

การศึกษาและเปรียบเทียบวิธีในการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของหม้อแปลงไฟฟ้า  
The Study and Comparison of Methods for Measuring the Dielectric Response  
of Transformers



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# The Study and Comparison of Methods for Measuring the Dielectric Response of Transformers



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT  
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING SCHOOL OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2565

การศึกษาและเปรียบเทียบวิธีในการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของหม้อแปลงไฟฟ้า

The Study and Comparison of Methods for Measuring the Dielectric Response of  
Transformers



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2565

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาและเปรียบเทียบวิธีในการวัดผลตอบสนองไดโอดีเล็กทริกของหม้อแปลงไฟฟ้า

ผู้จัดทำ

1. นาย ศิริวุฒิ พงษ์พิทักษ์
2. นางสาว ศุภิสรา ไววิชา
3. นาย สุกฤษฏี ตรงจิตจรจริง



*ดร.เดวิด วัฒนเด*

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ วัฒนเด)

*ดร.จันทร์เจริญสุข*

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภพ จันทร์เจริญสุข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การศึกษาและเปรียบเทียบวิธีในการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของหม้อแปลงไฟฟ้า

นาย ศิริวุฒิ พงษ์พิทักษ์

นางสาว ศุภิสรา ไววิชา

นาย สุกฤษฎ์ ตรงจิตจริง

รศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2565

## บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาและเปรียบเทียบวิธีในการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 50 kVA 50 Hz และ 1500 kVA 50 Hz ที่มีการดูแลรักษาที่แตกต่างกัน ด้วยเทคนิคการวัดกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน (Polarization and depolarization current, PDC) การวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ (Frequency domain spectroscopy, FDS) การวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ร่วมกับการวัดกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน (FDS & PDC) และการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ร่วมกับการวัดกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันพลัส (FDS & PDC+) จากการทดสอบพบว่าระดับแรงดันและเวลาในการชาร์จส่งผลต่อการวัดกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน ระดับแรงดันที่สูงขึ้นและระยะเวลาในการชาร์จที่นานขึ้น ส่งผลให้ผลลัพธ์ของการทดสอบมีค่าแม่นยำมากขึ้น โดยผลการทดสอบแต่ละวิธีมีค่าใกล้เคียงและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ร่วมกับการวัดกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันพลัส (FDS & PDC+) ให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำและใช้เวลาในการทดสอบน้อยที่สุดในย่านความถี่ที่เท่ากัน ทำให้สามารถนำผลการทดสอบไปใช้ในการวิเคราะห์และประเมินสภาพฉนวนแข็งในหม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

# The Study and Comparison of Methods for Measuring the Dielectric Response of Transformers

Mr. Siriwut Pongpitak

Ms. Supisara waiwicha

Mr. Sukit Trongjitjing

Assoc. Prof. Dr. Norasage Pattanadech Advisor

## ABSTRACT

This thesis presents the study and comparison of methods for measuring the dielectric response of transformers rated at 50 kVA 50 Hz and 1500 kVA 50 Hz with different maintenance. By polarization and depolarization current measurements (PDC), frequency domain spectroscopy measurements (FDS), frequency domain spectroscopy combined with polarization and depolarization current (FDS & PDC) and frequency domain spectroscopy and polarization and depolarization current plus (FDS & PDC+). It has been found that voltage levels and charging times affect PDC testing. Higher voltage levels and longer charging times result in more accurate test results. The test results of each method were similar and tended to be in the same direction. And FDS & PDC+ measurements provide accurate results with the least amount of testing time required. This makes it possible to use the test results for analysis and evaluation of solid insulation conditions in electrical transformers efficiently.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณรองศาสตราจารย์นเรศรชัช วัฒนเดช และดร.ภพ จันทร์เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา รวมไปถึงคุณโกมินทร์ ชุมพิบูลย์ ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไขปริญญาานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณคุณนายสุทัศน์ สุขสกุลปัญญา นายศรัณย์ พรหมศรีทอง และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง กองทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (บางพลี) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการยืมเครื่องวิเคราะห์หมนวนไดอิเล็กทริก PDC-ANALYSER-1MOD สำหรับทดสอบการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนเวลา และบริษัท เพาเวอร์ อินทิเกรชั่น จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการยืมเครื่องวิเคราะห์หมนวนไดอิเล็กทริก DIRANA สำหรับทดสอบการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ และคำปรึกษาในการทดสอบ

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ น้อง ๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคน โดยเฉพาะคุณศิวกร จินเมือง และ คุณปฎิยะ อุดมลักษณะานนท์ ที่ให้ความร่วมมือและช่วยแก้ปัญหาด้วยดีมาโดยตลอด

นอกจากนี้ผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้เบิกใช้เครื่องมือ ตลอดจนคุณกมลวรรณเจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเบิกใบเสร็จของโครงการ

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจอีกทั้งเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 หม้อแปลงไฟฟ้า	5
2.1.1 ส่วนประกอบโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า	5
2.1.2 ประเภทของหม้อแปลงไฟฟ้า	6
2.1.3 ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า	8
2.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมอายุของหม้อแปลงไฟฟ้า	8
2.2 ระบบฉนวนเหลวภายในหม้อแปลงไฟฟ้า	9
2.3 ระบบฉนวนแข็งภายในหม้อแปลงไฟฟ้า	10
2.3.1 กระดาษคราฟท์ (Kraft paper)	11
2.3.2 คอตตอนเซลลูโลส (Cotton cellulose)	11
2.3.3 กระดาษสำหรับการใช้งานพิเศษ (Papers for special applications)	11
2.3.4 เพรสบอร์ด (Pressboard)	12
2.4 การวัดและตีความการตอบสนองไดอิเล็กทริกของโดเมนเวลาด้วยกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน	13
2.4.1 กระบวนการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันขั้นพื้นฐาน	13
2.4.2 ทฤษฎีพื้นฐานของการตอบสนองไดอิเล็กทริก	16
2.4.3 ปัญหาการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันเชิงปฏิบัติ	21

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 การวัดและตีความการตอบสนองสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่	29
2.5.1 ทฤษฎีของการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่	30
2.5.2 การวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ของฉนวนน้ำมันและ กระดาษ	34
2.5.3 ขั้นตอนการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่สำหรับหม้อแปลง ไฟฟ้า	36
2.5.4 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ บนหม้อแปลงไฟฟ้า	37
2.5.5 การตีความผลลัพธ์ของสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่	38
2.6 แบบจำลอง X-Y	54
2.7 การลดระยะเวลาทดสอบการตอบสนองเชิงไดอิเล็กทริก	56
2.7.1 การกำหนดช่วงความถี่ที่เหมาะสม	56
2.7.2 ปรับหลักการวัดให้เหมาะสม	60
<b>บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง</b>	62
3.1 การวิเคราะห์การตอบสนองไดอิเล็กทริกของหม้อแปลงไฟฟ้า	62
3.2 เทคนิคการตรวจวัด	62
3.2.1 เทคนิคกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (PDC)	62
3.2.2 เทคนิคสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ (FDS)	63
3.2.3 เทคนิค FDS & PDC+	64
3.3 หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการวิจัยและชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	65
3.3.1 หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง	65
3.3.2 เครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD	65
3.3.3 เครื่อง Dielectric Insulation Analyser (DIRANA)	66
3.4 กรณีศึกษาในการทดสอบการตอบสนองไดอิเล็กทริก	67
3.4.1 กรณีศึกษาการทดสอบการตอบสนองไดอิเล็กทริกโดยใช้เครื่อง DIRANA	67
3.4.2 กรณีศึกษาการทดสอบการตอบสนองไดอิเล็กทริกโดยใช้เครื่อง PDC- ANALYSER-1MOD	68
3.5 ขั้นตอนการทดลอง	68
3.5.1 ขั้นตอนการต่อวงจรและการทดสอบโดยใช้เครื่อง DIRANA	68
3.5.2 ขั้นตอนการต่อวงจรและการทดสอบโดยใช้เครื่อง PDC-ANALYSER- 1MOD	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 4 ผลการทดสอบ</b>	72
4.1 การทดสอบวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกโดยวิธีสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ (FDS)	72
4.2 การทดสอบวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกโดยวิธี FDS and PDC with Depolarization	74
4.3 การทดสอบวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกโดยวิธี FDS & PDC+	75
4.4 การทดสอบวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกโดยวิธีกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันด้วยเครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD	76
4.5 การทดสอบความชื้นของฉนวนเหลวของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้เครื่อง Karl Fischer Titrators	82
4.6 ผลการทดลองทุกกรณีศึกษา	82
<b>บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ</b>	84
5.1 สรุปผลการทดสอบ	84
5.1.1 การทดสอบในหัวข้อที่ 1 ด้วยวิธีสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ (FDS)	84
5.1.2 การทดสอบในหัวข้อที่ 2 ด้วยวิธี FDS and PDC with depolarization	84
5.1.3 การทดสอบในหัวข้อที่ 3 ด้วยวิธี FDS and PDC+	84
5.1.4 การทดสอบในหัวข้อที่ 4 ด้วยวิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (PDC)	85
5.1.5 การทดสอบในหัวข้อที่ 5 ด้วยการทดสอบความชื้นของฉนวนเหลวในหม้อแปลงไฟฟ้า	85
5.2 อภิปรายผลการทดสอบ	86
5.3 ข้อเสนอแนะ	87
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	88
<b>ภาคผนวก</b>	89
<b>ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ</b>	90
<b>ประวัติผู้เขียน</b>	95

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้า	5
2.2	ประเภทของหม้อแปลงไฟฟ้าที่แบ่งตามแกนเหล็ก	7
2.3	แกนเหล็กแบบ Shell-Type	7
2.4	แกนเหล็กแบบ Core-Type	8
2.5	ผลิตภัณฑ์ฉนวนบางชนิดที่พัฒนาขึ้นเฉพาะสำหรับอุตสาหกรรมหม้อแปลงไฟฟ้า	10
2.6	โครงสร้างทางพันธะเคมีของเซลลูโลส	11
2.7	การพันสายในหม้อแปลงไฟฟ้าด้วย Creped paper	12
2.8	กระดาษพิมพ์ลาย Diamond dotted	12
2.9	กระบวนการที่ใช้ในการผลิตเพรสบอร์ด	13
2.10	วิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันเมื่อสวิตช์อยู่ในตำแหน่งที่หนึ่ง	14
2.11	กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน	15
2.12	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันกับเวลาที่ความชื้นต่างกัน	21
2.13	กระแสคล้ายตัวที่แรงดันกระตุ้นต่างกัน (ปรับให้อยู่ในระดับเดียวกันเพื่อเปรียบเทียบ)	22
2.14	การข้ามของกระแสดีโพลาริเซชันและโพลาริเซชัน ส่วนขยายแสดงถึงช่วงเวลาเริ่มต้น	23
2.15	ฟังก์ชันการตอบสนองของไดอิเล็กทริก $f(t)$ ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ของเวลาชาร์จและคาย ประจุ $t_p$ และ $t_d$	24
2.16	กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันที่มีและไม่มี การดิสชาร์จประจุล่วงหน้าเพียงพอ	25
2.17	กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันในที่มีสัญญาณรบกวน	26
2.18	กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันหลังจากการกรองสัญญาณรบกวนออก	26
2.19	ผังกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของหม้อแปลงไฟฟ้าภายใต้อุณหภูมิที่ลดลง	28
2.20	การเกิดไทโรโบอิเล็กทริก	29
2.21	ความหลากหลายของปัจจัยการสูญเสียของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าเทียบกับความถี่	35
2.22	การวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่พื้นฐานโดยใช้ระบบ IDA 250	36
2.23	ลักษณะการประกอบการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่แบบมีอิเล็กโทรดป้องกัน	37

## สารบัญรูป (ต่อ)

2.24	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่างการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ที่มา	39
2.25	เส้นโค้ง Fabre-Pichon สำหรับการกระจายความชื้นในกระดาษคราฟท์และน้ำมัน	40
2.26	การแปรผันของส่วนจริงและส่วนจินตภาพของเปอร์มิติวิตีเชิงซ้อนที่ความชื้นต่างกันที่ อุณหภูมิคงที่ 20 องศาเซลเซียส	41
2.27	สเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่สำหรับกระดาษที่มีระดับความชื้นต่างกัน	42
2.28	ตัวประกอบการสูญเสียตามฟังก์ชันของความถี่ที่ความชื้นต่างกัน	42
2.29	ตัวประกอบการสูญเสียตามฟังก์ชันของความถี่ที่ความชื้นต่างกัน	43
2.30	ผลกระทบของการเสื่อมสภาพบนกระดาษคราฟท์ที่มีความชื้นเริ่มต้น 0.2%: (A) ไม่ผ่าน กระบวนการ; (B) อบ 94 ชั่วโมง DP 840 (C) อบ 1029 ชั่วโมง DP 360	44
2.31	ผลกระทบของการเสื่อมสภาพบนกระดาษคราฟท์ที่มีความชื้นเริ่มต้น 4% (A) ไม่ผ่านการหมัก (B) ผ่านการเสื่อมสภาพมา 72 ชั่วโมง DP 1000 (C) ผ่านการเสื่อมสภาพมา 2005 ชั่วโมง อายุ DP 280	45
2.32	การตอบสนองความถี่ของตัวอย่างเพรสบอร์ดจุ่มน้ำมันที่ผ่านการเสื่อมสภาพแล้วและไม่ยัง ผ่านการเสื่อมสภาพ: (a) ความชื้นเริ่มต้น 4%; (b) ความชื้นเริ่มต้น 0.6% A และ C ยังผ่านการเสื่อมสภาพ B และ D ผ่านการเสื่อมสภาพ	46
2.33	แสดงการตอบสนองของไดอิเล็กทริกของเพรสบอร์ดมีความชื้นและกรดต่างกัน	48
2.34	ตัวประกอบการสูญเสีย $\tan \delta$ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	50
2.35	ตัวประกอบการสูญเสีย $\tan \delta$ ที่อุณหภูมิต่างกันของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ติดตั้งภาคสนาม	51
2.36	$\tan \delta$ ที่โครงสร้างของฉนวนที่แตกต่างกันสำหรับอัตราส่วนน้ำมันและเพรสบอร์ด	52
2.37	การวัดสัญญาณรบกวนกระแสตรงทุก 1 วินาทีระหว่างกระบวนการอบของโคโรนา	53
2.38	ภาพตัดขวางของโครงสร้างฉนวนหลักของหม้อแปลงไฟฟ้า	54
2.39	แบบจำลอง X-Y ของโครงสร้างฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้า	55
2.40	ผลกระทบของเบรตอ์ปัจจัยการกระจายตัวเมื่อ $Y = 0.52$	56
2.41	เส้นโค้งการตอบสนองไดอิเล็กทริกลักษณะเฉพาะของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงด้วย ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่าง ๆ	57
2.42	เส้นโค้งการตอบสนองไดอิเล็กทริกของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยไม่มี "โหนด" ที่มองเห็นได้ ชัดเจน	58
2.43	การตอบสนองไดอิเล็กทริกของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มี "โหนด" ที่มองเห็นได้	58

## สารบัญรูป (ต่อ)

2.44	การตอบสนองของไดอิเล็กทริกของแทนอัดน้ำมันแร่	59
2.45	การวัดกระแสโพลาริเซชันในแผนผังพร้อมการคาดคะเนในช่วงเวลาสั้นและยาว	60
3.1	วงจรพื้นฐานสำหรับวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน	63
3.2	การวัด CHL บนหม้อแปลงไฟฟ้า 2 ขดลวดแบบไม่มีตัวป้องกันและมีตัวป้องกัน	64
3.3	เนมเพลทของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง	65
3.4	เครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD	66
3.5	เครื่อง Dielectric Insulation Analyser (DIRANA)	66
3.6	ทำความเข้าใจการลัดวงจรชั่วแรงแรงดันสูง และชั่วแรงแรงดันต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้า	68
3.7	กราฟด์ของเครื่องมือวัด DIRANA	69
3.8	ต่อสายการวัดเข้ากับหม้อแปลงไฟฟ้า	69
3.9	เครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD	70
3.10	การต่อวงจรการทดสอบ	71
4.1	ตัวประกอบการสูญเสียของกรณีศึกษาที่ 1	72
4.2	ตัวประกอบการสูญเสียของกรณีศึกษาที่ 2 ย่านความถี่ช่วงแรก	73
4.3	ตัวประกอบการสูญเสียของกรณีศึกษาที่ 2 ย่านความถี่ช่วงที่สอง	73
4.4	ตัวประกอบการสูญเสียของกรณีศึกษาที่ 3	74
4.5	ตัวประกอบการสูญเสียของกรณีศึกษาที่ 4	74
4.6	ตัวประกอบการสูญเสียของกรณีศึกษาที่ 5	75
4.7	ตัวประกอบการสูญเสียของกรณีศึกษาที่ 6	76
4.8	กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของกรณีศึกษาที่ 7	77
4.9	การเปรียบเทียบกราฟเพื่อหาค่าความนำไฟฟ้าของน้ำมันและความชื้นของฉนวนแข็งของกรณีศึกษาที่ 7	77
4.10	กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของกรณีศึกษาที่ 8	78
4.11	กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของกรณีศึกษาที่ 9	78
4.12	กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของกรณีศึกษาที่ 10	79
4.13	กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของกรณีศึกษาที่ 11	80
4.14	กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของกรณีศึกษาที่ 12	80
4.15	กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของกรณีศึกษาเพิ่มเติม	81

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ขั้นตอนการศึกษา	3
2.1	ตัวประกอบการสูญเสียสูงสุดและต่ำสุดตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง	51
3.1	รายละเอียดการแบ่งกรณีศึกษาของการทดสอบการตอบสนองไดอิเล็กทริกโดยใช้เครื่อง DIRANA	67
3.2	รายละเอียดการแบ่งกรณีศึกษาของการทดสอบการตอบสนองไดอิเล็กทริกโดยใช้เครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD วัดหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ขนาด 50 kVA	68
4.1	ค่าพารามิเตอร์การทดลองกรณีที่ 1 จากโปรแกรม DIRANA	72
4.2	ค่าพารามิเตอร์การทดลองกรณีที่ 2 จากโปรแกรม DIRANA	73
4.3	ค่าพารามิเตอร์การทดลองกรณีที่ 3 จากโปรแกรม DIRANA	74
4.4	ค่าพารามิเตอร์การทดลองกรณีที่ 4 จากโปรแกรม DIRANA	75
4.5	ค่าพารามิเตอร์การทดลองกรณีที่ 5 จากโปรแกรม DIRANA	75
4.6	ค่าพารามิเตอร์การทดลองกรณีที่ 6 จากโปรแกรม DIRANA	76
4.7	ค่าพารามิเตอร์การทดลองกรณีที่ 7 จากการเปรียบเทียบกราฟในโปรแกรม PDC Evaluation	77
4.8	ค่าพารามิเตอร์การทดลองกรณีที่ 8 จากการเปรียบเทียบกราฟในโปรแกรม PDC Evaluation	78
4.9	ค่าพารามิเตอร์การทดลองกรณีที่ 9 จากการเปรียบเทียบกราฟในโปรแกรม PDC Evaluation	79
4.10	ค่าพารามิเตอร์การทดลองกรณีที่ 10 จากการเปรียบเทียบกราฟในโปรแกรม PDC Evaluation	79
4.11	ค่าพารามิเตอร์การทดลองกรณีที่ 11 จากการเปรียบเทียบกราฟในโปรแกรม PDC Evaluation	80
4.12	ค่าพารามิเตอร์การทดลองกรณีที่ 12 จากการเปรียบเทียบกราฟในโปรแกรม PDC Evaluation	81
4.13	ค่าพารามิเตอร์การทดลองกรณีศึกษาเพิ่มเติม จากการเปรียบเทียบกราฟในโปรแกรม PDC Evaluation	81
4.14	ค่าความชื้นของฉนวนเหลวของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 2 ตัว (*เส้นโค้ง Fabre-Pichon สามารถอ้างอิงค่าความชื้นได้สูงสุดที่ 10%)	82
4.15	ค่าความชื้นในฉนวนแข็งที่วัดได้และเวลาที่ใช้ในการวัดด้วยวิธีการต่าง ๆ	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีโครงสร้างซับซ้อน เป็นจุดเริ่มต้นของการจ่ายพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้า และทำหน้าที่ปรับแรงดันไฟฟ้าให้เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามความเหมาะสมในแต่ละพื้นที่ได้ โครงสร้างหลักได้แก่ แกนเหล็ก ตัวนำ และฉนวน ฉนวนเป็นวัสดุที่สำคัญในหม้อแปลงไฟฟ้า ระบบฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วย ระบบฉนวนเหลวและระบบฉนวนแข็ง ฉนวนเหลวมีหน้าที่ระบายความร้อนจากขดลวดและแกนเหล็กเพราะฉนวนเหลวสามารถไหลผ่านจุดต่าง ๆ ภายในหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีโครงสร้างซับซ้อนได้ สามารถป้องกันการลัดวงจรของขดลวดตัวนำ ซึ่งทำงานร่วมกับฉนวนแข็ง ฉนวนแข็งมีหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าและรับแรงทางกล ฉนวนเหลวมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน เปลี่ยนไปตามภาชนะที่บรรจุ จึงไม่สามารถรับแรงทางกลได้เช่นเดียวกับฉนวนแข็ง

ฉนวนเหลวและฉนวนแข็งได้แก่ น้ำมันแร่และกระดาษตามลำดับ น้ำมันแร่เป็นฉนวนเหลวที่มีใช้งานโดยทั่วไปและใช้มาเป็นระยะเวลาอันยาวนานภายในหม้อแปลงไฟฟ้า กระดาษประกอบด้วยเส้นใยเซลลูโลสซึ่งเรียงตัวแบบสุ่ม และเป็นส่วนที่มีความสำคัญกับหม้อแปลงไฟฟ้า เนื่องจากไม่สามารถเปลี่ยนและซ่อมได้ ทำให้สามารถใช้เป็นตัวบ่งบอกอายุขัยของหม้อแปลงไฟฟ้าได้

การวิเคราะห์สภาพฉนวนแข็งจึงเป็นสิ่งสำคัญ วิธีที่นิยมทดสอบเพื่อวิเคราะห์สภาพฉนวนแข็งคือ การวัดปริมาณน้ำหรือความชื้น ซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการเพิ่มการเสื่อมสภาพของฉนวนแข็งให้เร็วขึ้น ส่งผลต่อประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าหลายด้าน อาทิ ความสามารถในการจ่ายโหลด โดยหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีความชื้นจะถูกจำกัดในการจ่ายโหลดไม่ให้สูง เนื่องจากอุณหภูมิที่ทำให้เริ่มเกิดฟองอากาศ (Bubble) จะลดลง ความคงทนของฉนวนแข็ง หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีความชื้นจะทำให้ความเป็นฉนวนของน้ำมันลดลงและทำให้แรงดันที่เกิดการดิสชาร์จบางส่วนลดลง ส่งผลต่ออายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า เนื่องจากความแข็งแรงทางกลของฉนวนแข็งจะลดลงเมื่อความชื้นสูงขึ้น โดยทั่วไปค่าความชื้นของฉนวนแข็งของหม้อแปลงไฟฟ้าใหม่ จะถูกกำหนดไว้ที่ค่าต่ำกว่า 0.5% เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้ามีอายุมากขึ้นความชื้นก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น กรณีหม้อแปลงประเภท open-breathing type ค่าความชื้นจะเพิ่มขึ้นประมาณ 0.2% ต่อปี และหม้อแปลงไฟฟ้าประเภท sealed conservator type มีค่าความชื้นเพิ่มขึ้นประมาณ 0.05% ต่อปีสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าเก่าหรือหม้อแปลงไฟฟ้าที่เสื่อมสภาพอาจมีค่าความชื้นมากกว่า 4% สามารถกล่าวได้ว่าอายุของฉนวนเกี่ยวข้องโดยตรงกับปริมาณความชื้น

การวัดค่าความชื้นของฉนวนแข็งแบ่งเป็น 2 วิธีหลักคือ วิธีทางตรงและวิธีทางอ้อม วิธีทางตรงนำตัวอย่างกระดาษหรือน้ำมันจากหม้อแปลงไฟฟ้ามาวัดความชื้นโดยใช้การไทเทรตแบบ Karl Fischer และวิธีทางอ้อมซึ่งมีหลากหลายวิธี วิธีที่ได้รับความนิยมและมีประสิทธิภาพในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์และแม่นยำคือ การวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริก โดยการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกมีหลากหลายวิธี แบ่งเป็น 2 วิธีหลักคือ วิธีกระแสตรงหรือเทคนิคการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (polarization and depolarization ไรเซชัน, PDC) และวิธีกระแสสลับหรือเทคนิคการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ (frequency domain spectroscopy, FDS) ซึ่งแต่ละวิธีนั้นมีจุดเด่นและจุดด้อยที่แตกต่างกัน ปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้กับวิธีการทดสอบเพื่อหาค่าความชื้นของฉนวนแข็งมากมาย อาทิ เทคนิคการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ร่วมกับการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (FDS & PDC) เป็นการนำเอาจุดเด่นของทั้งสองเทคนิคมาประยุกต์ใช้ร่วมกันทำให้การวัดมีประสิทธิภาพมากขึ้น

โครงการเล่มนี้ศึกษาและเปรียบเทียบวิธีในการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของหม้อแปลงไฟฟ้า ด้วยเทคนิคการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (PDC) การวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ (FDS) การวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ร่วมกับการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (FDS & PDC) และการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ร่วมกับการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันพลัส (FDS & PDC+) เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์การเสื่อมสภาพฉนวน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการโครงการ

1. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลการตอบสนองไดอิเล็กทริกของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยเทคนิคการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (PDC) การวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ (FDS) การวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ร่วมกับการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (FDS & PDC) และการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ร่วมกับการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันพลัส (FDS & PDC+)
2. เพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการตอบสนองไดอิเล็กทริก ได้แก่ ระดับแรงดันที่จ่ายและเวลาในการชาร์จประจุในเทคนิคการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (PDC)
3. เพื่อเปรียบเทียบผลการตอบสนองไดอิเล็กทริกด้วยเทคนิคต่าง ๆ และนำไปเทียบค่าความชื้นกับการนำตัวอย่างน้ำมันมาทดสอบด้วยวิธีการไทเทรตแบบ Karl Fischer

## 1.3 ขอบเขตโครงการ

โครงการนี้ศึกษาและเปรียบเทียบวิธีในการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 50 kVA 50 Hz และ 1500 kVA 50 Hz ที่มีการดูแลและบำรุงรักษาต่างกัน โดยการเก็บตัวอย่างน้ำมันทั้ง 2 หม้อแปลงมาทดสอบหาความชื้นด้วยเครื่องไทเทรตเชิงปริมาตรและ

คู่มือเมตริกแบบ Karl Fischer เปรียบเทียบกับการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกเทคนิคการวัด 4 เทคนิค ดังนี้

1. เทคนิคการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (PDC) ด้วยเครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD
2. เทคนิคการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ (FDS) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ฉนวนไดอิเล็กทริก DIRANA
3. เทคนิคการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ร่วมกับการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (FDS & PDC) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ฉนวนไดอิเล็กทริก DIRANA
4. เทคนิคการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ร่วมกับการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันพลัส (FDS & PDC+) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ฉนวนไดอิเล็กทริก DIRANA

#### 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

##### ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการศึกษา

การดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2565					ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2565				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	●	●	●							
2. ศึกษาข้อมูลการวัดค่าและแปรผลการตอบสนองไดอิเล็กทริกด้วยเทคนิคต่าง ๆ			●	●	●					
3. ออกแบบการทดลองและเตรียมเครื่องมือการทดสอบ					●	●				
4. ทดสอบและแก้ไขปัญหา							●			
5. ตรวจสอบข้อมูลและทดสอบซ้ำ								●		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตารางที่ 1.1 (ต่อ) ขั้นตอนการศึกษา

6. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง								●	●	
7. จัดทำเล่มโครงงาน									●	●

### 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. โครงงานนี้เป็นการการศึกษาและเปรียบเทียบวิธีในการวัดผลตอบสนองไดโอดีเล็กทริกของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีพิกัดกำลัง การดูแล และบำรุงรักษาต่างกัน ด้วยเทคนิคการวัดที่แตกต่างกัน โดยการบูรณาการความรู้ทางทฤษฎีด้านวิศวกรรมที่ได้เรียนมา ร่วมกับการปฏิบัติจริง ดังนั้นผลลัพธ์ของงานโครงงานนี้ทำให้เกิดความเข้าใจในเนื้อหาความรู้เกี่ยวกับการวินิจฉัยสภาพนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้า และความชำนาญในการปฏิบัติมากขึ้น
2. โครงงานนี้ได้อบรมความรู้ทางทฤษฎีด้านวิศวกรรมที่ได้เรียนนำมาใช้คำนวณวางแผน และออกแบบการทดสอบการวัดผลตอบสนองไดโอดีเล็กทริกของหม้อแปลงไฟฟ้าตามเทคนิคการทดสอบต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบ ซึ่งการคำนวณวางแผน และออกแบบการทดสอบจำเป็นต้องอยู่ภายใต้ข้อกำหนดและมาตรฐานสากล ดังนั้นผลลัพธ์ของโครงงานนี้ ทำให้เกิดความเข้าใจในข้อกำหนดและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับผลตอบสนองไดโอดีเล็กทริกของหม้อแปลงไฟฟ้า

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

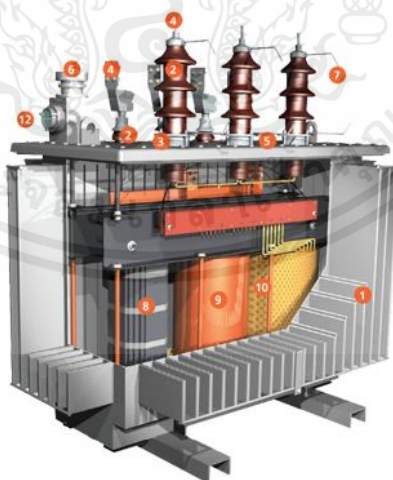
ในบทนี้อธิบายถึงระบบฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ได้แก่ ฉนวนเหลวและฉนวนแข็ง รวมถึงการทดสอบฉนวนทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับโครงการ ได้แก่ การวัดค่ากระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน การวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ รวมถึงการแปลผลข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ

#### 2.1 หม้อแปลงไฟฟ้า

เป็นส่วนสำคัญในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าเพราะหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับถ่ายเทกำลังไฟฟ้าจากแรงดันระดับหนึ่งไปยังแรงดันอีกระดับหนึ่ง อาจสูงขึ้น ต่ำลง หรือแรงดันอาจเท่าเดิม การทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าจะอาศัยการเหนี่ยวนำของขดลวด ที่อยู่ในสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

##### 2.1.1 ส่วนประกอบโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า

ส่วนประกอบที่สำคัญของหม้อแปลงไฟฟ้า ประกอบด้วย แกนเหล็ก เป็นทางเดินของเส้นฟลักซ์แม่เหล็กและมีขดลวดสองชุด ชุดหนึ่งเป็นด้านป้อนแรงดันเข้า อีกชุดหนึ่งเป็นด้านจ่ายแรงดันออก พันอยู่บนแกนเหล็กดังรูปที่ 2.1 นอกจากแกนเหล็กและขดลวด มีฉนวนซึ่งถือเป็นส่วนประกอบสำคัญในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทุกชนิด



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) Tank and Fin: โดย Tank ทำหน้าที่ห่อหุ้มชิ้นส่วนที่สำคัญภายในของหม้อแปลงไฟฟ้า เช่น แกนเหล็ก ขดลวด และน้ำมัน ส่วน Fin เป็นส่วนประกอบของ Tank ทำหน้าที่ระบายความร้อน ขณะใช้งาน

2) HV and LV Bushing: เป็นฉนวนกั้นระหว่างขั้วตัวนำด้านแรงสูงและแรงต่ำ กับ Tank

3) Transformer Gasket: เป็นวัสดุที่ใช้ป้องกันการรั่วซึมของน้ำมัน

4) HV and LV Terminal: เป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้ากับสายไฟฟ้า

5) Tap Changer: สำหรับปรับเพิ่มหรือลดระดับแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อรักษาระดับแรงดันด้านผู้ใช้ไฟให้คงที่ มีทั้งแบบ Off-Load Tap Changer และแบบ On-Load Tap Changer (OLTC)

6) Pressure-Relief Device: ทำหน้าที่ระบายความดันภายใน Tank ที่มากเกินไป กำหนด ใช้ป้องกัน Tank และ Fin ไม่ให้เกิดความเสียหาย จะมีทั้งแบบ Without Contact และ With Contact

7) Arcing Horn: ทำหน้าที่ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้า จากความเสียหายที่เกิดขึ้นจากแรงดันเกิน (surge) โดยเฉพาะที่เกิดจากฟ้าผ่า

8) Transformer Core: แกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า ใช้เป็นทางผ่านของสนามแม่เหล็กระหว่างขดลวดแรงสูงและแรงต่ำ

9) HV Winding: เป็นขดลวดด้านแรงสูง

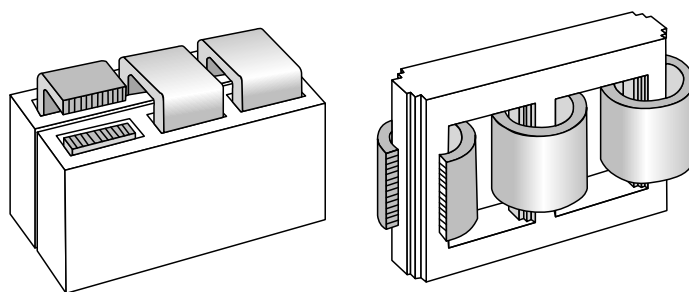
10) LV Winding: เป็นขดลวดด้านแรงต่ำ

11) Dial Type Thermometer: แสดงอุณหภูมิของน้ำมัน จะมีทั้งแบบ Without Contact และ With Contact

12) Oil Level Indicator: แสดงระดับน้ำมันภายใน Tank จะมีทั้งแบบ Without Contact และ With Contact

### 2.1.2 ประเภทของหม้อแปลงไฟฟ้า

สามารถแบ่งตามแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชลล์ (Shell-type transformer) และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบคอร์ (Core-type transformer)



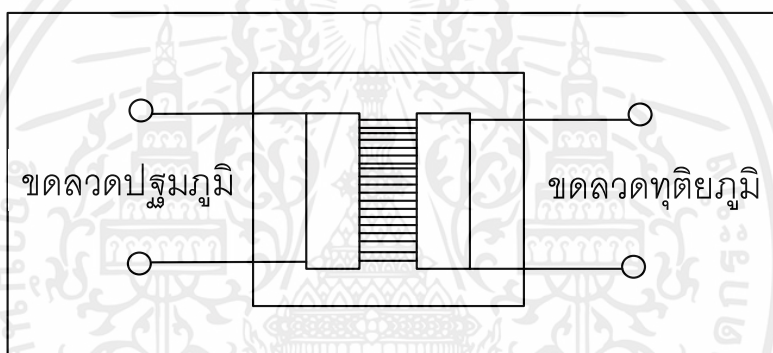
(ก) หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชลล์

(ข) หม้อแปลงไฟฟ้าแบบคอร์

รูปที่ 2.2 ประเภทของหม้อแปลงไฟฟ้าที่แบ่งตามแกนเหล็ก [1]

## 1) แบบ Shell-Type

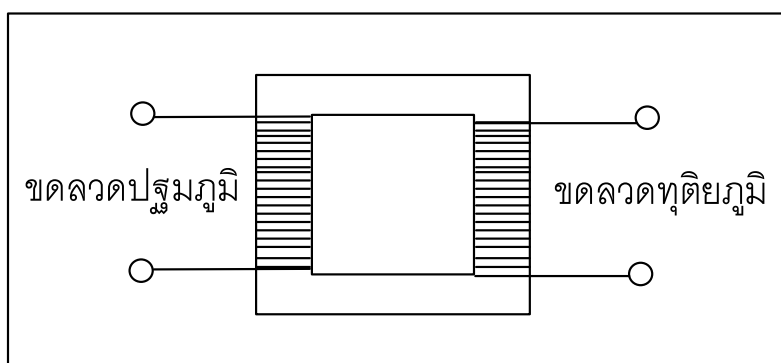
มีลักษณะเป็นตัว E และ I โดยพันลวดอยู่ตรงกลาง มีคุณสมบัติของเส้นแรงแม่เหล็กดีกว่าแบบ Core-Type เพราะเส้นแรงแม่เหล็กเกิดได้ทั้งสองข้าง



รูปที่ 2.3 แกนเหล็กแบบ Shell-Type [1]

## 2) แบบ Core-Type

ใช้กันมากในการทำหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแรงดันสูง สามารถพันขดลวดบนแกนเหล็กได้ง่าย ประกอบแกนเหล็กได้ดีกว่าแบบอื่น เพราะมีช่องมาก แต่ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กวิ่งได้เพียงทางเดียวเท่านั้น จึงมีค่าความต้านทานแม่เหล็กสูง แกนเหล็กเป็นรูปตัว U และ I การจัดวางแผ่นเหล็กของแกนเหล็กวางสลับเป็นชั้นดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แกนเหล็กแบบ Core-Type [1]

### 2.1.3 ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า

ขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้ามี 2 ขด คือ ขดลวดปฐมภูมิ (Primary Winding) และ ขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Winding)

#### 1) ขดลวดปฐมภูมิ (Primary Winding)

เป็นขดลวดแรงดันสูงที่รับกระแสไฟฟ้าจากระบบจำหน่าย เหนี่ยวนำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กไปตามแกนเหล็กคล้องกับขดลวดทุติยภูมิ และเหนี่ยวนำให้เกิดเป็นแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ ลักษณะของขดลวดปฐมภูมิจะเป็นขดลวดเส้นเล็กซึ่งสามารถทนกระแสทางด้านปฐมภูมิ (Primary current) ได้ตามพิกัด

#### 2) ขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Winding)

เป็นขดลวดแรงดันต่ำ ที่จ่ายไฟให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าส่วนมากเป็นขดลวดทองแดงที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดสูง หรือนำเอาลวดหลายเส้นมารวมกันพันแล้วต่อหัวท้ายเป็นเส้นเดียวกัน เส้นลวดแต่ละเส้นมีฉนวนหุ้มอยู่ การพันลวดต้องพยายามให้ลวดแต่ละเส้นมีความยาวเท่ากัน เพื่อป้องกันกระแสไหลวนในเส้นลวดและให้กระแสไฟฟ้าไหลได้มากตามพิกัด

### 2.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมอายุของหม้อแปลงไฟฟ้า

#### 1) การเสื่อมสภาพทางความร้อน (Thermal Ageing)

กลไกที่มีผลมากที่สุดในการทำให้ฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าเสื่อมสภาพคือ การเสื่อมสภาพทางความร้อน ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพในฉนวน การเสื่อมสภาพดังกล่าวเป็นผลมาจากปฏิกิริยาการย่อยสลายทางเคมี โพลีเมอไรเซชัน ดีพอลิเมอไรเซชัน การแพร่กระจาย ฯลฯ ผลกระทบทางอุณหพลศาสตร์ที่เกิดจากแรง เนื่องจากการขยายตัวทางความร้อนและการหดตัวก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพ ผลกระทบทั้งสองอย่างนี้ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและความเค้นทางอุณหพลศาสตร์ได้รับอิทธิพลอย่างมากจากอุณหภูมิในการทำงาน

### 2) ปัจจัยจากการเสื่อมสภาพทางไฟฟ้า (Electrical Ageing)

อายุการใช้งานทางไฟฟ้าไม่ว่าจะอยู่ภายใต้ความเค้นหรือแรงกระตุ้นจากไฟฟ้า ยังนำไปสู่การเสื่อมสภาพของฉนวนตลอดเวลาการทำงาน ปัจจัยนี้เกี่ยวข้องกับอิทธิพลของการดิสชาร์จบางส่วนในไดอิเล็กทริกที่เป็นของเหลว ก๊าซที่อยู่ติดกับแหล่งจ่าย หรือตามฉนวนที่เป็นของแข็งและของเหลวภายใต้ความเค้นทางไฟฟ้าสูง นอกจากนี้การสูญเสียอิเล็กทริกที่สูงและผลกระทบของประจุในอากาศยังส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของฉนวนอีกด้วย ผลกระทบของการสลายตัวทางไฟฟ้าและทางเคมีเกิดขึ้นในรูปแบบของอิเล็กโทรไลซิสของฉนวนเหลว โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีสิ่งเจือปนที่มีขี้

