์
9. สว่าน
10. เครื่องชั่งน้ำหนัก 5 ตำแหน่ง

ก.3 วิธีการทดสอบ

1. ผสมเมทานอล 100 มิลลิลิตร กับ คลอโรฟอร์ม 50 มิลลิลิตร (2:1, เมทานอล:คลอโรฟอร์ม) ใส่ในขวดแก้วขนาด 250 มิลลิลิตร (ที่ผ่านการอบมาแล้วที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง) ทำการแยกสารที่ผสมกันแล้วออกเป็น 3 ขวด ในปริมาตรขวดละ 50 มิลลิลิตร (ขวดแรกสำหรับใส่กระดาษเพรสบอร์ค ขวดที่สองเป็นสารที่ไม่ใส่กระดาษเพรสบอร์คซึ่งเตรียมไว้สำหรับหักลบกับค่าความชื้นของขวดที่ใส่กระดาษเพรสบอร์ค และขวดที่สามเหลือไว้สำหรับการทดสอบซ้ำ)

2. ทำการเจาะกระดาษเพรสบอร์คให้เป็นผงด้วยสว่าน ซึ่งผงเพรสบอร์คให้ได้ประมาณ 0.3 กรัม และใส่ในขวดที่มีส่วนผสมของข้อ 1 ที่มีปริมาตร 50 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุใดเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ใส่แท่งแม่เหล็กลงในขวด แล้วทำการปั่นกวนด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก เป็นเวลา 45 นาที
4. ใช้เข็มฉีดยา ขนาด 10 มิลลิลิตร คูดสารในขวดมา 5 มิลลิลิตร แล้วฉีดเข้าเครื่อง Coulometric Karl Fischer Titration (มีน้ำยาคาร์ลฟิชเชอร์อยู่ภายในเครื่อง) หลังจากผ่านไป 1 นาทีให้อ่านค่าที่แสดงเป็นไมโครกรัม
5. ทำการกรองผงกระดาษผ่านตัวกรองพอร์ซเลนที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน ด้วยเครื่องดูดสุญญากาศ อบกระดาษพร้อมตัวกรองพอร์ซเลนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นในเดสซิเคเตอร์ หลังจากนั้นทำการชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักกระดาษ
6. สามารถคำนวณหาของน้ำในกระดาษสามารถหาได้ดังนี้

$$\text{water, weight\%} = \frac{V_E (W_g - W_b)}{5W \times 10^4} \quad (\text{ก1})$$

เมื่อ V_E คือ ปริมาตรของสารผสม (มิลลิลิตร)
 W_g คือ ไมโครกรัมของน้ำในสารที่มีกระดาษ (ไมโครกรัม)
 W_b คือ ไมโครกรัมของน้ำในสารที่ไม่มีกระดาษ (ไมโครกรัม)
 W คือ น้ำหนักของกระดาษแห้ง (กรัม)



ก)



ข)

รูปที่ ก.1 ก) คาร์ลฟิชเชอร์ Metrohm รุ่น 733 ข) ผงเพอร์สبورด์ผสมกับเมตทานอลและโคโดฟอติ้มสำหรับการตรวจวัดความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.
การวัดค่าความชื้นภายในน้ำมัน
ตามมาตรฐาน ASTM D 1533

ข.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ

1. น้ำยาคาร์ลฟิชเชอร์

ข.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่อง Coulometric Karl Fischer Titration
2. เครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก และแท่งแม่เหล็ก
3. เข็มฉีดยา ขนาด 10 มิลลิลิตร
4. ฝอยบ
5. เคสซิเคเตอร์
6. เครื่องชั่งน้ำหนัก 5 ตำแหน่ง

ข.3 วิธีการทดสอบ

1. ทำความสะอาดเข็มฉีดยาด้วยเมทานอล และอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นในเคสซิเคเตอร์
2. นำเข็มฉีดยาคูดน้ำมัน 5 มิลลิลิตร แล้วชั่งน้ำหนัก
3. ฉีดน้ำมันเข้าเครื่อง Coulometric Karl Fischer Titration (มีน้ำยาคาร์ลฟิชเชอร์อยู่ภายในเครื่อง) อ่านค่าที่แสดงเป็นไมโครกรัม
4. ชั่งน้ำหนักเข็มฉีดยา (นำน้ำหนักของเข็มฉีดยาก่อนฉีดน้ำมันลบกับน้ำหนักเข็มฉีดยาหลังฉีดน้ำมันจะได้มวลของน้ำมันที่ผสมกับน้ำ)
5. สามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของน้ำในน้ำมันได้ดังนี้

$$mg / kg (ppm) = \frac{A}{B} \quad (ข1)$$

เมื่อ A คือ มวลของน้ำ (ไมโครกรัม)

B คือ มวลของน้ำมันที่ผสมกับน้ำ (กรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

การวัดค่าความเป็นกรดภายในน้ำมัน

ตามมาตรฐาน ASTM D664-07

ก.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ

1. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (potassium hydroxide)
2. โพรพาน-2-ออล (propan-2-ol)
3. โทลูอิน (toluene)
4. น้ำกลั่น

ก.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่องไทเทรต (Metrohm Titrino 716)
2. บีกเกอร์ (baker)
3. เครื่องกรองสุญญากาศ
4. ขวดสีขาขนาด 1 ลิตร

ก.3 การเตรียมสารเคมี

1. Potassium Hydroxide, Standard Alcoholic (0.1 mol/L)
ชั่งโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 6 กรัม ผสมกับ โพรพาน-2-ออล ปริมาตร 1 ลิตร คัมให้ความร้อน 10 นาที ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 2 วันภายในขวดสีขา แล้วทำการกรองตะกอนออก เก็บสารไว้ในขวดสีขาที่ต่อกับชุดซลิคา (ป้องกันคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂))
2. Titration solvent
ผสมน้ำ โพรพาน-2-ออล และ โทลูอิน ปริมาตร 5±0.2, 495±5, 500±5 มิลลิลิตร ตามลำดับ

ก.4 วิธีการทดสอบ

1. เตรียมสารละลายไทเทรชัน 125 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำมัน 10 กรัม
2. ไทเทรตด้วย Standard Alcoholic ในช่วง 0.05 – 0.5 มิลลิลิตร
3. เมื่อพบจุดยุติ (equivalent point) เครื่องจะหยุดทำงาน อ่านค่าที่ได้

4. ให้ทำความสะอาดขั้วด้วย โฟฟาน-2-อล ตามด้วยน้ำกลั่น และแช่ทิ้งไว้ในน้ำกลั่น 5 นาที (เพื่อให้เยื่อแก้วอิมมิตด้วยน้ำ)
5. ทำการตรวจสอบความเป็นกรดของเบลงค์ (สารละลายไทเทรตชัน 125 มิลลิลิตร ที่ไม่เติมน้ำมัน) ทำซ้ำข้อ 2 – 4
6. คำนวณหาปริมาณกรดได้ดังนี้

$$\text{Acid number, KOH / g} = (A - B) \times M \times 56.1 / W \quad (\text{ค1})$$

เมื่อ A คือ ปริมาตรแอลกอฮอล์ KOH ที่ใช้ในการไทเทรตกับสารละลายตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

B คือ ปริมาตรแอลกอฮอล์ KOH ที่ใช้ในการไทเทรตกับเบลงค์ (มิลลิลิตร)

M คือ ความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ KOH (mol/L)

W คือ มวลของสารตัวอย่าง (กรัม)



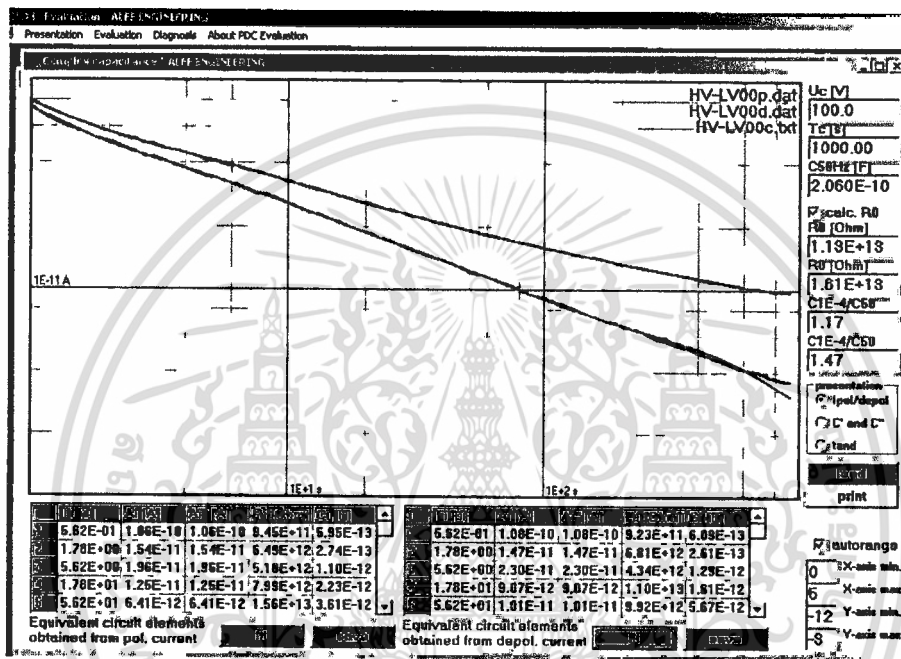
รูปที่ ค.1 การวัดค่าความเป็นกรดภายในน้ำมันด้วยเครื่อง ไทเทรต (Metrohm Titrino 716)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

การจำลองกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชัน

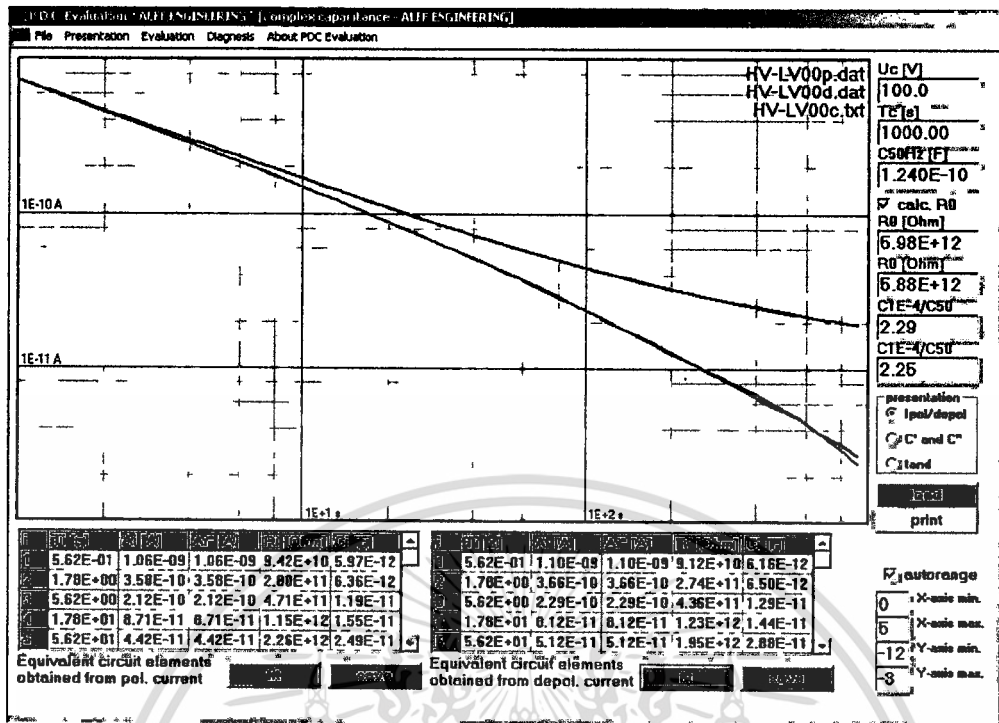
ง.1 การจำลองกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชันจนวนเพรสบอร์คุ่มน้ำมัน เมื่อเพรสบอร์คมี ความชื้นแตกต่างกัน



รูปที่ ง.1 การจำลองกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชันจนวนเพรสบอร์คความชื้น 1.7 % คุ่มในน้ำมันใหม่ที่ มีความชื้น 17.77 ppm

ตารางที่ ง.1 ค่าที่ได้จากการจำลองกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชันจนวนเพรสบอร์คความชื้น 1.7 % คุ่ม ในน้ำมันใหม่ที่มีความชื้น 17.77 ppm

i	Ti [s]	Ai [A]	Ai* [A]	Ri [ohm]	Ci [F]
1	5.62E-01	1.08E-10	1.08E-10	9.23E+11	6.09E-13
2	1.78E+00	1.47E-11	1.47E-11	6.81E+12	2.61E-13
3	5.62E+00	2.30E-11	2.30E-11	4.34E+12	1.29E-12
4	1.78E+01	9.07E-12	9.07E-12	1.10E+13	1.61E-12
5	5.62E+01	1.01E-11	1.01E-11	9.92E+12	5.67E-12
6	1.78E+02	7.10E-13	7.12E-13	1.40E+14	1.27E-12
7	1.00E+03	7.58E-12	1.20E-11	8.34E+12	1.20E-10

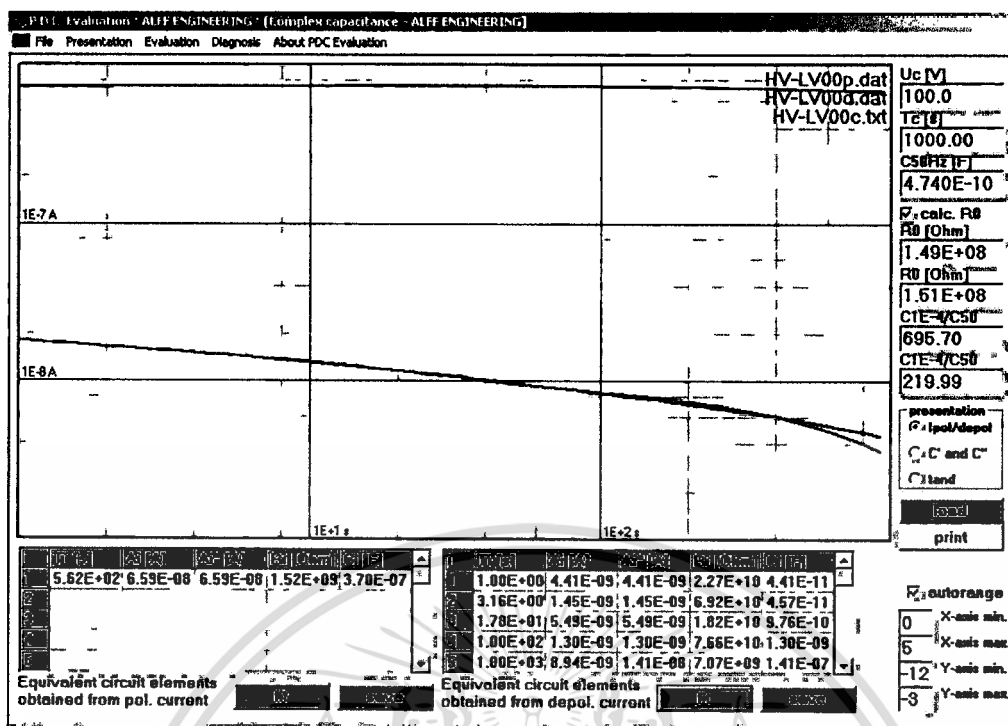


รูปที่ ง.2 การจำลองกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชันจนวนเพรสบอร์ดความชื้น 3.7 % จุ่มในน้ำมันใหม่ที่มีความชื้น 17.77 ppm

ตารางที่ ง.2 ค่าที่ได้จากการจำลองกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชันจนวนเพรสบอร์ดความชื้น 3.7 % จุ่มในน้ำมันใหม่ที่มีความชื้น 17.77 ppm

i	Ti [s]	Ai [A]	Ai* [A]	Ri [ohm]	Ci [F]
1	5.62E-01	1.10E-09	1.10E-09	9.12E+10	6.16E-12
2	1.78E+00	3.66E-10	3.66E-10	2.74E+11	6.50E-12
3	5.62E+00	2.29E-10	2.29E-10	4.36E+11	1.29E-11
4	1.78E+01	8.12E-11	8.12E-11	1.23E+12	1.44E-11
5	5.62E+01	5.12E-11	5.12E-11	1.95E+12	2.88E-11
6	1.78E+02	8.51E-12	8.55E-12	1.17E+13	1.52E-11
7	5.62E+02	1.19E-11	1.44E-11	6.96E+12	8.08E-11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



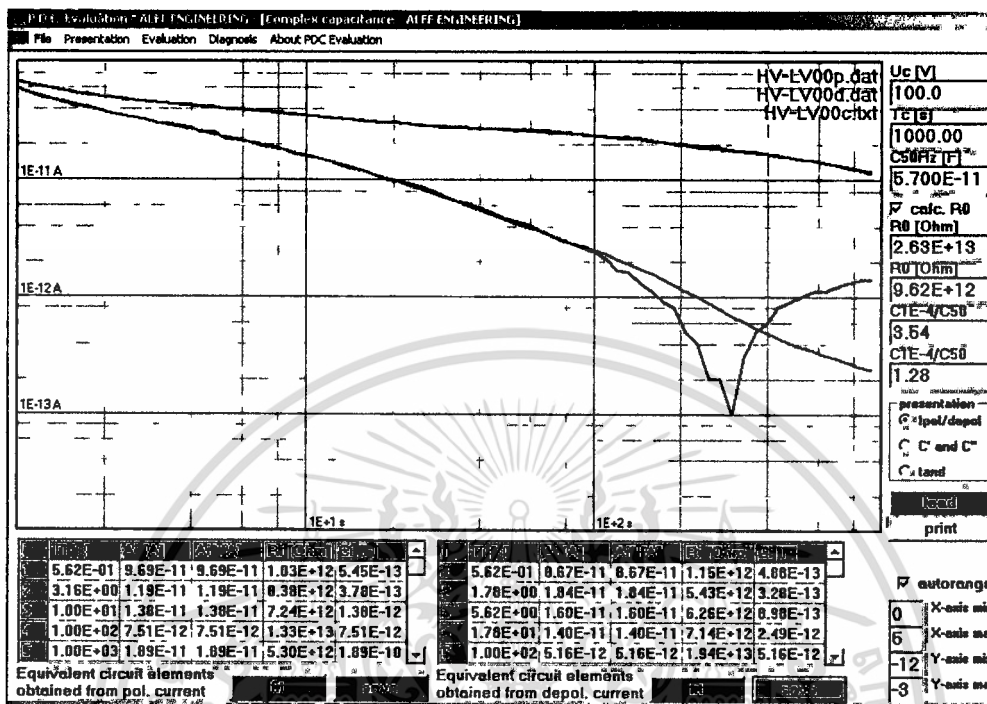
รูปที่ ง.3 การจำลองกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชันจนวนเพรสบอร์ดความชื้น 5.5 % จุ่มในน้ำมันใหม่ที่มีความชื้น 17.77 ppm

ตารางที่ ง.3 ค่าที่ได้จากการจำลองกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชันจนวนเพรสบอร์ดความชื้น 5.5 % จุ่มในน้ำมันใหม่ที่มีความชื้น 17.77 ppm

i	Ti [s]	Ai [A]	Ai* [A]	Ri [ohm]	Ci [F]
1	1.00E+00	4.41E-09	4.41E-09	2.27E+10	4.41E-11
2	3.16E+00	1.45E-09	1.45E-09	6.92E+10	4.57E-11
3	1.78E+01	5.49E-09	5.49E-09	1.82E+10	9.76E-10
4	1.00E+02	1.30E-09	1.30E-09	7.66E+10	1.30E-09
5	1.00E+03	8.94E-09	1.41E-08	7.07E+09	1.41E-07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง.2 การจำลองกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชันจนวนเพรสบอร์คุ่มน้ำมัน เมื่อความชื้นในน้ำมันแตกต่างกัน

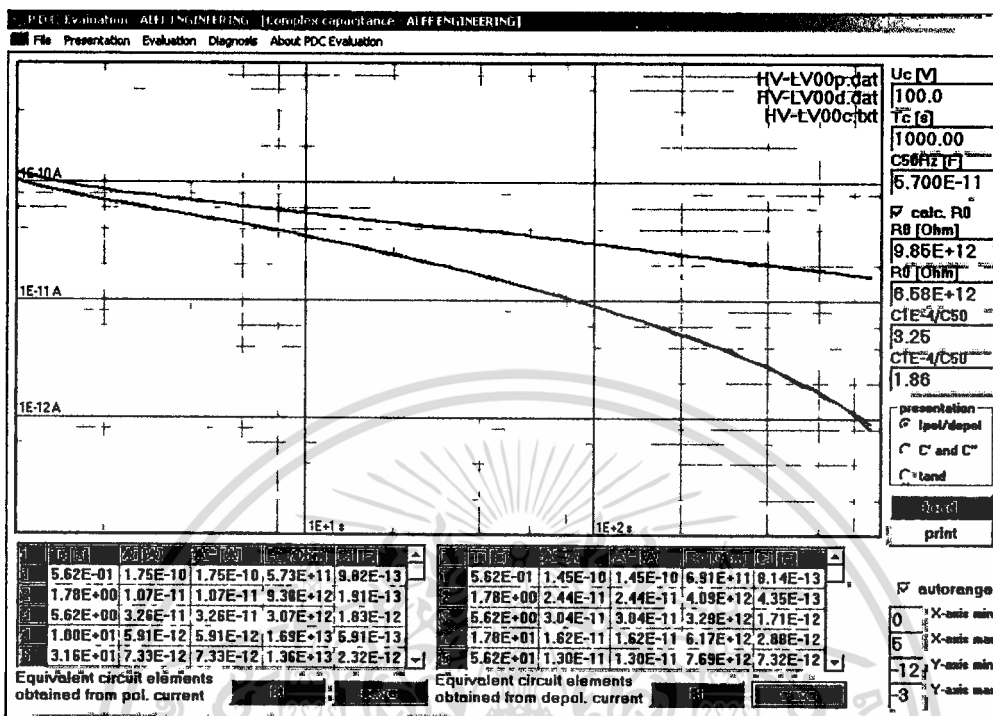


รูปที่ ง.4 การจำลองกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชันจนวนเพรสบอร์คความชื้น 1.7 % คุ่มในน้ำมันใหม่ที่มีความชื้น 21.39 ppm

ตารางที่ ง.4 ค่าที่ได้จากการจำลองกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชันจนวนเพรสบอร์คความชื้น 1.7 % คุ่มในน้ำมันใหม่ที่มีความชื้น 21.39 ppm

i	Ti [s]	Ai [A]	Ai* [A]	Ri [ohm]	Ci [F]
1	5.62E-01	8.67E-11	8.67E-11	1.15E+12	4.88E-13
2	1.78E+00	1.84E-11	1.84E-11	5.43E+12	3.28E-13
3	5.62E+00	1.60E-11	1.60E-11	6.26E+12	8.98E-13
4	1.78E+01	1.40E-11	1.40E-11	7.14E+12	2.49E-12
5	1.00E+02	5.16E-12	5.16E-12	1.94E+13	5.16E-12
6	1.00E+03	5.90E-13	9.33E-13	1.07E+14	9.33E-12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