### 3) ปัจจัยจากการเสื่อมสภาพทางกล (Mechanical Ageing)

อายุเชิงกลของโครงสร้างฉนวนอาจเกิดจากความเค้นทางกลที่เกิดจากไฟฟ้าหรือความร้อนเชิงกลที่เกิดขึ้นซ้ำ ๆ ในระดับต่ำและค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนทำให้ฉนวนที่เป็นของแข็งแตกได้ภายใต้แรงจากภายนอกหรือภายใน ส่วนประกอบที่เกี่ยวข้องกับชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหว เช่น ตัวเปลี่ยนแท๊ป อาจมีการสึกหรอจากการเสียดสีที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนฉนวน

### 4) ปัจจัยจากการเสื่อมสภาพจากปัจจัยแวดล้อม (Environmental Ageing)

นอกจากกระบวนการย่อยสลายทางเคมีและความร้อนที่เน้นข้างต้นแล้ว ปัจจัยแวดล้อมภายนอกอื่น ๆ รวมถึงอิทธิพลของฝุ่นและการปนเปื้อน ส่งผลต่อพฤติกรรมทางไฟฟ้าของอุปกรณ์

## 2.2 ระบบฉนวนเหลวภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

หน้าที่ของฉนวนเหลวในหม้อแปลงไฟฟ้าคือ การเป็นฉนวนไฟฟ้าระหว่างชิ้นส่วนต่าง ๆ ในหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นชั้นเคลือบป้องกันการเกิดออกซิเดชันของพื้นผิวโลหะ เป็นสื่อกลางในการระบายความร้อน โดยนำความร้อนออกจากแกนเหล็กและขดลวดไปยังถังโดยรอบซึ่งจะถูกระบายออกสู่อากาศภายนอกต่อไป บ่งชี้ความสมบูรณ์ของอุปกรณ์ ทั้งสภาพทางเคมีและไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า ฉนวนเหลวสำหรับใช้งานในหม้อแปลงไฟฟ้ามีคุณสมบัติที่ควรจะเป็น ดังนี้

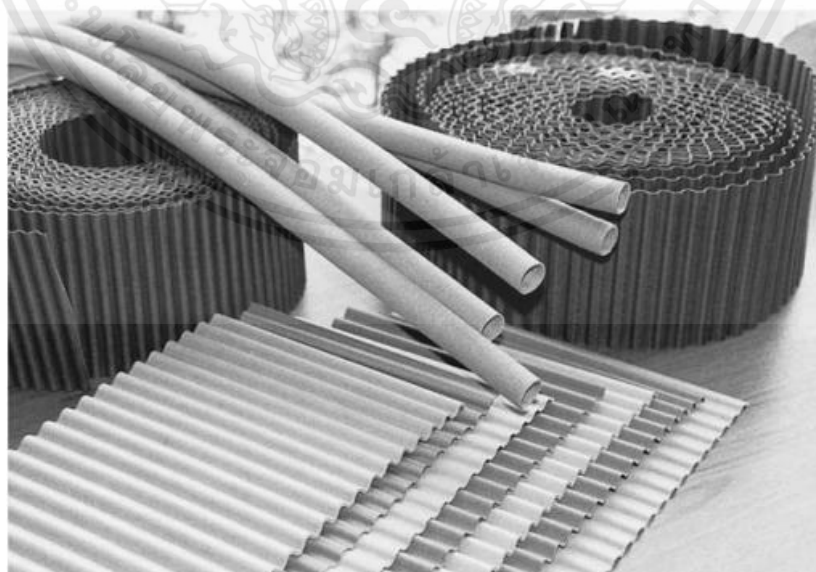
- ค่าความเป็นฉนวนสูง
- ทนต่อแรงดันอิมพัลส์ได้สูง
- ค่าความต้านทานสูง
- ปัจจัยการกระจายอิเล็กทริกต่ำ
- มีเสถียรภาพทางเคมีที่ดี
- ความหนืดต่ำ
- ความหนาแน่นต่ำ
- ความผันผวนต่ำและจุดวาบไฟสูง
- คุณสมบัติดับอาร์กที่ดี

- ไม่ติดไฟและไม่เป็นพิษ
- ราคาถูกและง่ายต่อการเข้าถึง
- จุดรักษาสภาพการไหลต่ำ
- ความแข็งแรงทางไฟฟ้าสูง
- ความร้อนจำเพาะสูง
- การนำความร้อนสูง
- พลังงานตัวทำละลายต่ำ
- ความหนาแน่นต่ำ

ฉนวนเหลวที่ใช้งานในปัจจุบันมีหลากหลายชนิด สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ ฉนวนเหลวอินทรีย์ โดยมีประกอบด้วยคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ได้มาจากวัตถุดิบธรรมชาติ เช่น น้ำมันแร่ น้ำมันพืช เอสเตอร์ธรรมชาติ ฯลฯ หรือกระบวนการสังเคราะห์ เช่น เอสเตอร์สังเคราะห์ ไฮโดรคาร์บอนสังเคราะห์ ฯลฯ และฉนวนเหลวอนินทรีย์ โดยเกิดจากกระบวนการผลิต เช่น ไนโตรเจน น้ำบริสุทธิ์ ฯลฯ

### 2.3 ระบบฉนวนแข็งภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

การเสื่อมสภาพของฉนวนแข็งของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นปัญหาที่ร้ายแรงที่สุด สิ่งสำคัญคือ อายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับการออกแบบและเงื่อนไขของฉนวนแข็ง จะต้องเหมาะสมสำหรับอายุการใช้งาน 40 ปี หรือมากกว่า โดยฉนวนแข็งในหม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วย



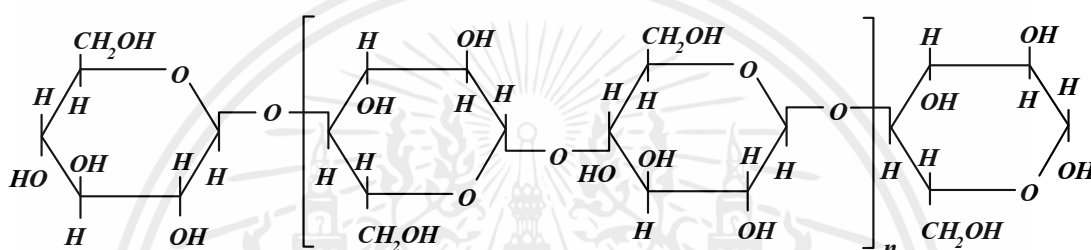
รูปที่ 2.5 ผลิตภัณฑ์ฉนวนบางชนิดที่พัฒนาขึ้นเฉพาะสำหรับอุตสาหกรรมหม้อแปลงไฟฟ้า [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1 กระดาษคราฟท์ (Kraft paper)

กระดาษเป็นหนึ่งในวัสดุฉนวนไฟฟ้าที่ถูกลงและดีที่สุด กระดาษทางไฟฟ้าต้องเป็นไปตามมาตรฐานและข้อกำหนดทางกายภาพ ทางไฟฟ้า และทางเคมี โดยทั่วไปคุณสมบัติทางไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกระดาษ คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญคือ มีความเป็นฉนวนสูง มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกใกล้เคียงกับน้ำมันแร่ และตัวประกอบกำลังสูญเสียต่ำ

สำหรับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของกระดาษคราฟท์ มีค่าประมาณ 4.4 และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำมันแร่มีค่าประมาณ 2.2 ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า ผู้ผลิตจะต้องคำนวณให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของกระดาษและน้ำมันใกล้เคียงกัน ซึ่งจะทำให้กระดาษและน้ำมันมีความเค้นร่วมกัน



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางพันธะเคมีของเซลลูโลส [1]

### 2.3.2 คอตตอนเซลลูโลส (Cotton cellulose)

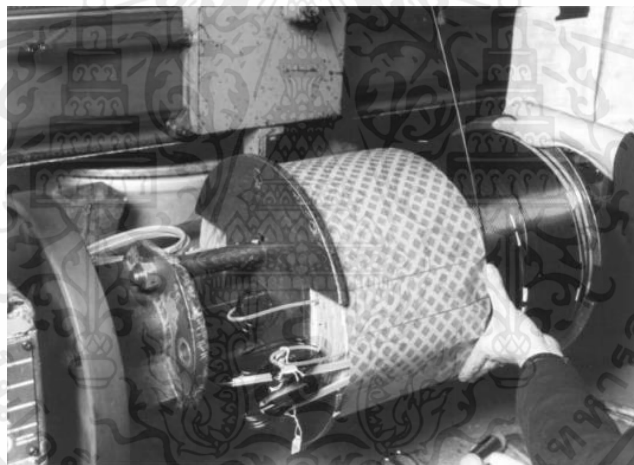
คอตตอนเซลลูโลส เป็นทางเลือกของเซลลูโลสที่บริสุทธิ์ ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในสหราชอาณาจักรเป็นเวลาหลายปี เพื่อผลิตกระดาษที่เรียกว่า Rag paper โดยมีจุดประสงค์เพื่อรวมความแข็งแรงทางไฟฟ้าและคุณสมบัติเชิงกลที่เหนือกว่ากระดาษคราฟท์ คอตตอนเซลลูโลสมีเส้นใยยาวกว่าเยื่อไม้ทั่วไป แต่แรงยึดเหนี่ยวภายในไม่ดี

### 2.3.3 กระดาษสำหรับการใช้งานพิเศษ (Papers for special applications)

กระดาษชนิดพิเศษที่มีคุณสมบัติที่ได้รับการพัฒนาเพื่อตอบสนองความต้องการเฉพาะทางของอุตสาหกรรมหม้อแปลงไฟฟ้า มี 4 ชนิด คือ Crêped paper, Highly extensible paper, Thermally upgraded paper และ Diamond dotted presspaper



รูปที่ 2.7 การพันสายในหม้อแปลงไฟฟ้าด้วย Crêped paper [1]

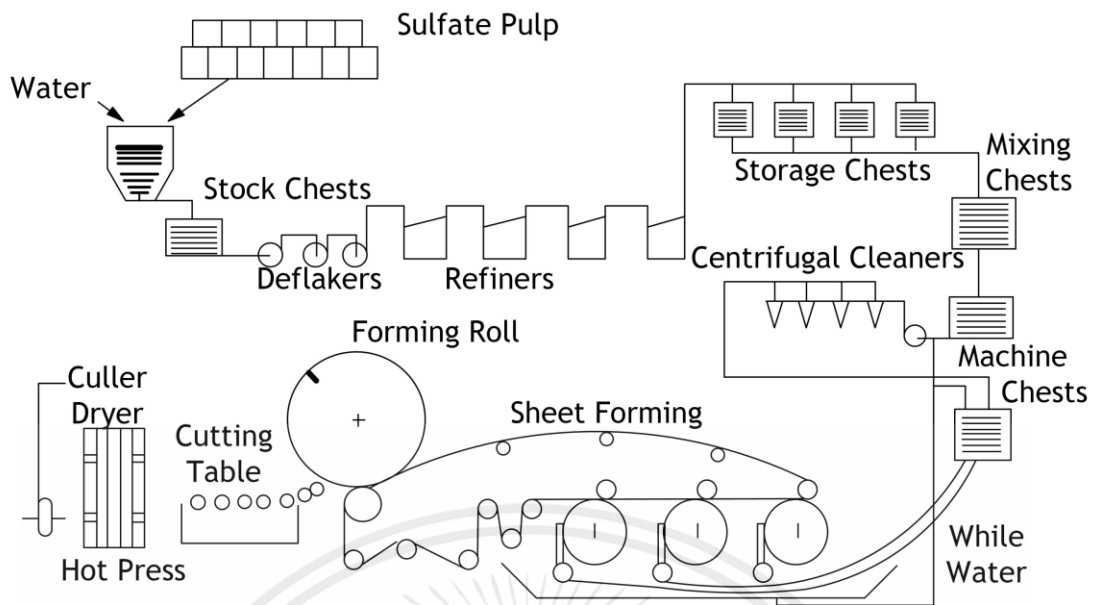


รูปที่ 2.8 กระดาษพิมพ์ลาย Diamond dotted [1]

#### 2.3.4 เพรสบอร์ด (Pressboard)

เพรสบอร์ด ผลิตจากกระดาษหลายชั้น กระบวนการที่ใช้ในการผลิตเพรสบอร์ด จะใช้กระดาษหลายชั้นขนาดบาง เพื่อให้ได้ความหนาที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 กระบวนการที่ใช้ในการผลิตเพรสบอร์ด [1]

ซึ่งกระดาษแข็งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทพื้นฐาน

- 1) สร้างขึ้นจากชั้นกระดาษล้วน ๆ ในสถานะเปียก โดยไม่มีสารยึดเกาะ
- 2) สร้างขึ้นจากการใช้กาวที่เหมาะสมในการยึดติดแผ่นแต่ละแผ่น ทำให้มีความหนา

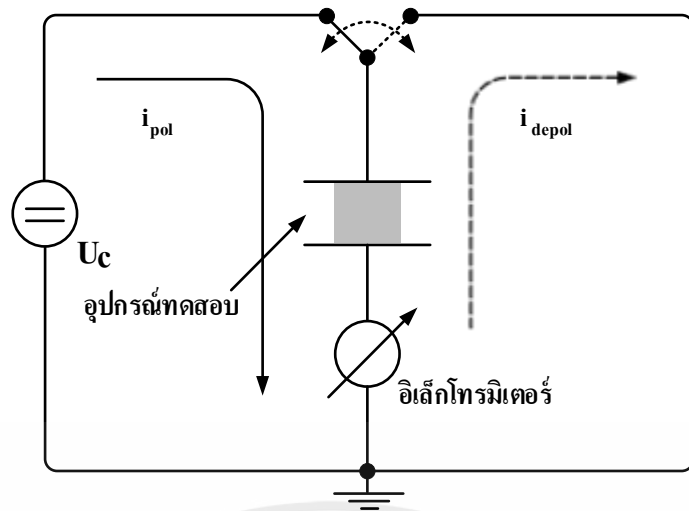
มากขึ้น

## 2.4 เทคนิคการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (PDC)

### 2.4.1 กระบวนการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันขั้นพื้นฐาน

การวิเคราะห์กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันโดยการวัดกระแสโพลาริเซชันด้วยการจ่ายแรงดันกระแสตรง หลังจากหยุดจ่ายแรงดันกระแสตรงออกจากระบบฉนวนแล้ว ระบบฉนวนในกรณีนี้สามารถนับเป็นฉนวนระหว่างขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ กระแสเหล่านี้จะบ่งบอกสภาพของระบบฉนวนแข็งที่ซบด้วยน้ำมัน วิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันถูกใช้เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ของความชื้นในฉนวนของแข็งของหม้อ สามารถบอกการนำไฟฟ้าของน้ำมันและกระดาษตาม ข้อมูลการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันยังสามารถใช้ในการคำนวณความต้านทานของฉนวนและดัชนีโพลาริเซชัน ข้อมูลการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันสามารถใช้เพื่อประมาณค่าความจุเชิงซ้อนและปัจจัยการกระจายตัวในโดเมนความถี่ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้

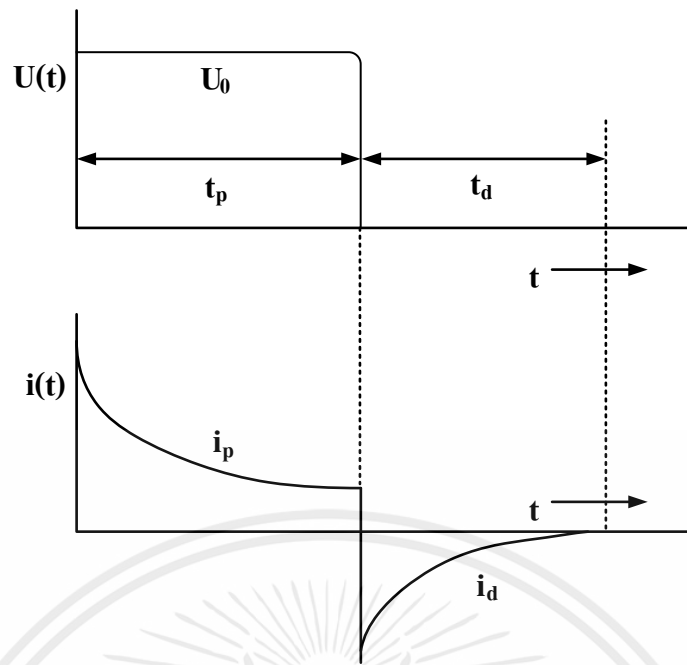
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 วิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันเมื่อสวิตช์อยู่ในตำแหน่งที่หนึ่ง [4]

แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าจะเชื่อมต่อกับวัตถุทดสอบ กระแสโพลาริเซชันจะไหลและวัดผ่านอิมพีแดนซ์มิเตอร์หรืออุปกรณ์วัดกระแสต่ำ หลังจากเวลาชาร์จ ( $t_p$ ) สวิตช์จะไปอยู่ที่ตำแหน่งที่ 2 วัตถุทดสอบลัดวงจรกระแสดีโพลาริเซชัน ( $i_{depol}$ ) ไหลผ่านอิมพีแดนซ์มิเตอร์ ซึ่งวัดกระแสการชาร์จและการคายประจุ (กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน)

หลักการการทำงานของวิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน แสดงไว้ในรูปที่ 2.11 ในช่วงเวลาโพลาริเซชัน กระแสเกิดขึ้นจากการกระตุ้นกระบวนการโพลาริเซชันด้วยค่าคงที่ของเวลาที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับการนำไฟฟ้าของวัตถุทดสอบ เมื่อหยุดจ่ายแรงดันไฟฟ้าและวัตถุเกิดการลัดวงจร กระบวนการโพลาริเซชันจะก่อให้เกิดกระแสดีโพลาริเซชันหรือการคายประจุในทิศทางตรงกันข้าม ซึ่งไม่มีส่วนนำไฟฟ้า รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะทั่วไปธรรมชาติของกระแสเหล่านี้ เนื่องจากแรงดันชาร์จไฟกระแสตรง ( $U_0$ ) กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันได้รับอิทธิพลจากคุณสมบัติของวัสดุฉนวน เช่นเดียวกับโครงสร้างทางเรขาคณิตของระบบฉนวน เมื่อแรงดันชาร์จไฟกระแสตรง ถูกนำไปใช้อย่างกะทันหันกับวัตถุทดสอบที่ไม่มีประจุก่อนหน้านี้ จะมีการเคลื่อนที่ของประจุเนื่องจากการทำงานร่วมกันของสนามไฟฟ้ากับประจุอิสระและประจุไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ ภายในไดอิเล็กทริก ที่เรียกว่ากระแสโพลาริเซชัน ( $i_p$ ) นี้เป็นกระแสคล้ายพัลส์ที่เวลา  $t = 0$  จากนั้นจะลดลงในช่วงเวลาโพลาริเซชัน ( $t_p$ ) จนถึงค่าหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการนำไฟฟ้าของฉนวนภายใน



รูปที่ 2.11 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน [4]

การวัดกระแสโพลาริเซชันสามารถหยุดได้เมื่อค่าเริ่มคงที่หรือต่ำมาก หากวัตถุทดสอบเกิดการลัดวงจรกะทันหัน กระแสไฟที่คายประจุ  $i_d$  (กระแสดีโพลาริเซชัน) จะกระโดดไปที่ค่าลบที่ค่อย ๆ ลดลงจนเหลือศูนย์ ถ้า  $t_p$  มีค่ามาก  $i_d$  จะกลายเป็นสัดส่วนโดยตรงกับฟังก์ชันตอบสนองไดโอดีเล็กทริก

ในขณะที่ทำการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของหม้อแปลงไฟฟ้า บุขซึ่งแรงดันสูงทั้งหมดจะเชื่อมต่อเข้าด้วยกันเพื่อสร้างอิเล็กทรอนิกส์ที่หนึ่งและบุขซึ่งแรงดันต่ำที่ลัดวงจรทั้งหมดจะประกอบเป็นอิเล็กทรอนิกส์ที่สอง กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันจะถูกวัดระหว่างขดลวดแรงดันต่ำและแรงดันสูงระหว่างการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน แนะนำให้ต่อสายดินของถึงหม้อแปลงไฟฟ้าในการวัด ฉนวนระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ทั้งสองจะถูกชาร์จด้วยแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงระหว่าง 500 V ถึง 1,000 V เป็นระยะเวลาสั้น โดยที่ระยะเวลาที่แนะนำโดยทั่วไปคือ 10,000 วินาที ต้องใช้เวลาในการชาร์จต่อโพลาริเซชันนานเพื่อประเมินค่าการนำไฟฟ้ากระแสตรงที่เป็นฉนวนแข็ง กระแสชาร์จหรือกระแสโพลาริเซชันที่วัดได้ในช่วงเวลานี้คือการรวมกันของกระแสดุดกลืนและกระแสการนำไฟฟ้า เมื่อสิ้นสุดเวลาการชาร์จที่ตั้งไว้ล่วงหน้า วัตถุทดสอบจะสลับไปมาเพื่อปลดฉนวนออกจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและวัตถุทดสอบจะลัดวงจรเป็นระยะเวลาสั้นอีก 10,000 วินาที โดยทั่วไปแล้วกระแสดีโพลาริเซชัน (การคายประจุ) ที่วัดได้ในช่วงเวลานี้ประกอบด้วยกระแสดุดกลืนเท่านั้น เนื่องจากกระแสการนำไฟฟ้าจะมีอยู่ในระหว่างการชาร์จแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่านั้น กระแสดีโพลาริเซชันจะสลายตัวเร็วไว้มากและควรมีค่าน้อยมาก

### 2.4.2 ทฤษฎีพื้นฐานของการตอบสนองไดโอิเล็กทริก

เมื่อสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ  $E(t)$  ถูกนำไปใช้กับวัสดุไดโอิเล็กทริกความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าผ่านพื้นผิวของวัสดุสามารถเขียนเป็น

$$J(t) = \sigma E(t) + \frac{dD(t)}{dt} \quad (2.1)$$

ความหนาแน่นกระแส  $J(t)$  คือ ผลรวมของกระแสการนำไฟฟ้าและกระแสการกระจัด โดยที่  $\sigma$  คือ การนำไฟฟ้ากระแสตรง และ  $D(t)$  คือ การเคลื่อนที่ด้วยไฟฟ้า

$$D(t) = \epsilon_0 \epsilon_r E(t) + \Delta P(t) \quad (2.2)$$

โดยที่  $\epsilon_0$  คือ ค่าสภาพยอมสุญญากาศ และ  $\epsilon_r$  คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของฉนวนที่ความถี่ไฟฟ้า (โดยทั่วไปคือ 4.5 สำหรับกระดาษเซลลูโลสและเพอร์สบอร์ด และ 2.2 สำหรับน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าไฮโดรคาร์บอน)  $P(t)$  เป็นโพลาริเซชันไดโอิเล็กทริกและเกี่ยวข้องกับฟังก์ชันการตอบสนองไดโอิเล็กทริกของวัสดุ  $f(t)$  โดยความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\Delta P(t) = \epsilon_0 \int_0^\infty f(t - \tau) \cdot E(\tau) d\tau \quad (2.3)$$

ฟังก์ชันตอบสนอง  $f(t)$  อธิบายคุณสมบัติหน่วยความจำพื้นฐานของระบบไดโอิเล็กทริก และสามารถให้ข้อมูลที่สำคัญเกี่ยวกับวัสดุฉนวน ฟังก์ชัน  $f(t)$  สามารถกำหนดได้จากการทดลองโดยเป็นการตอบสนองของไดโอิเล็กทริกต่อสนามประจุไฟฟ้าแบบ step-function

1) กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน

เมื่อรวมสมการ (2.2) (2.3) และ (2.1) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$J(t) = \sigma E(t) + \epsilon_0 \epsilon_r \frac{dE(t)}{dt} + \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_0^t f(t - \tau) \cdot E(\tau) d\tau \quad (2.4)$$

สำหรับวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกันเส้นแรงของสนามแม่เหล็ก  $E(t)$  สามารถพิจารณาได้จากแรงดันไฟฟ้าภายนอก  $U(t)$  กระแสที่ผ่านวัตถุทดสอบที่มีความจุทางเรขาคณิต  $C_0$  (ความจุที่วัดได้ ที่หรือใกล้กับความถี่กำลังไฟฟ้าหารด้วย  $\epsilon_r$ ) สามารถเขียนได้เป็น

$$i(t) = C_0 \left[ \frac{\sigma}{\epsilon_0} U(t) + \epsilon_r \frac{dU(t)}{dt} + \frac{d}{dt} \int_0^t f(t - \tau) \cdot U(\tau) d\tau \right] \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบสามารถเป็นวัสดุไดอิเล็กทริกเดี่ยวหรือการจัดเรียงวัสดุไดอิเล็กทริกหลายตัวในอนุกรมหรือขนานกัน สำหรับวัสดุไดอิเล็กทริกมากกว่าหนึ่งชนิด  $\sigma$ ,  $\epsilon_r$  และ  $f(t)$  แทนค่าค่าการนำไฟฟ้า ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ และฟังก์ชันการตอบสนองอิล็กทริกกว่าวัสดุทดสอบถูกคายประจุทั้งหมดและมีการใช้แรงดันไฟฟ้าแบบ step voltage ที่มีลักษณะดังต่อไปนี้

$$U(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ U_0 & 0 \leq t \leq t_p \\ 0 & t > t_p \end{cases} \quad (2.6)$$

สมการนี้จะให้กระแสเป็นศูนย์ในเวลาก่อน  $t = 0$  และเรียกว่ากระแสโพลาริเซชันสำหรับเวลา  $0 \leq t \leq t_p$  กระแสโพลาริเซชันแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนหนึ่งเกี่ยวข้องกับการนำไฟฟ้าของวัสดุทดสอบและอีกส่วนหนึ่งเกี่ยวข้องกับการเปิดใช้งานกระบวนการโพลาริเซชันที่แตกต่างกันภายในวัสดุทดสอบ ดังนั้นกระแสโพลาริเซชัน (ชาร์จ) ผ่านวัสดุสามารถแสดงได้

$$i_p(t) = C_0 U_0 \left[ \frac{\sigma}{\epsilon_0} + f(t) \right] \quad (2.7)$$

เมื่อแรงดัน step ถูกแทนที่ด้วยการลัดวงจร กระแสดีโพลาริเซชันจะถูกสร้างขึ้นขนาดของกระแสดีโพลาริเซชันแสดงดังสมการด้านล่างโดยที่  $t_p$  คือเวลาที่ป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับวัสดุทดสอบ

$$i_d(t) = -C_0 U_0 [f(t) - f(t + t_p)] \quad (2.8)$$

2) การประมาณค่าฟังก์ชันการตอบสนองของไดอิเล็กทริก แสดงให้เห็นว่าสำหรับระบบฉนวนน้ำมันและเซลลูโลส “ฟังก์ชันการตอบสนองทั่วไป” สามารถแสดงในรูปแบบพาราเมตริกได้ดังนี้

$$f(t) = \frac{A}{\left(\frac{t}{t_0}\right)^n + \left(\frac{t}{t_0}\right)^m} \quad (2.9)$$

โดย  $A$ ,  $t_0 > 0$ ,  $m > n > 0$ , และ  $m > 1$  ในการประมาณค่าฟังก์ชันตอบสนองไดอิเล็กทริก  $f(t)$  จากการวัดกระแสดีโพลาริเซชัน จะถือว่าฟังก์ชันตอบสนองไดอิเล็กทริกเป็นฟังก์ชันที่ลดลงอย่างต่อเนื่องใน เวลา จากนั้นหาระยะเวลาโพลาริเซชันนานพอที่จะทำให้  $f(t + t_p) \cong 0$  ฟังก์ชันการตอบสนองอิล็กทริก  $f(t)$  เป็นสัดส่วนกับกระแสดีโพลาริเซชันตามสมการ (2.8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f(t) \approx \frac{-i_d(t)}{c_0 u_0} \quad (2.10)$$

พารามิเตอร์ของ  $f(t)$  ได้มาจากค่ากำลังสองน้อยสุดแบบไม่เชิงเส้นที่พอดีกับสมการที่ (2.10)

### 3) การประมาณค่าการนำไฟฟ้า

จากการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน เป็นไปได้ที่จะประมาณค่าการนำไฟฟ้ากระแสตรง  $\sigma$  ของวัสดุทดสอบ หากวัสดุทดสอบถูกชาร์จเป็นเวลานานเพียงพอ  $f(t + t_p) \cong 0$  สมการ (2.7) และ (2.8) สามารถรวมกันเพื่อแสดงค่าการนำไฟฟ้ากระแสตรงของไดอิเล็กทริกผสมได้ดังนี้

$$\sigma \approx \frac{\epsilon_0}{c_0 u_0} (i_p(t) - i_d(t)) \quad (2.11)$$

ดังนั้น ค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ยสำหรับระบบฉนวนที่กำหนด จึงขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างค่ากระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน

### 4) การสร้างแบบจำลองของฟังก์ชันการตอบสนอง $f(t)$ และการประมาณค่าการนำไฟฟ้า

ขั้นตอนแรกคือทำให้กระแสดีโพลาริเซชันที่วัดได้พอดีในรูปแบบพาราเมตริกเพื่อให้ได้ฟังก์ชันการตอบสนองไดอิเล็กทริก  $f(t)$  จากสมการ (2.9) และ (2.10) ลักษณะของกระแสดีโพลาริเซชันขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ รวมถึง รูปทรง ปริมาณความชื้น การนำไฟฟ้า และสภาวะการเสื่อมสภาพอื่น ๆ ของระบบฉนวนคอมโพสิตน้ำมันและกระดาษ ดังนั้นฟังก์ชันการตอบสนอง  $f(t)$  เมื่อพอดีกับกระแสดีโพลาริเซชัน ควรจะกำหนดลักษณะคุณสมบัติทางกายภาพและเงื่อนไขทั้งหมดของระบบฉนวนคอมโพสิต ขั้นตอนต่อไปคือการคำนวณค่าการนำไฟฟ้าของฉนวนน้ำมันและกระดาษโดยใช้สมการ (2.11) ปริมาณ  $C_0$  ในสมการ (2.11) คือ ความจุไฟฟ้าของฉนวนที่กำหนดโดย

$$C_0 = \frac{C_m}{\epsilon_r} \quad (2.12)$$

ที่  $C_m$  คือความจุที่วัดได้ระหว่างขั้วทั้งสองของระบบฉนวนที่ทดสอบ สามารถวัดได้ด้วยสะพานไฟกระแสสลับที่วัดความจุใด ๆ ใกล้เคียงกับความถี่ไฟฟ้าหรือความถี่ไฟฟ้า  $\epsilon_r$  คือประสิทธิภาพยอมสัมพัทธ์ของระบบฉนวนกระดาษน้ำมันผสม สำหรับการประมาณประสิทธิภาพแรงดันสนามไฟฟ้านี้อย่างแม่นยำ จำเป็นต้องมีความเข้าใจที่ถูกต้องและสมบูรณ์เกี่ยวกับการออกแบบและองค์ประกอบที่แน่นอนของระบบฉนวนกระดาษและน้ำมันของหม้อแปลงไฟฟ้า ในกรณีส่วนใหญ่ ข้อมูลเกี่ยวกับการออกแบบและองค์ประกอบที่แน่นอนของระบบฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้านั้นไม่

สามารถหาได้ทั่วไป สำหรับวัตถุประสงค์ในการสร้างแบบจำลองและสถานการณ์จริงส่วนใหญ่ เพียงพอแล้วที่จะถือว่าการจัดเรียงกระดาษหรือเพอร์สบอร์ดและท่อน้ำมันของระบบฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นชุดก็เพียงพอ ในกรณีนี้ Gäfvert นำเสนอการแสดงผลของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่มีประสิทธิภาพ

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_p \cdot \epsilon_d}{\epsilon_p \cdot (1-X) + \epsilon_d \cdot X} \quad (2.13)$$

โดยที่  $\epsilon_p$  และ  $\epsilon_d$  คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของกระดาษและน้ำมัน ตามลำดับ X คือ ปริมาณกระดาษในฉนวนคอมโพสิต โดยทั่วไปคือ 20–50% สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าในทำนองเดียวกันการนำไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพอาจเขียนเป็น

$$\sigma_r = \frac{\sigma_{paper} \cdot \sigma_{oil}}{\sigma_{paper} \cdot (1-X) + \sigma_{oil} \cdot X} \quad (2.14)$$

โดยที่  $\sigma_{paper}$  และ  $\sigma_{oil}$  คือ การนำไฟฟ้าของกระดาษและน้ำมันตามลำดับ เมื่อประมาณค่าประสิทธิภาพการสภาพยอมสัมพัทธ์  $\epsilon_r$  และ  $C_0$  ค่าการนำไฟฟ้ากระแสตรง ( $\sigma$ ) สามารถหาค่าได้โดยใช้สมการ (2.11) จากความแตกต่างระหว่างกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน สำหรับไดอิเล็กทริกเชิงเส้น สามารถคาดการณ์ความแตกต่างระหว่างกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันว่าจะคงที่ตลอดและเท่ากับกระแสการนำไฟฟ้า เรื่อนไข่นี้เป็นจริงสำหรับไดอิเล็กทริกเชิงเส้นเท่านั้นและเมื่อเวลาในการชาร์จนานเพียงพอ แต่ในระบบไดอิเล็กทริกที่ใช้งานได้จริง เช่น ในระบบฉนวนกระดาษน้ำมันที่ซับซ้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า สมมติฐานของความเป็นเส้นตรงไม่เป็นความจริงเสมอไป เนื่องจากข้อจำกัดด้านเวลาในการทดสอบภาคสนามจริง จึงมักไม่สามารถชาร์จนวนกันความร้อน มีระยะเวลาสั้นกว่า 10000 วินาทีได้ จึงพบว่า ความแตกต่างระหว่างกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันเปลี่ยนแปลงไปตามกาลเวลา

นักวิจัยได้รายงานว่าส่วนเริ่มต้นของกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันนั้นไวต่อสภาพของน้ำมัน ในขณะที่ค่าระยะยาวสุดท้ายของกระแสเหล่านี้ได้รับอิทธิพลจากสภาพของฉนวนแข็ง ขนาดเริ่มต้นที่สูงขึ้นของกระแสการนำไฟฟ้านั้นเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ที่สูงขึ้นของตัวพาประจุในไดอิเล็กทริกเหลว (น้ำมัน) ส่วนเริ่มต้นของการตอบสนองนี้พบว่าตายลงหลังจากผ่านไประยะหนึ่งและกระแสการนำไฟฟ้าคงที่เนื่องจากตัวพาประจุเคลื่อนที่น้อยกว่าในฉนวนแข็ง (กระดาษหรือเพอร์สบอร์ด) กลายเป็นส่วนเด่น กระแสโพลาริเซชันเริ่มต้น (หลังจากเกิดชั่วคราวครั้งแรก ซึ่งปกติจะไม่ถูกบันทึก) สามารถเขียนเป็น

$$i_p(+0) = C_0 U_0 \frac{\sigma_{oil}}{\varepsilon_0} \cdot \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_d} \quad (2.15)$$

ดังนั้น

$$\sigma_{oil} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_d}{\varepsilon_r \cdot C_0 \cdot U_0} \cdot i_p(+0) \quad (2.16)$$

ในทางตรงกันข้ามกระแสโพลาริเซชันในระยะยาว (ค่าไฟกระแสตรงที่มีเสถียรภาพ  $i_{dc}$ ) อาจสัมพันธ์กับค่าการนำไฟฟ้าของกระดาษโดย

$$i_{dc} = C_0 \cdot U_0 \frac{\sigma_r}{\varepsilon_0} \quad (2.17)$$

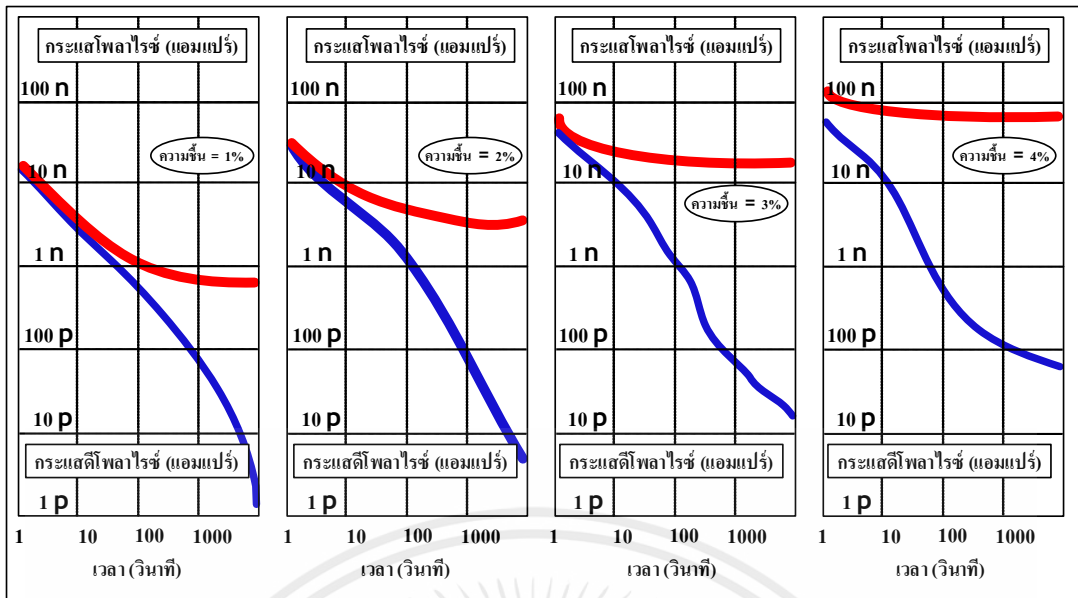
ถ้า  $\sigma_{oil}$  และ  $\sigma_{paper}$  เราจะได้จากสมการ (2.14)

$$\sigma_r = \frac{\sigma_{paper}}{X} \quad (2.18)$$

เมื่อรวมสมการ (2.17) กับ (2.18) เราจะได้

$$i_{dc} = C_0 \cdot U_0 \cdot \frac{\sigma_{paper}}{\varepsilon_0 \cdot X} \quad (2.19)$$

สามารถเลือกค่าเฉลี่ย  $X = 0.35$  (ถ้าไม่มีพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบจริง) เพื่อคำนวณการนำไฟฟ้าของกระดาษ



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโพลาร์และดีโพลาร์กับเวลาที่ความชื้นต่างกัน [6]

สำหรับการสร้างแบบจำลองการตอบสนองกระแสโพลาร์เซชันและดีโพลาร์เซชันมีขั้นตอนที่คล้ายกัน หากทราบรูปทรงเรขาคณิตของฉนวนหลัก เช่น ส่วนสัมพัทธ์ของท่อน้ำมัน ผงกั้นสเปเซอร์ เป็นต้น อุณหภูมิเฉลี่ย กระแสโพลาร์เซชันและดีโพลาร์เซชัน จะสามารถคำนวณได้จากแบบจำลองและเปรียบเทียบกับกระแสที่วัดได้

#### 2.4.3 ปัญหาการวัดกระแสโพลาร์เซชันและดีโพลาร์เซชันเชิงปฏิบัติ

สำหรับการวัดกระแสโพลาร์เซชันและดีโพลาร์เซชันในสถานไฟฟ้าย่อย จำเป็นต้องแก้ไขปัญหาเชิงปฏิบัติบางประการ ซึ่งรวมถึงข้อกำหนดของวงจรการวัด การเชื่อมต่อของหม้อแปลงไฟฟ้า ลักษณะของแรงดันกระตุ้น ระยะเวลาการชาร์จและการคายประจุ และอิทธิพลของสิ่งแวดล้อม เช่น ฝน อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง และผลกระทบของเสียงและการรบกวนต่าง ๆ

##### 1) การเชื่อมต่อเทอร์มินัล

การจัดเรียงวงจรพื้นฐานสำหรับการวัดกระแสโพลาร์เซชันและดีโพลาร์เซชันของฉนวนแสดงในรูปที่ 2.13 ขอแนะนำให้ใช้เทคนิค "สองอิเล็กโทรดกระตุ้น" สำหรับการวัดตามเทคนิคนี้ ฉนวนที่จะวิเคราะห์ต้องเชื่อมต่อระหว่างอิเล็กโทรดสองตัว จึงสร้างตัวเก็บประจุที่มีความเป็นฉนวนเหมือนไดอิเล็กทริก อิเล็กโทรดตัวใดตัวหนึ่งจะถูกทำเครื่องหมายเป็น "อิเล็กโทรดกระตุ้น" และแรงดันทดสอบจะถูกจ่ายให้กับอิเล็กโทรดนั้นโดยอ้างอิงกับกราวด์ ในขณะที่ทำการวัดกระแสไฟฟ้าตามเส้นที่เชื่อมต่อระหว่าง "อิเล็กโทรดตรวจจับ" อันที่สองและกราวด์ ด้วยการจัดเรียง "สองอิเล็กโทรดกระตุ้น" ทำให้ผลกระทบของสแตตริคาปาซิแตนซ์ของฉนวนต่อกราวด์และความจุของสายเคเบิลลดลงเหลือน้อยที่สุด