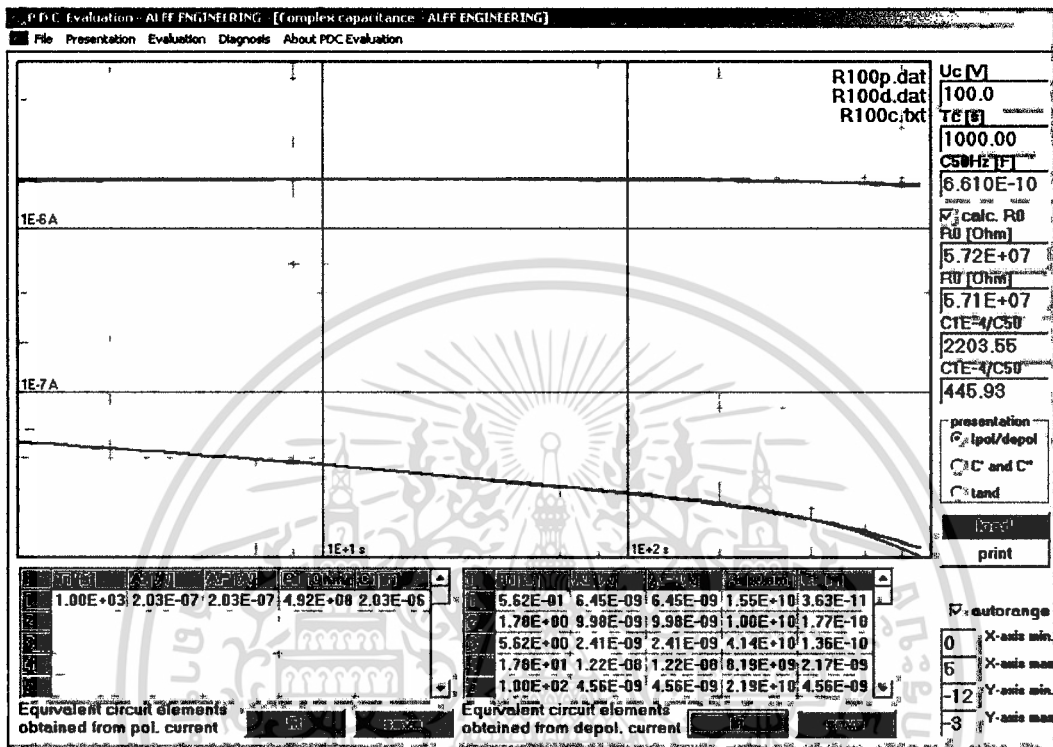
รูปที่ ๖.5 การจำลองกระแสดีโพลาร์ไซเซชันฉนวนเพอร์สอร์คความชื้น 1.7 % จุ่มในน้ำมันใหม่ที่
มีความชื้น 23.43 ppm

ตารางที่ ๖.5 ค่าที่ได้จากการจำลองกระแสดีโพลาร์ไซเซชันฉนวนเพอร์สอร์คความชื้น 1.7 % จุ่ม
ในน้ำมันใหม่ที่มีความชื้น 23.43 ppm

i	Ti [s]	Ai [A]	Ai* [A]	Ri [ohm]	Ci [F]
1	5.62E-01	1.45E-10	1.45E-10	6.91E+11	8.14E-13
2	1.78E+00	2.44E-11	2.44E-11	4.09E+12	4.35E-13
3	5.62E+00	3.04E-11	3.04E-11	3.29E+12	1.71E-12
4	1.78E+01	1.62E-11	1.62E-11	6.17E+12	2.88E-12
5	5.62E+01	1.30E-11	1.30E-11	7.69E+12	7.32E-12
6	1.78E+02	5.37E-12	5.39E-12	1.86E+13	9.58E-12
7	5.62E+02	4.38E-12	5.27E-12	1.90E+13	2.97E-11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง.3 การจำลองกระแสไฟฟ้าโพลาร์ไรซ์เซชันจนวนเพรสบอร์ดน้ำมัน เมื่อเพรสบอร์ดมีความชื้นแตกต่างกันและน้ำมันมีความเป็นกรด



รูปที่ ง.6 การจำลองกระแสไฟฟ้าโพลาร์ไรซ์เซชันจนวนเพรสบอร์ดความชื้น 5.5 % จุ่มในน้ำมันเก่าที่มี

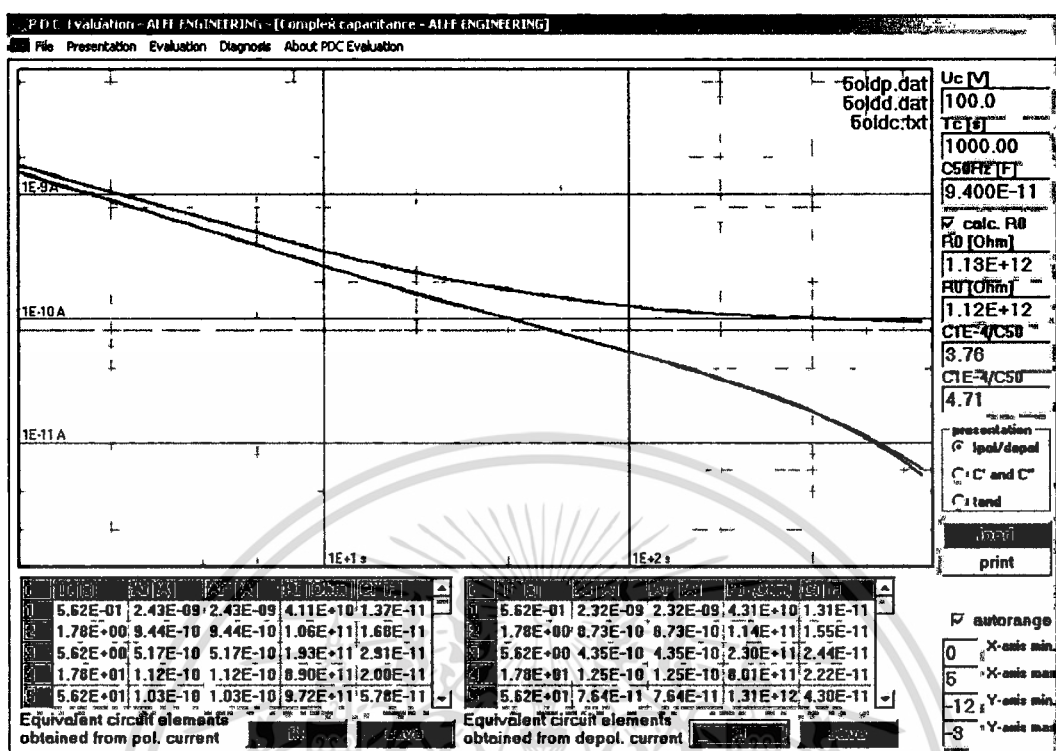
Total acid number = 0.09

ตารางที่ ง.6 ค่าที่ได้จากการจำลองกระแสไฟฟ้าโพลาร์ไรซ์เซชันจนวนเพรสบอร์ดความชื้น 5.5 % จุ่มในน้ำมันเก่าที่มี Total acid number = 0.09

i	Ti [s]	Ai [A]	Ai* [A]	Ri [ohm]	Ci [F]
1	5.62E-01	6.45E-09	6.45E-09	1.55E+10	3.63E-11
2	1.78E+00	9.98E-09	9.98E-09	1.00E+10	1.77E-10
3	5.62E+00	2.41E-09	2.41E-09	4.14E+10	1.36E-10
4	1.78E+01	1.22E-08	1.22E-08	8.19E+09	2.17E-09
5	1.00E+02	4.56E-09	4.56E-09	2.19E+10	4.56E-09
6	1.00E+03	2.53E-08	4.00E-08	2.50E+09	4.00E-07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และเผยแพร่โดยไม่หวังผลกำไร หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง.7 การจำลองกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชันบนพอร์สความชื้น 3.7% จุ่มในน้ำมันเก่าที่มี

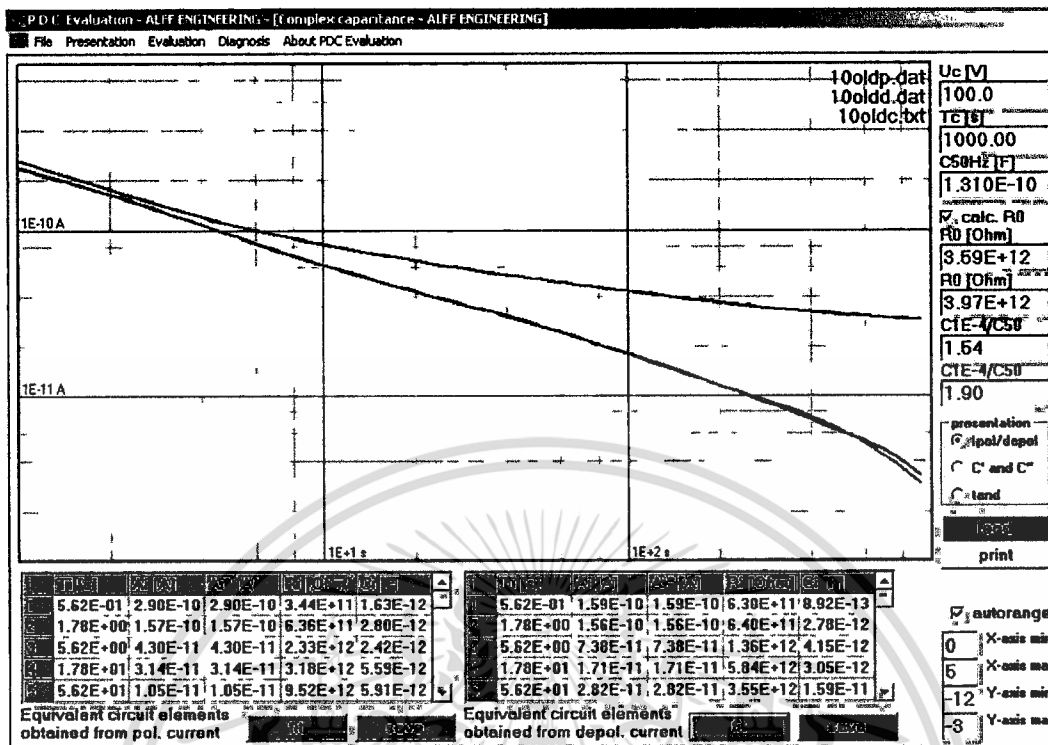
Total acid number = 0.09

ตารางที่ ง.7 ค่าที่ได้จากการจำลองกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชันบนพอร์สความชื้น 3.7 % จุ่ม

ในน้ำมันเก่าที่มี Total acid number = 0.09

i	Ti [s]	Ai [A]	Ai* [A]	Ri [ohm]	Ci [F]
1	5.62E-01	2.32E-09	2.32E-09	4.31E+10	1.31E-11
2	1.78E+00	8.73E-10	8.73E-10	1.14E+11	1.55E-11
3	5.62E+00	4.35E-10	4.35E-10	2.30E+11	2.44E-11
4	1.78E+01	1.25E-10	1.25E-10	8.01E+11	2.22E-11
5	5.62E+01	7.64E-11	7.64E-11	1.31E+12	4.30E-11
6	1.78E+02	2.81E-11	2.82E-11	3.54E+12	5.02E-11
7	5.62E+02	3.00E-11	3.61E-11	2.77E+12	2.03E-10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