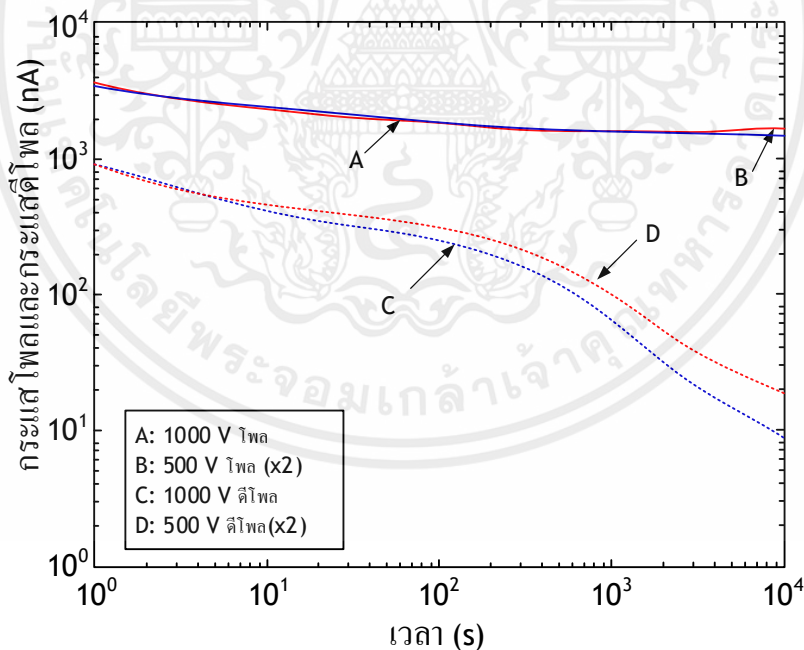
หม้อแปลงไฟฟ้าสามารถมีการเชื่อมต่อที่แตกต่างกัน ทั้งแบบเฟสเดียว สามเฟส สตาร์ทสามเฟส สามเฟสเดลต้า มีหรือไม่มีขดลวดตติยภูมิ มีหรือไม่มีขดลวดแพบ และแม้แต่หม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้าอัตโนมัติสามเฟสและเฟสเดียว แนวคิดพื้นฐานคือการประเมินสภาพของฉนวน ซึ่งประกอบด้วย กระดาษและน้ำมันระหว่างขดลวด ดังนั้น สำหรับการกำหนดค่าหม้อแปลงไฟฟ้าทุกประเภท ฉนวนที่ต้องการจะวิเคราะห์จำเป็นต้องเชื่อมต่อเป็นไดอิเล็กทริกกระหว่างอิเล็กโทรดสองตัวของหน่วยการวัด

## 2) แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง

แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงที่จะใช้สำหรับการกระตุ้นฉนวนในระหว่างการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันควรปราศจากการลอยเลื่อนและการรบกวน แหล่งจ่ายแรงดันต้องมีความเสถียรในระหว่างการเปลี่ยนเป็นโหลดแบบเก็บประจุของฉนวน ในระหว่างการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันมักมีการตั้งสมมติฐานความเป็นเชิงเส้นของไดอิเล็กทริกเพื่อทำให้การวิเคราะห์ผลการวัดง่ายขึ้น ข้อเท็จจริงเชิงทดลองแสดงให้เห็นว่ามีระบบน้อยมากที่เป็นเชิงเส้นจริง เมื่อมีสนามไฟฟ้าสูงที่แรงดันการชาร์จที่สูงขึ้น (สนามสูง) การเคลื่อนที่ของประจุอาจเกิดขึ้นในระดับที่มีนัยสำคัญ รูปที่ 2.13 แสดงอิทธิพลของการเพิ่มแรงดันไฟชาร์จจาก 500 V ถึง 1,000 V บนหม้อแปลงไฟฟ้า 100 kVA เพื่อให้การเปรียบเทียบง่ายขึ้น กระแสที่ได้รับจากแรงดันชาร์จ 500 V จะคูณด้วย 2 ผลลัพธ์แสดงว่าแอมพลิจูดที่แท้จริงของกระแสดีโพลาริเซชันสำหรับ 1,000 V นั้นต่ำกว่า ความไม่เชิงเส้นนี้เกิดจากแรงดันกระตุ้นสูง โดยสิ่งนี้จะทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการตีความหมายผลลัพธ์ที่ได้จากการวัด

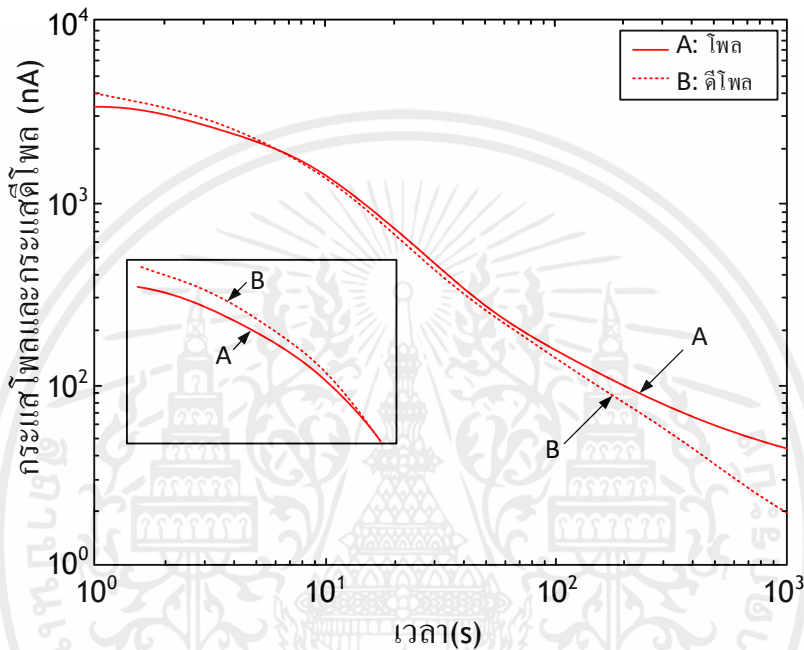


รูปที่ 2.13 กระแสคล้ายตัวที่แรงดันกระตุ้นต่างกัน (ปรับให้อยู่ในระดับเดียวกันเพื่อเปรียบเทียบ) [4]

ถ้าขนาดของสนามสูงมากพอ อาจสังเกตการข้ามของกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันในเวลาอันสั้นได้อย่างสมบูรณ์ ปรากฏการณ์การข้ามเกิดขึ้นจากการอัดประจุเข้าไปในไดอิเล็กทริกในระหว่างกระบวนการชาร์จ ซึ่งนำไปสู่การสะสมของประจุส่วนเกินอย่างค่อยเป็นค่อยไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใกล้กับอิเล็กทรอนิกส์หนึ่งหรือทั้งสองข้าง และเมื่อสนามถูกลบออกทันทีเมื่อเริ่มต้นกระบวนการคายประจุ กระแสดีโพลาริเซชันเริ่มต้นประกอบด้วยกระแสดีโพลาริเซชันจริงพร้อมกับกระแสเนื่องจากการถอนประจุส่วนเกินที่ทับซ้อนกันอยู่ รูปที่ 2.14 แสดงให้เห็นกรณีดังกล่าวที่สอดคล้องกับหม้อแปลงไฟฟ้า 30 MVA ซึ่งสังเกตการข้ามของกระแสดีโพลาริเซชันและโพลาริเซชันในช่วงเวลาสั้น ๆ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญที่การทดสอบจะต้องอยู่ภายในโดเมนไดอิเล็กทริกเชิงเส้น โดยให้ดำเนินการวัดกระแสดีโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันด้วยแรงดันการชาร์จที่ไม่สูงเกินไป



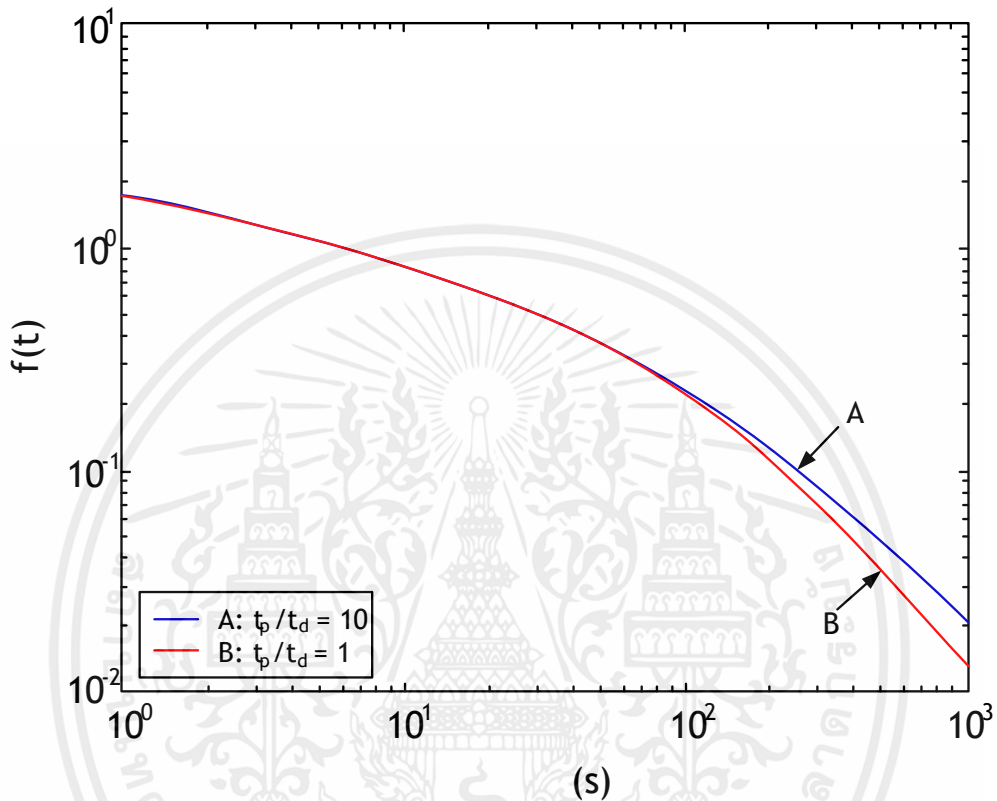
รูปที่ 2.14 การข้ามของกระแสดีโพลาริเซชันและโพลาริเซชันส่วนขยายแสดงถึงช่วงเวลาเริ่มต้น [4]

### 3) ระยะเวลาการชาร์จและการคายประจุ

เพื่อศึกษาลักษณะการคายประจุของวัสดุด้วยมุมมองที่แม่นยำในการระบุฟังก์ชันการตอบสนองไดอิเล็กทริก จำเป็นต้องชาร์จวัสดุก่อนเริ่มกระบวนการคายประจุนานกว่าเวลาที่ต้องการสูงสุดในการคายประจุอย่างน้อยสิบเท่า การวัดกระแสดีโพลาริเซชันในเวลาที่ยาวนานเมื่อเทียบกับเวลาในการชาร์จ เป็นไปตามลักษณะเฉพาะที่แท้จริงที่คาดไว้ของวัสดุ แต่เมื่อใช้เวลากการวัดกระแสดีโพลาริเซชันที่นานเมื่อเทียบกับเวลาในการชาร์จ ความชันของแผนภาพลอการิทึมของกระแสดีโพลาริเซชันจะชันกว่าลักษณะที่แท้จริง รูปที่ 2.15 เป็นพล็อตของฟังก์ชันการตอบสนองไดอิเล็กทริกสองตัว  $f(t)$  ที่คำนวณสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า 70 MVA ที่อัตราส่วนเวลาชาร์จต่อเวลาคายประจุ 10:1 และ 1:1 ตามลำดับ

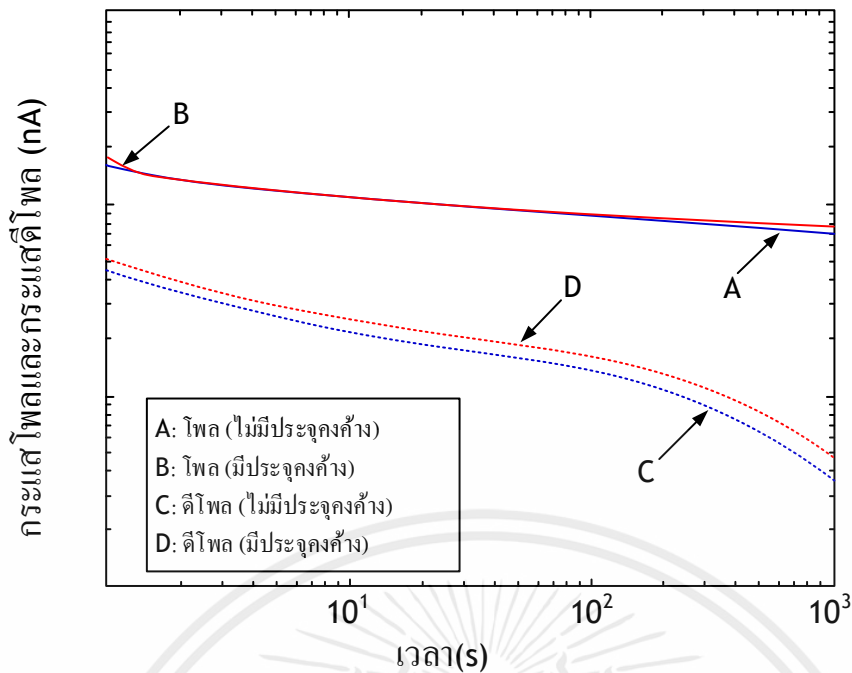
เงื่อนไขเดียวกันนี้ใช้กับกระบวนการที่ตรงกันข้ามกับการวัดกระแสดีโพลาริเซชัน วัสดุจะต้องถูกดีสชาร์จเป็นเวลาอย่างน้อยสิบเท่าที่ตั้งใจจะวัดกระแสดีโพลาริเซชัน หากปล่อยประจุออกไม่หมดก่อนที่จะเริ่มการวัดรอบใหม่ ประจุที่เหลือจากการวัดครั้งก่อนอาจทำให้เกิดข้อผิดพลาด

ในการวัดได้ รูปที่ 2.16 แสดงสถานะดังกล่าวเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าถูกชาร์จโดยไม่ถูกดีสชาร์จเป็นระยะเวลา นานเพียงพอ ตามที่สังเกตในรูปที่ 2.16 ความแตกต่างของขนาดของกระแสดีโพลาริเซชันสอง กระแสนั้นโดดเด่นกว่าความแตกต่างกันของกระแสโพลาริเซชัน ซึ่งอาจส่งผลให้การคำนวณฟังก์ชัน การตอบสนองและการนำไฟฟ้าผิดพลาด



รูปที่ 2.15 ฟังก์ชันการตอบสนองของไดอิเล็กทริก  $f(t)$  ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ของเวลาชาร์จและคาย ประจุ  $t_p$  และ  $t_d$  [4]

ดังนั้นจึงเห็นได้ชัดว่าเพื่อให้ได้ค่าประมาณที่ถูกต้องของการตอบสนองไดอิเล็กทริก หรือการนำไฟฟ้าจากกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน จำเป็นต้องสังเกตการหม้อแปลงไฟฟ้าลง กราวด์เป็นเวลานานพอสมควรก่อนทำการทดสอบ และแนะนำว่าเวลาในการชาร์จนานกว่าเวลาคาย ประจุที่ตั้งใจไว้อย่างน้อยสิบเท่าในการวัดหนึ่งรอบ ข้อกำหนดเหล่านี้มักไม่สามารถทำได้ เนื่องจากข้อจำกัดของเวลาในการทดสอบที่กำหนดโดยบริษัท ทำให้ต้องมีการประนีประนอมระหว่าง ระยะเวลาการชาร์จและการคายประจุ รวมถึงเวลาการทดสอบทั้งหมดที่มี



รูปที่ 2.16 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันที่มีและไม่มีกรดคาร์บอนิกประจุลวงหน้าเพียงพอ [4]

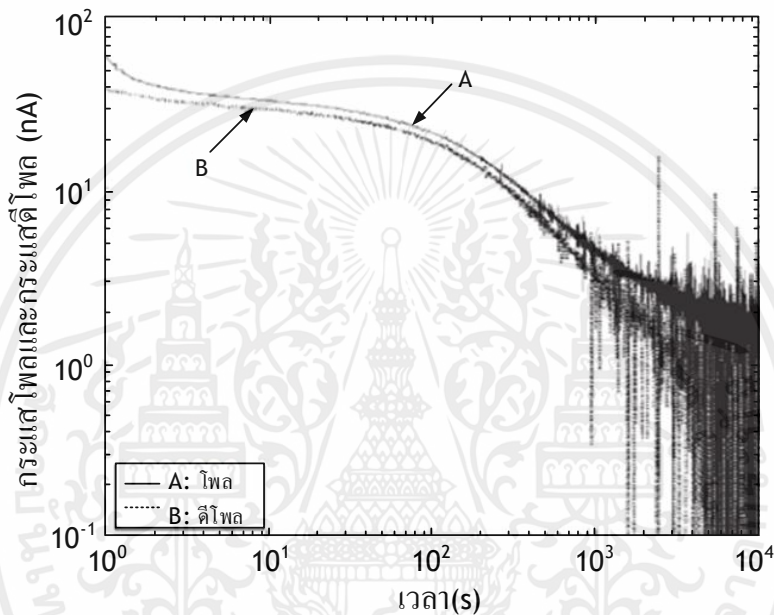
#### 4) สัญญาณรบกวนและการรบกวน

เนื่องจากค่าความต้านทานฉนวนของน้ำมันและกระดาษมีค่าสูงโดยธรรมชาติ กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันในหม้อแปลงไฟฟ้าปกติจึงมีค่าน้อยมากในช่วงนาโนแอมแปร์ การวัดกระแสขนาดเล็กเหล่านี้อาจได้รับผลกระทบจากกระแสสลับเหนี่ยวนำ การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าและการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิตจากการติดตั้งไฟฟ้าแรงสูงในบริเวณใกล้เคียงในสภาพการทดสอบภาคสนามจริง วัดรบกวนเหล่านี้เป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ มีการสังเกตพบว่าการรบกวนจ่ายไฟอื่นที่อยู่ใกล้เคียง โดยเฉพาะหม้อแปลงไฟฟ้าอื่น ทำให้เกิดการควมรวมของกระแสสลับในวงจรการวัด กระแสนี้จะซ้อนทับกระแสตรงที่ต้องการและมักจะเกินกระแสตรง  $10^3$  ถึง  $10^4$  เท่า โดยปกติแล้ว อุปกรณ์อื่นจะไม่สามารถปิดได้เนื่องจากข้อกำหนดด้านการปฏิบัติงาน ผลกระทบเหล่านี้ยังมีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้นจากลมและความชื้นในสถานีไฟฟ้าย่อยแบบเปิด สายวัดการทดสอบที่ยาวซึ่งเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องมือทดสอบยังเพิ่มปัญหาการรบกวน นอกจากนี้ในระหว่างการตรวจวัดในสถานที่จริง การเคลื่อนไหวมากเกินไปของบุคคลใกล้กับการตั้งค่าการวัดอาจทำให้เกิดเสียงรบกวนในการวัด ไม่ควรสัมผัสหม้อแปลงไฟฟ้าภายใต้การทดสอบจากภายนอกในขณะที่การทดสอบดำเนินไป มิฉะนั้นสัญญาณปลอมอาจถูกรวมเข้าไปในการวัด รูปที่ 2.17 แสดงกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 7 MVA ที่ทดสอบในสถานที่ที่อยู่ภายใต้สภาวะที่มีลมแรงมาก ใกล้กับขั้วสับที่มีไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้าที่กำลังใช้งาน

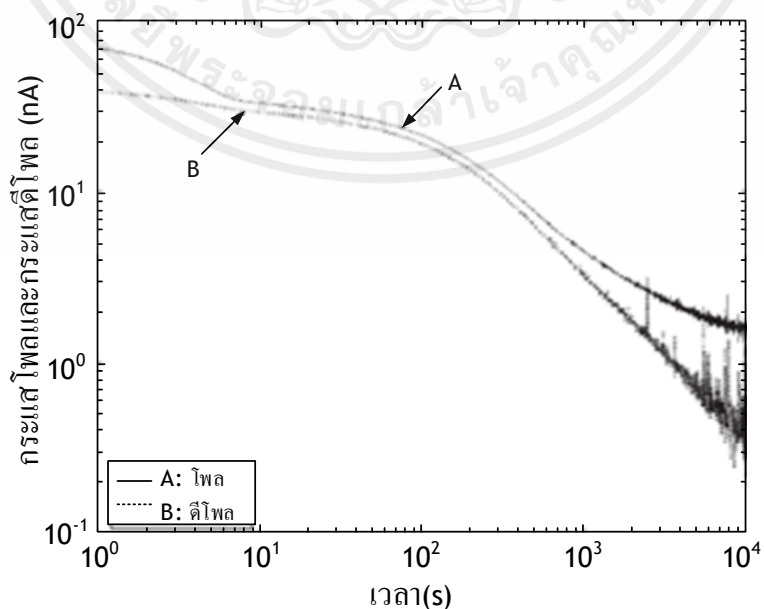
นอกเหนือจากข้อควรระวังที่ชัดเจนและปฏิบัติได้เพื่อลดการรบกวนในสนามแล้ว ยังสามารถปรับปรุงได้โดยใช้ตัวกรอง ตัวกรองเหล่านี้สามารถเป็นได้ทั้งตัวกรองแบบอนาล็อกที่รวมเข้ากับระบบการวัดหรือตัวกรองแบบดิจิทัลที่ใช้ซอฟต์แวร์ การกรองแบบอนาล็อกควรทำให้น้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากตัวเก็บประจุที่จำเป็นสำหรับตัวกรองจะแสดงปรากฏการณ์การคลายตัวของไดอิเล็กทริก เหมือนกับฉนวนที่ต้องวินิจฉัย ซึ่งจะทำให้เกิดข้อผิดพลาดที่ไม่ต้องการได้ การกรองแบบดิจิตอล ประกอบด้วย การกรองความถี่ที่ไม่ต้องการจากแหล่งจ่ายไฟหลักและการกรองความถี่ต่ำ การกรองแบบดิจิตอลมีข้อได้เปรียบสำหรับการใช้งานตรงที่คุณภาพตัวกรองไม่ขึ้นกับขนาดของสัญญาณและสามารถใช้ซอฟต์แวร์ปรับคุณสมบัติของตัวกรองได้อย่างง่ายดาย รูปที่ 2.18 แสดงกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของหม้อแปลงไฟฟ้าตัวเดียวกันกับในรูปที่ 2.17 หลังจากสัญญาณได้รับการประมวลผลโดยตัวกรองดิจิตอล



รูปที่ 2.17 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันในที่มีสัญญาณรบกวน [4]



รูปที่ 2.18 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันหลังจากกรองสัญญาณรบกวนออก [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากสัญญาณรบกวนที่กล่าวไปข้างต้นฝนตกหรือสภาพอากาศขึ้นมากเกินไป เป็นอีกหนึ่งปัญหา ในการวัดนอกสถานที่ไม่เพียงแค่ว่าไม่สะดวก ฝนจะสร้างไฟฟ้ากระแสตรงรั่ว ซึ่งไปทับกับกระแสการวัดที่ต้องการ ขนาดของกระแสรั่วไหลเหล่านี้ขึ้นอยู่กับความหนักของฝนและบางครั้ง อาจเกิน 100 nA ซึ่งทำให้วัดได้ยากหรือเกือบเป็นไปไม่ได้ เนื่องจากดูเหมือนจะไม่มีโอกาสแยกความแตกต่างระหว่างกระแสที่ไหลผ่านระบบฉนวนกระดาศหรือน้ำมันและกระแสรั่วไหลที่เกิดจากฝน ผลกระทบดังกล่าวจึงยังไม่ได้รับการตรวจสอบเพิ่มเติม

#### 5) ความไม่เสถียรของอุณหภูมิ

งานวิจัยและการวัดภาคสนามหลายชิ้นรายงานว่ากระแสคล้ายตัวมีความไวต่ออุณหภูมิมาก ปรากฏการณ์นี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ที่เพิ่มขึ้นของตัวพาประจุระหว่างกระบวนการ โพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันที่อุณหภูมิสูง การพึ่งพากระแสคล้ายตัวนี้อาจส่งผลกระทบต่อผลการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันระหว่างการทดสอบภาคสนามได้

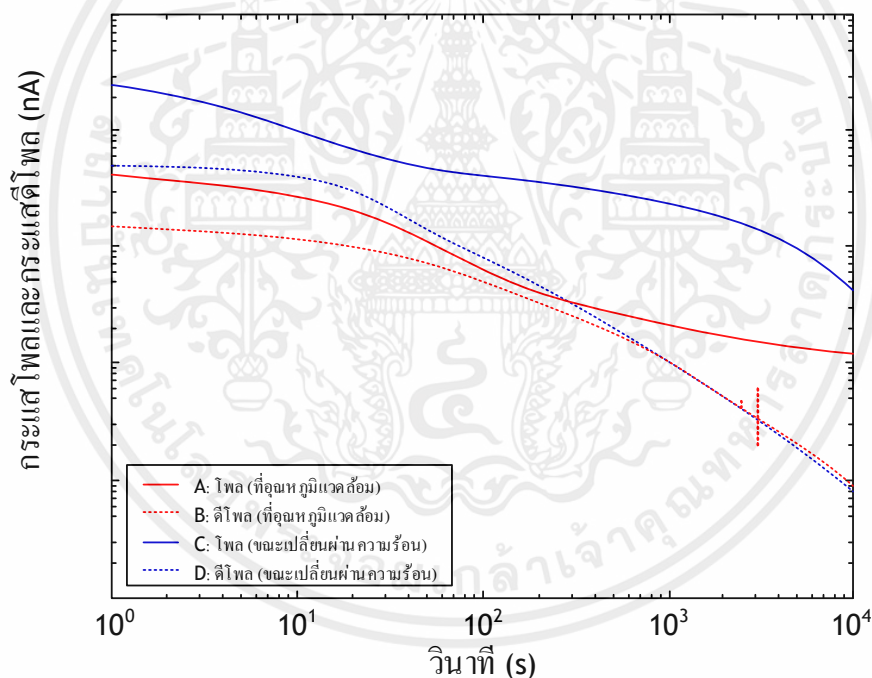
บ่อยครั้งในการทดสอบภาคสนามจริงพบว่าหม้อแปลงไฟฟ้าที่จะทดสอบเคยเชื่อมต่อกับ กริดและอยู่ในสภาพการทำงานมาก่อน ในระหว่างสภาวะการทำงานปกติ อุณหภูมิภายในหม้อแปลงไฟฟ้ามักสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อม ขึ้นอยู่กับสภาวะการใช้งาน สำหรับวัตถุประสงค์ในการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน หากหม้อแปลงไฟฟ้าหยุดการใช้งานจะต้องใช้เวลาเพียงพอสำหรับอุณหภูมิที่จะตกลงสู่อุณหภูมิแวดล้อมก่อนที่จะเริ่มการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันจริง

ระหว่างการเปลี่ยนผ่านความร้อน กระบวนการไดนามิกที่ซับซ้อนเกิดขึ้นเมื่อการไล่ระดับอุณหภูมิเกิดขึ้น การเปลี่ยนอุณหภูมิรบกวนความขึ้นสมดุลของระบบ ทำให้เกิดการเริ่มต้นของกระบวนการถ่ายโอนมวลความชื้น น้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าและกระดาศหรือเพรสบอร์ดเป็นวัสดุที่แตกต่างกันมาก โดยชนิดแรกเป็นไฮโดรโฟบิกและชนิดหลังเป็นไฮโดรฟิลิก เป็นผลให้ความชื้นเกือบทั้งหมดในระบบอยู่ในเพรสบอร์ด เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ความชื้นจะเคลื่อนที่เข้าหรือออกจากกระดาศหรือเพรสบอร์ดผ่านการแพร่ ดังนั้นจึงเห็นได้ชัดว่า เว้นแต่อุณหภูมิจะคงที่และกระดาศน้ำมันมีความสมดุล การทดสอบไดอิเล็กทริกใดที่ทำในช่วงเปลี่ยนผ่านอุณหภูมิจะไม่สะท้อนสภาพที่แท้จริงของฉนวน

รูปที่ 2.19 แสดงพล็อตการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันบนหม้อแปลงไฟฟ้า โดยทำการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันในขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเย็นลง ก่อนเริ่มการทดสอบ หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานอยู่ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จากนั้นหม้อแปลงไฟฟ้าจะถูกปิดจากการใช้งานและปล่อยให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิแวดล้อมที่ 23 องศาเซลเซียส การวัดค่ากระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันเสร็จสิ้นระหว่างกระบวนการทำความเย็นนี้ พล็อตของรูปที่ 2.19 ยังประกอบด้วยกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันที่ดำเนินการสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าเดียวกันที่สภาวะแวดล้อมปกติที่ 23 องศาเซลเซียส เพื่อเปรียบเทียบ

หากใช้ขั้นตอนการระบายความร้อนกับตัวอย่าง จะมีการแพร่กระจายของคลื่นความร้อนเข้าไปในวัสดุ สิ่งนี้ทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายเล็กน้อยของประจุที่อยู่ในมวลของวัสดุ สิ่งนี้ทำให้เกิดกระแสในวงจรภายนอก กระแสนี้อาจรบกวนกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันภายใต้การวัดทำให้เกิดข้อผิดพลาดที่ไม่ต้องการ ข้อสังเกตนี้ได้รับการสนับสนุนอย่างดีจากรูปที่ 2.19 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันที่สอดคล้องกับกรณีที่อุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ภายใต้การเปลี่ยนแปลงนั้นสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อม ซึ่งอาจส่งผลให้มีการคำนวณฟังก์ชันการตอบสนองและค่าการนำไฟฟ้าผิดพลาด

ในรูปที่ 2.19 ค่าของการดีโพลาริเซชันของสองกรณีที่แยกจากกัน (พล็อต B และพล็อต D) เกือบจะทับซ้อนกันหลังจากการคายประจุประมาณ 1,000 วินาที เนื่องจากในช่วงเวลานี้ อุณหภูมิหม้อแปลงไฟฟ้าได้ลดลงใกล้เคียงกับอุณหภูมิแวดล้อมจากค่าเดิมที่สูงกว่า ดังนั้นจึงจำเป็นต้องให้เวลาเพียงพอสำหรับอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าในการปรับให้เข้าสู่สภาพแวดล้อมก่อนที่จะเริ่มการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันจริง



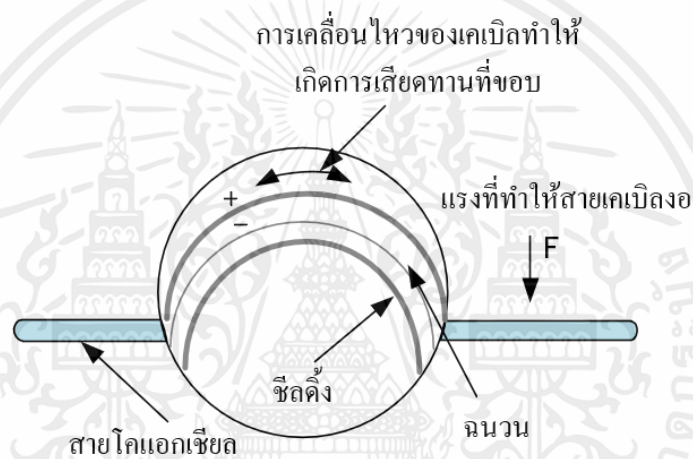
รูปที่ 2.19 ผังกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของหม้อแปลงไฟฟ้าภายใต้อุณหภูมิที่ลดลง [4]

#### 6) ความยาวสายสัญญาณ สายจ่าย หรือสายวัด

อีกประเด็นที่ต้องแก้ไขเกี่ยวกับการตั้งค่าการวัดคือสายเคเบิลที่ใช้เชื่อมต่อหัวหม้อแปลงไฟฟ้ากับอุปกรณ์วัดกระแสต่ำ เช่น อิเล็กโทรมิเตอร์ สายสัญญาณเหล่านี้ต้องมีการหุ้มฉนวนและตัวป้องกันเชื่อมต่อกับจุดกราวด์ร่วมของอุปกรณ์เพื่อลดผลกระทบจากการรบกวนและใช้ความยาวสายเคเบิลให้สั้นที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบของสแตตริคคาปาซิแตนซ์และความต้านทานของสายสัญญาณไม่ให้ส่งผลต่อผลการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงขนาดใหญ่ที่มีบุชชิงยาวจะต้องคำนึงถึงคุณภาพของสายเคเบิลด้วย เพื่อรักษาระยะห่างให้สั้นหรือเนื่องจากสภาพพื้นที่ สายวัดมักจะทำย้อยลงมาจากบุชชิงโดยตรงกับพื้น ซึ่งบางครั้งทำให้เกิดการสั้นของสายเคเบิลแม้โดนลมเบา ๆ หากระหว่างการวัดสายเคเบิลถูกทำให้เคลื่อนที่ อาจมีกระแสรบกวน ซึ่งเกิดจากผลกระทบของโทรโบอิเล็กทริก กระแสโทรโบอิเล็กทริกเกิดจากประจุไฟฟ้าที่จุดต่อระหว่างตัวนำและฉนวนเนื่องจากแรงเสียดทาน อิเล็กตรอนอิสระจะถูกกับตัวนำและสร้างความไม่สมดุลของประจุซึ่งทำให้เกิดการไหลของกระแส มีสายสัญญาณรบกวนต่ำพิเศษที่มีชั้นสารกึ่งตัวนำระหว่างฉนวนและตัวนำ ซึ่งช่วยลดสัญญาณรบกวนจากโทรโบอิเล็กทริกได้อย่างมาก สิ่งสำคัญคือต้องตรวจสอบให้แน่ใจว่าสายเคเบิลไม่มีการเคลื่อนที่ระหว่างการวัด



รูปที่ 2.20 การเกิดโทรโบอิเล็กทริก [4]

## 2.5 เทคนิคสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ (FDS)

การวัดการตอบสนองของไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่เป็นเทคนิคที่ได้รับการยอมรับอย่างดีในการศึกษาพฤติกรรมโพลาริเซชันของระบบฉนวน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเกิดจากส่วนผสมที่ซับซ้อนของวัสดุฉนวน ในเทคนิคนี้ กลไกโพลาริเซชันในระบบฉนวนจะได้รับการศึกษาโดยการวัดขนาดและเฟสของกระแสเนื่องจากการกระตุ้นด้วยแรงดันกระแสสลับ โดยทั่วไป ในการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า การวัด FDS จะดำเนินการระหว่าง 0.1 mHz ถึง 1 kHz เทคนิคนี้ช่วยให้สามารถวัดค่าความจุที่ขึ้นกับความถี่ การนำไฟฟ้า และการสูญเสียแทนเจนต์ของระบบฉนวน ซึ่งสามารถใช้ประเมินค่าความชื้นเฉลี่ยและค่าการนำไฟฟ้าของฉนวนผ่านเทคนิคการสร้างแบบจำลองต่าง ๆ ข้อได้เปรียบที่สำคัญของเทคนิคนี้คือการวัดมักจะทำเนื่งการที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำ เนื่องจากการลดสัญญาณรบกวนทำได้ค่อนข้างง่ายกว่าในการวัดแถบความถี่แคบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.1 ทฤษฎีของการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่

ไดอิเล็กทริกโพลาริเซชันของวัสดุฉนวนส่วนใหญ่เปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรงกับสนามไฟฟ้าที่ใช้ สมมติว่าวัสดุฉนวนเป็นไอโซโทรปิกและสม่ำเสมอ ไดอิเล็กทริกโพลาริเซชัน ( $P$ ) ในระบบฉนวนจะสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าที่ใช้ ( $E$ ) ผ่านสมการต่อไปนี้

$$P(t) = \epsilon_0 \chi E(t) \quad (2.20)$$

โดยที่  $\epsilon_0$  คือ แรงดันสนามไฟฟ้าของพื้นที่ว่างและ  $\chi$  คือ ค่าความอ่อนไหวทางไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริก ซึ่งเป็นตัวชี้วัดของอัตราโพลาริเซชันต่อการตอบสนองของสนามไฟฟ้า ในทางกลับกันจะกำหนดค่าคงที่ ไดอิเล็กทริกของวัสดุและจึงมีผลต่อปรากฏการณ์อื่น ๆ อีกมากมายที่กำหนดโดยคุณสมบัติไดอิเล็กทริก ดังนั้นค่าความอ่อนไหวทางไฟฟ้าจึงสัมพันธ์กับค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ( $\epsilon_r$ )

$$\chi = \epsilon_r - 1 \quad (2.21)$$

เนื่องจากการเหนี่ยวนำไดอิเล็กทริกโพลาริเซชัน การกระจัดไดอิเล็กทริกจึงเพิ่มขึ้น การกระจัดทางไฟฟ้า ( $D$ ) เกี่ยวข้องกับโพลาริเซชันไดอิเล็กทริก ( $P$ ) โดย

$$\begin{aligned} D(t) &= \epsilon_0 E(t) + P(t) \\ &= \epsilon_0 E(t) + \epsilon_0 \chi E(t) \\ &= \epsilon_0 (1 + \chi) E(t) \\ &= \epsilon_0 \epsilon_r E(t) \end{aligned} \quad (2.22)$$

ความหนาแน่นกระแส  $J(t)$  ภายในวัสดุไดอิเล็กทริกเนื่องจากการกระตุ้นแบบขั้นจากแหล่งภายนอกกำหนดโดย

$$J(t) = \sigma E(t) + \frac{\partial D(t)}{\partial t} \quad (2.23)$$

โดยที่  $\sigma$  คือค่าการนำไฟฟ้ากระแสตรงของวัสดุไดอิเล็กทริก สมมติว่าไดอิเล็กทริกเป็นเส้นตรงสม่ำเสมอและเป็นไอโซโทรปิกและสนามไฟฟ้าเป็นรูปคลื่นไซน์ การแปลงการวิเคราะห์สามารถทำได้โดยใช้การแปลงอนุกรม Fourier จากโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่ (ความถี่เชิงมุม  $\omega$ )

โดยที่

$$\bar{\epsilon}(\omega) = \epsilon'(\omega) - j\epsilon''(\omega) \quad (2.24)$$

และ

$$\begin{aligned} J(\omega) &= \sigma E(\omega) + j\omega D(\omega) \\ &= \sigma E(\omega) + j\omega \epsilon_0 \epsilon_r E(\omega) \\ &= j\omega \epsilon_0 \left( \epsilon_r + \frac{\sigma}{j\omega \epsilon_0} \right) E(\omega) \\ &= j\omega \epsilon_0 \bar{\epsilon}(\omega) E(\omega) \end{aligned} \quad (2.25)$$

โดยที่  $\epsilon$  และ  $\omega$  คือ ค่าสภาพยอมเชิงซ้อน นอกจากนี้ยังสามารถเขียนความหนาแน่นกระแสได้ว่า

$$\begin{aligned} J(\omega) &= j\omega \epsilon_0 \left( \epsilon_r + \frac{\sigma}{j\omega \epsilon_0} \right) E(\omega) \\ &= j\omega \epsilon_0 \left( 1 + \bar{\chi} - j \frac{\sigma}{j\omega \epsilon_0} \right) E(\omega) \end{aligned} \quad (2.26)$$

โดยที่

$$\bar{\chi} = \chi' - j\chi'' \quad (2.27)$$

โดยที่  $\chi$  คือ ค่าสภาพรับไว้ได้เชิงซ้อน ดังนั้น

$$\begin{aligned} J(\omega) &= j\omega \epsilon_0 \left( 1 + \chi' - j \left( \frac{\sigma}{j\omega \epsilon_0} + \chi'' \right) \right) E(\omega) \\ &= j\omega \epsilon_0 (\epsilon' - j\epsilon'') E(\omega) \\ &= j\omega \epsilon_0 \bar{\epsilon} E(\omega) \end{aligned} \quad (2.28)$$