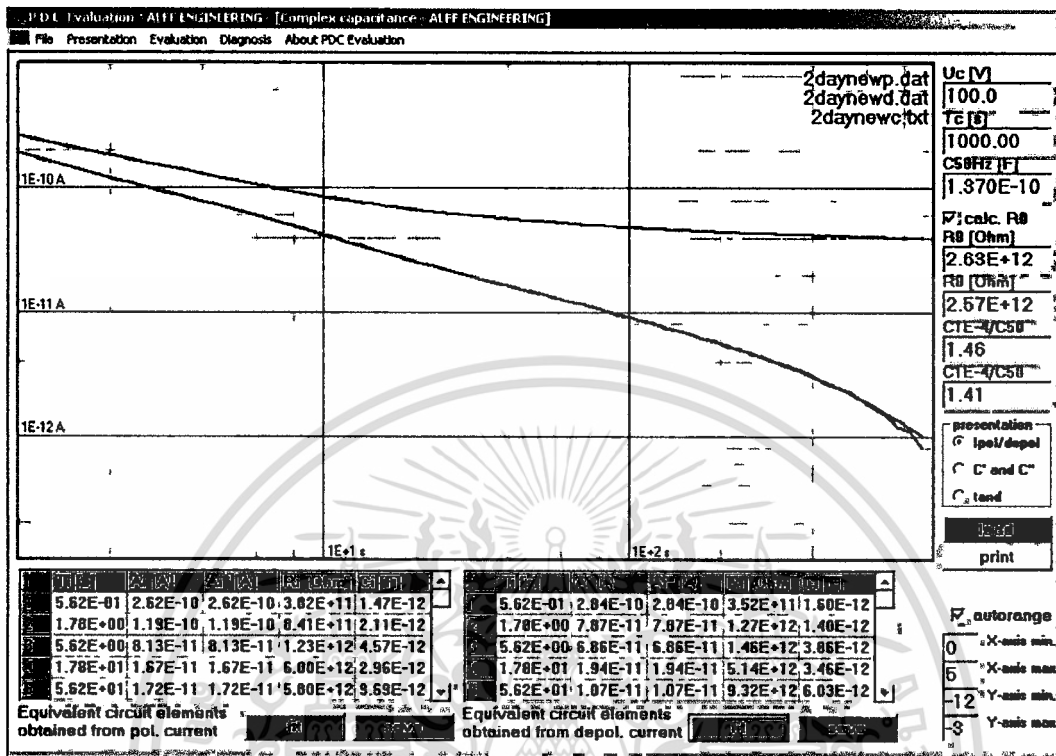
รูปที่ ๖.๘ การจำลองกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชันจนพบสมรรถนะความชื้น 1.7 % จุ่มในน้ำมันเก่าที่มี Total acid number = 0.09

ตารางที่ ๖.๘ ค่าที่ได้จากการจำลองกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชันจนพบสมรรถนะความชื้น 1.7 % จุ่มในน้ำมันเก่าที่มี Total acid number = 0.09

i	Ti [s]	Ai [A]	Ai* [A]	Ri [ohm]	Ci [F]
1	5.62E-01	1.59E-10	1.59E-10	6.30E+11	8.92E-13
2	1.78E+00	1.56E-10	1.56E-10	6.40E+11	2.78E-12
3	5.62E+00	7.38E-11	7.38E-11	1.36E+12	4.15E-12
4	1.78E+01	1.71E-11	1.71E-11	5.84E+12	3.05E-12
5	5.62E+01	2.82E-11	2.82E-11	3.55E+12	1.59E-11
6	1.78E+02	9.59E-13	9.62E-13	1.04E+14	1.71E-12
7	5.62E+02	1.49E-11	1.79E-11	5.58E+12	1.01E-10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง.4 การจำลองกระแสดีโพลาริซ์เซชันจนจนเพรสอร์คุ่มน้ำมัน เมื่อความชื้นของ
จนจนเพรสอร์คุ่มน้ำมันที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความชื้นในบรรยากาศ



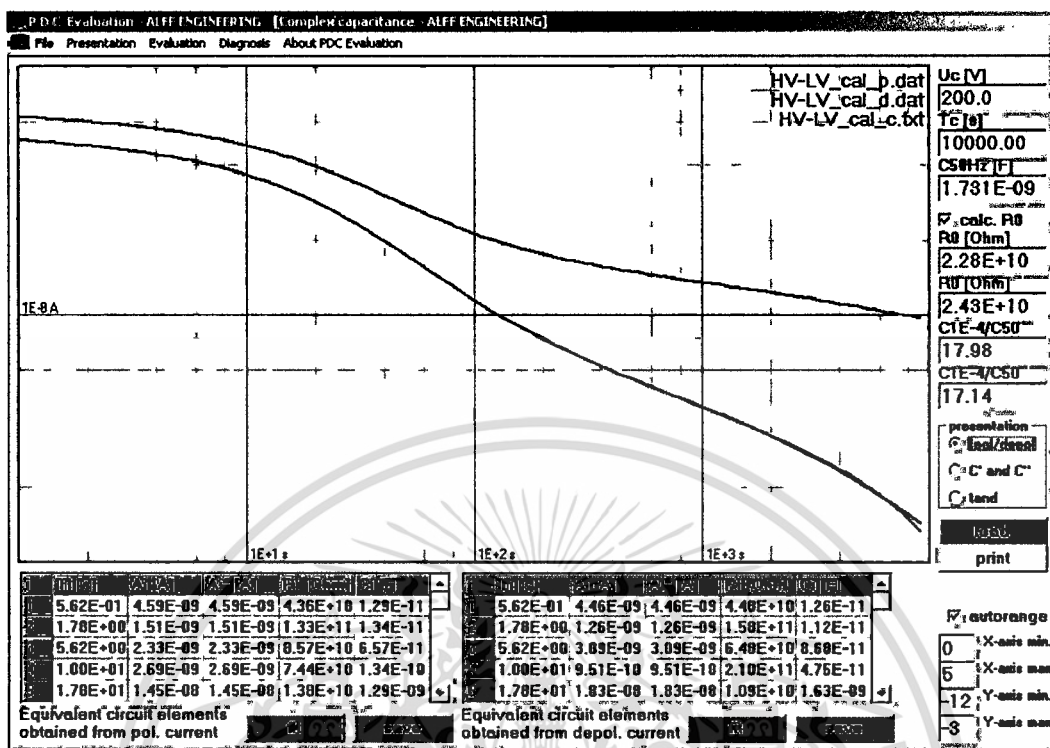
รูปที่ ง.9 การจำลองกระแสดีโพลาริซ์เซชัน จนจนเพรสอร์คุ่มความชื้น 1.7 % จุ่มในน้ำมันเก่าทิ้งไว้ให้ได้รับความชื้นในบรรยากาศเป็น 48 ชั่วโมง

ตารางที่ ง.9 ค่าที่ได้จากการจำลองกระแสดีโพลาริซ์เซชัน จนจนเพรสอร์คุ่มความชื้น 1.7 % จุ่มในน้ำมันเก่าทิ้งไว้ให้ได้รับความชื้นในบรรยากาศเป็น 48 ชั่วโมง

i	Ti [s]	Ai [A]	Ai* [A]	Ri [ohm]	Ci [F]
1	5.62E-01	2.84E-10	2.84E-10	3.52E+11	1.60E-12
2	1.78E+00	7.87E-11	7.87E-11	1.27E+12	1.40E-12
3	5.62E+00	6.86E-11	6.86E-11	1.46E+12	3.86E-12
4	1.78E+01	1.94E-11	1.94E-11	5.14E+12	3.46E-12
5	5.62E+01	1.07E-11	1.07E-11	9.32E+12	6.03E-12
6	1.78E+02	5.55E-12	5.57E-12	1.79E+13	9.91E-12
7	5.62E+02	4.95E-12	5.95E-12	1.68E+13	3.35E-11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

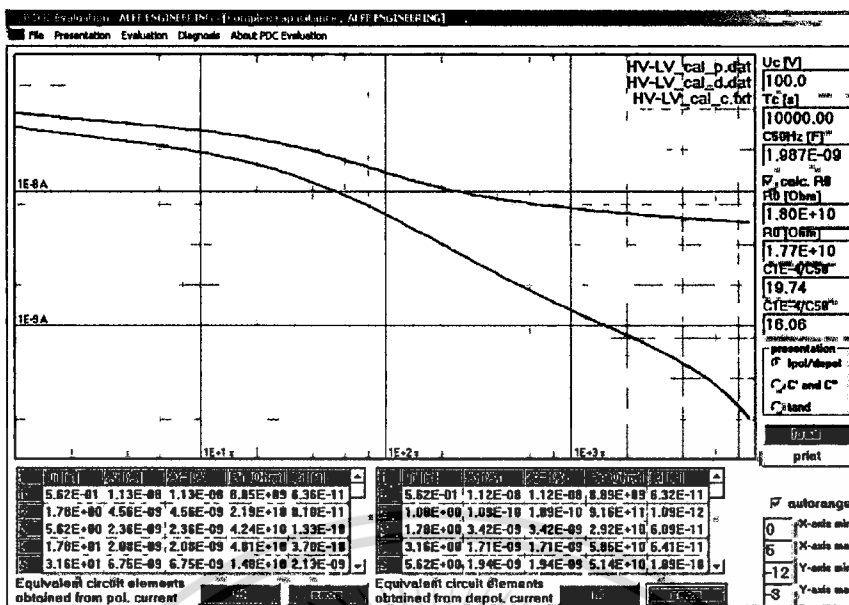
จ.5 การจำลองกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชัน ฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง



รูปที่ ง.10 การจำลองกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชัน ฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 500 kVA 33kV/380 V

ตารางที่ ง.10 ค่าที่ได้จากการจำลองกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชัน ฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 500 kVA 33kV/380 V

i	Ti [s]	Ai [s]	Ai* [A]	Ri [ohm]	Ci [F]
1	5.62E-01	4.46E-09	4.46E-09	4.48E+10	1.26E-11
2	1.78E+00	1.26E-09	1.26E-09	1.58E+11	1.12E-11
3	5.62E+00	3.09E-09	3.09E-09	6.48E+10	8.68E-11
4	1.00E+01	9.51E-10	9.51E-10	2.10E+11	4.75E-11
5	1.78E+01	1.83E-08	1.83E-08	1.09E+10	1.63E-09
6	3.16E+01	5.12E-09	5.12E-09	3.91E+10	8.09E-10
7	5.62E+01	1.25E-08	1.25E-08	1.60E+10	3.51E-09
8	1.78E+02	4.31E-09	4.31E-09	4.65E+10	3.83E-09
9	5.62E+02	2.36E-09	2.36E-09	8.47E+10	6.64E-09
10	1.78E+03	1.43E-09	1.44E-09	1.39E+11	1.28E-08
11	1.00E+04	3.32E-09	5.25E-09	3.81E+10	2.63E-07



รูปที่ ง.11 การจำลองกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชัน จำนวนหม้อแปลงไฟฟ้า 600 kVA 22kV/380 V

ตารางที่ ง.11 ค่าที่ได้จากการจำลองกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชัน หม้อแปลงไฟฟ้า 600 kVA 22kV/380 V

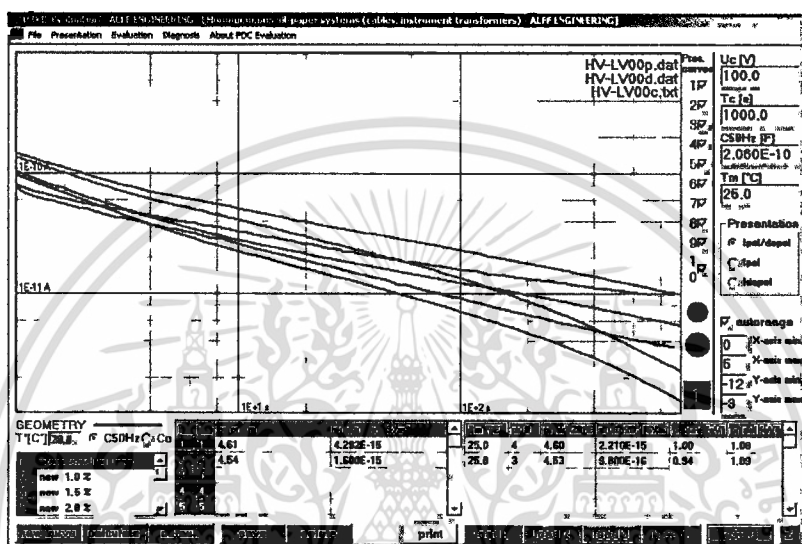
i	Ti [s]	Ai [A]	Ai* [A]	Ri [ohm]	Ci [F]
1	5.62E-01	1.12E-08	1.12E-08	8.89E+09	6.32E-11
2	1.00E+00	1.09E-10	1.09E-10	9.16E+11	1.09E-12
3	1.78E+00	3.42E-09	3.42E-09	2.92E+10	6.09E-11
4	3.16E+00	1.71E-09	1.71E-09	5.85E+10	5.41E-11
5	5.62E+00	1.94E-09	1.94E-09	5.14E+10	1.09E-10
6	1.00E+01	5.84E-10	5.84E-10	1.71E+11	5.84E-11
7	1.78E+01	3.87E-09	3.87E-09	2.59E+10	6.88E-10
8	3.16E+01	4.77E-09	4.77E-09	2.10E+10	1.51E-09
9	5.62E+01	5.28E-09	5.28E-09	1.89E+10	2.97E-09
10	1.00E+02	2.51E-09	2.51E-09	3.98E+10	2.51E-09
11	1.78E+02	3.39E-09	3.39E-09	2.95E+10	6.03E-09
12	5.62E+02	1.77E-09	1.77E-09	5.65E+10	9.95E-09
13	1.78E+03	2.53E-10	2.53E-10	3.95E+11	4.51E-09
14	5.62E+03	1.02E-09	1.22E-09	8.17E+10	6.89E-08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