แรงต้านสนามไฟฟ้าเชิงซ้อน ( $\bar{\epsilon}$ ) สามารถกำหนดโดยมีส่วนจริงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\varepsilon'(\omega) = \text{Re}(\bar{\varepsilon}(\omega)) = 1 + \mathcal{X}'(\omega) \quad (2.29)$$

และเป็นส่วนจินตภาพ

$$\varepsilon''(\omega) = \text{Im}(\bar{\varepsilon}(\omega)) = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} + \mathcal{X}''(\omega) \quad (2.30)$$

ซึ่งมีตัวนำไฟฟ้ากระแสตรงอยู่ สมมติว่าตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนานระหว่างอิเล็กโทรดสามารถกำหนด ค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริกได้

$$C_0 = \varepsilon_0 \times \frac{A}{d} \quad (2.31)$$

โดยที่  $\varepsilon_0$  คือ แรงต้านสนามไฟฟ้าของพื้นที่ว่าง A คือพื้นที่หน้าตัดของไดอิเล็กทริก และ d คือความหนาของไดอิเล็กทริก สมการความหนาแน่นกระแสที่กำหนดในสมการ (2.23) สามารถเขียนใหม่ได้

$$J(\omega) = j\omega C_0 \times \frac{d}{A} \left( 1 + \mathcal{X}' - j \left( \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} + \mathcal{X}'' \right) \right) E(\omega) \quad (2.32)$$

หรือ

$$J(\omega) \times A = j\omega C_0 \left( 1 + \mathcal{X}' - j \left( \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} + \mathcal{X}'' \right) \right) E(\omega) \times d \quad (2.33)$$

หรือ

$$I(\omega) = j\omega C_0 \left( 1 + \mathcal{X}' - j \left( \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} + \mathcal{X}'' \right) \right) U(\omega) \quad (2.34)$$

โดยที่ I คือกระแสผ่านไดอิเล็กทริกเนื่องจากแรงดันภายนอก (U) บนวัสดุฉนวนในความสัมพันธ์ที่

$$I(\omega) = j\omega \bar{C}(\omega) U(\omega) \quad (2.35)$$

เราสามารถกำหนดค่าความจุเชิงซ้อนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{C}(\omega) = C'(\omega) - jC''(\omega) \quad (2.36)$$

โดยที่

$$C'(\omega) = C_0(1 + \mathcal{X}'(\omega)) \quad (2.37)$$

แสดงถึงค่าความจริงและ

$$C''(\omega) = C_0 \left( \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} + \mathcal{X}'' \right) \quad (2.38)$$

คือ ค่าความจริงส่วนจินตภาพ ซึ่งสอดคล้องกับการสูญเสียพลังงานในวัสดุฉนวน การสูญเสียพลังงานเป็นการรวมกันของการสูญเสียตัวต้านทานเนื่องจากผลของการนำไฟฟ้าและการสูญเสียไดอิเล็กทริก เนื่องจากความเฉื่อยของประจุไฟฟ้าและเขตปลอดภาวะเมื่อพวกมันถูกแทนที่ด้วยสนามไฟฟ้า

ดังจะเห็นได้จากสมการ (2.35) ว่าการมีส่วนร่วมของผลการนำไฟฟ้าต่อค่าความจริงส่วนจินตภาพ นั้นแปรผกผันกับความถี่ ดังนั้นผลกระทบของการนำไฟฟ้าต่อการสูญเสียจึงมีอิทธิพลมากกว่าที่ความถี่ต่ำ วัสดุฉนวนที่เป็นของแข็งส่วนใหญ่ เช่น กระจกหรือเพอร์สโอบอร์ด มีการกระจายตัวความถี่ต่ำ (LFD) ซึ่งจะเพิ่มการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ความถี่ต่ำ เทคนิคทั่วไปที่สามารถแยกผลของการนำไฟฟ้าออกจาก LFD เรียกว่าการแปลงแบบคราเมอร์ส-โครนิก (K-K) ตามที่ระบุในสมการต่อไป

$$\mathcal{X}'(\omega) = \frac{2}{\pi} \lim_{a \rightarrow \infty} \int_0^a \frac{x \mathcal{X}''(x)}{x^2 - \omega^2} dx \quad (2.39)$$

$$\mathcal{X}''(\omega) = \frac{2\omega}{\pi} \lim_{a \rightarrow \infty} \int_0^a \frac{\mathcal{X}'(x)}{x^2 - \omega^2} dx \quad (2.40)$$

การแปลง K-K เชื่อมโยงองค์ประกอบในจินตภาพและองค์ประกอบจริงของความสามารถในการรองรับ เนื่องจากส่วนจริงของความไวไม่ขึ้นกับการนำไฟฟ้า จึงสามารถใช้ส่วนนี้ในการคำนวณส่วนจินตภาพของความไวได้โดยใช้การแปลง K-K ความแตกต่างระหว่างการสูญเสียทั้งหมดที่วัดได้และส่วนจินตภาพที่คำนวณได้คือการสูญเสียไดอิเล็กทริกเนื่องจากการนำไฟฟ้า

ตามสมการ (2.34) การตอบสนองของไดอิเล็กทริกที่วัดได้ขึ้นอยู่กับค่าความจุไฟฟ้าตามรูปทรงของระบบฉนวน ดังนั้นการตอบสนองไดอิเล็กทริกของหม้อแปลงไฟฟ้าจึงได้รับอิทธิพลอย่างมากจากรูปทรงของฉนวน ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ระดับกำลัง ระดับแรงดันไฟฟ้า ผู้ผลิตประเภทขดลวด ฯลฯ เห็นได้ชัดว่าเมื่อข้อมูล รูปทรง ระดับกำลัง ระดับแรงดันไฟฟ้า ผู้ผลิต ประเภทเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขดลวด ฯลฯ เห็นได้ชัดว่าเมื่อข้อมูลรูปทรงของหม้อแปลงไฟฟ้าไม่สามารถหาได้ง่ายเนื่องจากในกรณีส่วนใหญ่การตอบสนองทางไดอิเล็กทริกสัมบูรณ์ไม่สามารถเปรียบเทียบได้ โดยไม่ต้องชดเชยค่าความจุไฟฟ้าตามรูปทรง ดังนั้นส่วนมากในการใช้งานภาคสนามตัวประกอบการสูญเสีย ( $\tan \delta$ ) ซึ่งไม่ขึ้นกับรูปทรง จึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย

ปัจจัยการกระจายไดอิเล็กทริกหรือปัจจัยการสูญเสียหมายถึงอัตราส่วนของส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ต่อส่วนจริงของอิมพีแดนซ์ ในแง่ของความจุเชิงซ้อนและแรงต้านสนามไฟฟ้าสามารถแสดงเป็น

$$\tan \delta(\omega) = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} = \frac{C''(\omega)}{C'(\omega)} = \frac{\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} + \chi''}{1 + \chi'} \quad (2.41)$$

แม้ว่า ค่าปรับที่ไม่สามารถเดินเครื่องตามที่สั่งการหรือควบคุมได้ จะเป็นพารามิเตอร์ที่น่าสนใจในการเปรียบเทียบระบบฉนวนที่แตกต่างกัน แต่ก็คุ้มค่าที่จะกล่าวถึงว่าการรวมพารามิเตอร์ทั้งสองเข้าด้วยกันอาจทำให้สูญเสียข้อมูลที่สำคัญบางอย่าง ดังนั้นในเทคนิคการวิเคราะห์การวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ แรงต้านสนามไฟฟ้าและค่าการสูญเสียจะถูกใช้เป็นสองพารามิเตอร์แยกกัน

### 2.5.2 การวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ของฉนวนน้ำมันและกระดาษ

ฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังส่วนใหญ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งระหว่างขดลวดแรงสูงและแรงดันต่ำ เกิดจากการรวมกันของน้ำมันและเพอร์สโอบอร์ดขุ่นน้ำมัน การตอบสนองของไดอิเล็กทริกของระบบที่ซับซ้อนดังกล่าว ขึ้นอยู่กับการตอบสนองของวัสดุแต่ละชนิดตลอดจนวิธีการรวมเข้าด้วยกัน ดังนั้นการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ของระบบฉนวนจึงมีประโยชน์ในการแยกคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดและการจัดเรียงทางกายภาพของระบบฉนวน ผ่านการสร้างแบบจำลองที่เหมาะสม

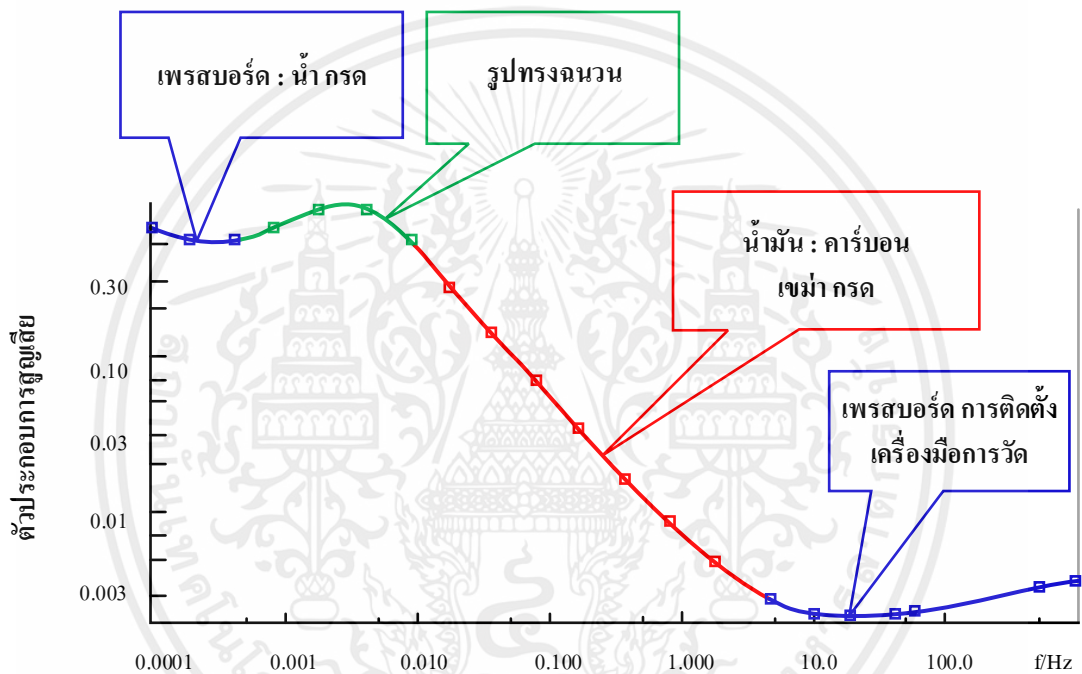
น้ำมันแร่มีการนำไฟฟ้าสูงเมื่อเทียบกับวัสดุฉนวนเพอร์สโอบอร์ดและกระดาษ เมื่อระบบนี้ได้รับความเครียดทางไฟฟ้าการสะสมประจุมักจะเกิดขึ้นที่ส่วนต่อประสานของวัสดุทั้งสองปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การโพลาไรซ์ภายในหรือผลกระทบจาก Maxwell-Wagner ซึ่งเห็นได้ชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายใต้การกระตุ้นความถี่ต่ำของระบบฉนวนกระดาษน้ำมัน ดังนั้นการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ ความถี่ต่ำจึงเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการระบุความสำคัญของการโพลาไรซ์ของอินเทอร์เฟซในระบบฉนวนที่ซับซ้อนเช่นฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า

น้ำมันแร่เป็นสารที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นการกระจายตัวของไดอิเล็กทริกจึงไม่สำคัญที่ความถี่ต่ำกว่า 1 MHz โดยทั่วไปแล้วการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ของน้ำมันจะถูกจำลองโดยค่าแรงต้านสนามไฟฟ้าคงที่  $\varepsilon_r = 2.2$  และค่าการนำไฟฟ้ากระแสตรง  $\sigma_{dc}$  สมมติว่าค่าความไวต่อความถี่ไม่ขึ้นกับความถี่ที่ความถี่ต่ำ ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนิกจึงใช้เป็นตัวชี้วัดคุณภาพของระบบฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้า ในทางตรงกันข้ามเพรสบอร์ดเป็นวัสดุที่มีชีวิต ซึ่งการกระจายตัวของไดอิเล็กทริกขึ้นอยู่กับเนื้อหาของสสารที่โพลาริไซซ์ได้ เช่น น้ำ ซึ่งอยู่ในนั้นเป็นหลัก ดังนั้นแรงต้านทานสนามไฟฟ้าของเพรสบอร์ดชุบน้ำมันจึงขึ้นอยู่กับความชื้นและผลิตภัณฑ์ที่เสื่อมสภาพอื่น ๆ ในฉนวน

ดังนั้นการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าสะท้อนถึงการตอบสนองของไดอิเล็กทริกของน้ำมัน กระดาษ และรูปทรงของฉนวน มีอิทธิพลเหนือการตอบสนองทั้งหมดที่ความถี่ต่างกัน อิทธิพลเด่นของเพรสบอร์ด น้ำมัน และรูปทรงที่ความถี่ต่าง ๆ ต่อการตอบสนองทั้งหมดแสดงไว้ในรูปที่ 2.21



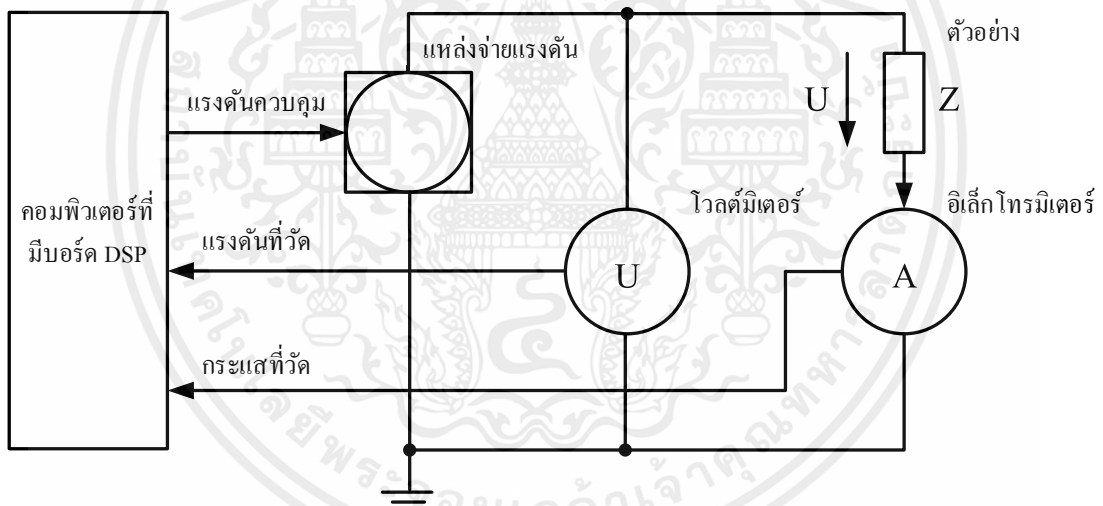
รูปที่ 2.21 ความหลากหลายของปัจจัยการสูญเสียของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าเทียบกับความถี่ [4]

ดังรูปช่วงความถี่ที่สูงกว่า 10 Hz ส่วนใหญ่ถูกควบคุมโดยสภาพฉนวนที่เป็นของแข็ง ในขณะที่ยังมีอิทธิพลเพิ่มเติมจากการเหนี่ยวนำของขดลวด สายวัด และเทคนิคการเชื่อมต่อก็มีอยู่เช่นกัน ความชื้นในย่านความถี่ 0.01–1 Hz มีสาเหตุหลักมาจากการนำไฟฟ้าของน้ำมัน ซึ่งเกิดจากการเสื่อมสภาพที่เป็นสื่อกระแสไฟฟ้าที่ละลายน้ำ เขม่า และกรดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมันและส่งผลกระทบต่อบริเวณนี้ รูปทรงของฉนวน (อัตราส่วนของน้ำมันต่อเพรสบอร์ด) เป็นตัวกำหนดค่าสูงสุดในพื้นที่หรือ “โหนด” ที่มองเห็นได้ที่ความถี่ต่ำยิ่งอัตราส่วนของน้ำมันต่อเพรสบอร์ดสูงเท่าไร ผลกระทบนี้ก็ยิ่งมีอำนาจมากขึ้นเท่านั้น คุณสมบัติของเซลล์ลูโลสปรากฏขึ้นอีกครั้งที่ความถี่ประมาณ 1 mHz ซึ่งสะท้อนถึงปริมาณความชื้น กระบวนการผลิต การมีกรดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และผลจากการเสื่อมสภาพที่เป็นสื่อกระแสไฟฟ้าอื่น ๆ ช่วงความถี่ที่ระบุอาจแตกต่างกัน

ไปตามช่วงกว้างในกรณีอื่น ด้วยระดับความชื้น ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมัน รูปทรงของฉนวน อุณหภูมิ และปริมาณของผลที่เกิดจากการเสื่อมสภาพที่เป็นสื่อกระแสไฟฟ้า

### 2.5.3 ขั้นตอนการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า

การวัดการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นเทคนิคที่ค่อนข้างใหม่สำหรับอุตสาหกรรมไฟฟ้า เครื่องมือสำหรับการวัดเหล่านี้เกิดขึ้นในตลาดในช่วงปลายทศวรรษที่ 1990 IDA 200 ซึ่งเป็นเครื่องมือจากบริษัท General Electric Programma Inc. เป็นเครื่องมือแรกในตลาดสำหรับการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่บนหม้อแปลงไฟฟ้า IDA เวอร์ชันต่าง ๆ ได้รับการเผยแพร่ในช่วง 15 ปีที่ผ่านมา DIRANA จาก Omicron เป็นอีกหนึ่งอุปกรณ์ที่ใช้วัดการตอบสนองของไดอิเล็กทริกโดยการรวมการตอบสนองการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่และวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า อุปกรณ์เหล่านี้ทำงานโดยใช้หลักการพื้นฐานเดียวกัน สิ่งเหล่านี้อาจมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไปตามกลไกการดำเนินงานและข้อจำกัดทางเทคนิค รวมเข้ากับซอฟต์แวร์การสร้างแบบจำลองเพื่อตีความการวัดการตอบสนองของไดอิเล็กทริก

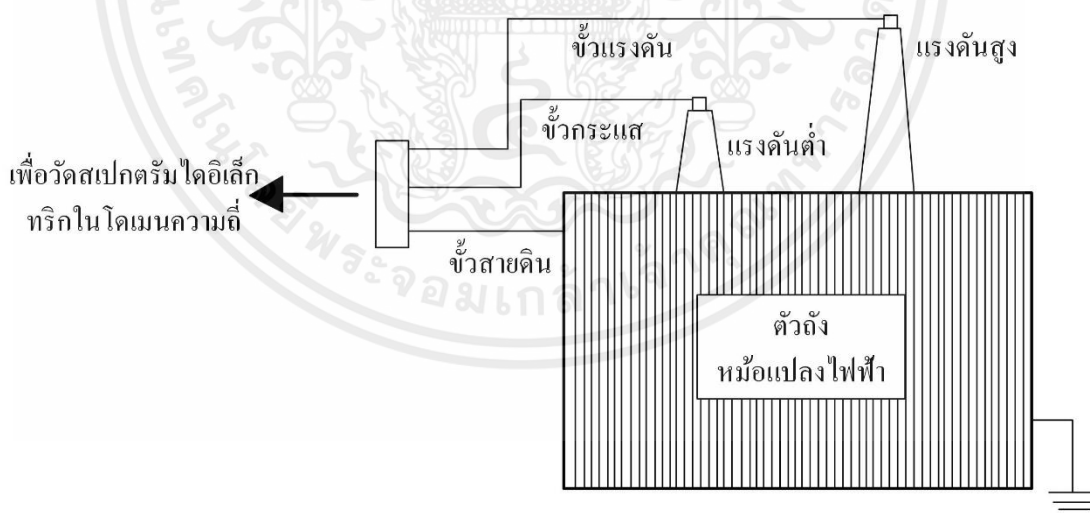


รูปที่ 2.22 การวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่พื้นฐานโดยใช้ระบบ IDA 250 [4]

ในระบบการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ทั่วไป จะใช้แรงดันไฟฟ้าค่อนข้างต่ำถึง 200 V พร้อมความถี่การจ่ายไฟตั้งแต่ 0.1 mHz ถึง 1 kHz ระบบจะวัดกระแสผ่านฉนวนทั้งขนาดและมุมเฟส ที่ การกระตุ้นด้วยสัญญาณไซน์ กระแสและแรงดันที่วัดได้จะใช้ในการคำนวณค่าความจุและค่าการกระจายตัวของฉนวนการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่สามารถดำเนินการได้ทั้งแบบกวาดความถี่หรือแบบกวาดแรงดันไฟฟ้าในการกวาดความถี่ การวัดจะดำเนินการที่ความถี่ที่ตั้งไว้ในขณะที่แรงดันกระตุ้นจะถูกรักษาไว้ที่ระดับสูงสุดคงที่ การวัดจะทำงานจากความถี่สูงสุดไปหาต่ำสุดเสมอเพื่อลดผลกระทบจากความจำโพลาริเซชัน สิ่งนี้จะลดผลกระทบของโพลาริเซชันจากการวัดครั้งก่อนที่มีต่อการวัดครั้งต่อไป การวัดแรงดันกวาดจะดำเนินการที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่คงที่ ในขณะที่ค่าพีคของแรงดันไฟฟ้าจะแปรผันจากระดับต่ำสุดไปจนถึงระดับสูงสุดที่ตั้งไว้ ใน การใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า การกวาดความถี่เป็นเรื่องปกติมากขึ้นเนื่องจากเป็นการอธิบายการ กระจายตัวของไดอิเล็กทริกของฉนวนอย่างชัดเจน การกวาดแรงดันไฟฟ้ามีประโยชน์สำหรับการ ตรวจสอบปรากฏการณ์โพลาริเซชันแบบไม่เชิงเส้นในระบบฉนวน แผนผังบล็อกไดอะแกรมของ ระบบวงจรการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่พื้นฐานแสดงในรูปที่ 2.22 การวัดแบบสาม อิเล็กโทรดซึ่งช่วยให้กระแสไฟรั่วไหลลงสู่กราวด์ผ่านอิเล็กโทรดป้องกัน โดยทั่วไปจะใช้ในการวัด สเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ เพื่อปรับปรุงความแม่นยำของการวัด การกำหนดค่าการวัด สเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่แบบสามอิเล็กโทรด สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียวแสดงใน รูปที่ 2.23 ในกรณีของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส ขั้วทั้งหมดของขดลวดแรงดันสูงและแรงดันต่ำจะ ลัดวงจรแยกจากกันและเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ ซึ่งคล้ายกับการ เชื่อมต่อแบบเฟสเดียว ถึงต่อสายดินเชื่อมต่อกับเทอร์มินอลป้องกัน เช่นเดียวกับการวัดแบบเฟสเดียว

การกำหนดค่าสามอิเล็กโทรดที่แสดงในที่นี้ใช้ได้กับการวัดระหว่างขั้วต่อที่ไม่มีสาย ดินในกรณีของหม้อแปลงไฟฟ้า สเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่โดยทั่วไปจะดำเนินการระหว่าง ด้านแรงดันสูงและด้านแรงดันต่ำโดยทั้งสองโดยไม่ต้องต่อสายดินและใช้การกำหนดค่าการวัดที่เสนอ เครื่องมือวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ ล่าสุดให้การสนับสนุนในการวัดสเปกตรัม ไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ระหว่างขั้วต่อขดลวดและถึงที่ต่อสายดิน โดยมีผลกระทบน้อยที่สุดของ กระแสไฟรั่วลงกราวด์ต่อความแม่นยำในการวัด



รูปที่ 2.23 ลักษณะการประกอบกรวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่แบบมีอิเล็กโทรด ป้องกัน [4]

2.5.4 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกรวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่บนหม้อ แปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกเหนือจากสภาพความเป็นฉนวนภายในของหม้อแปลงไฟฟ้า ยังมีปัจจัยภายในและภายนอกอีกมากมายที่อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ ซึ่งอาจนำไปสู่การตีความสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ผิด ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องลดผลกระทบของปัจจัยเหล่านั้นให้เหลือน้อยที่สุดหรือแนะนำการปรับเทียบที่เหมาะสมหลังจากศึกษาระบบการวัดโดยรวมอย่างรอบคอบ

#### 1) การเปลี่ยนแปลงด้านอุณหภูมิ

การตอบสนองไดอิเล็กทริกนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอย่างมาก ดังนั้นควรทราบอุณหภูมิที่ถูกต้องของการวัดเพื่อผลทดสอบที่น่าเชื่อถือ ในกรณีของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังอุณหภูมิภายในหม้อแปลงไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ยิ่งไปกว่านั้นอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะโหลดและอุณหภูมิแวดล้อม ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อมเมื่อเลิกใช้งาน เนื่องจากเวลาที่จำกัดในการปิดการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า เช่น ในกรณีส่วนใหญ่จะไม่สามารถรองานว่าอุณหภูมิจะถึงสภาวะคงที่ก่อนที่จะเริ่มการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่จะเริ่มต้นที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะลดลงอย่างช้าในระหว่างการวัด อัตราการลดลงของอุณหภูมิขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเริ่มต้นปัจจัยภายใน เช่น ความจุความร้อนของเครื่อง เป็นต้น และปัจจัยภายนอก เช่น อุณหภูมิแวดล้อมในสภาพแวดล้อมเขตร้อนอุณหภูมิจะลดลง 2-3 องศา แต่อาจสูงถึง 15 องศาเซลเซียสในสภาพอากาศหนาวเย็นผลกระทบนี้ได้รับการศึกษาในการอ้างอิงและแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมินั้นเด่นชัดที่ความถี่ต่ำกว่า 1 Hz ดังแสดงในรูปที่ 2.24 ข้อเสนอแนะแนะนำให้ตรวจสอบความแปรผันของอุณหภูมิระหว่างการวัด ควรแนะนำการแก้ไขอุณหภูมิที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่

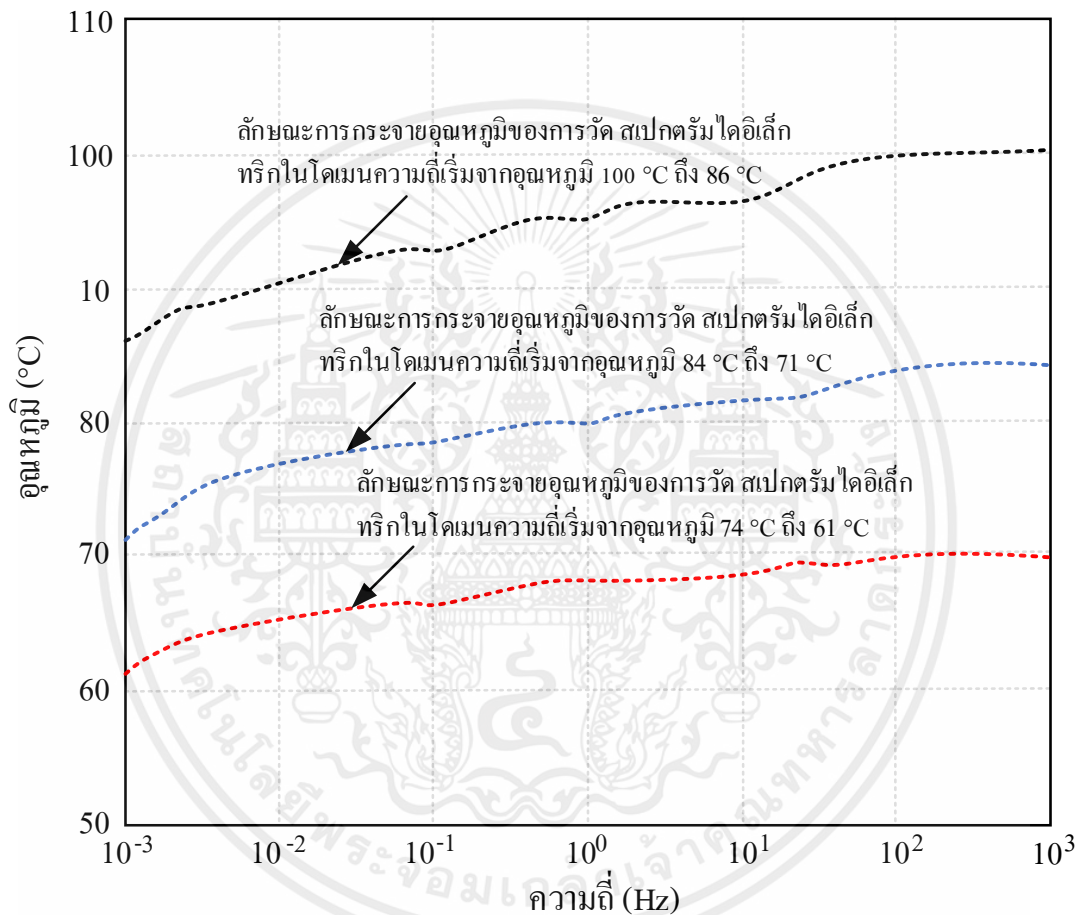
#### 2) กระแสรั่วไหล

โดยทั่วไปแนะนำให้แยกหม้อแปลงไฟฟ้าออกจากระบบอย่างสมบูรณ์สำหรับการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ ซึ่งจะช่วยลดเส้นทางกระแสไฟรั่วที่ไม่จำเป็นและการโอเวอร์โหลดของแหล่งเครื่องมือวัดผ่านสเตรย์คาปาซิแตนซ์ ในบางกรณีไม่สามารถแยกหม้อแปลงไฟฟ้าออกมาได้อย่างสมบูรณ์ และจะตัดการเชื่อมต่อจากระบบโดยการใช้อิซเลเตอร์เท่านั้น ดังนั้นสายเคเบิลและตัวแยกสัญญาณจึงยังคงเชื่อมต่อกับขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้า อุปกรณ์เพิ่มเติมเหล่านี้เพิ่มสเตรย์คาปาซิแตนซ์ ทำให้เส้นทางการรั่วไหลเพิ่มเติม ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ได้

#### 2.5.5 การตีความผลลัพธ์ของสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่

ตามที่ระบุในส่วนก่อนหน้านี้ ผลลัพธ์ของสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ได้รับอิทธิพลจากพารามิเตอร์หลายตัวรวมถึงสภาพของน้ำมันและกระดาษหรือเพอร์สบอร์ด การมีกรดสิ่งเจือปน และปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับอายุ ความชื้น เนื้อหา อุณหภูมิ และโครงสร้างของฉนวน โดยหลักการควรจะคำนวณการตอบสนองโดยรวมของไดอิเล็กทริกเซลล์โลสแซ็งจากการตอบสนองที่วัดได้ของหม้อแปลงไฟฟ้า และทราบค่าความชื้นโดยเฉลี่ยในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและ

ความถี่ แต่จากหัวข้อก่อนหน้าทั้งส่วนเพอร์สบอร์ด น้ำมัน และกรด มีอิทธิพลอื่น มากมายที่มีผลต่อค่าความชื้น ทำให้ยากจะแยกแยะวิเคราะห์และตีความ ปัจจัยต่าง ๆ มีอิทธิพลต่อคุณภาพของการแปรรูปของเพอร์สบอร์ด เช่น ประเภทของวัสดุ น้ำมัน ปริมาณกรด ประเภทหม้อแปลงไฟฟ้า เงื่อนไขการบริการ บันทึกการบริการ เป็นต้น ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้รับการประมาณการ สิ่งสำคัญคือต้องตระหนักถึงข้อผิดพลาดเหล่านี้และนำมาพิจารณาในการประเมินคุณภาพฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้า อิทธิพลของข้อผิดพลาดที่แตกต่างกัน



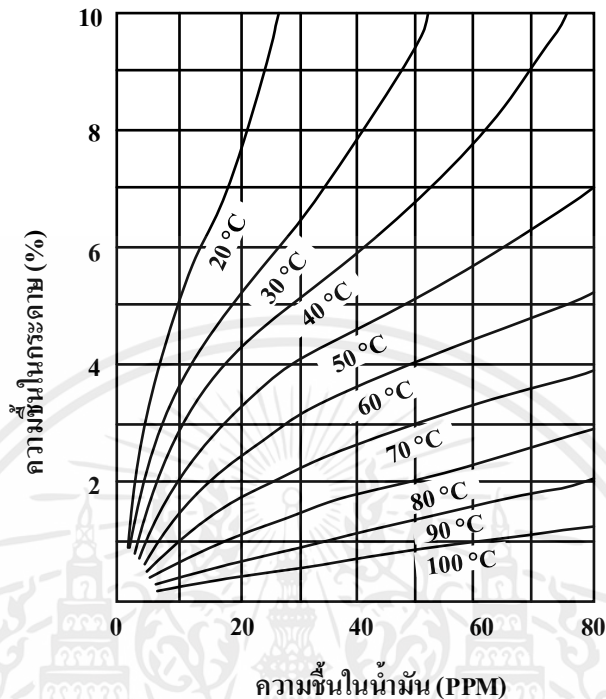
รูปที่ 2.24 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่างการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ที่มา [4]

#### 1) ผลกระทบของความชื้น

ความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเสื่อมสภาพของกระดาษ ดังนั้นในการประเมินสภาพของระบบกระดาษน้ำมัน เช่น ในหม้อแปลงไฟฟ้า จึงมีความจำเป็นต้องระบุปริมาณความชื้นในฉนวนกระดาษให้ได้ การเก็บตัวอย่างกระดาษจากหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการทดสอบโดยทั่วไปไม่สามารถทำได้สำหรับการทดสอบภาคสนาม การวัดความชื้นสัมบูรณ์ของตัวอย่างน้ำมันในหน่วย ppm เช่น ใช้การทดสอบการไทเทรตแบบ Karl Fischer โดยทั่วไปจะไม่สามารถให้ข้อมูลที่สรุปได้ เนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นสมดุลของน้ำมันและกระดาษจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและอาจใช้เวลาในการรอให้เสถียรโดยความสัมพันธ์ระหว่างฉนวนเหลวและฉนวนแข็งเป็นดังรูปที่ 2.25



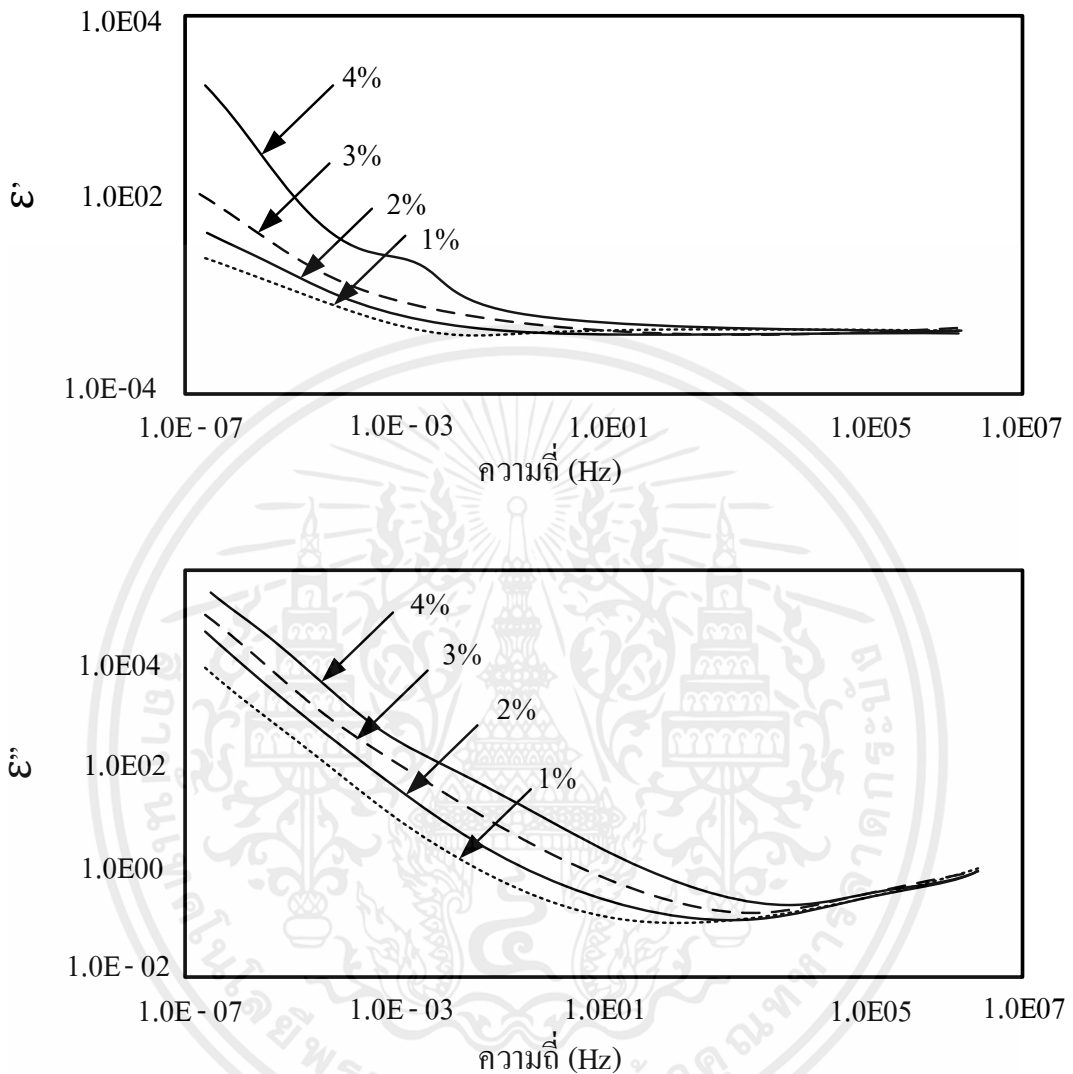
รูปที่ 2.25 เส้นโค้ง Fabre-Pichon สำหรับการกระจายความชื้นในกระดาษกราฟและน้ำมัน [9]

ดังนั้นวิธีการที่ทำให้สามารถประมาณปริมาณความชื้นของฉนวนแข็งของหม้อแปลงไฟฟ้าได้จึงมีความจำเป็น จากนั้นวิธีการดังกล่าวจะสามารถตัดสินสถานะของการเสื่อมสภาพของระบบฉนวนและสามารถใช้เพื่อกำหนดอุณหภูมิสูงสุดของการทำงานที่ปลอดภัยสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อหลีกเลี่ยงการเร่งการเสื่อมอายุของกระดาษได้ การวัดค่าการตอบสนองของไดอิเล็กทริก รวมถึงการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่นั้นมีประโยชน์อย่างมากและเป็นเทคนิคการวัดที่ได้รับการพิสูจน์ทางวิทยาศาสตร์ ซึ่งใช้ในการประเมินปริมาณความชื้นในฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าผ่านการทดสอบนอกสถานที่อย่างง่าย โดยไม่จำเป็นต้องเปิดถังหรือนำตัวอย่างน้ำมันหรือกระดาษออกมา ผลลัพธ์การทดสอบสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ สามารถยืนยันด้วยการทดสอบการตอบสนองไดอิเล็กทริกในโดเมนเวลาและการวิเคราะห์ทางเคมีเพิ่มเติมเพื่อยืนยันค่าความชื้นโดยประมาณในฉนวนอีกครั้ง

ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ การประมาณปริมาณความชื้นในฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าผ่านสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ เป็นเทคนิคทางอ้อมและจำเป็นต้องได้รับการพิสูจน์ทางวิทยาศาสตร์ผ่านการวัดในห้องปฏิบัติการ Gielniak และคณะ ได้รายงานผลการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่บนตัวอย่างเพอร์สบอร์ด Weidmann หนา 1.5 มม. ที่มีความชื้น 1%, 2%, 3% และ 4% ในช่วงความถี่ 0.1 mHz ถึง 1 MHz ดังที่เห็นได้จากรูปที่ 2.26 เฟอร์มิตีวีตี้และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

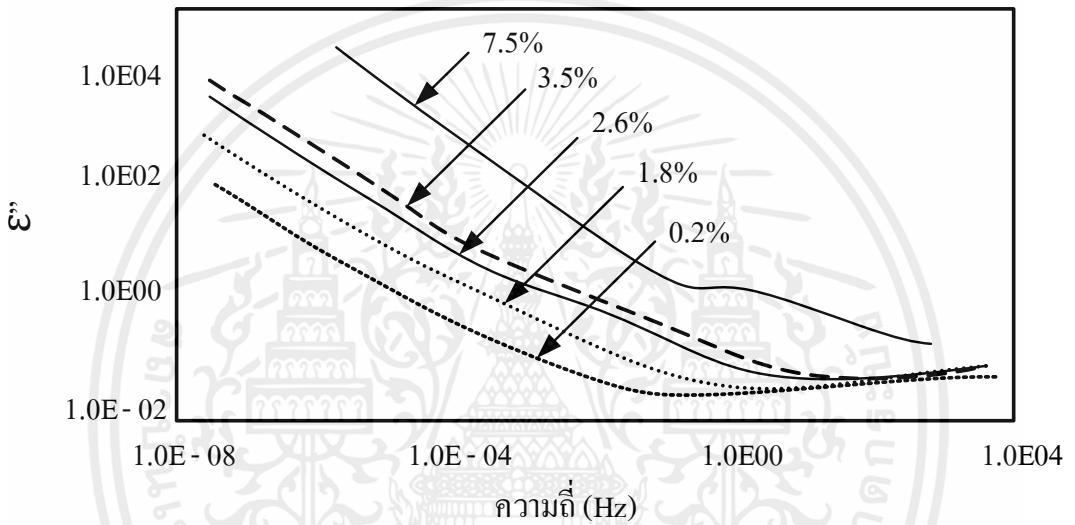
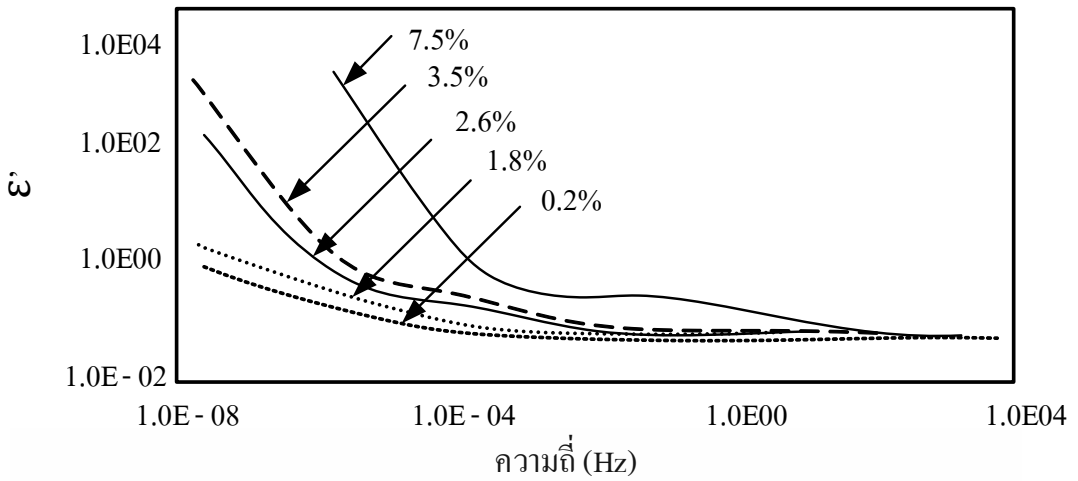
การสูญเสีย (ส่วนจริงและจินตภาพของเปอร์มิติวิตีเชิงซ้อนตามลำดับ) มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญตามระดับความชื้นที่แตกต่างกัน ผลลัพธ์ที่น่าเสนอได้รับที่อุณหภูมิคงที่ 20 องศาเซลเซียส



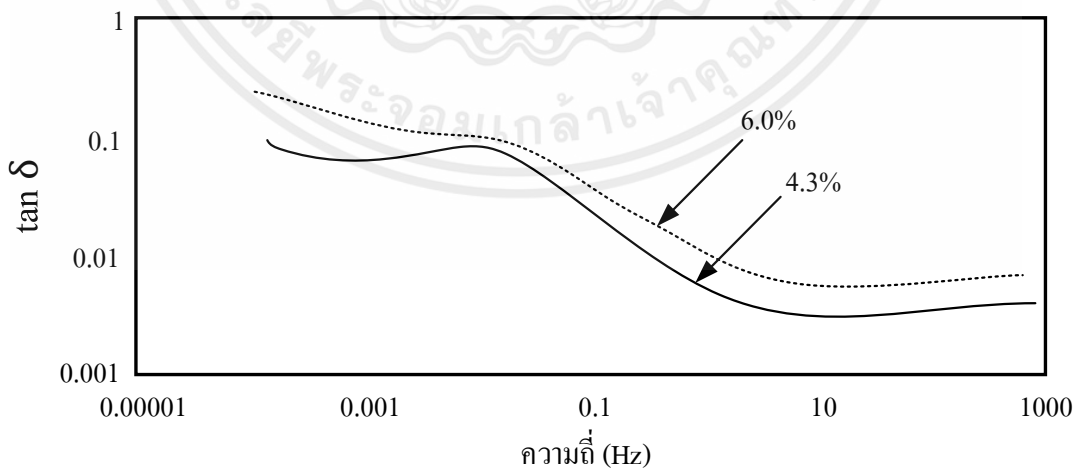
รูปที่ 2.26 การแปรผันของส่วนจริงและส่วนจินตภาพของเปอร์มิติวิตีเชิงซ้อนที่ความชื้นต่างกันที่อุณหภูมิคงที่ 20 องศาเซลเซียส [4]

ดังที่แสดงในรูปทั้งเปอร์มิติวิตีและการสูญเสียที่ความถี่ต่ำ (ต่ำกว่า 1 Hz) จะแสดงการเปลี่ยนแปลงที่มีนัยสำคัญกับปริมาณความชื้น มีรายงานผลกระทบที่คล้ายกันของความชื้นในกระดาษต่อการตอบสนองสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่และได้รับการทำซ้ำในรูปที่ 2.27 ผลกระทบของปริมาณความชื้นของกระดาษต่อสเปกตรัมความถี่ของตัวประกอบการสูญเสียยังแสดงไว้ในรูปที่ 2.28 ทำการวัดบนตัวอย่างฉนวนกระดาษน้ำมันใหม่ 2 ตัวอย่าง โดยมีความชื้น 4.3% และ 6% ตามลำดับ เส้นโค้งทั้งสองมีความถี่และขนาดสูงสุดสัมพันธ์ ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามปริมาณความชื้นเห็นได้จากรูปที่ 2.28 ว่าตัวประกอบการสูญเสียเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



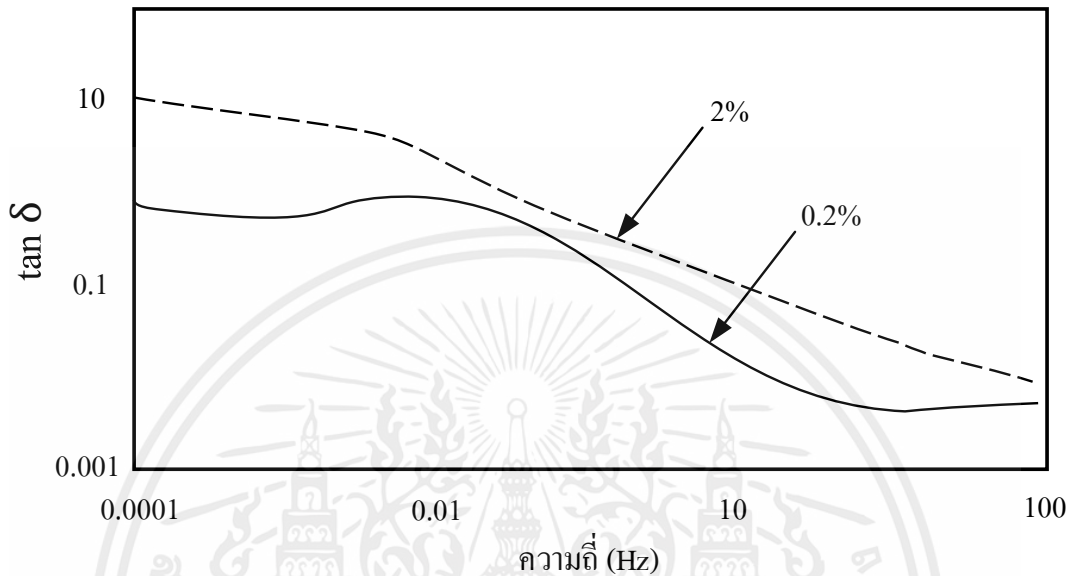
รูปที่ 2.27 สเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่สำหรับกระดาษที่มีระดับความชื้นต่างกัน [4]



รูปที่ 2.28 ตัวประกอบการสูญเสียตามฟังก์ชันของความถี่ที่ความชื้นต่างกัน [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการรายงานข้อสังเกตที่คล้ายกันโดยได้รับสเปกตรัมตัวประกอบการสูญเสียตามความถี่สำหรับตัวอย่างกระดาษน้ำมันสองตัวอย่างที่แตกต่างกันที่ความชื้น 0.2% และ 2% ตามลำดับ ผลลัพธ์ที่แสดงในรูปที่ 2.29 ยืนยันว่าค่าสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ของตัวประกอบการสูญเสียมีค่าสูงกว่าสำหรับฉนวนที่มีความชื้นสูงกว่า



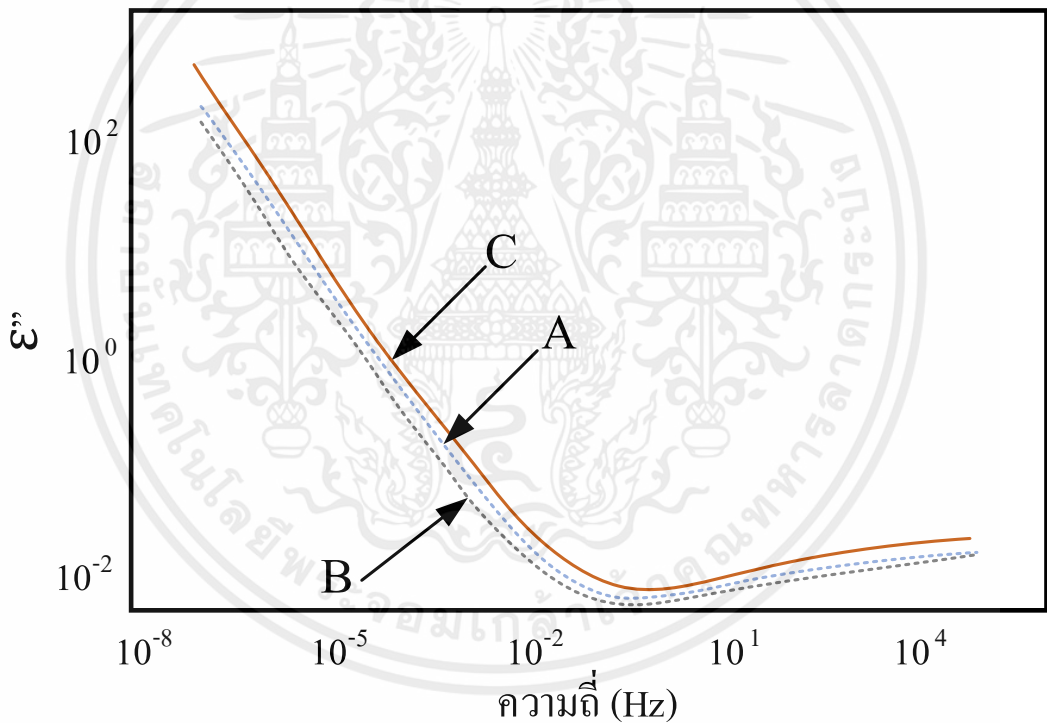
รูปที่ 2.29 ตัวประกอบการสูญเสียตามฟังก์ชันของความถี่ที่ความชื้นต่างกัน [4]

กราฟข้างต้นและการค้นพบที่คล้ายคลึงกันซึ่งรายงานโดยนักวิจัยหลายคน ได้ชี้ให้เห็นข้อเท็จจริงที่ว่าทั้งเปอร์มิติวิตีและการสูญเสียในฉนวนเพิ่มขึ้นอย่างมากตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น การพล็อตสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ มีค่าสูงขึ้นสำหรับฉนวนที่มีความชื้นสูง ความเปียงเบนดังกล่าวในค่าการสูญเสียและเปอร์มิติวิตีสำหรับฉนวนที่มีความชื้นต่างกันนั้นโดดเด่นในช่วงความถี่ต่ำ (0.0001–1 Hz)

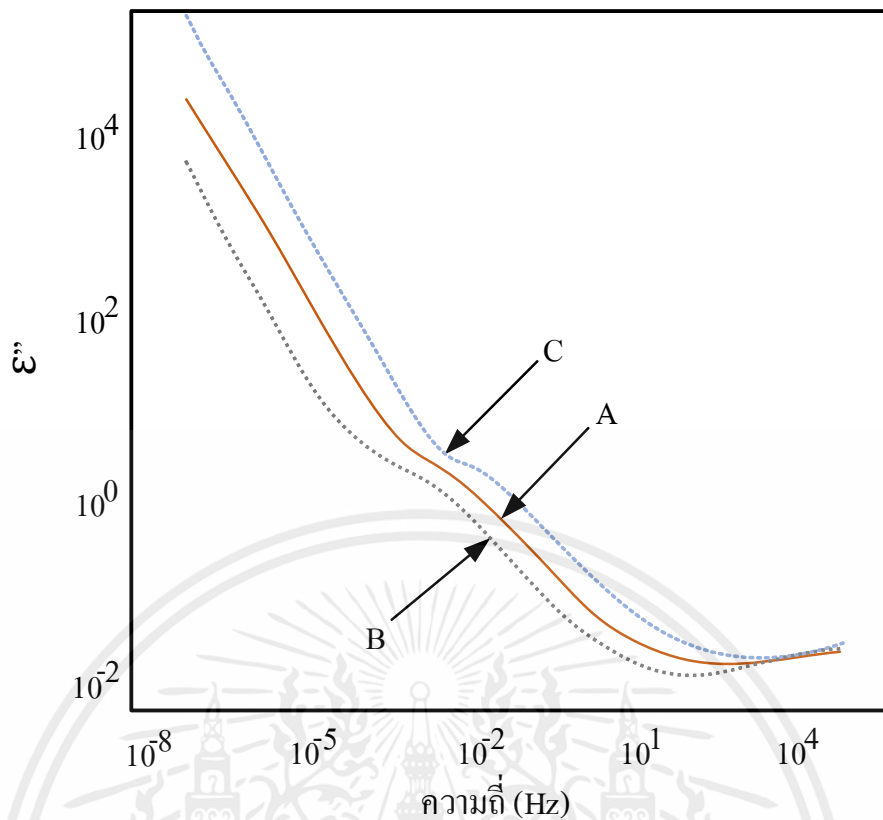
## 2) ผลกระทบจากการเสื่อมสภาพ

ปัจจัยสำคัญอีกประการหนึ่งที่บ่งบอกสถานะของฉนวนคือ สถานะการเสื่อมสภาพ ซึ่งอาจทำให้ระดับการเกิดพอลิเมอร์ (degree of polymerization, DP) ของฉนวนแข็งลดลง การเกิดความชื้นและกรด ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ผลผลิตที่เกิดจากการเสื่อมสภาพ ฯลฯ ปัจจัยทั้งหมดเหล่านี้ล้วนมีอิทธิพลต่อผลการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ การศึกษาในห้องปฏิบัติการต่าง ๆ ได้ยืนยันว่าการเสื่อมสภาพของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า และผลผลิตที่เกิดจากการเสื่อมสภาพ เช่น กรดโมเลกุลต่ำมีผลกระทบต่อการตอบสนองของไดอิเล็กทริก ผลการศึกษาในห้องปฏิบัติการเหล่านั้นยังรวมอยู่ในซอฟต์แวร์ประเมินความชื้นเพื่อประเมินความชื้นในหม้อแปลงไฟฟ้าที่ติดตั้งภาคสนาม

ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการนักวิจัยรายงานการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ที่ดำเนินการกับตัวอย่างฉนวนกระดาษน้ำมันในห้องทดลอง Linhjell พร้อมคณะ และ Blenow และพร้อมคณะ อภิปรายผลลัพธ์ของสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ในตัวอย่างกระดาษชุบน้ำมันที่มีอายุ ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นต่างกัน รูปที่ 2.30 และ 2.31 แสดงผลของการเสื่อมสภาพของกระดาษกราฟที่ชุบน้ำมันที่มีระดับความชื้นต่างกัน จากข้อมูลสามารถสังเกตได้ว่าเส้นโค้งสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ ในช่วงต้นจะลดลงจากการตัวอย่างที่ไม่มีการเสื่อมสภาพ ตัวอย่างที่มีการเสื่อมสภาพเพิ่มขึ้น พล็อตของสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่จะอยู่เหนือเส้นกราฟอ้างอิงที่ไม่มีการเสื่อมสภาพ ปรากฏการณ์นี้จะเด่นชัดเมื่อความชื้นเริ่มต้นของฉนวนสูงขึ้น ในช่วงเริ่มต้นของการเสื่อมสภาพความชื้นจะถูกใช้โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและกระบวนการเสื่อมสภาพทั้งหมดยังไม่เสร็จสมบูรณ์ ในช่วงเริ่มต้นของการเสื่อมสภาพ ปริมาณของกรดที่ผลิตได้ยังไม่มีความสำคัญ

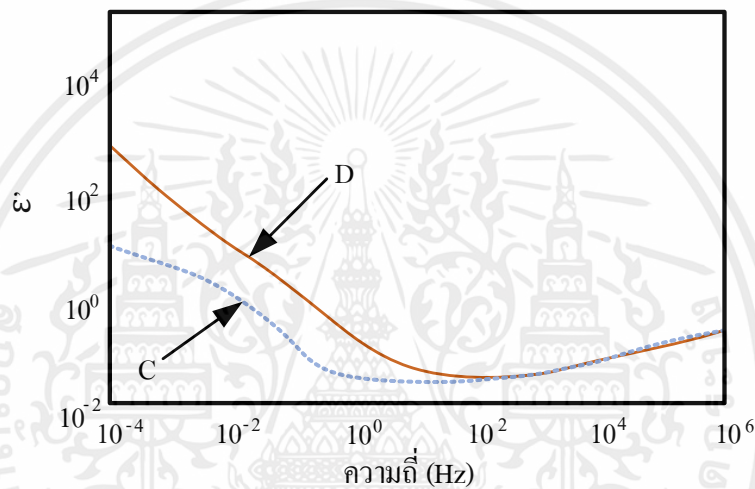
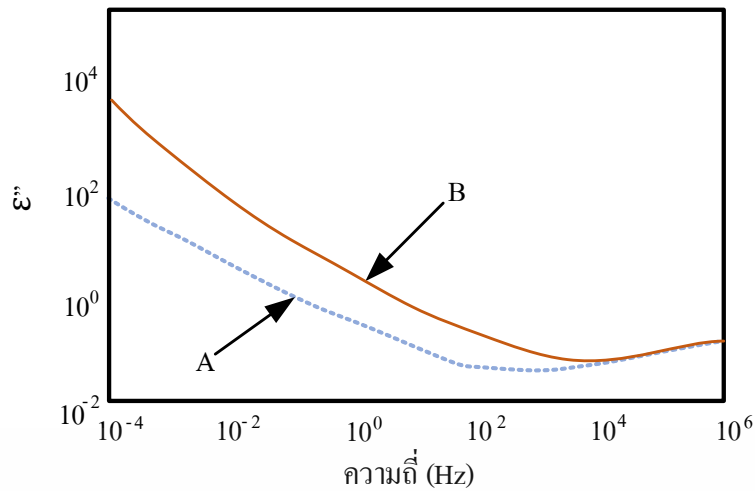


รูปที่ 2.30 ผลกระทบของการเสื่อมสภาพบนกระดาษกราฟที่มีความชื้นเริ่มต้น 0.2%: (A) ไม่ผ่านกระบวนการ; (B) อบ 94 ชั่วโมง DP 840 (C) อบ 1029 ชั่วโมง DP 360 [4]



รูปที่ 2.31 ผลกระทบของการเชื่อมสภาพบนกระดาษกราฟที่มีความชื้นเริ่มต้น 4%  
 (A) ไม่ผ่านการหมัก (B) ผ่านการเชื่อมสภาพมา 72 ชั่วโมง DP 1000  
 (C) ผ่านการเชื่อมสภาพมา 2005 ชั่วโมง อายุ DP 280 [4]

ดังนั้นสามารถคาดเดาได้ว่าการสูญเสียจะลดลงเล็กน้อย แต่ไม่ได้หมายความว่าคุณภาพของฉนวนนั้นดีขึ้น เมื่อการเชื่อมสภาพมากขึ้น ความชื้นและกรดโมเลกุลต่ำจะก่อตัวขึ้นนำไปสู่การสูญเสียไดอิเล็กทริกของฉนวนเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงในแนวตั้งหรือแนวนอนของแผนสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ที่ระดับการเชื่อมสภาพต่าง ๆ กันนั้นยังไม่เป็นที่เข้าใจ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเป็นผลจากการผสมผสานของระดับองค์ประกอบของการเกิดพอลิเมอร์เชิงซ้อนความเป็นกรดและระดับความชื้นที่มีอยู่



รูปที่ 2.32 การตอบสนองความถี่ของตัวอย่างเพอร์สโบริดจุ่มน้ำมันที่ผ่านการเชื่อมสภาพแล้วและไม่ยังผ่านการเชื่อมสภาพ: (a) ความชื้นเริ่มต้น 4%; (b) ความชื้นเริ่มต้น 0.6%  
A และ C ยังผ่านการเชื่อมสภาพ B และ D ผ่านการเชื่อมสภาพ [4]

การเชื่อมสภาพของตัวอย่างกระดาษหรือเพอร์สโบริดที่มีความชื้น ส่งผลต่อรูปร่างและค่าสัมบูรณ์เบี่ยงเบนที่เห็นได้ชัดเจนของพล็อตสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่เทียบกับพล็อตอ้างอิงที่ไม่มีการเชื่อมสภาพ เมื่อตัวอย่างที่แห้งมีการเชื่อมสภาพ การเบี่ยงเบนดังกล่าวจะมีนัยสำคัญน้อยลง สถานการณ์เหล่านี้สามารถอธิบายได้โดยใช้รูปที่ 2.31 ใช้ตัวอย่างเพอร์สโบริดสองตัวอย่างแบบแห้งมากโดยมีความชื้นน้อยกว่า 1% และอีกแบบค่อนข้างเปียกโดยมีความชื้นเริ่มต้น 4% ตัวอย่างทั้งสองถูกบ่มเป็นเวลา 800 ชั่วโมงที่ 130 °C เช่นเดียวกับในกรณีก่อนหน้านี้ การเบี่ยงเบนของแปลงสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ระหว่างตัวอย่างที่มีการเชื่อมสภาพแล้วและไม่ผ่านการเชื่อมสภาพอาจมีสาเหตุมาจากค่าระดับของสาเหตุของการเกิดพอลิเมอไรเซชันที่ลดลง ค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น หรือการสร้างความชื้นและผลผลิตที่เป็นกรดที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการการเชื่อมสภาพ

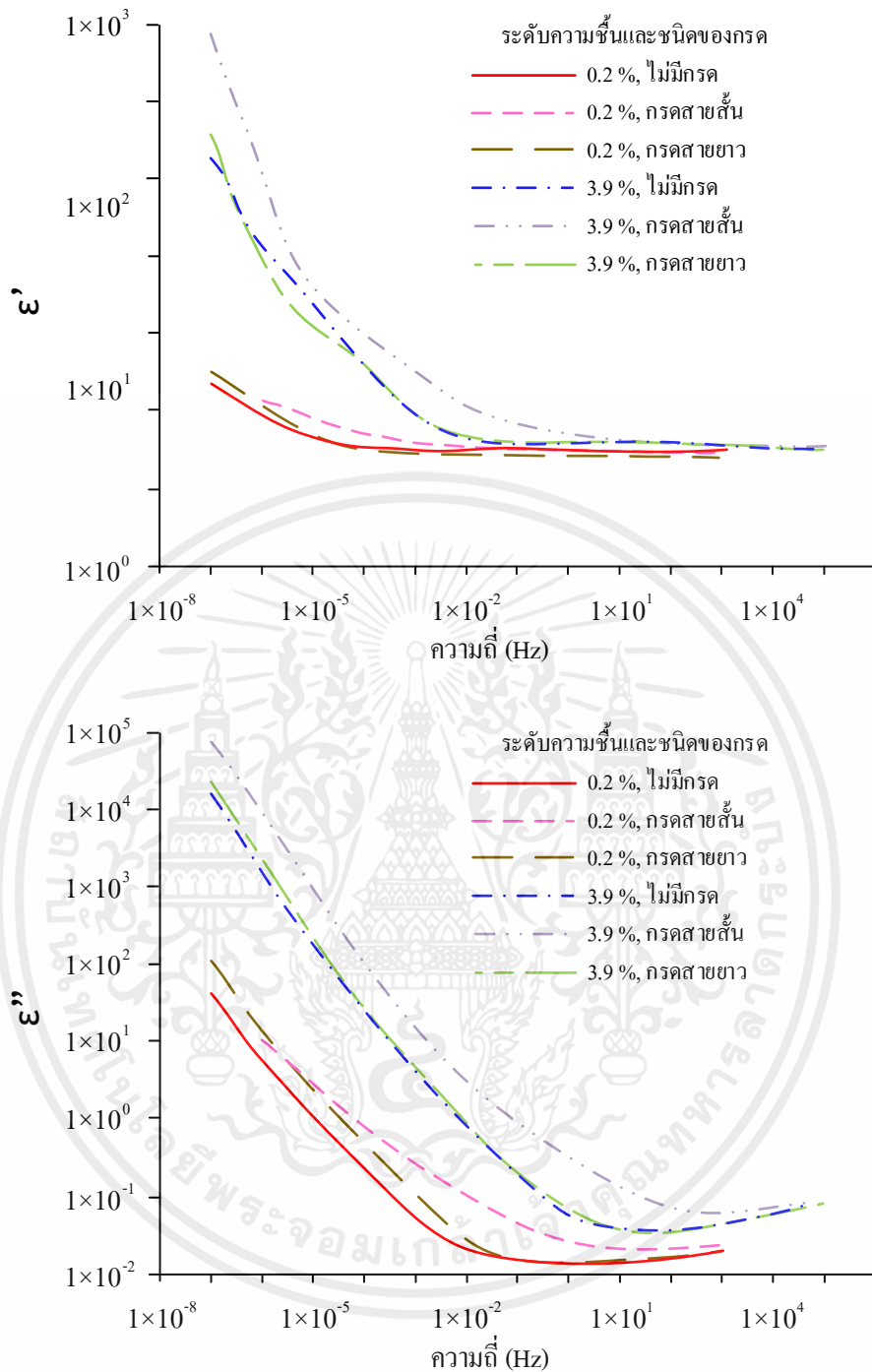
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3) ผลของกรด

ระหว่างการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าการเสื่อมสภาพของทั้งกระดาษและน้ำมัน เกิดจากหลายปัจจัย รวมทั้งการเกิดออกซิเดชันที่เร่งโดยอุณหภูมิที่สูง อากาศ และความชื้น ปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันและเซลลูโลสทำให้เกิดกรด เปอร์ออกไซด์ และน้ำ มีกรดสองชนิดหลักที่พบในฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเสื่อมสภาพ ได้แก่ กรดไฮโดรฟลิค เช่น กรดฟอร์มิกและกรดอะซิติก จากการเสื่อมสภาพของเซลลูโลส และกรดไฮโดรฟอสฟอริก เช่น กรดแนฟเทนิคและกรดสเตียริกจากการออกซิเดชันของน้ำมันฉนวน

กรดคาร์บอกซิลิกหลายชนิดเกิดขึ้นจากการเสื่อมสภาพของเซลลูโลสและน้ำมัน อายุที่มากขึ้นของเซลลูโลสส่วนใหญ่จะสร้างกรดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าซึ่งละลายน้ำได้ ในขณะที่อายุที่มากขึ้นของน้ำมันจะสร้างกรดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าซึ่งส่วนใหญ่จะละลายในน้ำมัน เมื่อสร้างแบบจำลองการตอบสนอง สเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ ควรคำนึงถึงผลกระทบของกรดสำหรับทั้งน้ำมันและเซลลูโลส โดยผลกระทบหลักของกรดในน้ำมันคือการเพิ่มความนำไฟฟ้า ผลของกรดในเซลลูโลสทำให้มีการเติมโมเลกุลที่มีขั้วซึ่งมีผลต่อการตอบสนองของไดอิเล็กทริกของทั้งกระดาษและเพรสบอร์ด โดยกรด "สายสั้น" ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (กรดไฮโดรฟลิค) ประกอบด้วยกรดฟอร์มิกและกรดอะซิติก สามารถละลายน้ำได้และอยู่ในกระดาษและมีส่วนทำให้เกิดการเสื่อมสภาพในทางตรงกันข้ามกรด "สายยาว" ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (กรดไฮโดรฟอสฟอริก) ซึ่งประกอบด้วยกรดแนฟเทนิคและสเตียริกจะละลายในไขมันและอยู่ในน้ำมัน กรดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะมีปฏิกิริยามากกว่ากรดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เมื่อกรดแทรกซึมเข้าไปในกระดาษ กรดจะสนับสนุนปฏิกิริยาการย่อยสลายและส่งผลให้สูญเสียความต้านทานแรงดึงและ องค์การของการเกิดพอลิเมอร์ไซคลิก ซึ่งจะช่วยให้วัสดุฉนวนอื่น เช่น การเคลือบโพลีเมอร์ประเภทอื่นด้วย ผลของกรดต่อสเปกตรัมความถี่ของเปอร์มิติวิตีของกระดาษ

การทดลองนำเพรสบอร์ดมีความหนาแน่น  $1.2 \text{ g/cm}^3$  ความหนา  $1 \text{ mm}$  และความชื้น  $0.2$  และ  $3.9 \%$  ถูกชุบด้วยน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าแนฟเทนิคที่แห้งและไล่ก๊าซออกซึ่งมีกรดที่เติมลงไปอย่างใดอย่างหนึ่ง คือ ส่วนผสมของกรดคาร์บอกซิลิกสายสั้นคือกรดฟอร์มิกและกรดอะซิติก หรือส่วนผสมของกรดคาร์บอกซิลิกสายยาวคือกรดแนฟเทนิคและกรดสเตียริกส่วนผสมของกรดแต่ละชนิดประกอบด้วยกรดสองชนิดที่มีส่วนทำให้ค่าการทำให้เป็นกลางโดยรวมเท่ากับ  $0.4 \text{ mgKOH/g}$  เท่า ๆ กัน ซึ่งเพรสบอร์ดที่นำมาทดลองถูกแช่ในน้ำมันเป็นเวลาอย่างต่ำ 5 เดือน เพื่อให้แพร่เข้าในเนื้อเพรสบอร์ดอย่างสมบูรณ์ สำหรับใช้งานที่อุณหภูมิ  $20 \text{ }^\circ\text{C}$



รูปที่ 2.33 แสดงการตอบสนองของไดโอดเล็ทริกของเพรสบอร์ดมีความชื้นและกรดต่างกัน [4]

กรดสายโซ่สั้นเปลี่ยนกราฟการตอบสนองไปสู่ความถี่ที่สูงขึ้นและสำหรับ  $\epsilon''$  มีการเปลี่ยนแปลงมากขึ้น ผลกระทบของกรดสายสั้นนั้นค่อนข้างสูงแต่ไม่เท่ากับผลกระทบของความชื้น ในการวินิจฉัยหม้อแปลงไฟฟ้าในทางปฏิบัติ เป็นการยากที่จะเห็นความแตกต่างระหว่างผลกระทบของกรดสายสั้นและความชื้น ในส่วนกรดสายยาวแสดงการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยในเพรสบอร์ดที่มีความชื้นต่ำ แต่จะไม่มี การเปลี่ยนแปลงเลยเมื่อกระดาษหรือเพรสบอร์ดเปียกชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาเหตุที่มีความแตกต่างอย่างมากระหว่างกรดสายโซ่ยาวและกรดสายสั้น คือ กรดสายสั้นซึ่งละลายน้ำได้จะแพร่เข้าไปในเซลล์โลสได้ดีโดยมีปริมาณเหลืออยู่ในน้ำมันน้อยมาก ในขณะที่กรดสายโซ่ยาวซึ่งละลายในไขมันได้ดีจะอยู่ในน้ำมันและแทบจะไม่เข้าไปเซลล์โลส

ในการทดสอบการตอบสนองของไดอิเล็กทริกสะท้อนให้เห็นค่าการนำไฟฟ้าและค่าการทำให้เป็นกลางของน้ำมันหลังทำการชุปกับเพรสบอร์ดทั้งน้ำมันที่ไม่มีกรดและน้ำมันที่มีกรดสายสั้นแต่เดิมมีค่าการนำไฟฟ้าที่ 20 °C ที่ 0.04 – 0.09 pS/m ขึ้นอยู่กับความชื้น และค่าการทำให้เป็นกลางลดลงจากเดิม 0.4 เป็นประมาณ 0.02 mgKOH/g ทั้งคู่ แสดงว่าแทบไม่มีกรดเหลืออยู่ในน้ำมัน แสดงว่าความถี่สายสั้นจำนวนมากในน้ำมันแพร่เข้าไปอยู่ในเพรสบอร์ด สำหรับกรดสายโซ่ยาว มีค่าการทำให้เป็นกลางเท่ากับ 0.37 และค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมันอยู่ที่ 0.5 – 10 pS/m ซึ่งสูงกว่าน้ำมันที่มีกรดสายสั้นอยู่ถึง 10 เท่า

โดยสรุปในหม้อแปลงไฟฟ้า กรดสายสั้นส่วนใหญ่ที่เกิดจากเซลล์โลสจะยังคงอยู่ในเพรสบอร์ดซึ่งมีส่วนช่วยในการนำไฟฟ้าของน้ำมันเล็กน้อย ในขณะที่มีส่วนช่วยในการตอบสนองของฉนวนแข็งนั้นพฤติกรรมคล้ายกับการมีผลของความชื้นแต่น้อยกว่ามาก ในทางตรงกันข้ามกรดสายโซ่ยาวจะคงอยู่ในน้ำมันและมีส่วนอย่างมากต่อการนำไฟฟ้า แต่แทบจะไม่เข้าไปในกระดาษหรือเพรสบอร์ด ดังนั้นจึงมีส่วนน้อยมากในการตอบสนองของฉนวนแข็ง

#### 4) ผลกระทบของอุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลอย่างมากต่อการตอบสนองไดอิเล็กทริกของระบบฉนวน อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะเพิ่มการนำไฟฟ้า ซึ่งสามารถเพิ่มขึ้นได้สองวิธี เนื่องจากการเพิ่มจำนวนของพาหะของประจุหรือเนื่องจากการเคลื่อนที่ของพาหะประจุเพิ่มขึ้น อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสามารถนำไปสู่การแตกตัวเป็นไอออนด้วยความร้อน ทำให้จำนวนพาหะของประจุเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นยังรบกวนการกระจายความชื้นในน้ำมันและกระดาษ สิ่งเหล่านี้มีส่วนทำให้อุณหภูมิมีผลต่อการตอบสนองของสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่

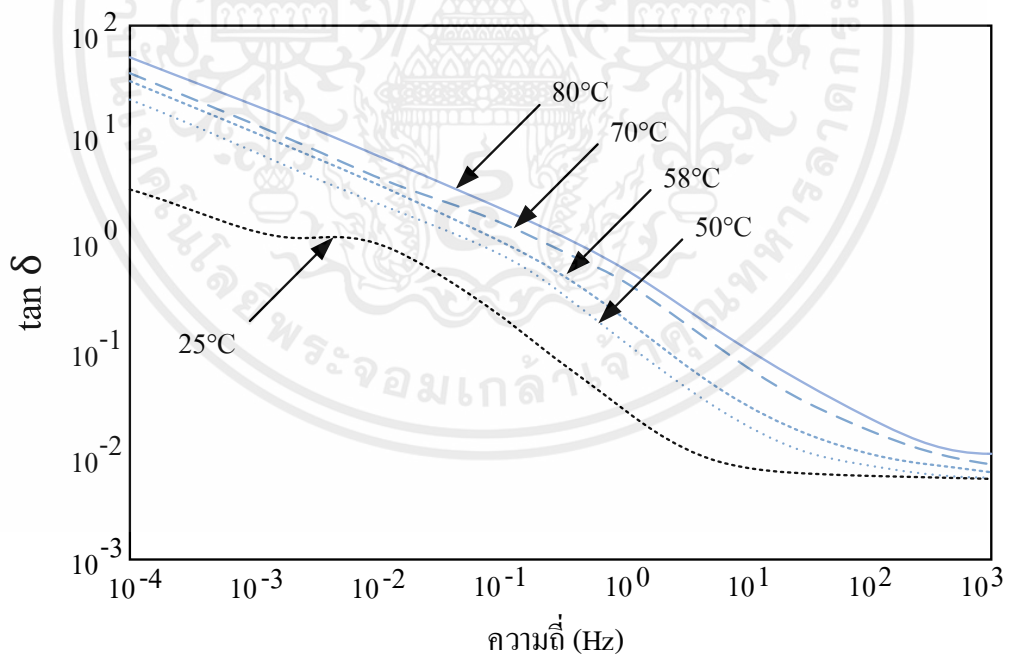
รูปร่างทั่วไปของสเปกตรัมตัวประกอบการสูญเสียของเพรสบอร์ดชุปน้ำมันที่อุณหภูมิขึ้นอยู่กับปัจจัยสองประการ ได้แก่ ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมันและความต้านทานฉนวนของเพรสบอร์ด ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมันขึ้นอยู่กับการเคลื่อนที่และความหนาแน่นของไอออนในน้ำมัน ซึ่งเกิดจากการแยกตัวของสิ่งเจือปนทางไฟฟ้าที่มีอยู่ในน้ำมัน ที่อุณหภูมิสูงขึ้น การไหล และการแยกตัวของสิ่งเจือปนทางไฟฟ้ากับไอออนจะเพิ่มขึ้น นำไปสู่การเพิ่มขึ้นในการนำไฟฟ้าพร้อมกับอุณหภูมิ

ในทางตรงกันข้าม การนำไฟฟ้าในกระดาษขึ้นอยู่กับการปริมาณความชื้นในเพรสบอร์ดเป็นหลัก ที่อุณหภูมิสูงขึ้น โพลาริเซชันและการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากผลกระทบซ้อนทับสองอย่าง ความหนาแน่นของพาหะของประจุเพิ่มขึ้นและการเคลื่อนที่ของพาหะประจุในฉนวนเพรสบอร์ดเพิ่มขึ้นเนื่องจากการสั้นสะพานทางความร้อนที่เพิ่มขึ้นของตัวพาประจุแบบเคลื่อนที่ในระบบเมื่อ

อุณหภูมิเพิ่มขึ้น อาจทำให้มีระดับการนำไฟฟ้าและโพลาริเซชันที่สูงขึ้นของเพอร์สโอบอร์ดที่อุณหภูมิสูงขึ้น

รูปที่ 2.34 แสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริก (dielectric dissipation factor, DDF) ที่อุณหภูมิต่างกัน เช่นเดียวกับการสูญเสียไดอิเล็กทริก ตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริกของระบบฉนวนกระดาษและน้ำมันเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการตอบสนองจะเคลื่อนไปตามแนวนอนตามแกนความถี่ไปสู่ความถี่ที่สูงขึ้น ค่าสูงสุดและต่ำสุดของตัวประกอบการสูญเสียที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิภายในช่วงความถี่ที่วัดได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.34 จากข้อมูลที่แสดงในตารางด้านล่าง จะสังเกตได้ว่าทั้งค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของตัวประกอบการสูญเสียภายในช่วงความถี่ที่วัดได้จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

พล็อตสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ของการสูญเสียไดอิเล็กทริกสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังไฟฟ้า 110 kV ที่อุณหภูมิต่างกันถูกจำลองขึ้นและแสดงในรูปที่ 2.34 หม้อแปลงไฟฟ้านี้ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลานานกว่าหนึ่งเดือนก่อนที่จะทำการตรวจวัดในสองสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน สันนิษฐานได้ว่าความชื้นในกระดาษจะใกล้เคียงกันทั้งสองกรณี ดังนั้นความแปรปรวนที่สังเกตได้ในการตอบสนองจึงเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ เส้นโค้งที่ตรงกับ 25 องศาเซลเซียสเลื่อนไปทางขวาตามเส้นโค้งที่ 15 องศาเซลเซียส ในขณะที่รูปร่างยังคงไม่เปลี่ยนแปลง