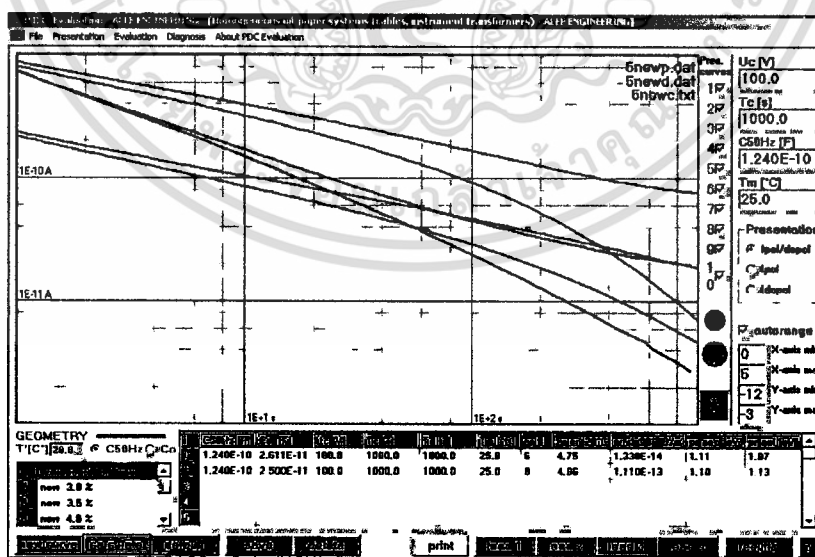
ภาคผนวก จ.

การวัดความชื้นฉนวนเพรสบอร์คุ่มน้ำมันด้วย PDC- analyser

จ.1 การวัดความชื้นฉนวนเพรสบอร์คุ่มน้ำมันด้วย PDC- analyser เมื่อเพรสบอร์คมีความชื้นแตกต่างกัน

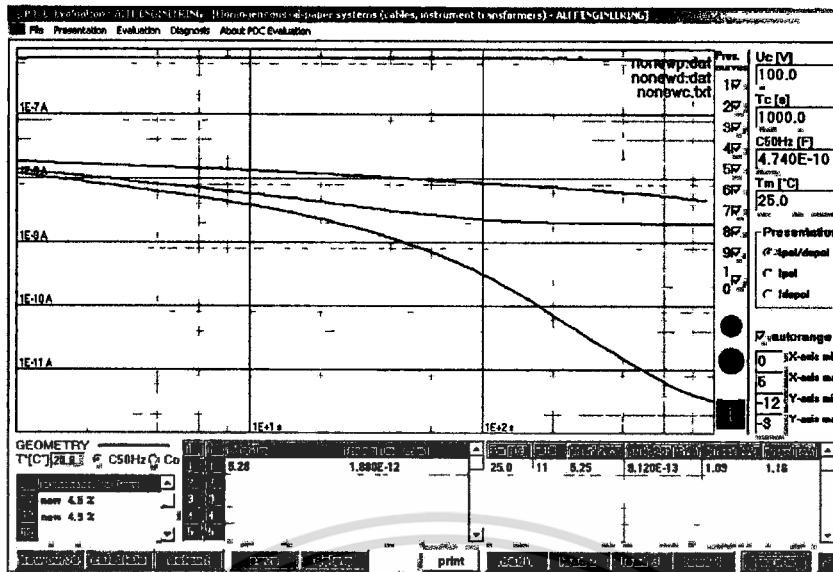


รูปที่ จ.1 การวัดความชื้นฉนวนเพรสบอร์คความชื้น 1.7 % คุ่มในน้ำมันใหม่ที่มีความชื้น 17.77 ppm ด้วย PDC- analyserพบว่ามีความชื้นในเพรสบอร์คประมาณ 1-1.5 %



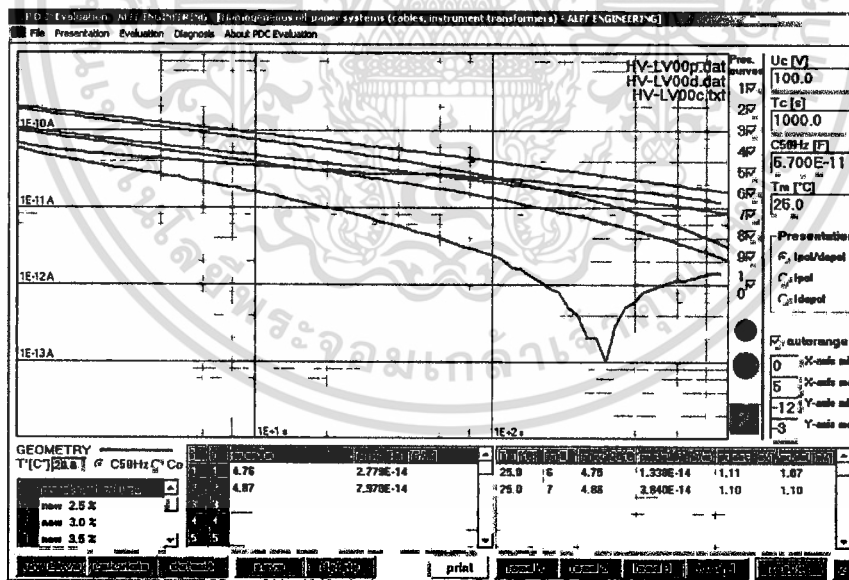
รูปที่ จ.2 การวัดความชื้นฉนวนเพรสบอร์คความชื้น 3.7 % คุ่มในน้ำมันใหม่ที่มีความชื้น 17.77 ppm ด้วย PDC- analyserพบว่ามีความชื้นในเพรสบอร์คประมาณ 2.5-3.5 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



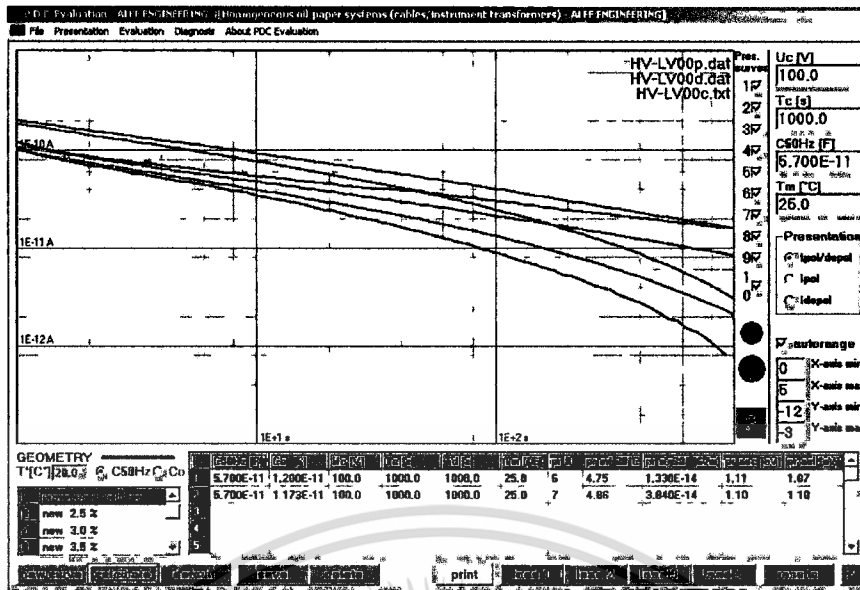
รูปที่ ๑.๓ การวัดความชื้นฉนวนเพรสบอร์ดความชื้น 5.5 % จุ่มในน้ำมันใหม่ที่มีความชื้น 17.77 ppm ด้วย PDC- analyser พบว่ามีความชื้นในเพรสบอร์ดมากกว่า 4.9 %

จ.๒ การวัดความชื้นฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมันด้วย PDC- analyser เมื่อความชื้นในน้ำมันแตกต่างกัน



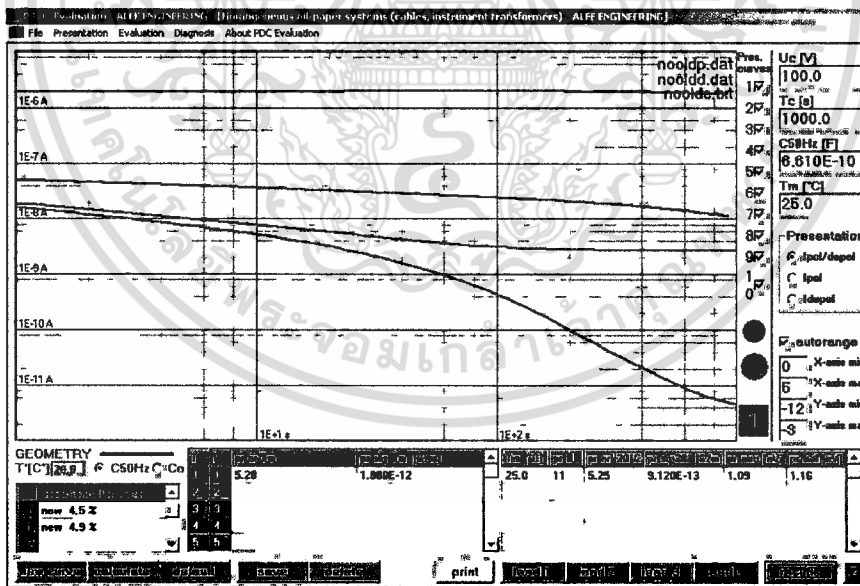
รูปที่ ๑.๔ การวัดความชื้นฉนวนเพรสบอร์ดความชื้น 1.7 % จุ่มในน้ำมันใหม่ที่มีความชื้น 21.39 ppm ด้วย PDC- analyser พบว่ามีความชื้นในเพรสบอร์ดประมาณ 2.5-3 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



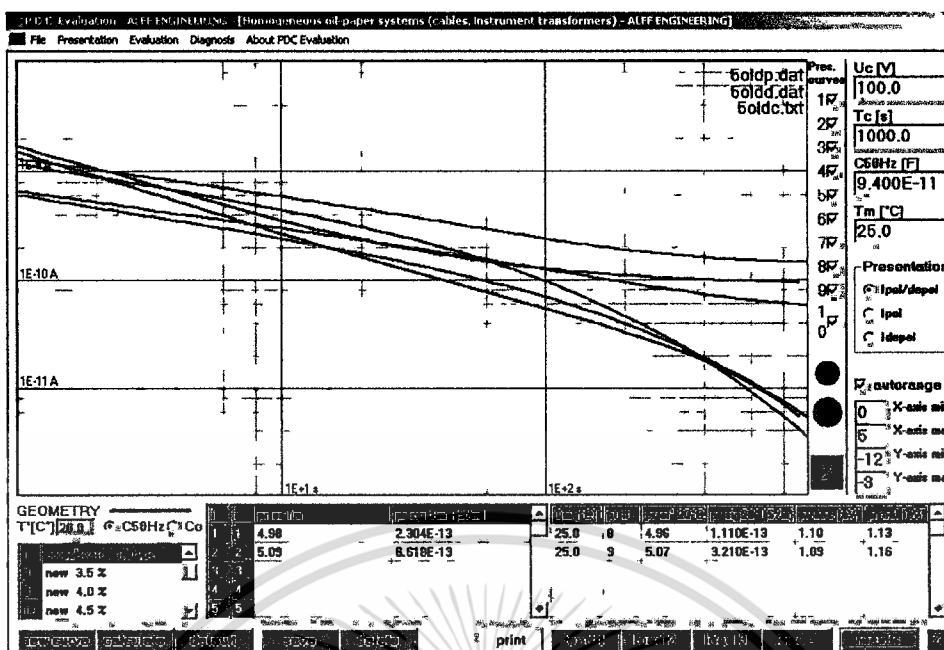
รูปที่ จ.5 การวัดความเข้มข้นนพเรสบอร์ดความขึ้น 1.7 % จุ่มในน้ำมันใหม่ที่มีความขึ้น 21.39 ppm ด้วย PDC- analyser พบว่ามีความขึ้นในนพเรสบอร์ดประมาณ 2.5-3 %