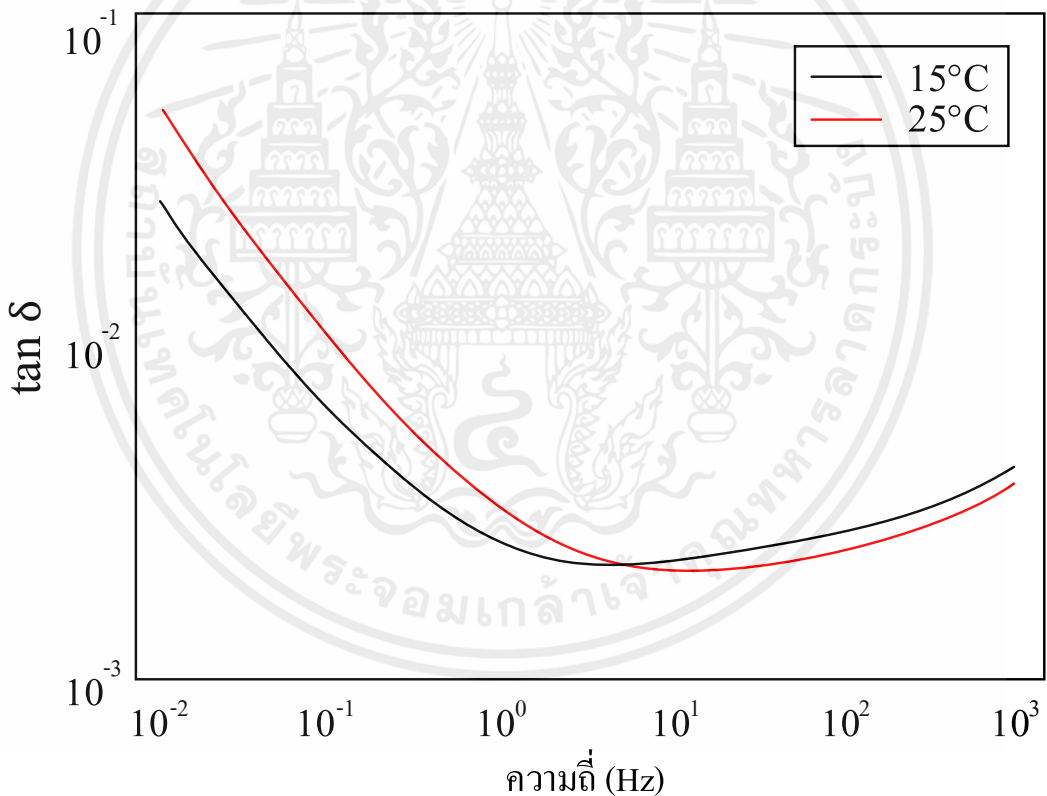


รูปที่ 2.34 ตัวประกอบการสูญเสีย  $\tan \delta$  ที่อุณหภูมิต่าง ๆ [4]

ตารางที่ 2.1 ตัวประกอบการสูญเสียสูงสุดและต่ำสุดตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

อุณหภูมิ (°C)	ค่าการสูญเสียอิเล็กทรอนิกส์ต่ำสุด	ค่าการสูญเสียอิเล็กทรอนิกส์สูงสุด
25	0.006709	2.8866
50	0.005799	21.114
58	0.006400	29.339
70	0.007489	35.605
80	0.008199	48.181

สิ่งนี้บ่งชี้อีกครั้งว่าอุณหภูมิเป็นส่วนสำคัญของข้อมูลสำหรับการประเมินสภาพของฉนวนและควรได้รับการบันทึกอย่างแม่นยำ ก่อนที่จะสรุปผลสรุปเกี่ยวกับสถานะของฉนวน การแก้ไขอุณหภูมิให้ถูกต้องจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งยวด



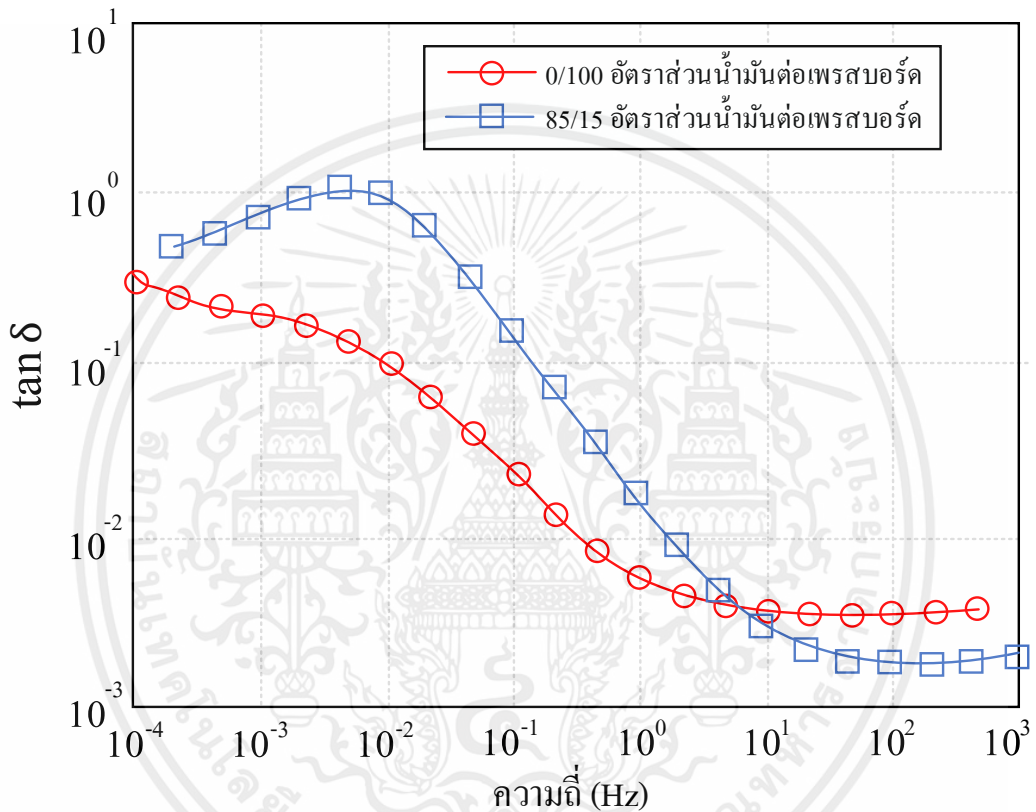
รูปที่ 2.35 ตัวประกอบการสูญเสีย  $\tan \delta$  ที่อุณหภูมิต่างกันของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ติดตั้งภาคสนาม [4]

#### 5) ผลของโครงสร้างฉนวน

ฉนวนหลักของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างด้านแรงดันสูงและด้านแรงดันต่ำ เกิดจากเพอร์สบอร์ดและน้ำมัน เพอร์สบอร์ดใช้เป็นตัวกั้นและสเปเซอร์ ในขณะที่ช่องน้ำมันในท่อถูกใช้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวกลางในการระบายความร้อน จำนวนของเพอร์สบอร์ดและจำนวนช่องน้ำมันที่ใช้ในการออกแบบ หม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละตัวขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น แรงดันไฟฟ้าที่กำหนด ระดับพลังงาน ประเภท การระบายความร้อน ตัวเลือกการออกแบบของผู้ผลิต เป็นต้น สัดส่วนของน้ำมัน กระจกตาช และเพอร์ส บอร์ดในการประกอบฉนวนจึงมักมีความแตกต่างกันในหม้อแปลงไฟฟ้าต่าง ๆ ดังนั้นการศึกษาอย่าง รอบคอบจึงจำเป็นเพื่อทำความเข้าใจผลกระทบของโครงสร้างของฉนวนที่มีต่อการวัดสเปกตรัม ไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่

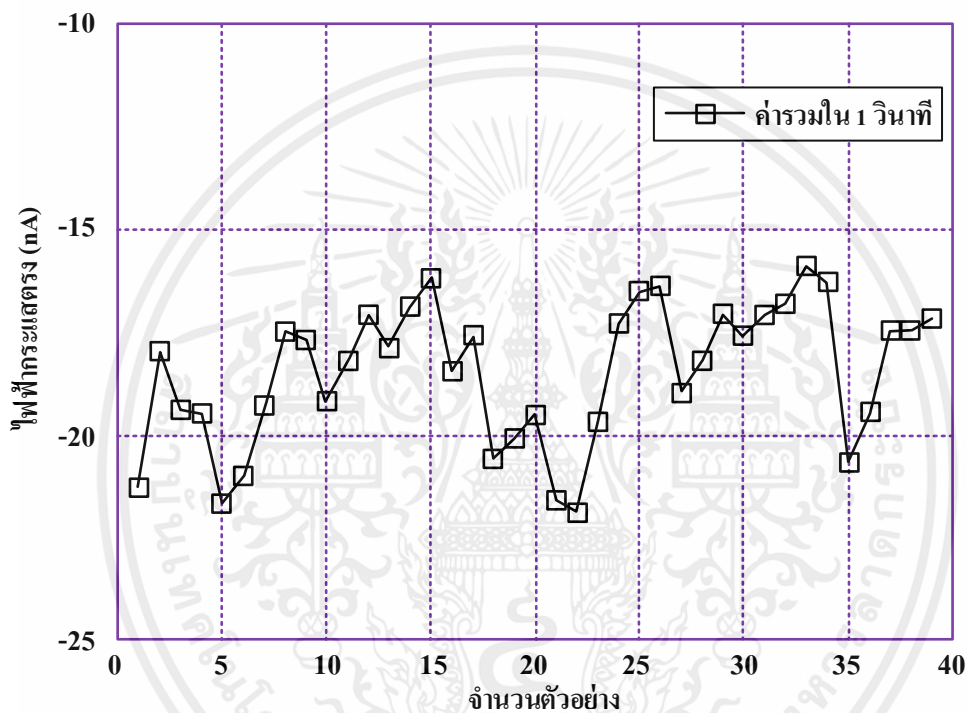


รูปที่ 2.36 Tan  $\delta$  ที่โครงสร้างของฉนวนที่แตกต่างกันสำหรับอัตราส่วนน้ำมันและเพอร์สบอร์ด [4]

เพื่อตรวจสอบเพิ่มเติมถึงผลกระทบของโครงสร้างของฉนวนต่อการตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวน การตั้งค่าการทดลองได้รับการพัฒนาขึ้นที่มหาวิทยาลัยควีนส์แลนด์ ประเทศออสเตรเลีย โดยจำลอง โครงสร้างขดลวดและฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าจริงตามรูปที่ 2.36 แบบจำลองนี้อ้างอิงจากการ จัดเรียงฉนวนที่มีอยู่ในหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นส่วนใหญ่ แบบจำลองฉนวนนี้เป็นรุ่นที่ปรับขนาดฉนวน ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีโครงสร้างที่เรียบง่าย การจัดเรียงทางเรขาคณิตและปริมาณสัมพัทธ์ของท่อ น้ำมัน เพอร์สบอร์ดบาเรียร์ และสเปเซอร์สามารถเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ควบคุมได้เพื่อศึกษา ผลกระทบต่อผลการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่

### 6) ผลของสัญญาณรบกวนกระแสตรงและกระแสสลับ

การวัดความจุและตัวประกอบการสูญเสียของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าในสถานีย่อยจะมีการเพิ่มกระแสรบกวนในการวัด ในแง่ของแอมพลิจูดสัญญาณรบกวนการสลับในสถานีย่อยกำลังกระแสตรง อาจสูงถึง 0.1 mA ส่วนการรบกวนของไฟฟ้ากระแสสลับในความถี่เครือข่าย (50 หรือ 60 เฮิร์ตซ์) และฮาร์โมนิกมักจะต่ำกว่า 1 mA โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 10  $\mu$ A ถึง 100  $\mu$ A นอกจากนี้องค์ประกอบกระแสสลับที่มีความถี่เครือข่ายและองค์ประกอบความถี่ข้างต้นแล้วยังมีการรบกวนของกระแสตรงและกระแสสลับความถี่ต่ำ



รูปที่ 2.37 การวัดสัญญาณรบกวนกระแสตรงทุก 1 วินาที ระหว่างการรบกวนของโคโรนา [4]

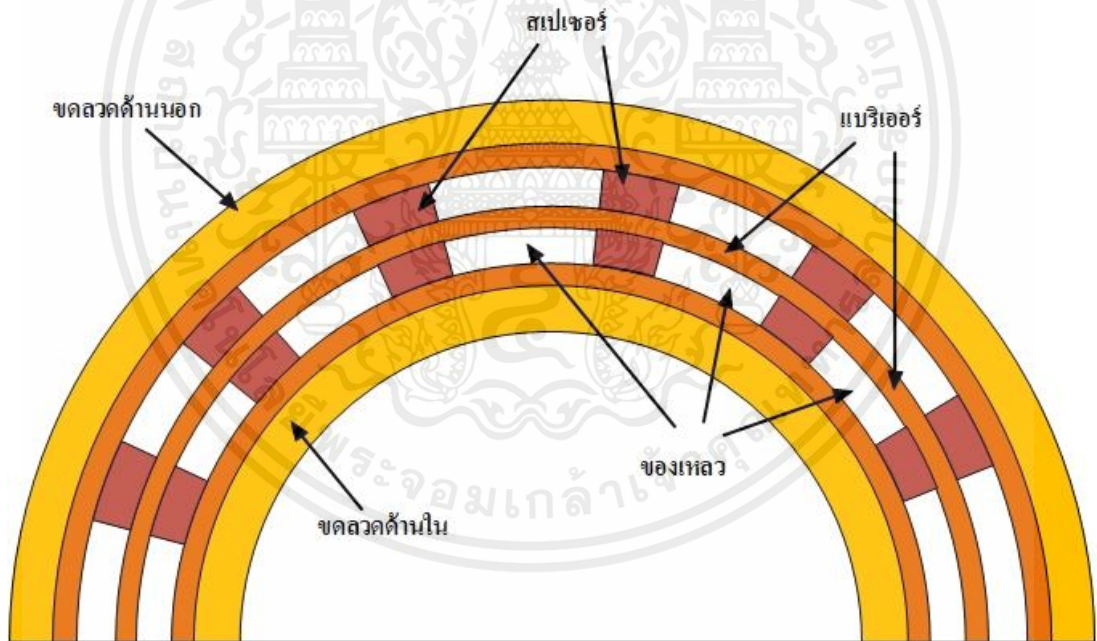
รูปที่ 2.37 เป็นตัวอย่างของกระแสตรงที่วัดจากแหล่งโคโรนา 50 Hz ในช่วง 1 วินาที ในกรณีการรบกวนกระแสสลับที่วัดได้คือหลายร้อย  $\mu$ A และกระแสตรงเฉลี่ยเกือบ -0.02  $\mu$ A สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนว่าการวัดกระแสตรง ให้ผลลัพธ์ของความผกผันและยังมีองค์ประกอบความถี่ที่ต่ำ ส่วนความถี่สูงของสัญญาณรบกวนส่วนใหญ่ได้รับการป้องกันโดยการไม่ใช่สัญญาณความถี่ที่ทราบค่าและมีการใช้อยู่ ร่วมกับสัญญาณกำลังประมวลผล การรบกวนของไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำอาจรบกวนการวัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อวัดค่าความจุต่ำ (<1nF) เนื่องจากการสูญเสียต่ำที่ความถี่ต่ำ ทางเลือกหนึ่งเพื่อให้ได้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ดีขึ้นคือการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่ใช้

ส่วนประกอบกระแสตรงของสัญญาณรบกวนมีอิทธิพลน้อยกว่า ในกรณีของการวัดการตอบสนองไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ (DFR) โดยใช้สัญญาณกระแสสลับ ส่วนประกอบความถี่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของกระแสตรงจะเป็นศูนย์ ในกรณีของการวัดกระแสโพลาริเซชัน ส่วนประกอบกระแสตรงจะถูกแปลงเป็นการสูญเสีย ซึ่งจะเพิ่มการสูญเสียที่วัดได้ให้สูงกว่าการสูญเสียฉนวนที่เกิดขึ้นจริง ผลกระทบนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งที่ความถี่ต่ำ

## 2.6 แบบจำลอง X-Y

ความชื้น ความเป็นกรด อุณหภูมิขณะทำงานในสภาวะปกติ ปฏิกริยาดีพอลิเมอร์ไรเซชันและสาเหตุอื่น ๆ มีผลกับค่าการนำไฟฟ้าและอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า การวัดความสูญเสียไดอิเล็กทริกนั้นจะช่วยบ่งบอกถึงอายุของหม้อแปลงไฟฟ้าและสถานะของฉนวนได้ โดยค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกจะแปรผันตรงกับอายุของหม้อแปลงไฟฟ้า แต่จะแปรผกผันกับย่านความถี่คือ ย่านความถี่สูงจะมีค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ต่ำกว่าย่านความถี่ต่ำ ซึ่งความแม่นยำของอุปกรณ์มีผลต่อการวัดค่ามากโดยเฉพาะในช่วงความถี่ต่ำ อาจจะไม่รับประกันความถูกต้องของผลลัพธ์ที่วัดได้ หากไม่มีการสร้างแบบจำลองที่เหมาะสม จึงเป็นไปได้ที่จะเชื่อมโยงผลการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่กับสถานะอายุของฉนวน

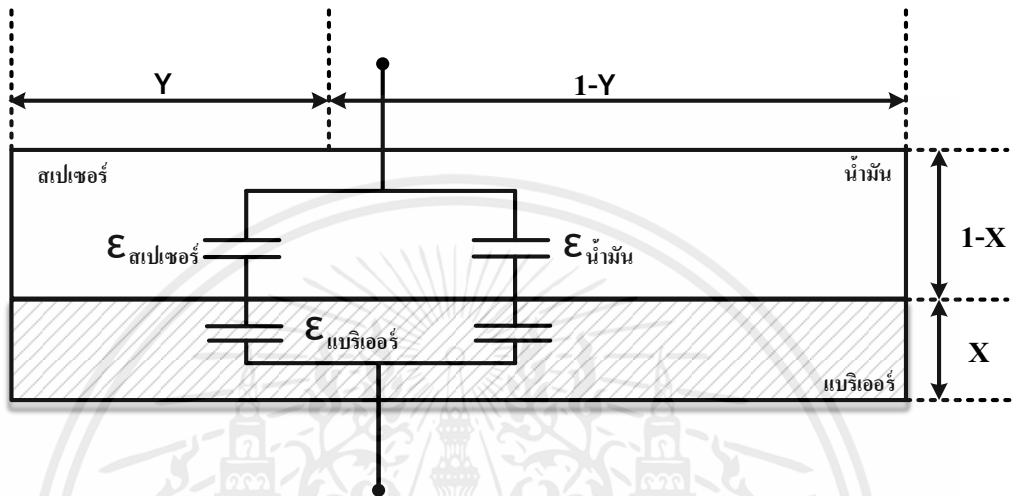


รูปที่ 2.38 ภาพตัดขวางของโครงสร้างฉนวนหลักของหม้อแปลงไฟฟ้า [8]

การตีความผลลัพธ์ของการวัดการตอบสนองของไดอิเล็กทริก มีจุดประสงค์เพื่อประเมินปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในส่วนที่เป็นของแข็งของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า สามารถหาได้โดยใช้แบบจำลอง X-Y โครงสร้างที่แสดงในรูปนี้เป็นแบบจำลองที่เรียบง่ายของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าจริง เราคาดฉนวนทรงกระบอกนี้สามารถแสดงด้วยแบบจำลองตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนานแบบก้อน ในแบบจำลอง X-Y แบรีเออร์ สเปเซอร์ และช่องน้ำมันทั้งหมด จะรวมกันตามจำนวนสัมพัทธ์ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเปเซอร์และแบรีเออร์ ในท่อ ซึ่งแสดงถึงสัดส่วนปริมาตรของส่วนประกอบระบบฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.39 พารามิเตอร์  $X$  ถูกกำหนดให้เป็นอัตราส่วนของผลรวมของความหนาทั้งหมดของสิ่งกีดขวางทั้งหมดในท่อรวมกันและหารด้วยความกว้างของท่อ ความครอบคลุมของสเปเซอร์  $Y$  ยังถูกกำหนดให้เป็นความกว้างรวมของสเปเซอร์ทั้งหมดหารด้วยความยาวทั้งหมดของขอบของท่อ ค่าทั่วไปของ  $X$  ในหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.2–0.5



รูปที่ 2.39 แบบจำลอง  $X$ - $Y$  ของโครงสร้างฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้า [8]

โดยค่าคงที่ได้อิเล็กทรอนิกส์ได้จาก

$$\varepsilon(\omega, T) = \left[ \frac{Y}{\left( \frac{1-X}{\varepsilon_{\text{Spacer}}} \right) + \left( \frac{X}{\varepsilon_{\text{Barrier}}} \right)} \right] + \left[ \frac{1-Y}{\left( \frac{1-X}{\varepsilon_{\text{oil}}} \right) + \left( \frac{X}{\varepsilon_{\text{Barrier}}} \right)} \right] \quad (2.42)$$

เมื่อ

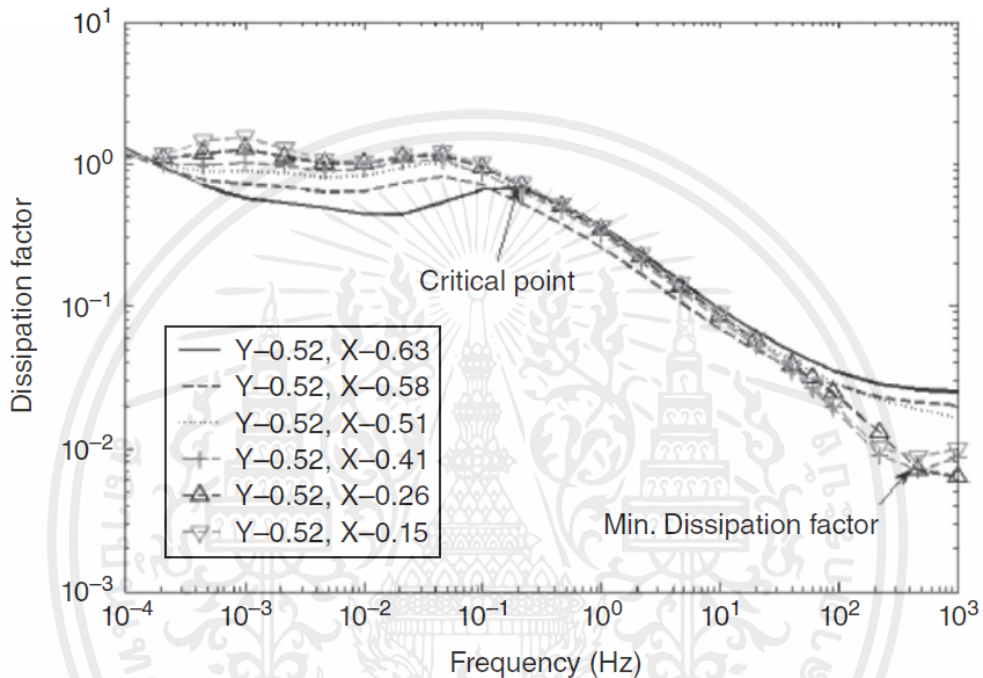
$$X = \frac{\text{ความหนารวมของสิ่งกีดขวาง}}{\text{ความกว้างของทรงกลม}} \times 100\%$$

$$Y = \frac{\text{ความกว้างรวมของสเปเซอร์}}{2\pi r} \times 100\% \quad ; \quad \text{สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดแกน}$$

$$Y = \text{ความกว้างบล็อกสเปเซอร์รวมในแหวนทั้งหมด} \quad ; \quad \text{สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดเซลล์}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของโครงสร้างที่มีต่อสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ ซึ่งวัดการตอบสนองไดอิเล็กทริกของแบบจำลองฉนวนที่แสดงในรูปที่ 2.39 ในขณะที่พารามิเตอร์  $X$  แปรผันตั้งแต่ 0.63 ถึง 0.15 ผลลัพธ์ของการตอบสนองที่วัดได้แสดงในรูปที่ 2.40 เมื่อพิจารณาสเปกตรัมที่แสดงในรูปอย่างละเอียดยิ่งขึ้น จะพบว่าจุดวิกฤติ (เกิดขึ้นในย่านความถี่  $10^{-2}$  ถึง 1 Hz ตามที่ระบุไว้ในรูป) เลื่อนไปสู่ความถี่ที่สูงขึ้นเมื่อค่า  $X$  เพิ่มขึ้น นอกจากนี้สเปกตรัมมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ปลายความถี่สูง (1 kHz) ซึ่งเชื่อมโยงกับโครงสร้างของฉนวน



รูปที่ 2.40 ผลกระทบของแบรตอปัจจัยการกระจายตัวเมื่อ  $Y = 0.52$  [4]

การอภิปรายข้างต้นระบุว่าโครงสร้างของฉนวนมีอิทธิพลบางอย่างต่อธรรมชาติของพล็อตสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ที่จะใช้สำหรับการประเมินสภาพของฉนวน ดังนั้นก่อนที่จะทำการอนุมานสรุปเกี่ยวกับสถานะของฉนวน แนะนำให้หาข้อมูลบางอย่างเกี่ยวกับโครงสร้างของฉนวนของวัสดุทดสอบ

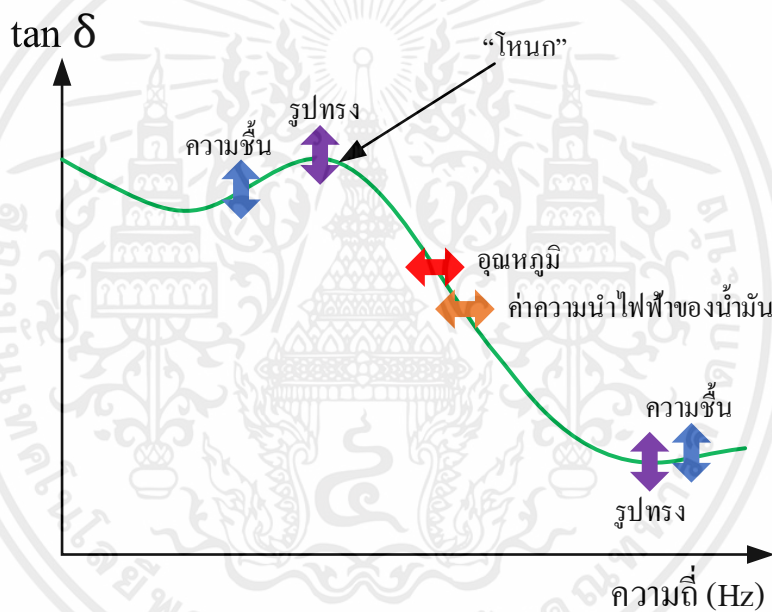
## 2.7 การลดระยะเวลาทดสอบการตอบสนองเชิงไดอิเล็กทริก

### 2.7.1 การกำหนดช่วงความถี่ที่เหมาะสม

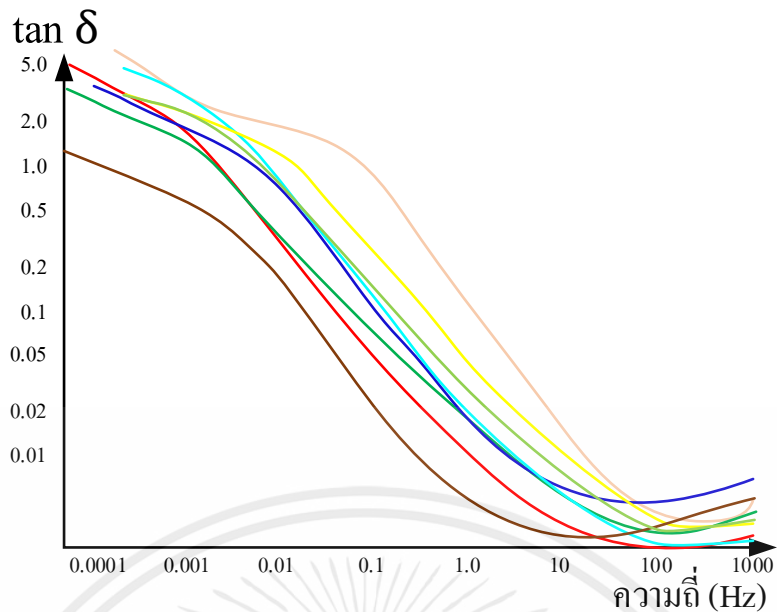
ช่วงความถี่ที่วัดได้สำหรับการวัดค่าความชื้น การตอบสนองไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ต้องมีตั้งแต่ความถี่สูงไปจนถึงย่านความถี่ต่ำซึ่งได้รับอิทธิพลจากความชื้น ความถี่สูงจะวัดได้เร็วมาก แต่ยิ่งความถี่ต่ำเวลาในการวัดก็จะยิ่งนานขึ้น ดังนั้นหากสามารถกำหนดช่วงความถี่ขั้นต่ำที่ต้องการได้ วิธีนี้จะช่วยป้องกันไม่ให้ใช้เวลาในการวัดนานเกินไปชุดการวัดหม้อแปลงไฟฟ้าบนหม้อ

แปลงไฟฟ้าต่าง ๆ มากกว่าหนึ่งร้อยรายการทำให้สามารถกำหนดช่วงความถี่ที่สามารถ "ตัด" เส้นโค้งที่วัดได้โดยไม่สูญเสียความแม่นยำในการวัดความถี่ ผลที่ได้คือหากความถี่ในการหยุดต่ำกว่า "โหนด" มากกว่า 1.5 ทศวรรษ ผลลัพธ์จะยังคงแม่นยำ ในขณะที่ความถี่การหยุดต่ำกว่า 1.5 ทศวรรษที่ต่ำกว่าความถี่ "โหนด" จะลดความแม่นยำของการวัดความถี่ซึ่งนี้เข้ากันได้ดีกับการค้นพบของแหล่งอื่น จึงเป็นไปได้ที่จะระบุช่วงความถี่ขั้นต่ำที่จำเป็นเมื่อทราบความถี่ของ "โหนด"

การระบุ "โหนด" อาจฟังดูง่าย หากเส้นโค้งเช่นที่แสดงด้านบนถือเป็น "โหนด" นั้นมองเห็นได้ชัดเจนเป็นค่าสูงสุดในพื้นที่ และสามารถตรวจจับได้ง่ายด้วยอัลกอริทึม มีค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมันและค่าความถี่ผสมกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดเส้นโค้งโดยไม่มีค่าสูงสุดเฉพาะในรูปที่ 2.42 แม้ว่าในบางกรณี ตำแหน่งของโหนดสามารถคาดเดาได้ แต่ควรมีวิธีที่เชื่อถือได้ในการระบุโหนด จึงต้องสังเกตช่วงความถี่ที่ความถี่มีอิทธิพลต่อเส้นโค้งไดอิเล็กทริก

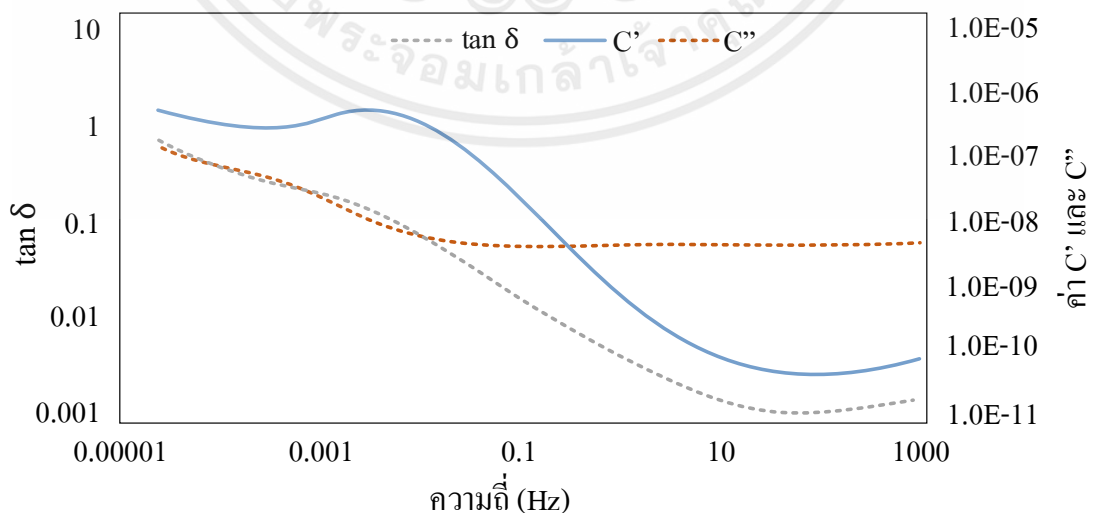


รูปที่ 2.41 เส้นโค้งการตอบสนองไดอิเล็กทริกลักษณะเฉพาะของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงด้วยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่าง ๆ [10]



รูปที่ 2.42 เส้นโค้งการตอบสนองไดอิเล็กทริกของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยไม่มี "โหนด" ที่มองเห็นได้ชัดเจน [10]

เพื่อกำหนดหลักการดังกล่าว เส้นโค้ง  $\tan(\delta)$  จะถูกตรวจสอบโดยละเอียด "โหนด" แสดงถึงบริเวณที่  $\tan(\delta)$  เริ่มลดลงเมื่อความถี่ลดลงเนื่องจากค่า  $\tan(\delta)$  คือ อัตราส่วนระหว่างการสูญเสียและโพลาริเซชัน การลดลงดังกล่าวจะเกิดขึ้นหากการสูญเสียลดลงมากกว่าโพลาริเซชันหรือเมื่อโพลาริเซชันเพิ่มขึ้นมากกว่าการสูญเสียในกรณีของการวัดหม้อแปลงไฟฟ้าจะเป็นไปตามกรณีหลัง คือ สำหรับความถี่ที่สูงกว่าความถี่โหนดมาก โพลาริเซชันจะคงที่แต่การสูญเสียจะเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้  $\tan(\delta)$  เพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ลดลงในรูปที่ 2.43



รูปที่ 2.43 การตอบสนองไดอิเล็กทริกของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มี "โหนด" ที่มองเห็นได้ [10]

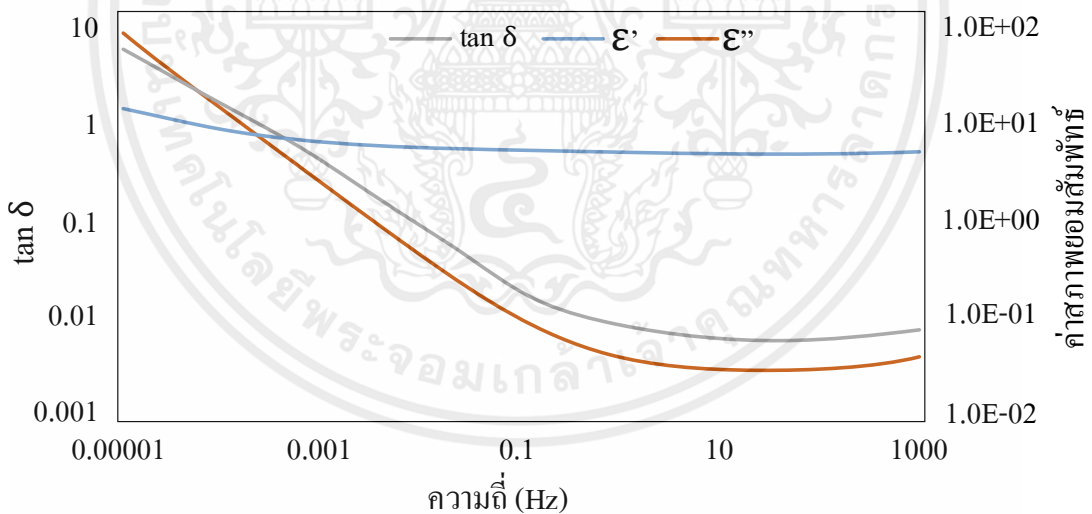
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่จุดเริ่มต้นของโหนด โพลาริเซชันจะเริ่มเพิ่มขึ้นมากกว่าการสูญเสีย ซึ่งทำให้  $\tan(\delta)$  ลดลงหลังจากจุดต่ำสุดสัมพัทธ์ที่ต่ำกว่าโหนด การเพิ่มขึ้นของการสูญเสียจะมากกว่าการเพิ่มขึ้นของโพลาริเซชันอีกครั้ง ค่า  $\tan(\delta)$  จะเพิ่มขึ้นอีกครั้งด้วยความถี่ที่ลดลงเนื่องจากโพลาริเซชันจะคงที่เหนือความถี่โหนดสำหรับช่วงการวัดทั้งหมด จึงสามารถใช้โพลาริเซชันที่เพิ่มขึ้นเพื่อตรวจจับ "โหนด" ได้อย่างน่าเชื่อถือ สำหรับการตรวจสอบต่อไปนี้ คำจำกัดความที่ใช้ของความถี่ "โหนด" คือค่าของ  $C'$  คือ 1.5 เท่าของค่าของ  $C'$  ที่ 50 Hz

$$C'(f_{hump}) = 1.5 \cdot C'(50 \text{ Hz}) \quad (2.43)$$

โดยที่  $f_{hump}$  คือ ความถี่ของ "โหนด"

เมื่อใช้สมการนี้ จะสามารถกำหนด "โหนด" ได้อย่างน่าเชื่อถือแม้ว่าจะไม่สามารถมองเห็นค่าสูงสุดเฉพาะที่ได้ที่เส้นโค้ง  $\tan(\delta)$  การค้นพบเชิงปฏิบัตินี้สามารถตรวจสอบได้ด้วยการพิจารณาทางทฤษฎี น้ำมันบริสุทธิ์ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงของโพลาริเซชันในช่วงความถี่ที่ตรวจสอบ ในขณะที่เซลล์ลูโลสขุ่นน้ำมัน เช่น เพอร์สโอร์ดที่ไม่มีโครงสร้างกั้นและสเปเซอร์ แสดงโพลาริเซชันรูปที่ 2.43



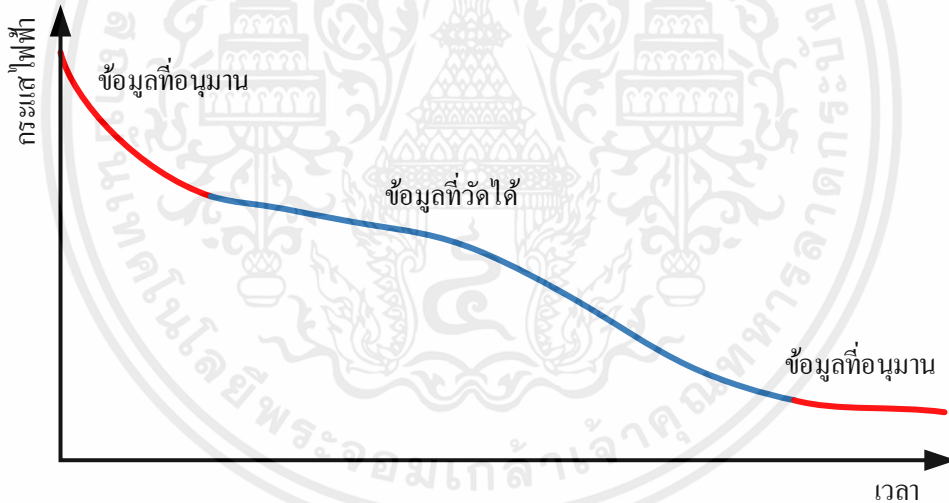
รูปที่ 2.44 การตอบสนองของไดอิเล็กทริกของแทนน้ำมันแร่ [10]

เมื่อถึงความถี่ "โหนด" ในการวัดแล้ว จะสามารถกำหนดความถี่หยุดที่จำเป็นซึ่งต่ำกว่าความถี่ "โหนด" 1.5 ทศวรรษได้ สิ่งนี้ไม่เพียงช่วยลดเวลาการทดสอบ แต่ยังหลีกเลี่ยงการวัดที่ไม่ถูกต้องด้วยช่วงความถี่ที่สั้นเกินไป

### 2.7.2 ปรับหลักการวัดให้เหมาะสม

มีหลักการมากมายในการวัดการตอบสนองของไดโอดีเล็กทริก โดยใช้การวัดโดเมนความถี่และโดเมนเวลา ตัวอย่าง ได้แก่ การวัดสเปกตรัมไดโอดีเล็กทริกในโดเมนความถี่ (FDS), การวัดกระแสโพลารไรเซชันและดีโพลารไรเซชัน (PDC), วิธีแรงดันการกู้คืน (RVM) เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถผสมผสานกันได้และสามารถช่วยในการรวมข้อดีของหลักการต่าง ๆ เนื่องจากหลักการวัดทั้งหมดเหล่านี้ เมื่อดำเนินการอย่างถูกวิธี จะสามารถวัดคุณสมบัติไดโอดีเล็กทริกของทรานซิสต์ในความถี่หรือช่วงเวลาหนึ่ง ผลลัพธ์สามารถแปลงเป็นค่าของกันและกันได้ รูปแบบการนำเสนอข้อมูลที่ได้รับที่ใช้มากที่สุดอยู่ในโดเมนความถี่ เช่น คุณสมบัติ  $\tan(\delta)$  จะแสดงในแผนภูมิเทียบกับความถี่ ข้อดีของการวัดโดเมนเวลาคือการประหยัดเวลา เนื่องจากสามารถใช้การวัดเพียงครั้งเดียวเพื่อระบุคุณสมบัติของไดโอดีเล็กทริกที่ความถี่ต่าง ๆ ได้ เพื่อให้ได้ข้อมูลในโดเมนความถี่ จำเป็นต้องมีการแปลง โดยมีหลักการหลายอย่างที่สามารถใช้ในการแปลง