จ.3 การวัดความเข้มข้นนพเรสบอร์ดจุ่มน้ำมันด้วย PDC- analyser เมื่อนพเรสบอร์ดมีความขึ้นแตกต่างกันและน้ำมันมีความเป็นกรด

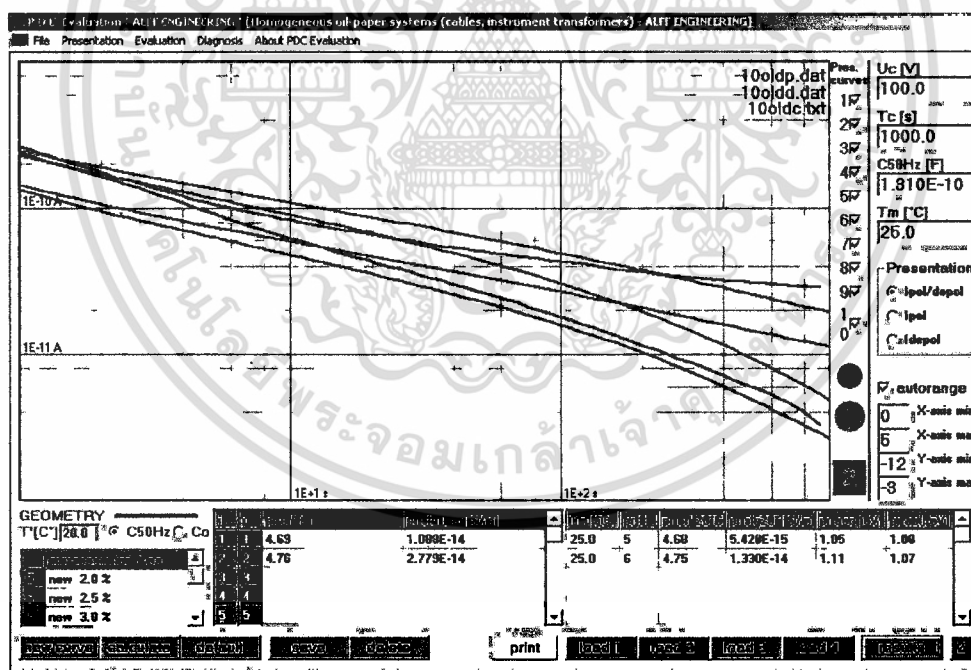


รูปที่ จ.6 การวัดความเข้มข้นนพเรสบอร์ดความขึ้น 5.5 % จุ่มในน้ำมันเก่าที่มี Total acid number = 0.09 ด้วย PDC- analyser พบว่ามีความขึ้นในนพเรสบอร์ดมากกว่า 4.9 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



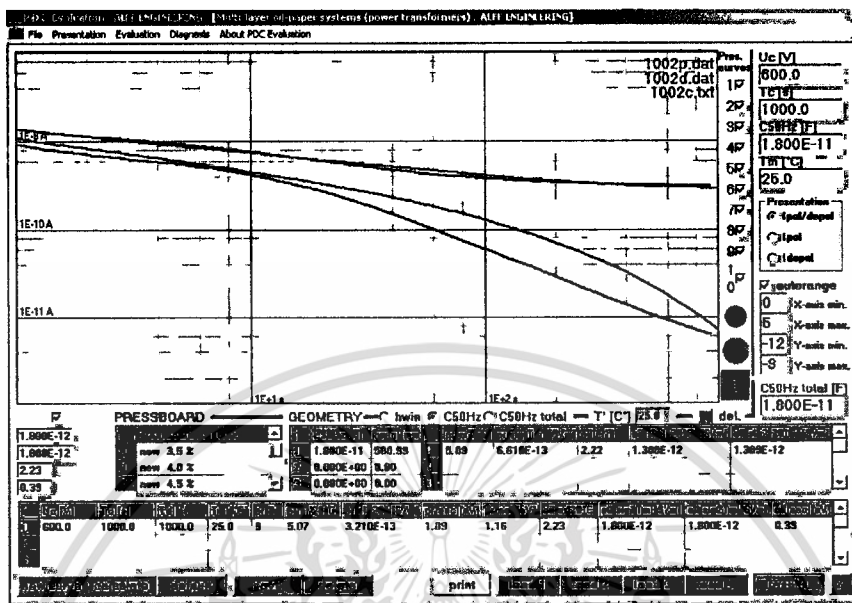
รูปที่ จ.7 การวัดความชื้นจนพบเปอร์เซ็นต์ความชื้น 3.7 % จุ่มในน้ำมันเก่าที่มี Total acid number = 0.09 ด้วย PDC- analyser พบว่ามีความชื้นในเพอร์สอร์คประมาณ 3.5-4 %



รูปที่ จ.8 การวัดความชื้นจนพบเปอร์เซ็นต์ความชื้น 1.7 % จุ่มในน้ำมันเก่าที่มี Total acid number = 0.09 ด้วย PDC- analyser พบว่ามีความชื้นในเพอร์สอร์คประมาณ 2-2.5 %

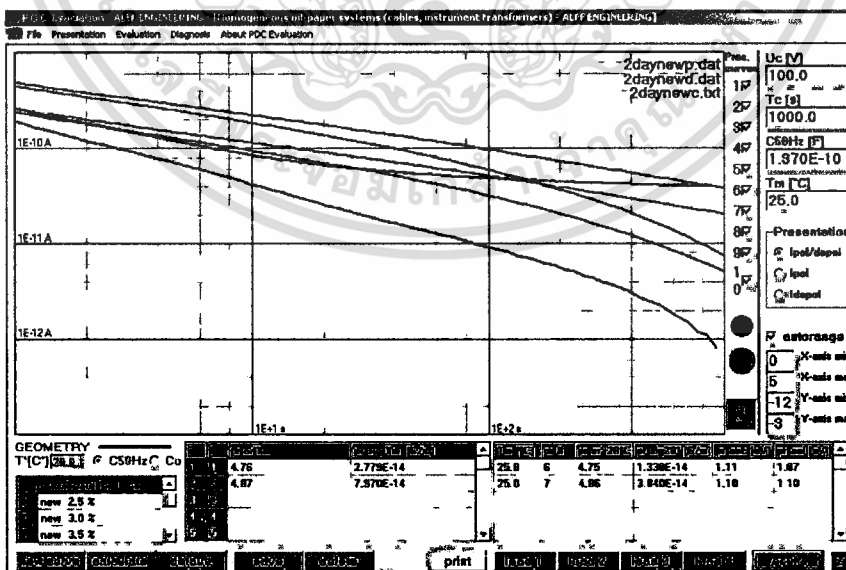
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ.4 การวัดความชื้นฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมันด้วย PDC-analyser ซึ่งเกิดจากความชื้นต่อฉนวนเพรสบอร์ด



รูปที่ จ.9 การวัดความชื้นต่อฉนวนเพรสบอร์ด(โครงสร้าง X = 67%, Y = 25 %) พบว่ามีความชื้นในเพรสบอร์ด 4 %

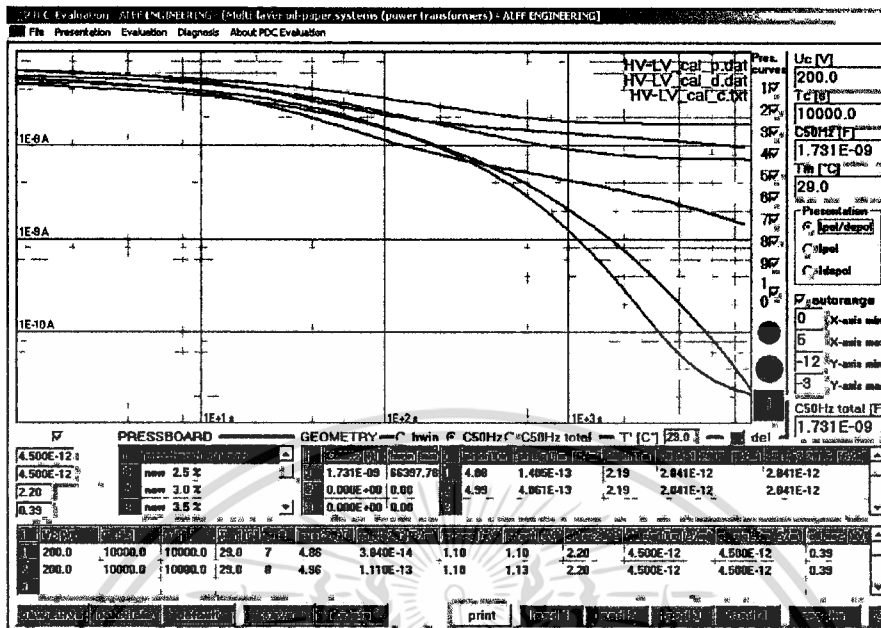
จ.5 การวัดความชื้นฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมันด้วย PDC-analyser เมื่อความชื้นของฉนวนเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมันที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความชื้นในบรรยากาศ



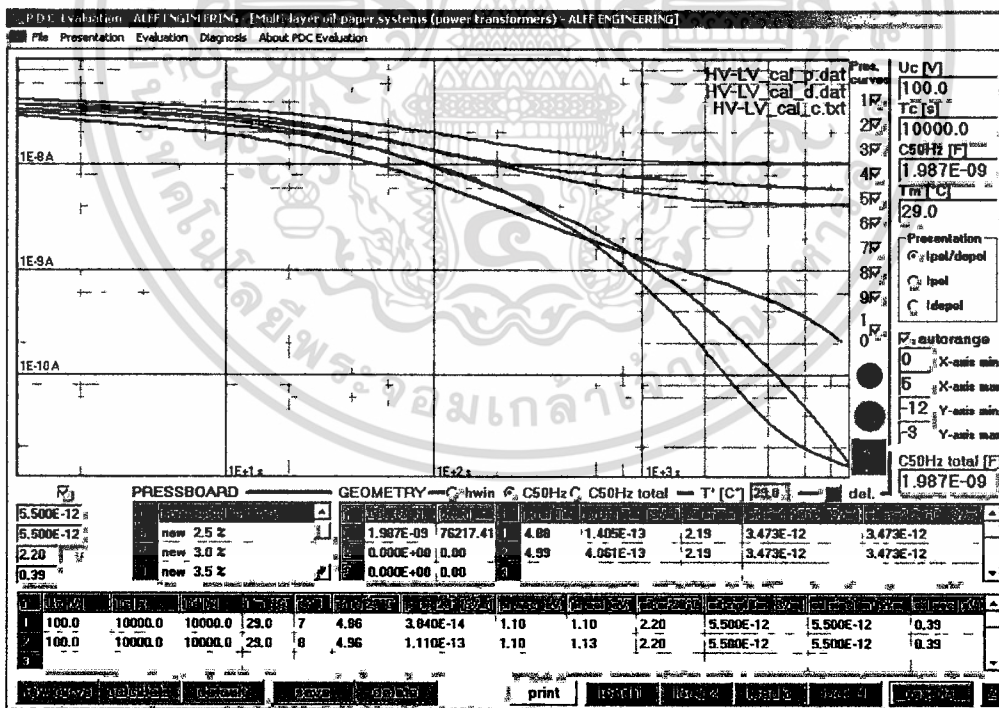
รูปที่ จ.10 การวัดความชื้นฉนวนเพรสบอร์ดความชื้น 1.7 % จุ่มในน้ำมันเก่าทิ้งไว้ให้ได้รับความชื้นในบรรยากาศเป็น48 ชั่วโมง ด้วย PDC-analyser พบว่ามีความชื้นในเพรสบอร์ดประมาณ 2.5-3 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ.6 การวัดความชื้นฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังด้วย PDC- analyser



รูปที่ จ.11 การวัดความชื้นฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 500 kVA 33kV/380 V PDC- analyser พบว่ามีความชื้นในเพอร์สบอร์ดประมาณ 3-3.5 %

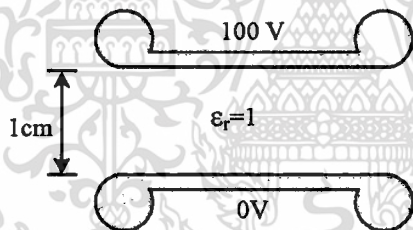
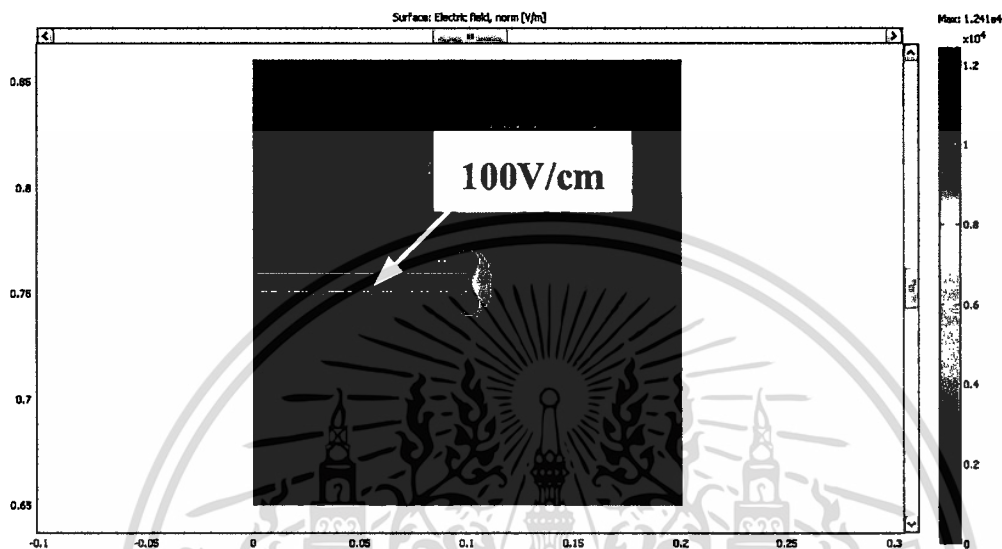


รูปที่ จ.12 การวัดความชื้นฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 600 kVA 22kV/380 V PDC- analyser พบว่ามีความชื้นในเพอร์สบอร์ดประมาณ 3-3.5 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

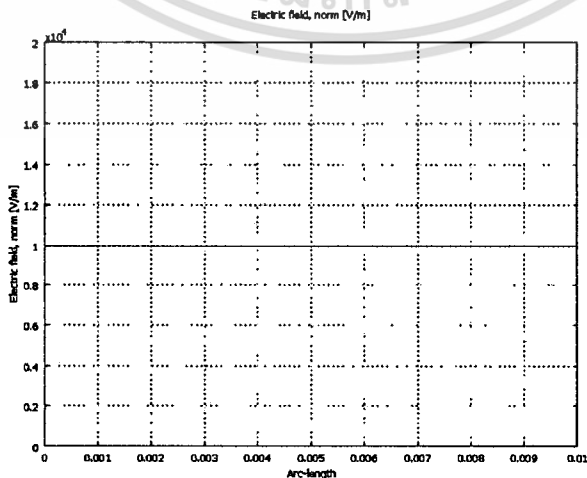
ภาคผนวก ฉ.

การเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าที่ได้
ระหว่างตัวโปรแกรมกับค่าที่คำนวณ



ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด

$$E = \frac{V}{d} = \frac{100V}{1cm} = 100 \frac{V}{cm}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าก็กระยะทางภายในอิเล็กโทรด ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข.

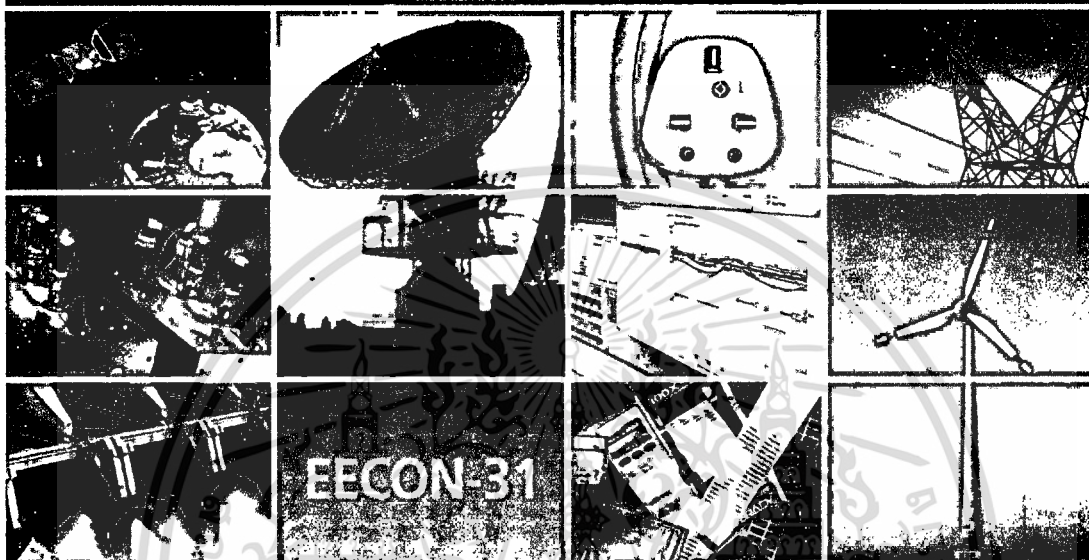
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. อภิชาติ นิ่มเทียน, นรเศรษฐ พัฒนเดช, กฤษวัฒน์ ทองแกมแก้ว และ ประภาส ไพรสวรรณา, “เทคนิคตรวจวัดความชื้นของกระดาษฉนวนของหม้อแปลงโดยใช้กระแสไฟฟ้าไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชัน” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31, 29-31 ตุลาคม 2551 ณ รอยัลฮิลล์ จังหวัดนครนายก หน้า 315-318



การประชุมวิชาการ ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31

31st Electrical Engineering Conference (EECON-31)



Volume I

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- คอมพิวเตอร์ และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)

29 - 31 ตุลาคม 2551

ณ รอยัลฮิลส์ กอล์ฟ รีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดนครนายก

ร่วมจัดโดย



มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
SRINAKHARINWIROT UNIVERSITY



มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

สนับสนุนโดย



Western Digital



ABB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคตรวจวัดความชื้นของกระดาษฉนวนของหม้อแปลง โดยใช้กระแสโพลาไรเซชันและกระแสดีโพลาไรเซชัน

The Measurement Technique of Moisture Content in Oil-Paper Insulations of A Transformer by Analyzing Polarization and Depolarization Current

อภิชาติ นิ่มเทียน¹, นรเศรษฐ์ พัฒนาศข², กฤษวิวัฒน์ ทองแถมแก้ว³, และ ประภาส ไพรสุวรรณ⁴

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3 หมู่ 2 ถนนฉลองกรุง แขวงลำป่าเตา เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร/โทรสาร. 0-2326-4550 E-mail: s0060220@kmitl.ac.th
²ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นเสนอเทคนิคการตรวจวัดค่าความชื้นในฉนวนกระดาษชุบน้ำมันในหม้อแปลง โดยใช้วิธีการวิเคราะห์กระแสโพลาไรเซชันและกระแสดีโพลาไรเซชัน (PDC) วิเคราะห์ตัวอย่าง ฉนวนกระดาษที่มีความชื้น 1.58 % และ 4.18 % ถูกจำลองขึ้นมาไปติดตั้ง ชุดทดลอง และวัดด้วยวิธีวัด PDC ผลการทดลองพบว่าค่าความชื้นของกระดาษที่ตรวจวัดได้มีค่าใกล้เคียงกันกับความชื้นที่วัดได้จากวิธีคาร์บพิชเชอร์ การทดสอบภาคสนามนั้นได้ทำการทดสอบกับหม้อแปลงฉนวนน้ำมันพิกัด 25 MVA 3 เฟส 115-22 kV การทดสอบตรวจวัดด้วย PDC กระทำก่อนและหลังการปรับปรุงสภาพการฉนวนของหม้อแปลง ผลการวัดปริมาณความชื้นในฉนวนกระดาษชุบน้ำมันในหม้อแปลงต่างกันไม่มากกับผลการวัดด้วยวิธีคาร์บพิชเชอร์

คำสำคัญ : ความชื้น, ฉนวนกระดาษชุบน้ำมัน, ผลตอบสนองของไดอิเล็กตริก, กระแสโพลาไรเซชัน, กระแสดีโพลาไรเซชัน

Abstract

This paper presents the measurement technique of moisture content in oil-paper insulations of a transformer by analyzing polarization and depolarization current (PDC) the test samples, pressboard with 1.58 % and 4.18 % moisture content, were simulated, installed in the test cell investigated moisture content, by detecting The polarization and depolarization current. The test results compared with the result obtained from Karl Fischer method is similar. From the field test, oil immersed transformer rated of 25 MVA 3 phase 115-22 kV was examined with PDC method before and after being recovered the insulation system. The moisture in pressboard of the tested transformer obtained from PDC method was not much difference with the results form Karl Fischer method

Keywords: moisture content, oil-paper insulation, dielectric response, polarization current, depolarization current

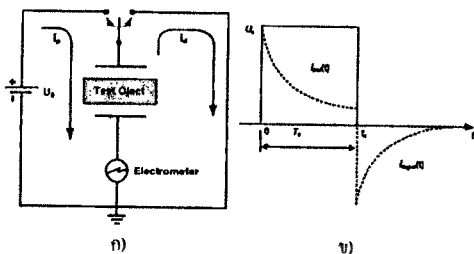
1. บทนำ

หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีความสำคัญมากในระบบไฟฟ้ากำลัง การเกิดความเสียหายขึ้นกับตัวหม้อแปลงนั้น ส่งผลต่อความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าและความเสียหายต่อเศรษฐกิจอย่างมาก ปัญหาความผิดปกติของหม้อแปลงนั้น สาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากความผิดปกติของระบบฉนวน การตรวจวินิจฉัยฉนวนหม้อแปลงก่อนที่หม้อแปลงจะชำรุดเสียหายจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงได้มาก ฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด oil immersed นั้น ประกอบด้วยฉนวนผสมจะประกอบไปด้วย กระดาษกระดาษและน้ำมันเป็นหลัก การเสื่อมสภาพหรือชำรุดของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ามาเกิดจากหลายปัจจัย ได้แก่ ทางไฟฟ้า ทางกล ทางเคมี ความร้อน และ สิ่งเจือปนต่างๆ

ความชื้นที่อยู่ภายในฉนวนกระดาษผสมน้ำมันเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพได้ง่ายขึ้น การตรวจสอบหาปริมาณความชื้นสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งในบทความนี้ได้ใช้ วิธีตรวจวัด PDC ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายเพื่อหาความชื้นที่เกิดขึ้น

2. ผลตอบสนองไดอิเล็กตริก

ในระบบฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า จะประกอบไปด้วยฉนวนต่างชนิดกัน ได้แก่ กระดาษหรือกระดาษผสมกับน้ำมัน พลาสติก ฟิลลาโรเซชันและดีโพลาไรเซชันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติต่างๆของฉนวนคือ คุณสมบัติเชิง Electronic, ionic, dipole, space charge และ interfacial polarization [1-3] วงจรการตรวจวัดพฤติกรรมพหุขั้วโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ก) วงจรวัด PDC ข) รูปคลื่นของกระแส