การวัดทั้งหมดในโดเมนเวลาจะทำในช่วงเวลาที่จำกัด ในการถ่ายโอนข้อมูลไปยังโดเมนความถี่ จำเป็นต้องประเมินข้อมูลการวัดนอกช่วงเวลานี้



รูปที่ 2.45 การวัดกระแสโพลารไรเซชันในแผนผังพร้อมการคาดคะเนในช่วงเวลาสั้นและยาว [10]

เนื่องจากข้อมูลในโดเมนเวลาจำเป็นต้องอนุมานเพื่อให้บรรลุขีดจำกัดการรวมของการแปลงฟูริเยร์ ฟังก์ชันนี้ยังสามารถใช้คำนวณข้อมูลเพิ่มเติมในโดเมนความถี่ซึ่งช่วยประหยัดเวลาในการวัดเพิ่มเติม อัลกอริทึมที่ใช้ในการตรวจสอบนี้ สำหรับการแปลงจากเวลาเป็นโดเมนความถี่จะคำนวณการตอบสนองของไดโอดีเล็กทริกโดยอัตโนมัติในช่วงความถี่ที่เกี่ยวข้องทั้งหมด โดยไม่คำนึงถึงเวลาในการวัดจริง ข้อมูลที่แสดงจะถูกจำกัดในช่วงความถี่ ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลาการวัด การตั้งค่าทั่วไปคือความถี่ต่ำสุดจะอินเวอร์สกับเวลาที่วัดได้ โดยที่

$$f_{min} = \frac{1}{t_{measured}} \quad (2.44)$$

$F_{min}$  คือ ความถี่ที่ต่ำที่สุดที่กำหนด

$t_{measured}$  คือ เวลาที่ใช้วัด

แม้ว่าหลักการนี้จะให้ข้อได้เปรียบในแง่ของความเร็วในการวัดเมื่อเทียบกับการวัด FDS แต่เวลาในการวัดก็ยังคงค่อนข้างนาน เช่น ประมาณ 6 ชั่วโมงสำหรับการวัดที่ต่ำถึง 50  $\mu\text{Hz}$  การตั้งค่าอื่น ๆ เช่น ตัวอย่างใน (สูตร 3) ด้วยตัวประกอบค่า 0.1 จะทำให้เวลาในการวัดสั้นลง 10 เท่า สำหรับช่วงความถี่เดียวกัน

$$f_{min} = 0.1 \cdot \frac{1}{t_{measured}} \quad (2.45)$$

$F_{min}$  คือ ความถี่ที่ต่ำที่สุดที่กำหนด

$t_{measured}$  คือ เวลาที่ใช้วัด

ยิ่งค่าแฟกเตอร์ต่ำ การวัดยิ่งเร็วขึ้น เพื่อค้นหาว่าปัจจัยใดที่ยังสามารถระบุผลลัพธ์ที่เชื่อถือได้ การวัดโดเมนเวลาที่มีอยู่จึงถูกตัดออกและประมาณค่า โดยใช้ปัจจัยเดียวกัน สำหรับตัวประกอบเช่น 0.1 การวัด 10,000 วินาทีถูกตัดเป็น 1,000 วินาทีและอนุมานโดยใช้สูตรที่ 2 เป็นความถี่ขั้นต่ำที่ 100  $\mu\text{Hz}$  ผลลัพธ์ถูกนำไปเปรียบเทียบกับการวัดดั้งเดิมที่ 10,000 วินาที ซึ่งถูกแปลงเป็นโดเมนความถี่โดยใช้สูตรที่ 1 ปัจจัยอื่น ๆ นอกเหนือจาก 0.1 เป็นไปได้และถูกนำมาใช้ด้วย ผลการวิจัยพบว่า ในทุกกรณีปัจจัย 0.3 โดยซึ่งลดเวลาการวัดลงประมาณ 2/3 ให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องในกรณีส่วนใหญ่ปัจจัยที่สูงขึ้นถึง 0.05 โดยเพิ่มความเร็วในการวัดโดยปัจจัย 20 และต่ำกว่านั้นสามารถทำได้โดยไม่สูญเสียความแม่นยำ ปัจจัยสูงสุดจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของเส้นโค้งแต่ละแบบและเวลาในการวัดสัมบูรณ์ เช่น สำหรับการวัดที่ยาวมาก ปัจจัยที่ต่ำกว่านั้นเป็นไปได้ การค้นพบว่าสามารถใช้ปัจจัยที่ต่ำกว่าเพื่อลดระยะเวลาการทดสอบให้สั้นลงสอดคล้องกับการตรวจสอบอื่น ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความเร็วในการวัด อัลกอริทึมอัตโนมัติถูกสร้างขึ้นซึ่งใช้ปัจจัยแบบไดนามิกระหว่าง 0.3 ถึง 0.05 ซึ่งทำให้เวลาในการวัดโดเมนเวลาสั้นลงในช่วงตั้งแต่ 1/3 ถึง 1/20 ปัจจัยจริงที่ใช้ขึ้นอยู่กับความเสถียรของผลลัพธ์ที่คำนวณได้ในโดเมนความถี่ เทคนิคนี้เรียกว่า “PDC+”

## บทที่ 3

### การออกแบบการทดลอง

#### 3.1 การวิเคราะห์การตอบสนองไดอิเล็กทริกของหม้อแปลงไฟฟ้า

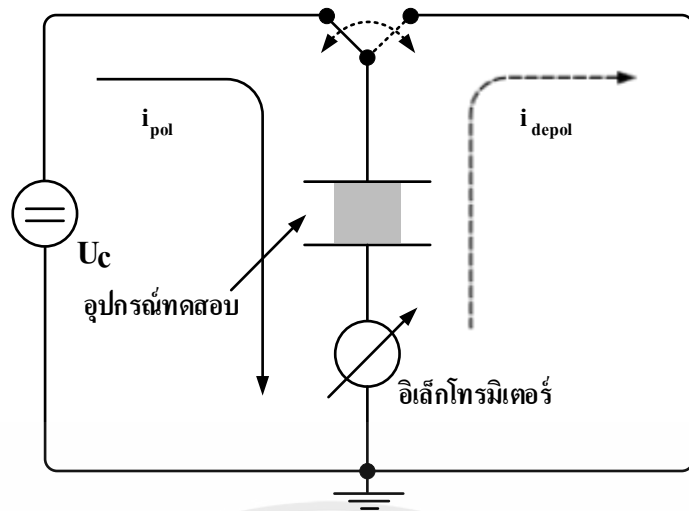
ในส่วนของการทดลองและศึกษา เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และประเมินหาความผิดปกติ หรือ ความชื้น ที่เกิดขึ้นกับระบบฉนวนแข็งภายในหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อเป็นการประเมินสภาพอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า เนื่องจากน้ำเป็นตัวเร่งการเสื่อมสภาพของฉนวนแข็งอย่างมีนัยสำคัญ การประเมินปริมาณความชื้นของฉนวนแข็งและกระดาษชุบน้ำมันในหม้อแปลงไฟฟ้าจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยในการทดลองจะใช้เทคนิคที่สามารถวิเคราะห์ความชื้นของระบบฉนวนแข็งภายในหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เทคนิค ได้แก่ เทคนิคกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (Polarization and Depolarization Current, PDC) เทคนิคสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ (Frequency Domain Dielectric Spectroscopy, FDS) และเทคนิคที่ผสมทั้งสองเทคนิคนี้เข้าด้วยกัน ชื่อว่า FDS & PDC+ โดยมีจุดมุ่งหมายของการทดลอง คือ การเปรียบเทียบเทคนิคการวัดการตอบสนองไดอิเล็กทริกของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 3 เทคนิค ว่าเทคนิคใดมีการวัดความชื้นของฉนวนแข็งที่แม่นยำที่สุด เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับเทคนิคการวัดความชื้นในน้ำมันด้วยวิธี Karl Fischer Titration

#### 3.2 เทคนิคการตรวจวัด

ในการทดลองจะใช้เทคนิคที่สามารถวิเคราะห์ความชื้นของระบบฉนวนแข็งภายในหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เทคนิค ดังนี้

##### 3.2.1 เทคนิคกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (PDC)

เทคนิคกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน จะวัดกระแสโพลาริเซชันระหว่างการจ่ายแรงดันไฟ DC (ดังแสดงในรูปที่ 3.1) และกระแสดีโพลาริเซชันหลังจากปลดแรงดันไฟ DC ออกจากระบบฉนวน โดยระบบฉนวนในกรณีนี้ คือ ฉนวนระหว่างขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยกระแสเหล่านี้จะบ่งบอกสภาพของน้ำมันและระบบฉนวนแข็งชุบน้ำมัน

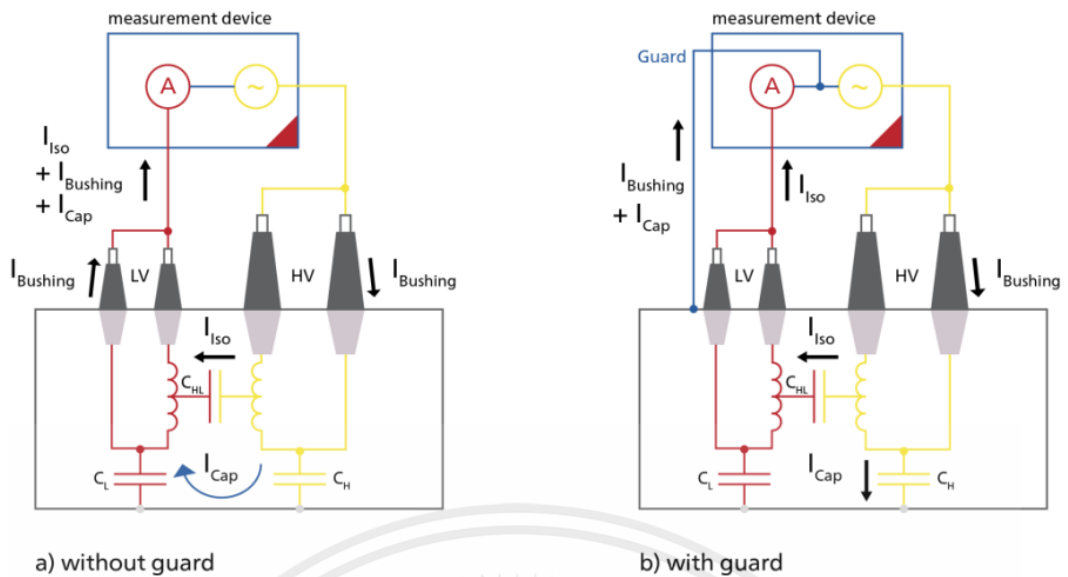


รูปที่ 3.1 วงจรพื้นฐานสำหรับวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน [4]

รูปที่ 3.1 แสดงวิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน เมื่อสวิตช์อยู่ในตำแหน่งด้านซ้าย (ตำแหน่ง 1) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าจะเชื่อมต่อกับวัตถุทดสอบ (เช่น หม้อแปลงไฟฟ้าที่ลัดวงจรขดลวดปฐมภูมิ และลัดวงจรขดลวดทุติยภูมิ เพื่อสร้างระบบไดโอดเล็กทริกสองขั้ว) กระแสโพลาริเซชันจะเคลื่อนที่ และถูกวัดผ่านอิเล็กโทรมิเตอร์หรืออุปกรณ์วัดกระแสต่ำ หลังจากเวลาชาร์จ  $t_p$  จะสวิตช์ไปยังตำแหน่งด้านขวา (ตำแหน่ง 2) ทำให้วัตถุทดสอบจะลัดวงจร กระแสดีโพลาริเซชันจะไหลผ่านอิเล็กโทรมิเตอร์ และอิเล็กโทรมิเตอร์วัดกระแสการชาร์จและการคายประจุ (โพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน)

### 3.2.2 เทคนิคสเปกตรัมไดโอดเล็กทริกในโดเมนความถี่ (FDS)

ในการวิเคราะห์สเปกตรัมไดโอดเล็กทริกในโดเมนความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้า ฉนวนหลักของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งหมดจะถูกใช้เป็นเซ็นเซอร์วัดความถี่ อุปกรณ์วัดจะเชื่อมต่อกับบิวซีชิ่งและวัดหาคณสมบัติไดโอดเล็กทริกของฉนวน การเชื่อมต่อนั้นทำได้ง่ายมาก เช่นเดียวกับการวัดตัวประกอบกำลังไฟฟ้าหรือ  $\tan(\delta)$  โดยจะวัดฉนวนเพียงส่วนเดียว โดยทั่วไปจะใช้ฉนวนหลักระหว่างด้านไฟฟ้าแรงสูงและด้านไฟฟ้าแรงต่ำ (CHL) เนื่องจากเป็นส่วนที่มีฉนวนแข็งมากที่สุด กระแสคาปาซิทีฟและรีซีทีฟที่ไม่ต้องการจะถูกกำจัดโดยการเชื่อมต่อตัวป้องกันซึ่งใช้กับถึงหม้อแปลงไฟฟ้าในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โดอะแกรมการวัด CHL บนหม้อแปลงไฟฟ้า 2 ขดลวดแบบไม่มีตัวป้องกันและมีตัวป้องกัน จากโปรแกรม DIRANA

ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าหรือตัวประกอบการสูญเสียของฉนวน จะถูกวัดในช่วงความถี่ที่กว้าง โดยเส้นโค้งผลลัพธ์จะประกอบไปด้วยข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสภาพของฉนวน ในช่วงความถี่ที่ต่ำมาก จะมีข้อมูลเกี่ยวกับความชื้นในฉนวนแข็ง ในขณะที่ตำแหน่งของความลาดเอียงในช่วงความถี่ช่วงกลาง จะบ่งบอกถึงการนำไฟฟ้าของฉนวนเหลว เส้นโค้งนี้ จะถูกเปรียบเทียบกับเส้นโค้งแบบจำลอง และนำไปคำนวณความชื้นของฉนวนเซลลูโลส

### 3.2.3 เทคนิค FDS & PDC+

เทคนิค FDS & PDC+ เป็นเทคนิคการวัดการตอบสนองไดอิเล็กทริกที่ทันสมัยของบริษัท OMICRON ในรูปแบบของอุปกรณ์การวัดที่มีชื่อว่า DIRANA คือ การนำข้อได้เปรียบของเทคนิคสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ (FDS) และเทคนิคกระแสโพลาริเซชันและ ดีโพลาริเซชันขั้นสูง (PDC+) มารวมกัน โดยเป็นหลักการที่จดสิทธิบัตรแล้ว ซึ่งเป็นการใช้เทคนิค FDS สำหรับการวัดความถี่สูง และเทคนิค PDC+ สำหรับการวัดความถี่ต่ำ ทำให้สามารถทดสอบในช่วงความถี่ที่กว้างได้ในเวลาอันสั้น ด้วยเหตุนี้ เทคนิคเฉพาะของ DIRANA จึงช่วยให้มั่นใจได้ว่าช่วงความถี่ที่ต้องการนั้นวัดได้แม่นยำ ไม่มากไปไม่น้อยไป ในกรณีที่การวัด FDS แบบเดิมใช้เวลามากกว่าหนึ่งวัน ในการวัดตั้งแต่ 1 kHz ถึง 10  $\mu$ Hz DIRANA แต่เทคนิคนี้สามารถทำได้ภายใน 30 นาทีถึง 1 ชั่วโมง 45 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการวิจัยและชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.3.1 หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง

เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่ถูกปลดการใช้งาน คือ หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ขนาด 50 kVA, 22000/400 V, 50 Hz จำนวน 1 ตัว และหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ขนาด 1500 kVA, 24000/416 V, 50 Hz เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่กระบอกซิลิกาเจลแตก จำนวน 1 ตัว ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เนมเพลทของหม้อแปลงที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.3.2 เครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD

เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการวัดกระแสโวลตาโรเซชันและดีโวลตาโรเซชัน และวิเคราะห์ปฏิกิริยาทางไฟฟ้าของวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าในการทดลอง โดยใช้ร่วมกับคอมพิวเตอร์ที่รองรับระบบปฏิบัติการ Windows



รูปที่ 3.4 เครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD

### 3.3.3 เครื่อง Dielectric Insulation Analyser (DIRANA)

เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์การตอบสนองไดอิเล็กทริก ใช้เพื่อประเมินความชื้นของฉนวนเซลลูโลสและบ่งบอกสภาพของฉนวนแข็งภายในหม้อแปลง ใช้วัด FDS, FDS & PDC, FDS & PDC+ ในการทดลองนี้



รูปที่ 3.5 เครื่อง Dielectric Insulation Analyser (DIRANA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 กรณีศึกษาในการทดสอบการตอบสนองไดโอดีเล็กทริก

#### 3.4.1 กรณีศึกษาการทดสอบการตอบสนองไดโอดีเล็กทริกโดยใช้เครื่อง DIRANA

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดการแบ่งกรณีศึกษาของการทดสอบการตอบสนองไดโอดีเล็กทริกโดยใช้เครื่อง DIRANA

ประเภทการทดสอบ	กรณีศึกษา	การตั้งค่าโปรแกรมทดสอบ
เทคนิคสเปกตรัม ไดโอดีเล็กทริกใน โดเมนความถี่ (FDS)	1. หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 kVA, ที่ความถี่เริ่มต้น 1 kHz ความถี่สิ้นสุด 1 mHz แรงดัน FDS 200 V	Start frequency <input type="text" value="1 kHz"/> Stop frequency <input type="text" value="1 mHz"/> FDS voltage <input type="text" value="200 V"/> PDC voltage <input type="text"/>
	2. หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 1500 kVA, ที่ความถี่เริ่มต้น 1 kHz ความถี่สิ้นสุด 1 mHz แรงดัน FDS 100 V	Start frequency <input type="text" value="1 kHz"/> Stop frequency <input type="text" value="1 mHz"/> FDS voltage <input type="text" value="100 V"/> PDC voltage <input type="text"/>
FDS&PDC	3. หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 kVA, ที่ความถี่เริ่มต้น 1 kHz ความถี่สิ้นสุด 1 mHz แรงดัน FDS 200 V	Start frequency <input type="text" value="1 kHz"/> Stop frequency <input type="text" value="10 μHz"/> FDS voltage <input type="text" value="200 V"/> PDC voltage <input type="text" value="200 V"/>
	4. หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 1500 kVA, ที่ความถี่เริ่มต้น 1 kHz ความถี่สิ้นสุด 1 mHz แรงดัน FDS 100 V	Start frequency <input type="text" value="1 kHz"/> Stop frequency <input type="text" value="10 μHz"/> FDS voltage <input type="text" value="100 V"/> PDC voltage <input type="text" value="100 V"/>
FDS&PDC+	5. หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 kVA, ที่ความถี่เริ่มต้น 1 kHz ความถี่สิ้นสุด 1 mHz แรงดัน FDS 200 V	Start frequency <input type="text" value="1 kHz"/> Stop frequency <input type="text" value="10 μHz"/> FDS voltage <input type="text" value="200 V"/> PDC voltage <input type="text" value="200 V"/>
	6. หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 1500 kVA, ที่ความถี่เริ่มต้น 1 kHz ความถี่สิ้นสุด 1 mHz แรงดัน FDS 100 V	Start frequency <input type="text" value="1 kHz"/> Stop frequency <input type="text" value="10 μHz"/> FDS voltage <input type="text" value="100 V"/> PDC voltage <input type="text" value="100 V"/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2 กรณีศึกษาการทดสอบการตอบสนองไดอิเล็กทริกโดยใช้เครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD

**ตารางที่ 3.2** รายละเอียดการแบ่งกรณีศึกษาของการทดสอบการตอบสนองไดอิเล็กทริกโดยใช้เครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD วัตต์หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ขนาด 50 kVA

กระแสโพลาริเซชัน และดีโพลาริเซชัน	แรงดัน (V)	ระยะเวลาชาร์จ (วินาที)	ระยะเวลาดิสชาร์จ (วินาที)
กรณีศึกษาที่ 7	1000	3000	3176
กรณีศึกษาที่ 8	500	3000	3002
กรณีศึกษาที่ 9	500	500	10519
กรณีศึกษาที่ 10	200	5000	11131
กรณีศึกษาที่ 11	200	1000	2324
กรณีศึกษาที่ 12	200	500	1707

### 3.5 ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.5.1 ขั้นตอนการต่อวงจรและการทดสอบโดยใช้เครื่อง DIRANA

1. เนื่องจากมีหม้อแปลงไฟฟ้าที่ต้องการทดสอบ 2 ตัว และมีเครื่องมือวัด DIRANA เพียงหนึ่งเครื่อง ทำให้ต้องทำการทดสอบกับหม้อแปลงทีละตัว โดยเริ่มจากหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 kVA ก่อน
2. ทำความสะอาดบุชชิ่ง และทำการลัดวงจรขั้วแรงดันสูง และขั้วแรงดันต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้า



**รูปที่ 3.6** ทำความสะอาดบุชชิ่ง ทำการลัดวงจรขั้วแรงดันสูง และขั้วแรงดันต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ต่อกราวด์ศักย์ไฟฟ้าของ DIRANA เข้ากับถังหม้อแปลงโดยใช้สายดิน



รูปที่ 3.7 กราวด์ของเครื่องมือวัด DIRANA

4. ป้อนอุณหภูมิของฉนวนหม้อแปลงลงในโปรแกรม หากไม่มีอุณหภูมิฉนวนให้ใช้อุณหภูมิน้ำมันส่วนบน
5. ตั้งค่าการทดสอบตามกรณีศึกษา
6. ต่อสายการวัดเข้ากับหม้อแปลงตามแผนภาพการต่อวงจร



รูปที่ 3.8 ต่อสายการวัดเข้ากับหม้อแปลงไฟฟ้า

7. ตรวจสอบการเชื่อมต่อของตัวป้องกันบนถังหม้อแปลงไฟฟ้า
8. เริ่มการวัด
9. เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการวัด
10. หลังจากทำการศึกษาทั้งหมดของหม้อแปลงไฟฟ้าตัวแรกเสร็จแล้ว ให้ถอดเครื่องมือวัดออกจากหม้อแปลงไฟฟ้าและนำไปต่อกับหม้อแปลงไฟฟ้าตัวที่สอง ด้วยวิธีการต่อเดียวกับการต่อของหม้อแปลงไฟฟ้าตัวแรก เพื่อทำการวัดตามกรณีศึกษาที่เหลืออยู่ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.2 ขั้นตอนการต่อวงจรและการทดสอบโดยใช้เครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD

การต่อใช้งานของเครื่องวัด PDC-ANALYSER-1MOD กับอุปกรณ์ที่ทำการทดสอบให้ถูกต้องนั้นเป็นสิ่งสำคัญอย่างมาก เพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่ถูกต้องแม่นยำและค่าไม่ผิดพลาด สิ่งสำคัญจะต้องทำการตรวจเช็คจุดต่อสายที่เชื่อมต่อระหว่างเครื่องวัดกับอุปกรณ์ที่ทดสอบให้แน่นและถูกต้องโดยเฉพาะขั้วต่อและสายไฟที่ใช้ในการวัดค่า ไม่ควรจะใช้ไขว้หรือพาดเพราะจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำในสายซึ่งจะส่งผลต่อการทดสอบ เช่น เกิดการแฟลชหรือดิสชาร์จออกมาและจะทำให้ค่าที่วัดได้เกิดความเพี้ยน จุดเชื่อมต่อการใช้งานของตัวเครื่องในแต่ละจุดสามารถดูได้จากหมายเลขที่กำหนดไว้บนตัวเครื่องดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD

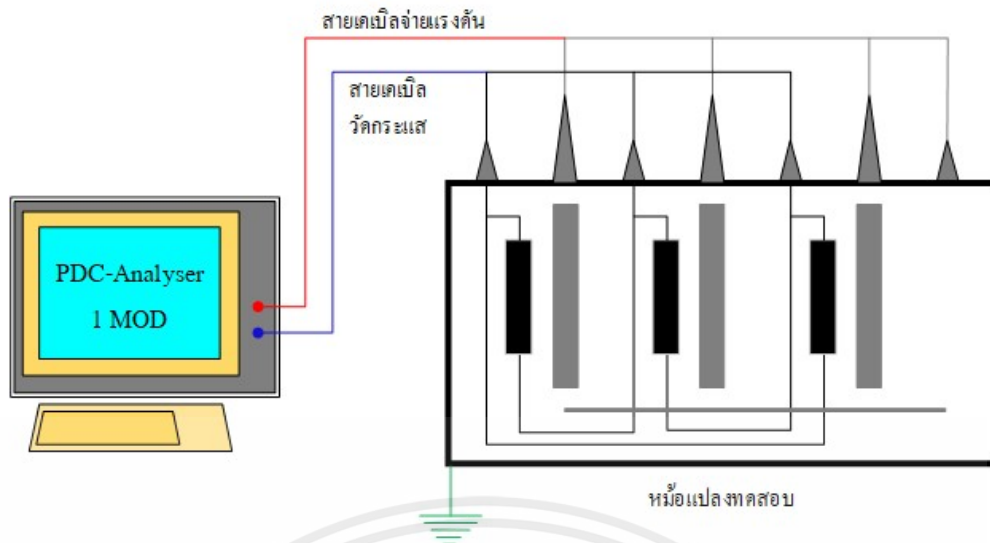
หมายเลข 1 จุดต่อสายเพื่อป้อนไฟฟ้าแรงสูงให้กับอุปกรณ์ที่ทดสอบ (ใช้สาย SHV)

หมายเลข 2 จุดต่อสายเพื่อตรวจวัดกระแส จากอุปกรณ์ทดสอบ (ใช้สาย BNC)

หมายเลข 3 จุดต่อสายจากแหล่งจ่ายแรงดันแบบ PDC-Phantom-1000XE

หมายเลข 4 สวิตช์เปิดเครื่อง PDC-ANALYSER- 1MOD

หมายเลข 5 พอร์ตต่อสายแป้นพิมพ์



รูปที่ 3.10 การต่อวงจรการทดสอบ

1. ทำการต่อวงจรทดสอบดังรูปที่ 3.10
2. สำหรับการวัดที่แม่นยำ ต้องกำหนดสถานะเริ่มต้นของวัตถุทดสอบก่อนที่จะใช้แรงดันกระตุ้นใด ๆ
3. สถานะเริ่มต้น (หรือสถานะการชาร์จ) ของวัตถุทดสอบสามารถบอกได้โดยการตรวจสอบกระแสเริ่มต้นที่ไหลผ่านวัตถุนั้น โดยเริ่มวัดกระแสด้วยระยะเวลาโพลาไรซ์เป็นศูนย์วินาที กระแสเริ่มต้นจะต้องต่ำและอย่างน้อยต้องอยู่ในสถานะคงที่ ในการทดลองนี้ต้องมีค่าต่ำกว่า 10 pA
4. ก่อนเริ่มการวัดหลัก ให้ดำเนินการวัดควบคุมด้วยระยะเวลาการชาร์จสั้น เช่น 5 วินาที ตรวจสอบขนาดของกระแสที่วัดได้และค่าความจุ
5. การวัดหลักตามกรณีศึกษาสามารถทำได้หลังจากการวัดควบคุม โดยเลือกตั้งค่าแรงดันไฟและระยะเวลาในการชาร์จและดิสชาร์จตามต้องการ
6. หลังจากได้กราฟกระแสโพลาไรเซชันและกระแสดีโพลาไรเซชันมาแล้ว ให้ทำการเปรียบเทียบกราฟเพื่อหาค่าความนำไฟฟ้าของน้ำมัน และความชื้นของฉนวนแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบ

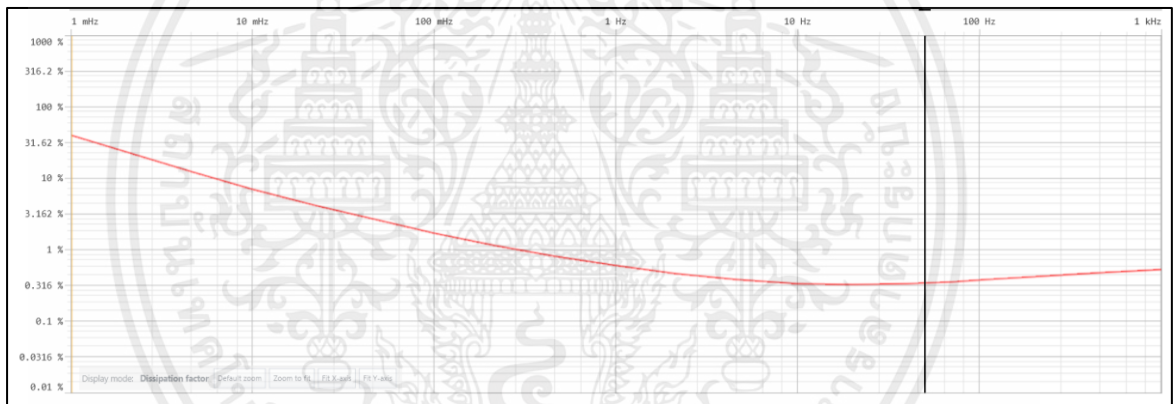
ผลการทดสอบการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของหม้อแปลงไฟฟ้า 2 ตัว โดยใช้เครื่อง Dielectric Insulation Analyzer (DIRANA) เครื่อง PDC-ANALYZER-1MOD และเครื่อง Karl Fischer Titrators (เครื่อง DIRANA สามารถแสดงผลค่าความชื้นในฉนวนแห้งได้สูงที่สุด 5%) โดยที่

หม้อแปลงไฟฟ้าตัวที่ 1 พิกัดไฟฟ้า 50 kVA

หม้อแปลงไฟฟ้าตัวที่ 2 พิกัดไฟฟ้า 1500 kVA

#### 4.1 การทดสอบวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกโดยวิธีสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ (FDS)

กรณีศึกษาที่ 1 การทดสอบวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริก โดยวิธีสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ (FDS) ของหม้อแปลงไฟฟ้าตัวที่ 1



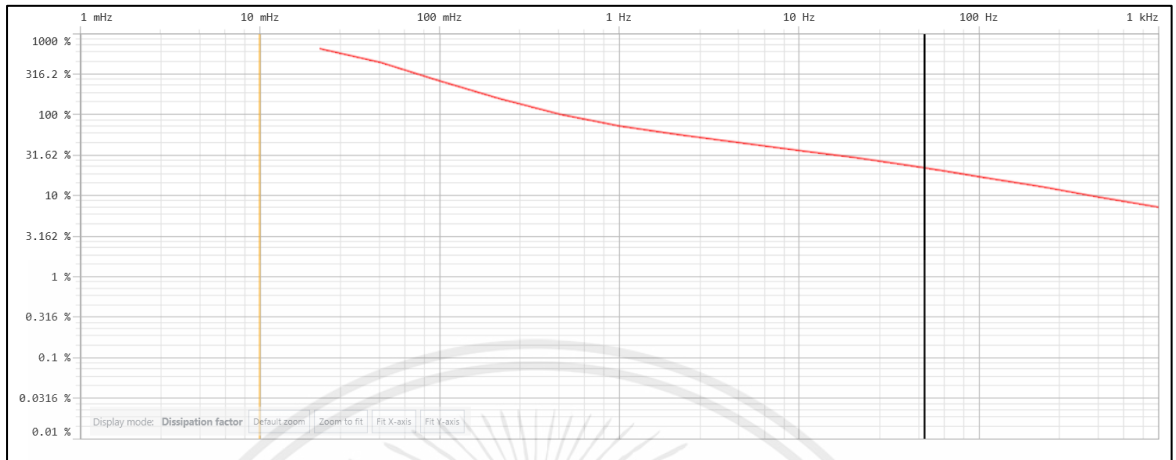
รูปที่ 4.1 ตัวประกอบการสูญเสียของกรณีศึกษาที่ 1

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์การทดลองกรณีศึกษาที่ 1 จากโปรแกรม DIRANA

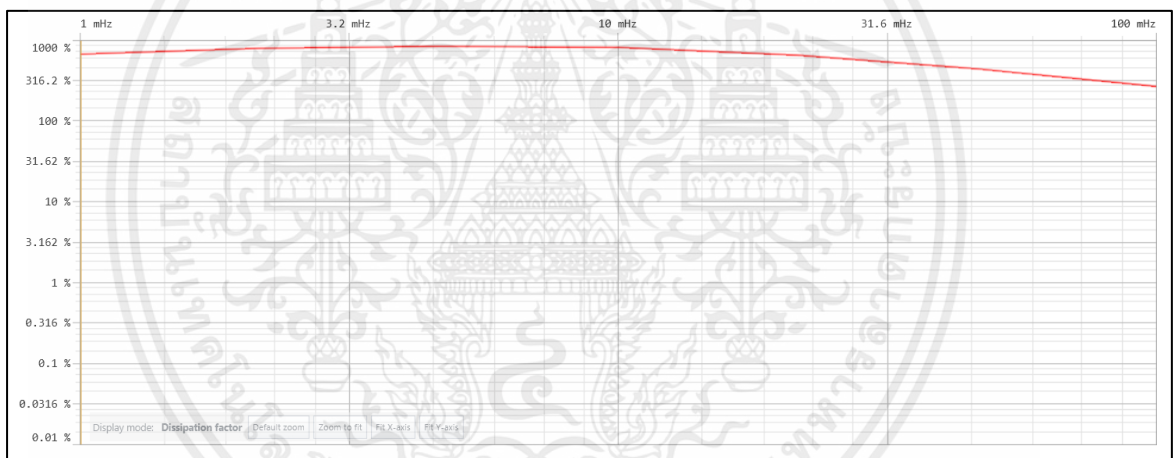
พารามิเตอร์ (หน่วย)	ค่าที่วัดได้
ความชื้น (%)	2.1
ความนำไฟฟ้าของน้ำมัน (fS/m)	29.9
ตัวประกอบการสูญเสีย (%)	0.34
ความจุไฟฟ้า (pF)	641.996
อิมพีแดนซ์ (MΩ)	4.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีศึกษาที่ 2 การทดสอบวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริก โดยวิธีสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ (FDS) ของหม้อแปลงไฟฟ้าตัวที่ 2



รูปที่ 4.2 ตัวประกอบสูญเสียของกรณีศึกษาที่ 2 ย่านความถี่ช่วงแรก



รูปที่ 4.3 ตัวประกอบสูญเสียของกรณีศึกษาที่ 2 ย่านความถี่ช่วงที่สอง

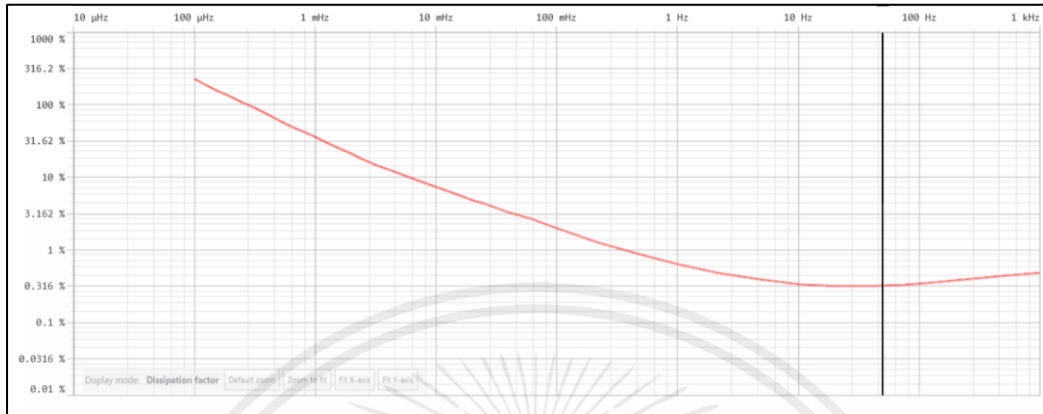
ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์การทดลองกรณีศึกษาที่ 2 จากโปรแกรม DIRANA

พารามิเตอร์ (หน่วย)	ค่าที่วัดได้
ความชื้น (%)	5.0
ความนำไฟฟ้าของน้ำมัน (pS/m)	358.5
ตัวประกอบการสูญเสีย (%)	23.07
ความจุไฟฟ้า (nF)	3.529
อิมพีแดนซ์ (kΩ)	877.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การทดสอบวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกโดยวิธี FDS & PDC

กรณีศึกษาที่ 3 การทดสอบวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริก โดยวิธี FDS & PDC ของหม้อแปลงไฟฟ้า  
ตัวที่ 1

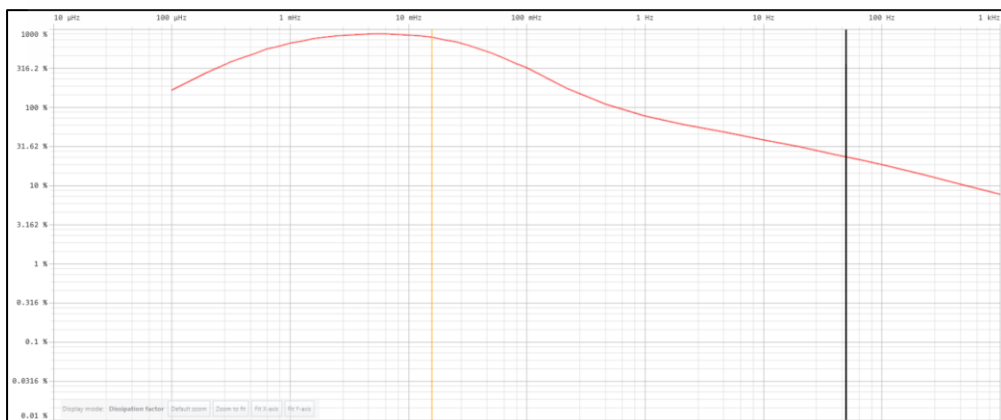


รูปที่ 4.4 ตัวประกอบสูญเสียของกรณีศึกษาที่ 3

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์การทดลองกรณีศึกษาที่ 3 จากโปรแกรม DIRANA

พารามิเตอร์ (หน่วย)	ค่าที่วัดได้
ความชื้น (%)	1.9
ความนำไฟฟ้าของน้ำมัน (fS/m)	21.2
ตัวประกอบการสูญเสีย (%)	0.32
ความจุไฟฟ้า (pF)	643.395
อิมพีแดนซ์ (MΩ)	4.95

กรณีศึกษาที่ 4 การทดสอบวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริก โดยวิธี FDS & PDC ของหม้อแปลงไฟฟ้า  
ตัวที่ 2



รูปที่ 4.5 ตัวประกอบสูญเสียของกรณีศึกษาที่ 4

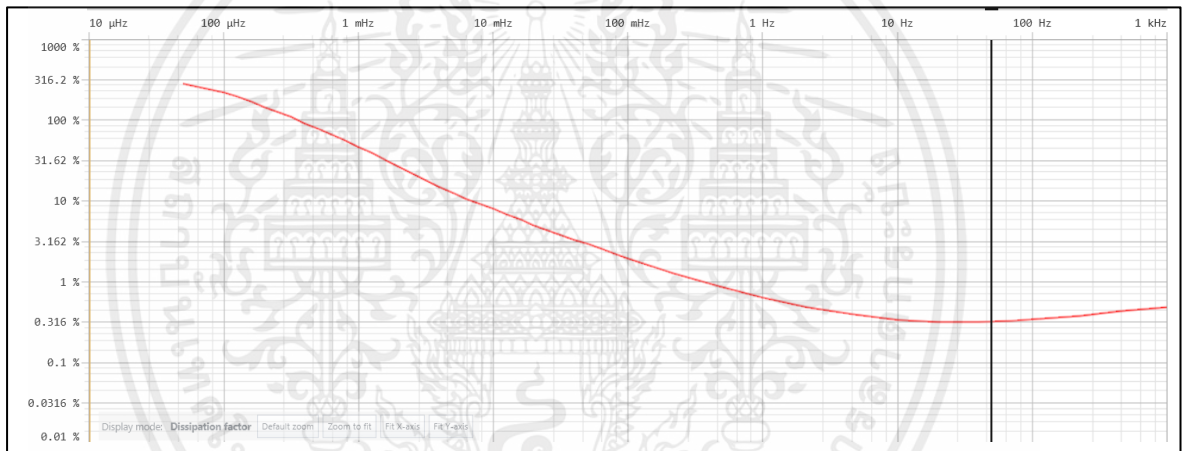
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์การทดลองกรณีที่ 4 จากโปรแกรม DIRANA