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขนาดเป็น U_0 ทันทีทันใดให้กับวัสดุทดสอบ จะเกิดกระแสไหลาไรเซชัน $i_{pdc}(t)$ ชาร์จประจุให้กับวัสดุทดสอบซึ่งแสดงในสมการที่ 1

$$i_{pdc}(t) = C_0 U_0 \left(\frac{\sigma}{\epsilon_0} + \epsilon_m \delta(t) + f(t) \right) \quad (1)$$

เมื่อ C_0 เป็นค่าคาปาซิแตนซ์ของวัสดุทดสอบ $\delta(t)$ เป็นเคลต้าฟังก์ชันที่เกิดขึ้นจากการป้อนแรงดันอย่างทันทีทันใดที่เวลา $t = t_0$ และ σ คือค่าความนำไฟฟ้ากระแสตรง (dc conductivity) จากสมการที่ 1 แบ่งออกเป็น 3 เทอม เทอมแรกเป็นค่าความนำไฟฟ้าของวัสดุทดสอบไปเกี่ยวข้องกับกระบวนการไหลาไรเซชันที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เทอมสุดท้ายแสดงให้เห็นกระบวนการไหลาไรเซชันเมื่อได้ป้อนแรงดันให้กับวัสดุทดสอบ $f(t)$ คือฟังก์ชันผลตอบสนองของไดอิเล็กทริก

เมื่อกระแสไหลาไรเซชันหยุดนิ่งที่ค่าคงแล้ว จะทำการวัดวงจร ที่เวลา $t = t_c$ กระแสที่วัดได้จะเป็นกระแสดีไหลาไรเซชัน i_{pdc} ดังแสดงในสมการที่ 2

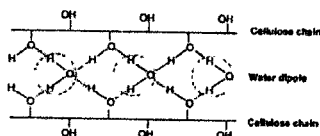
$$i_{pdc}(t) = C_0 U_0 [f(t) - f(t + t_c)] \quad (2)$$

t_c เป็นเวลาที่เกิดจากการป้อนแรงดัน (step voltage) ทิศทางของกระแสดีไหลาไรเซชันจะตรงกันข้ามกับกระแสดีไหลาไรเซชัน

3. วัสดุเซลลูโลสและความชื้นที่เกิดขึ้นในวัสดุเซลลูโลส

วัสดุที่เป็นฉนวนที่มีส่วนประกอบเป็นเซลลูโลส ได้แก่ กระดาษพรสบอร์ด (press paper) โมลด์พาร์ท (molded parts) วัสดุที่เป็นบอร์ด (board) หรือลามิเนตบอร์ด (laminated board) วัสดุเหล่านี้จะซึมซับน้ำได้ดีมาก คุณสมบัติของไดโพล โมเลกุลของวัสดุดังกล่าวประกอบกันอย่างง่าย โดยจะประกอบด้วย กลุ่มของ -OH ของโมเลกุลเซลลูโลส และ กลุ่ม OOH สำหรับโมเลกุลที่เกิดขึ้นใหม่จากกระบวนการเสื่อมอายุของฉนวน ความชื้นที่เกิดขึ้นในวัสดุฉนวนนั้นจะมีความเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ เพื่อที่รักษาสภาพสมดุลของความชื้นเอาไว้ โดยภายใต้สภาวะปกติ

ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส (°C) ความชื้นสัมพัทธ์ 50% จะมีปริมาณน้ำอยู่ในวัสดุเซลลูโลส 5-8% [4]



รูปที่ 2 กลุ่มของ-OH ของเซลลูโลสจึงมีการเชื่อมต่อกับโมเลกุลของน้ำ

4. การจำลองฉนวนของหม้อแปลงเพื่อวัดค่า PDC

เทสเซลล์ (test cell) ทำมาจากท่ออะลูมิเนียม 15 ซม. สูง 25 ซม. หัวอิเล็กโทรดทำตามมาตรฐาน IEC 60093 [5] ทำมาจากสแตนเลสมีตัวประกอบ 3 ส่วนคือหัวกัน ได้แก่ อิเล็กโทรดส่วนที่ป้อนแรงดัน ส่วนที่สองได้แก่อิเล็กโทรดตรวจวัดและส่วนที่สามเป็นการยึดอิเล็กโทรดเพื่อตัดกระแสที่ไม่ต้องการออก จากรูปที่ 3 ก) เทสเซลล์สำหรับใช้ทดสอบหาความชื้น ข) ส่วนประกอบต่างๆของเทสเซลล์ 1 คือ อิเล็กโทรดส่วนที่ป้อนแรงดัน 2 คือ อิเล็กโทรดส่วนตรวจวัด 3 คือ การ์ดอิเล็กโทรด 4 คือ ฉนวนกั้นระหว่างการ์ดอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรดส่วนชุด 5 คือ เฟรสบอร์ด weidmann ขนาดหนา 2 มม. รัศมี 80 มม. 6 คือ น้ำมัน



รูปที่ 3 ก) เทสเซลล์ ข) ส่วนประกอบต่างๆของเทสเซลล์

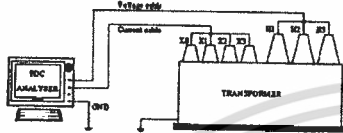
การจำลองคุณสมบัติเกี่ยวกับความชื้นในเฟรสบอร์ดจะแบ่งการจำลองออกเป็น 2 ตัวอย่างได้แก่ ตัวอย่างที่ ก จะเป็นเฟรสบอร์ดที่อบไล่ความชื้นด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 15 นาที มีความชื้น 1.58% ตัวอย่างที่ ข อบไล่ความชื้นด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 5 นาที มีความชื้น 4.18% ความชื้นของเฟรสบอร์ดหลังการอบแล้วสามารถหาได้โดยใช้เครื่องคาร์พิซเซอร์แสดงดังรูปที่ 4 โดยวิธีการหาความชื้นของเฟรสบอร์ดทำตามมาตรฐาน ASTM D 3277 [6]

ในกรณีการทดลองเพื่อวัดค่า PDC นั้น น้ำมันที่ใช้ในการจำลองเป็นน้ำมันที่ผ่านปรับปรุงสภาพ ตัวน้ำมันมีความทนต่อแรงดันเบรคความถี่ 30 kV/cm ในการจำลองจะใช้น้ำมันประมาณ 1 ลิตร ต่อการทดลอง 1 ครั้ง

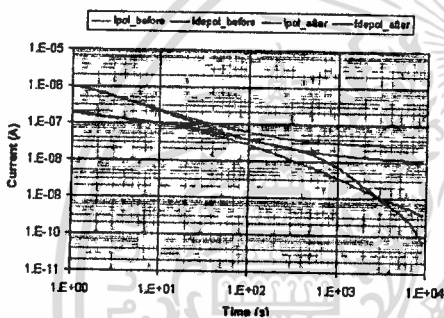
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9 Oil Immersed Transformer 25 MVA 3 ϕ 115-22 kV



รูปที่ 10 วงจรทดสอบต้านแรงดันสูงและแรงดันต่ำ



รูปที่ 11 PDC ก่อนและหลังการปรับปรุงสภาพ

ความชื้นในกระดาษหุ้มแปลงก่อนปรับปรุงสภาพวัดด้วย PDC-analyser มีความชื้นเท่ากับ 3.5 % จะถูกพิจารณาว่ามีค่าสูงเกินไป ซึ่งกระดาษฉนวนที่มีคุณสมบัติ ค่าความชื้นที่ยอมรับได้คือไม่เกิน 3 % ค่าความนำของน้ำมันที่อุณหภูมิที่ 20 °C มีค่าเท่ากับ 106.2 pS/m ความนำในน้ำมันที่วัดได้มีค่าสูงกว่าที่ยอมรับได้ซึ่งไม่ควรเกิน 5 pS/m

หลังปรับปรุงสภาพฉนวนแล้ว พบว่าความชื้นในกระดาษหุ้มแปลงมีค่าเท่ากับ 3 % มีค่าน้อยกว่าตอนยังไม่ปรับปรุงสภาพฉนวน และค่าความนำของน้ำมันที่ 20 °C เท่ากับ 11.4 pS/m การปรับปรุงคุณภาพของการฉนวนทำให้น้ำมันมีความเป็นฉนวนที่ดีขึ้น แต่ยังคงมีค่าความนำสูงอยู่

เปรียบเทียบผลที่ได้จากเครื่องคาร์ลพิชเชอร์ โดยการเก็บตัวอย่างกระดาษหลายๆ ตำแหน่งภายในหม้อแปลง ค่าความชื้นก่อนการปรับปรุงสภาพอยู่ระหว่าง 2.4-2.8 % และค่าความชื้นหลังปรับปรุงสภาพอยู่ระหว่าง 1.8-2.4 % ความแตกต่างของค่าความชื้นในฉนวนกระดาษที่เกิดขึ้น จากการวัดด้วย PDC และคาร์ลพิชเชอร์นั้น เกิดจากผลของกระบวนการเก็บตัวอย่างที่ไม่เหมือนกัน ก่อนที่จะนำกระดาษหม้อแปลงไปวัดค่าความชื้น

5. สรุป

เทคนิคการตรวจวัดความชื้นของกระดาษฉนวนหม้อแปลงที่นำเสนอ โดยวัด PDC ของหม้อแปลงนั้น เป็นเทคนิคที่ช่วยให้สามารถวินิจฉัยคุณสมบัติของฉนวนหม้อแปลง ทั้งในกรณีความชื้นในกระดาษเพอร์สอร์ด หรือค่าความนำของน้ำมันหม้อแปลงว่ายังคงอยู่ในสภาพเงื่อนไขของการเป็นฉนวนที่ดีหรือไม่ ผลการทดสอบจากการจำลองฉนวนตัวอย่างและการวัดจริง พบว่าข้อมูลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับวิธีดั้งเดิม ซึ่งก็คือ วิธีคาร์ลพิชเชอร์ ซึ่งการวัด PDC จะมีข้อได้เปรียบอยู่หลายประการ เช่น เป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย ไม่จำเป็นต้องตัดกระดาษฉนวนตัวอย่างออกมาวัด รวมทั้งผลการวัดยังสามารถนำไปทำเป็นโมเดลการฉนวนที่ถูกค้องมาอีกชั้นด้วย แต่อย่างไรก็ตามวิธีการวัดคุณสมบัติของฉนวนกระดาษและน้ำมันด้วยวิธีการวัดด้วยเครื่อง PDC นี้ยังคงเป็นเทคโนโลยีที่ใหม่มากสำหรับเมืองไทย จึงมีความจำเป็นที่ต้องศึกษาวิจัยกันอีกสักระยะหนึ่ง เพื่อให้เกิดความเข้าใจที่แท้จริง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูงและโรงซ่อมหม้อแปลง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ได้เอื้ออำนวยความสะดวกในเรื่องการทดสอบ

ขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้เอื้ออำนวยความสะดวกในเรื่องการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Water S. Zaengl, "Dielectric Spectroscopy in time and Frequency Domain for HV Power Equipment, Part I:Theoretical Considerations ", IEEE Electrical Insulation Magazine, Volume 19, September/October, 2003
- [2] A. K. Jonscher, "Dielectric Relaxation in Solids". Chelsea Dielectric Press, 1983.
- [3] นรเศรษฐ์ พัฒนเดช, "High Voltage Insulation maintenance, Examination and Diagnosis" เอกสารประกอบการเรียนการสอน รายวิชา Selected Topics in High Voltage Engineering, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.
- [4] Weidmann Compendium Version 1.1 e/d English Edition
- [5] IEC Standard 60093, "Methods of Test for Volume Resistivity and surface Resistivity of Electrical Insulating Material", International Electrotechnical Commission, 1980.
- [6] ASTM D 3277 "Standard Test Methods for Moisture Content of Oil-Impregnated Cellulosic Insulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายอภิชาติ นิ่มเทียน เกิดเมื่อวันที่ 24 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2527 ที่จังหวัดลพบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2550



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้