พารามิเตอร์ (หน่วย)	ค่าที่วัดได้
ความชื้น (%)	5.0
ความนำไฟฟ้าของน้ำมัน (pS/m)	385.5
ตัวประกอบการสูญเสีย (%)	23.12
ความจุไฟฟ้า (nF)	3.533
อิมพีแดนซ์ (k $\Omega$ )	877.75

#### 4.3 การทดสอบวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกโดยวิธี FDS & PDC+

กรณีศึกษาที่ 5 การทดสอบวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริก โดยวิธี FDS & PDC+ ของหม้อแปลงไฟฟ้า  
ตัวที่ 1



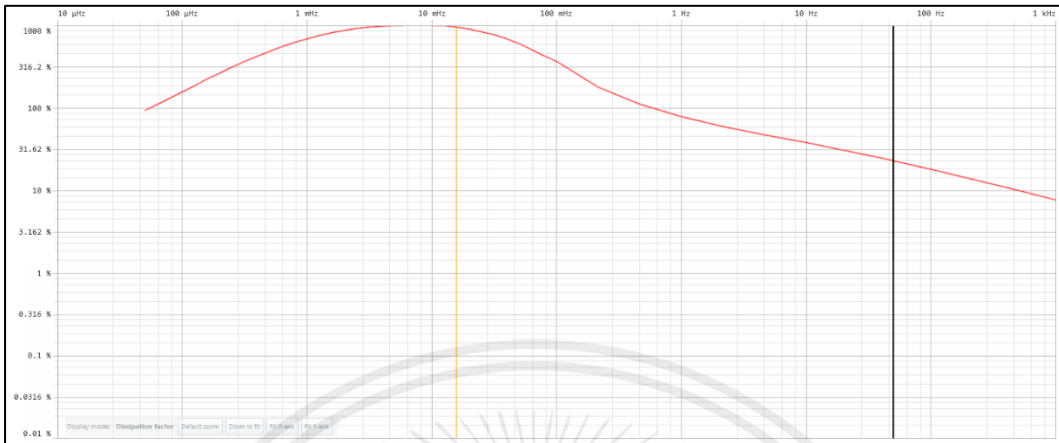
รูปที่ 4.6 ตัวประกอบสูญเสียของกรณีที่ 5

ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์การทดลองกรณีที่ 5 จากโปรแกรม DIRANA

พารามิเตอร์ (หน่วย)	ค่าที่วัดได้
ความชื้น (%)	1.9
ความนำไฟฟ้าของน้ำมัน (fS/m)	15.5
ตัวประกอบการสูญเสีย (%)	0.32
ความจุไฟฟ้า (pF)	643.431
อิมพีแดนซ์ (M $\Omega$ )	4.95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กรณีศึกษาที่ 6 การทดสอบวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริก โดยวิธี FDS & PDC+ ของหม้อแปลงไฟฟ้า ตัวที่ 2



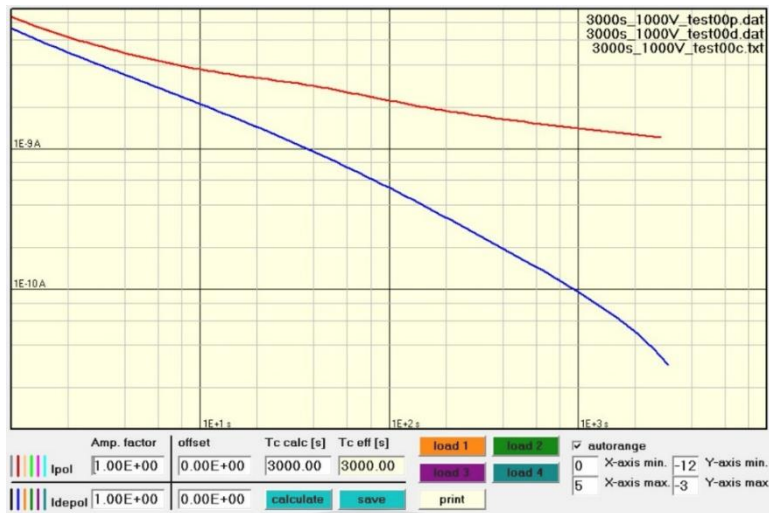
รูปที่ 4.7 ตัวประกอบสูญเสียของกรณีที่ 6

### ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์การทดลองกรณีที่ 6 จากโปรแกรม DIRANA

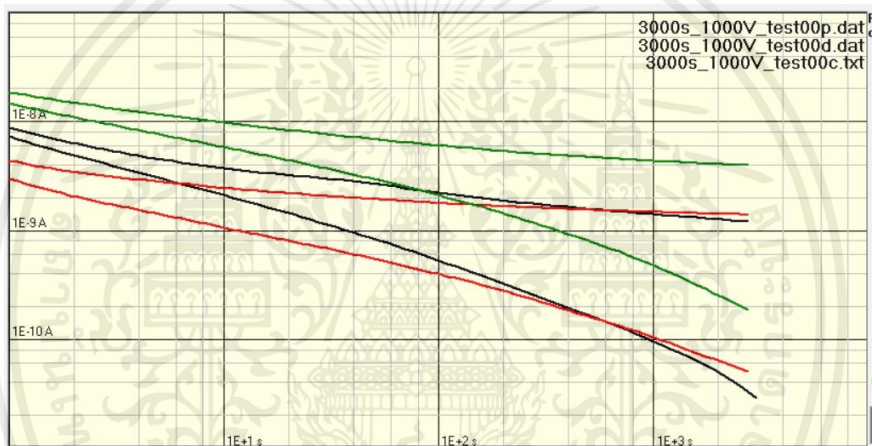
พารามิเตอร์ (หน่วย)	ค่าที่วัดได้
ความชื้น (%)	5.0
ความนำไฟฟ้าของน้ำมัน (pS/m)	340.4
ตัวประกอบการสูญเสีย (%)	23.0
ความจุไฟฟ้า (nF)	3.528
อิมพีแดนซ์ (kΩ)	879.21

### 4.4 การทดสอบวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกโดยวิธีวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (PDC) ด้วยเครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD

กรณีศึกษาที่ 7 การทดสอบวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริก โดยวิธีวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (PDC) ด้วยเครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD ที่แรงดัน 1000 V เวลาในการชาร์จ 3000 วินาที และเวลาในการดิสชาร์จ 3167 วินาที ของหม้อแปลงไฟฟ้าตัวที่ 1



รูปที่ 4.8 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของกรณีที่ 7



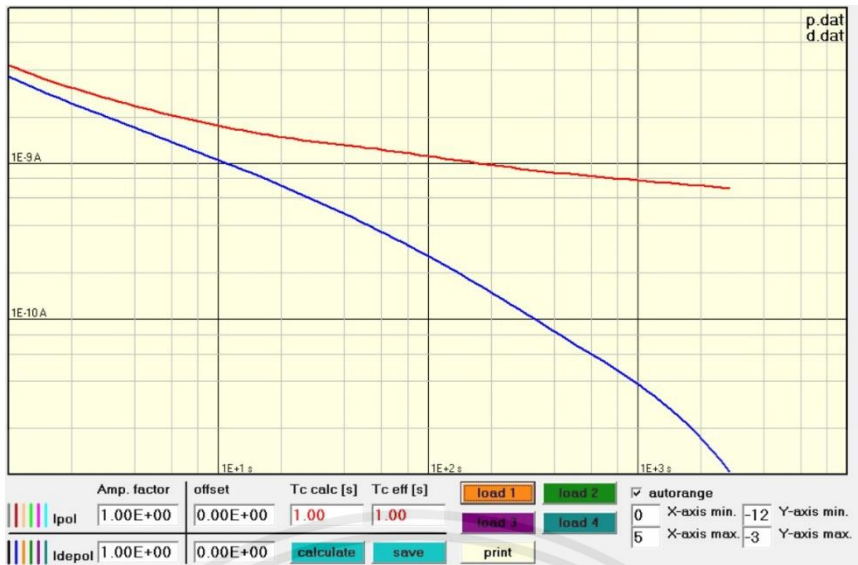
รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบกราฟเพื่อหาค่าความนำไฟฟ้าของน้ำมันและความชื้นของฉนวนแข็งของกรณีที่ 7

ตารางที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์การทดลองกรณีที่ 7 จากการเปรียบเทียบกราฟในโปรแกรม PDC Evaluation

พารามิเตอร์ (หน่วย)	ค่าที่วัดได้
ความชื้น (%)	1.5 - 2.0
ความนำไฟฟ้าของน้ำมัน (fS/m)	21.5

**กรณีศึกษาที่ 8** การทดสอบวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริก โดยวิธีวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (PDC) ด้วยเครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD ที่แรงดัน 500 V เวลาในการชาร์จ 3000 วินาที และเวลาในการดิสชาร์จ 3002 วินาที ของหม้อแปลงไฟฟ้าตัวที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



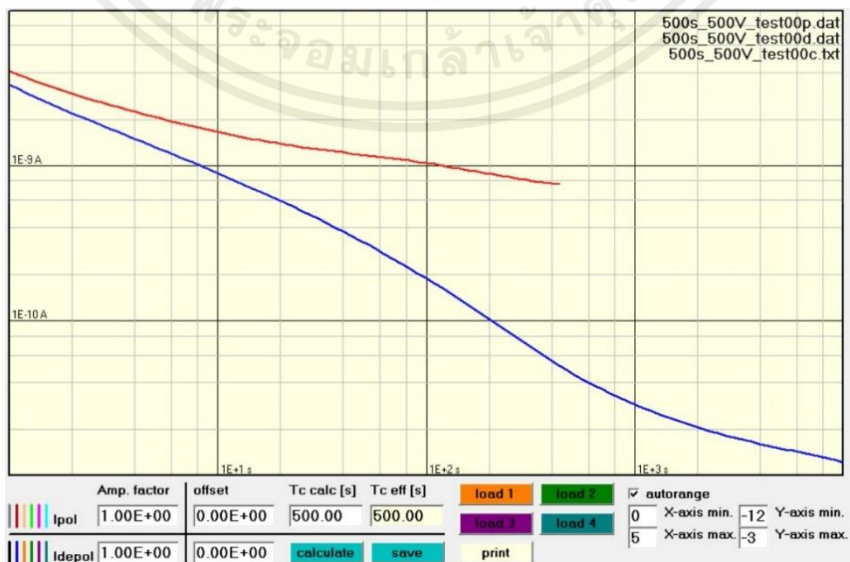
รูปที่ 4.10 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของกรณีที่ 8

ตารางที่ 4.8 ค่าพารามิเตอร์การทดลองกรณีที่ 8 จากการเปรียบเทียบกราฟในโปรแกรม PDC

Evaluation

พารามิเตอร์ (หน่วย)	ค่าที่วัดได้
ความชื้น (%)	1.5 - 2.0
ความนำไฟฟ้าของน้ำมัน (fS/m)	21.5

กรณีศึกษาที่ 9 การทดสอบวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริก โดยวิธีวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (PDC) ด้วยเครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD ที่แรงดัน 500 V เวลาในการชาร์จ 500 วินาที และเวลาในการดิสชาร์จ 10519 วินาที ของหม้อแปลงไฟฟ้าตัวที่ 1



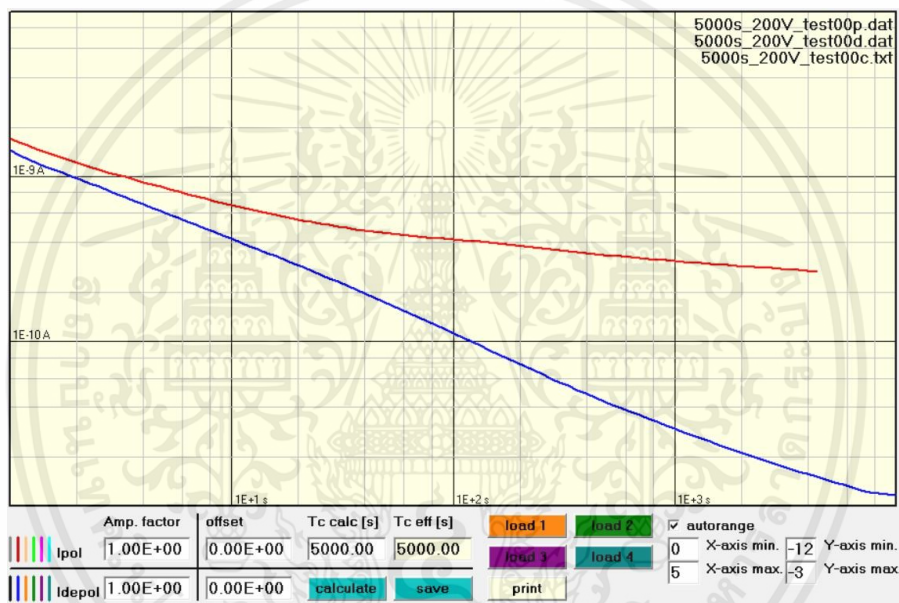
รูปที่ 4.11 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของกรณีที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ค่าพารามิเตอร์การทดลองกรณีที่ 9 จากการเปรียบเทียบกราฟในโปรแกรม PDC Evaluation

พารามิเตอร์ (หน่วย)	ค่าที่วัดได้
ความชื้น (%)	2.0 - 2.5
ความนำไฟฟ้าของน้ำมัน (fS/m)	21.5

กรณีศึกษาที่ 10 การทดสอบวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริก โดยวิธีวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (PDC) ด้วยเครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD ที่แรงดัน 200 V เวลาในการชาร์จ 5000 วินาที และเวลาในการดิสชาร์จ 11131 วินาที ของหม้อแปลงไฟฟ้าตัวที่ 1



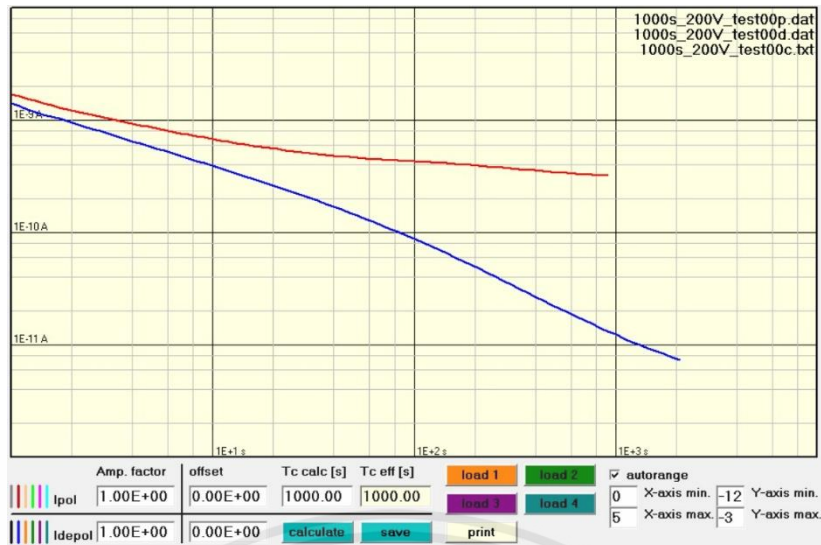
รูปที่ 4.12 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของกรณีที่ 10

ตารางที่ 4.10 ค่าพารามิเตอร์การทดลองกรณีที่ 10 จากการเปรียบเทียบกราฟในโปรแกรม PDC Evaluation

พารามิเตอร์ (หน่วย)	ค่าที่วัดได้
ความชื้น (%)	1.5 - 2.0
ความนำไฟฟ้าของน้ำมัน (fS/m)	21.5

กรณีศึกษาที่ 11 การทดสอบวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริก โดยวิธีวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (PDC) ด้วยเครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD ที่แรงดัน 200 V เวลาในการชาร์จ 1000 วินาที และเวลาในการดิสชาร์จ 2324 วินาที ของหม้อแปลงไฟฟ้าตัวที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

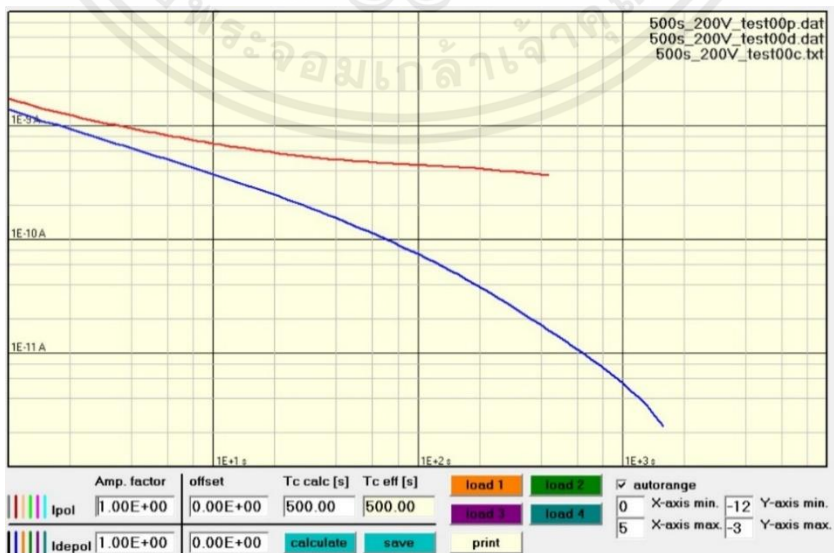


รูปที่ 4.13 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของกรณีที่ 11

ตารางที่ 4.11 ค่าพารามิเตอร์การทดลองกรณีที่ 11 จากการเปรียบเทียบกราฟในโปรแกรม PDC Evaluation

พารามิเตอร์ (หน่วย)	ค่าที่วัดได้
ความชื้น (%)	2.0 – 2.5
ความนำไฟฟ้าของน้ำมัน (fS/m)	21.5

กรณีศึกษาที่ 12 การทดสอบวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริก โดยวิธีวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (PDC) ด้วยเครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD ที่แรงดัน 200 V เวลาในการชาร์จ 500 วินาที และเวลาในการดิสชาร์จ 1707 วินาที ของหม้อแปลงไฟฟ้าตัวที่ 1



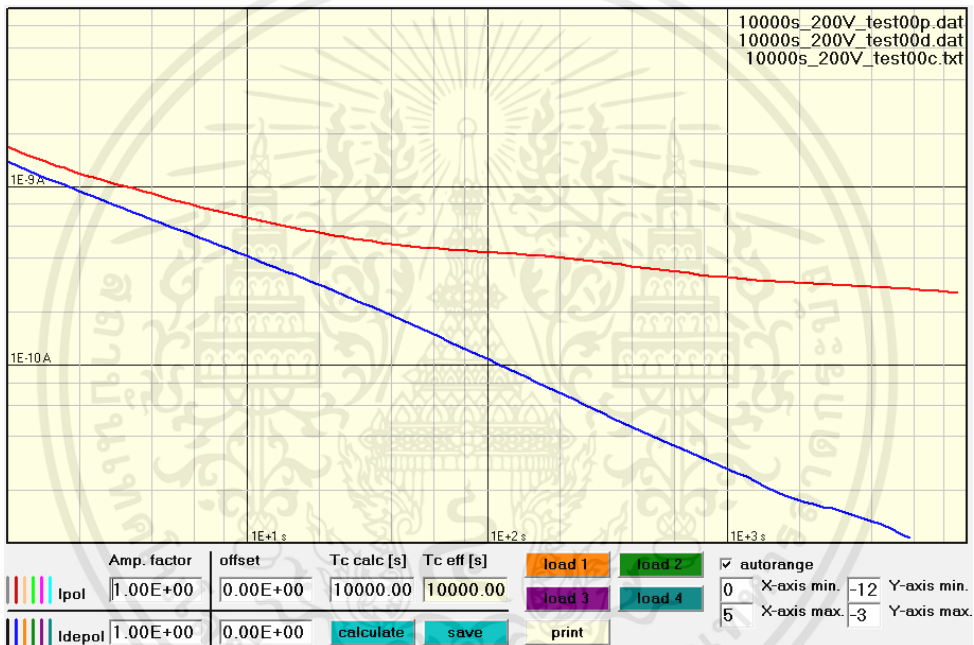
รูปที่ 4.14 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของกรณีที่ 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ค่าพารามิเตอร์การทดลองกรณีที่ 12 จากการเปรียบเทียบกราฟในโปรแกรม PDC Evaluation

พารามิเตอร์ (หน่วย)	ค่าที่วัดได้
ความชื้น (%)	2.5 - 3.0
ความนำไฟฟ้าของน้ำมัน (fS/m)	21.5

กรณีศึกษาเพิ่มเติม การทดสอบวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริก โดยวิธีวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (PDC) ด้วยเครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD ที่แรงดัน 200 V เวลาในการชาร์จ 10000 วินาที และเวลาในการดิสชาร์จ 6325 วินาที ของหม้อแปลงไฟฟ้าตัวที่ 1



รูปที่ 4.15 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของกรณีศึกษาเพิ่มเติม

ตารางที่ 4.13 ค่าพารามิเตอร์การทดลองกรณีศึกษาเพิ่มเติม จากการเปรียบเทียบกราฟในโปรแกรม PDC Evaluation

พารามิเตอร์ (หน่วย)	ค่าที่วัดได้
ความชื้น (%)	1.5 - 2.0
ความนำไฟฟ้าของน้ำมัน (fS/m)	21.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 การทดสอบความชื้นของฉนวนเหลวของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้เครื่อง Karl Fischer Titrators

จากการใช้เครื่อง Karl Fischer Titrators ในการวัดความชื้นของฉนวนเหลวของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 2 ตัว และนำค่าความชื้นของฉนวนเหลวมาคาดการณ์ปริมาณความชื้นในฉนวนแห้งได้จากเส้นโค้ง Fabre-Pichon ได้ ดังนี้

**ตารางที่ 4.14** ค่าความชื้นของฉนวนเหลวของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 2 ตัว (\*เส้นโค้ง Fabre-Pichon สามารถอ้างอิงค่าความชื้นได้สูงสุดที่ 10%)

หม้อแปลงไฟฟ้า	ค่าความชื้นฉนวนเหลว (ppm)	ค่าความชื้นฉนวนแห้ง (%)
หม้อแปลงไฟฟ้าตัวที่ 1	23.829	5.1
หม้อแปลงไฟฟ้าตัวที่ 2	100.186	10

#### 4.6 ผลการทดลองทุกกรณีศึกษา

**ตารางที่ 4.15** ค่าความชื้นในฉนวนแห้งที่วัดได้และเวลาที่ใช้ในการวัดด้วยวิธีการต่าง ๆ

กรณีศึกษา	วิธีการวัด	ความชื้นในฉนวนแห้ง (%)	เวลาที่ใช้
1	สเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ (FDS)	2.1	51 นาที
2	สเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ (FDS)	5	51 นาที
3	FDS & PDC	1.9	55 นาที
4	FDS & PDC	5	55 นาที
5	FDS & PDC+	1.9	9 นาที
6	FDS & PDC+	5	9 นาที
7	กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (PDC) ที่แรงดัน 1000 V เวลาชาร์จ 3000 วินาที	1.5-2.0	102 นาที 56 วินาที
8	กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (PDC) ที่แรงดัน 500 V เวลาชาร์จ 3000 วินาที	1.5-2.0	100 นาที 2 วินาที
9	กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (PDC) ที่แรงดัน 500 V เวลาชาร์จ 500 วินาที	2.0-2.5	183 นาที 39 วินาที
10	กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (PDC) ที่แรงดัน 200 V เวลาชาร์จ 5000 วินาที	1.5-2.0	268 นาที 51 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 (ต่อ) ค่าความชื้นในฉนวนแข็งที่วัดได้และเวลาที่ใช้ในการวัดด้วยวิธีการต่าง ๆ

11	กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (PDC) ที่แรงดัน 200 V เวลาชาร์จ 1000 วินาที	2.0-2.5	55 นาที 24 วินาที
12	กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (PDC) ที่แรงดัน 200 V เวลาชาร์จ 500 วินาที	2.5-3.0	36 วินาที 47 วินาที

หมายเหตุ ค่าความชื้นของฉนวนเหลวของหม้อแปลงไฟฟ้าตัวที่ 1 และ ตัวที่ 2 ที่วัดได้จากเครื่อง Karl Fischer Titrators ได้ 23.829 ppm และ 100.186 ppm ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความชื้นในกระดาษ (เส้นโค้ง Fabre-Pichon) ที่ 5.1% และ 10% (\*เส้นโค้ง Fabre- Pichon สามารถอ้างอิงค่าความชื้นได้สูงสุดที่ 10%) ตามลำดับ



## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของหม้อแปลงไฟฟ้า 2 ตัว โดยใช้เครื่อง Dielectric Insulation Analyzer (DIRANA) เครื่อง PDC-ANALYZER-1MOD และเครื่อง Karl Fischer Titrators โดยแบ่งหัวข้อการทดสอบหม้อแปลงทั้ง 2 ตัว เป็น 5 วิธี รวมเป็นกรณีศึกษาได้ 14 กรณี สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 การทดสอบในหัวข้อที่ 1 ด้วยวิธีสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ (FDS) มี 2 กรณีศึกษา ดังนี้

- กรณีศึกษาที่ 1 ทดสอบในหม้อแปลงตัวที่ 1 จากผลการทดสอบทราบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากเครื่อง DIRANA ดังนี้ คือ มีค่าความชื้น 2.1 % ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำมัน 29.9 fS/m ตัวประกอบการสูญเสีย 0.34 % ความจุไฟฟ้า 641.996 pF และมีอิมพีแดนซ์ 4.96 M $\Omega$

- กรณีศึกษาที่ 2 ทดสอบในหม้อแปลงตัวที่ 2 จากผลการทดสอบทราบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากเครื่อง DIRANA ดังนี้ คือ มีความชื้น 5.0 % ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำมัน 358.5 pS/m ตัวประกอบการสูญเสีย 23.07 % ความจุไฟฟ้า 3.529 nF และมีอิมพีแดนซ์ 877.28 k $\Omega$

5.1.2 การทดสอบในหัวข้อที่ 2 ด้วยวิธี FDS and PDC with depolarization มี 2 กรณีศึกษา ดังนี้

- กรณีศึกษาที่ 3 ทดสอบในหม้อแปลงตัวที่ 1 จากผลการทดสอบทราบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากเครื่อง DIRANA ดังนี้ คือ มีค่าความชื้น 1.9 % ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำมัน 21.2 fS/m ตัวประกอบการสูญเสีย 0.32 % ความจุไฟฟ้า 643.395 pF และมีอิมพีแดนซ์ 4.95 M $\Omega$

- กรณีศึกษาที่ 4 ทดสอบในหม้อแปลงตัวที่ 2 จากผลการทดสอบทราบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากเครื่อง DIRANA ดังนี้ คือ มีค่าความชื้น 5.0 % ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำมัน 385.5 pS/m ตัวประกอบการสูญเสีย 23.12 % ความจุไฟฟ้า 3.533 nF และมีอิมพีแดนซ์ 877.75 k $\Omega$

5.1.3 การทดสอบในหัวข้อที่ 3 ด้วยวิธี FDS and PDC+ มี 2 กรณีศึกษา ดังนี้

- กรณีศึกษาที่ 5 ทดสอบในหม้อแปลงตัวที่ 1 จากผลการทดสอบทราบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากเครื่อง DIRANA ดังนี้ คือ มีค่าความชื้น 1.9 % ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำมัน 15.5 fS/m ตัวประกอบการสูญเสีย 0.32 % ความจุไฟฟ้า 643.431 pF และมีอิมพีแดนซ์ 4.95 M $\Omega$

- กรณีศึกษาที่ 6 ทดสอบในหม้อแปลงตัวที่ 2 จากผลการทดสอบทราบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากเครื่อง DIRANA ดังนี้ คือ มีค่าความชื้น 5.0 % ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำมัน 340.4 pS/m ตัวประกอบการสูญเสีย 23.0 % ความจุไฟฟ้า 3.528 nF และมีอิมพีแดนซ์ 879.21 k $\Omega$

5.1.4 การทดสอบในหัวข้อที่ 4 ด้วยวิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (PDC) ในหม้อแปลงตัวที่ 1 มี 7 กรณีศึกษา ดังนี้

- กรณีศึกษาที่ 7 ทำการทดสอบที่แรงดัน 1000 V เวลาในการชาร์จ 3000 วินาที และเวลาในการดิสชาร์จ 3167 วินาที ผลการทดสอบทราบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากเครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD ดังนี้ ค่าความชื้น 1.5 - 2.0 % ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำมัน 21.5 fS/m

- กรณีศึกษาที่ 8 ทำการทดสอบที่แรงดัน 500 V เวลาในการชาร์จ 3000 วินาที และเวลาในการดิสชาร์จ 3002 วินาที ผลการทดสอบทราบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากเครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD ดังนี้ ค่าความชื้น 1.5 - 2.0 % ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำมัน 21.5 fS/m

- กรณีศึกษาที่ 9 ทำการทดสอบที่แรงดัน 500 V เวลาในการชาร์จ 500 วินาที และเวลาในการดิสชาร์จ 10519 วินาที ผลการทดสอบทราบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากเครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD ดังนี้ ค่าความชื้น 2.0 - 2.5 % ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำมัน 21.5 fS/m

- กรณีศึกษาที่ 10 ทำการทดสอบที่แรงดัน 200 V เวลาในการชาร์จ 5000 วินาที และเวลาในการดิสชาร์จ 11131 วินาที ผลการทดสอบทราบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากเครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD ดังนี้ ค่าความชื้น 1.5 - 2.0 % ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำมัน 21.5 fS/m

- กรณีศึกษาที่ 11 ทำการทดสอบที่แรงดัน 200 V เวลาในการชาร์จ 1000 วินาที และเวลาในการดิสชาร์จ 2324 วินาที ผลการทดสอบทราบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากเครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD ดังนี้ ค่าความชื้น 2.0 - 2.5 % ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำมัน 21.5 fS/m

- กรณีศึกษาที่ 12 ทำการทดสอบที่แรงดัน 200 V เวลาในการชาร์จ 500 วินาที และเวลาในการดิสชาร์จ 1707 วินาที ผลการทดสอบทราบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากเครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD ดังนี้ ค่าความชื้น 2.5 - 3.0 % ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำมัน 21.5 fS/m

- กรณีศึกษาที่ 13 ทำการทดสอบที่แรงดัน 200 V เวลาในการชาร์จ 10000 วินาที และเวลาในการดิสชาร์จ 6325 วินาที ผลการทดสอบทราบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากเครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD ดังนี้ ค่าความชื้น 1.5 - 2.0 % ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำมัน 21.5 fS/m

5.1.5 การทดสอบในหัวข้อที่ 5 ด้วยการทดสอบความชื้นของฉนวนเหลวของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้เครื่อง Karl Fischer Titrators ของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 2 ตัว โดยใช้เครื่อง Karl Fischer Titrators ในการวัดความชื้นของฉนวนเหลวของหม้อแปลงไฟฟ้าและนำค่าความชื้นของฉนวนเหลวมาคาดการณ์ปริมาณความชื้นในฉนวนแข็งได้จากเส้นโค้ง Fabre-Pichon ได้ผลการทดสอบ มี 1 กรณีศึกษา ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หม้อแปลงไฟฟ้าตัวที่ 1 ได้ผลการทดสอบดังนี้ มีค่าความชื้นฉนวนเหลว 23.829 ppm มีค่าความชื้นฉนวนแข็ง 5.1 %

- หม้อแปลงไฟฟ้าตัวที่ 2 ได้ผลการทดสอบดังนี้ มีค่าความชื้นฉนวนเหลว 100.186 ppm มีค่าความชื้นฉนวนแข็ง 10 % (ซึ่งเส้นโค้ง Fabre-Pichon สามารถอ้างอิงค่าความชื้นในฉนวนแข็งได้สูงสุดที่ 10 % เท่านั้น)

## 5.2 อภิปรายผลการทดสอบ

จากการศึกษาระบบฉนวนแบบผสมภายในหม้อแปลงไฟฟ้า และการตรวจสอบความชื้นภายในฉนวนแข็งที่เป็นเซลลูโลส ทั้งด้วยวิธีการวัดจากการเก็บตัวอย่างน้ำมัน และวิธีการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริก ได้แก่ วิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (PDC) วิธีการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ (FDS) วิธี FDS & PDC ที่นำข้อดีของทั้งสองวิธีมารวมกัน และวิธี FDS & PDC+ ที่เป็นวิธีการวัดผลตอบสนองเชิงไดอิเล็กทริกที่ทันสมัยที่สุด ล้วนมีความแตกต่างกัน ทั้งในด้านทฤษฎี ปฏิบัติ และผลลัพธ์ที่ได้ เริ่มต้นที่วิธีดั้งเดิมหรือการทดสอบจากตัวอย่างน้ำมันโดยใช้เครื่อง Karl Fischer Titrators ในการทดลองนี้ ต้องทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันจากหม้อแปลงทดสอบ และนำไปทดสอบกับเครื่องมือวัด ก่อนจะนำค่าความชื้นน้ำมันมาหาความสัมพันธ์กับปริมาณความชื้นในฉนวนแข็งโดยความสัมพันธ์เส้นโค้ง Fabre-Pichon ซึ่งกระบวนการต่าง ๆ ถึงแม้จะปฏิบัติตามหลักการทำการทดลองอย่างรัดกุมแล้ว ก็ยังสามารถเกิดความผิดพลาดจากมนุษย์ได้ ทำให้ค่าความชื้นที่ได้นั้น มีค่าที่แตกต่างกับการวัดความชื้นในฉนวนแข็งเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่วิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (PDC) เริ่มมีการใช้อุปกรณ์มาวัดกับหม้อแปลงทดสอบโดยตรง และขั้นตอนการวัดถูกส่งการผ่านโปรแกรม ทำให้ลดความผิดพลาดจากมนุษย์ลงได้ และสามารถกำหนดเวลาที่ใช้ในการทดสอบได้เอง แต่การเปรียบเทียบกราฟเพื่อหาค่าความชื้นของฉนวนแข็งนั้นยังมีความซับซ้อนอยู่บ้าง และไม่สามารถระบุค่าความชื้นได้อย่างชัดเจน ได้ผลลัพธ์เป็นแค่ช่วงความชื้นที่สามารถคาดการณ์ค่าความชื้นที่ได้เท่านั้น จากกรณีศึกษาที่ 7-12 ทำให้ทราบ เทรนด์ของการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (PDC) ว่าระยะเวลาที่ใช้ในการชาร์จที่นานขึ้น ส่งผลให้ค่าความชื้นของฉนวนแข็งที่วัดได้มีความแม่นยำมากขึ้น และจากกรณีศึกษาเพิ่มเติม ทำให้ทราบว่า มีขีดจำกัดของเวลาที่ใช้ในการชาร์จที่จะทำให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำอยู่ ทำให้ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องชาร์จเกินเวลานี้ ส่วนวิธีการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ (FDS) ด้วยเครื่อง DIRANA เป็นวิธีที่สามารถบอกค่าความชื้นของฉนวนแข็งได้อย่างชัดเจนและง่ายดายเพียงแค่กดปุ่มปรับเทียบอัตโนมัติ แต่มีข้อเสียคือหากต้องการค่าความชื้นที่แม่นยำ จำเป็นที่ต้องใช้เวลาในการวัดที่นาน จึงมีการรวมวิธีการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ (FDS) และ วิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (PDC) เข้าด้วยกัน เป็นวิธี FDS & PDC และวิธี FDS & PDC+ เพื่อให้ได้ค่าความชื้นที่ชัดเจนแม่นยำ และใช้เวลาไม่นาน ซึ่งค่าความชื้นที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวิธีการต่าง ๆ ที่ใช้เครื่อง DIRANA ในการวัดนั้น มีความสอดคล้องกับค่าความชื้นที่ได้จากวิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและ ดีโพลาริเซชัน (PDC) ที่ใช้เครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD ในการวัด ทำให้สามารถสรุปได้ว่า วิธี FDS & PDC+ เป็นวิธีที่ให้ความแม่นยำสูงที่สุด และใช้เวลาน้อยที่สุด ในขณะที่วิธีการทดสอบจากตัวอย่างน้ำมัน มีความคาดเคลื่อนสูงที่สุด

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. เพิ่มหัวข้อการทดสอบที่วัดความชื้นกระดาษโดยตรง เพื่อนำมาเป็นมาตรฐานอ้างอิงหรือเปรียบเทียบผลการทดสอบ
2. เพิ่มตัวควบคุมในการทดสอบโดยทำการทดสอบในสภาวะอากาศโดยรวมและอุณหภูมิขณะทำการทดสอบที่ต่างกัน เพื่อนำผลที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบว่าสภาวะอากาศและอุณหภูมิที่ต่างกัน มีผลต่อฉนวนของหม้อแปลงอย่างไร
3. เพิ่มวิธีการจากเครื่องมือใหม่ ๆ ในการทดสอบในหัวข้อเดียวกันเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ว่าเป็นไปในทางเดียวกันหรือไม่



## เอกสารอ้างอิง

- [1] Martin J. Heathcote, **J & P Transformer Book**, 13<sup>th</sup> Ed., Burlington, Elsevier, 2007.
- [2] Andreas Küchler, **High Voltage Engineering Fundamentals - Technology - Applications**, Berlin, Springer Vieweg, 2018.
- [3] Abderrahmane Beroual, Christophe Perrier, and Jean-Luc Bessedé, **Dielectric Materials for Electric Engineering**, Toulouse, ISTE publishing knowledge, 2010.
- [4] Tapan Kumar Saha and Prithwiraj Purkait, **Transformer Ageing: Monitoring and Estimation Techniques**, 1<sup>st</sup> Ed., Singapore, John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2017.
- [5] ญาณพล กิตติคุณธราดล, “การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วย เอสเตอร์ธรรมชาติภายใต้การเสื่อมจากความร้อน,” **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2565.
- [6] Working Group D1.01 (TF 14), “Dielectric Response Diagnoses For Transformer Windings”, **cigré 414**, 2010.
- [7] Ali Naderian, Peter Werelius, and Poorvi Patel, “IEEE Guide for Dielectric Frequency Response Test”, **IEEE standard association**, 2018.
- [8] S. R. Arsad et al., “Water Content in Transformer Insulation System: A Review on the Detection and Quantification Methods”, **Energies**, vol. 16, no. 4. MDPI AG, p. 1920, Feb. 15, 2023.
- [9] T. V. Oommen, "Moisture equilibrium in paper-oil insulation systems," **1983 EIC 6th Electrical/Electrical Insulation Conference**, Chicago, IL, USA, 1983
- [10] M. Anglhuber, F. Kaufmann, and S. Knuetter, “MINIMIZING DIELECTRIC TESTING TIME”, **OMICRON**, 2017



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การศึกษาและเปรียบเทียบวิธีการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของหม้อแปลงไฟฟ้า

## The Study and Comparison of Methods for Measuring the Dielectric Response of Transformers

ศิริวุฒิ พงษ์พิทักษ์<sup>1</sup> สุภิสรา ไววิชา<sup>1</sup> และ สุกฤษฎ์ ตรงจิตรจริง<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอยคลองกรุง 1 ลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-Mail: prasopchok\_ho@hotmail.com

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาและเปรียบเทียบวิธีการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 50 kVA 50 Hz และ 1500 kVA 50 Hz ที่มีการดูแลรักษาแตกต่างกัน ด้วยเทคนิคการวัดกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน (Polarization and depolarization current, PDC) การวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ (Frequency domain spectroscopy, FDS) การวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ร่วมกับการวัดกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน (FDS & PDC) และการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ร่วมกับการวัดกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน พลัส (FDS & PDC+) จากการทดสอบพบว่า ระดับแรงดันและเวลาในการชาร์จส่งผลต่อการวัดกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน ระดับแรงดันที่สูงขึ้นและระยะเวลาในการชาร์จที่นานขึ้น ส่งผลให้ผลลัพธ์ของการทดสอบมีค่าแม่นยำมากขึ้น โดยผลการทดสอบแต่ละวิธีมีค่าใกล้เคียงและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ร่วมกับการวัดกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน พลัส (FDS & PDC+) ให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำและใช้เวลาในการทดสอบน้อยที่สุดในย่านความถี่ที่เท่ากัน ทำให้สามารถนำผลการทดสอบไปใช้ในการวิเคราะห์และประเมินสภาพฉนวนแข็งในหม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: หม้อแปลงไฟฟ้า, FDS, PDC, FDS & PDC, FDS & PDC+

### Abstract

This paper presents the study and comparison of methods for measuring the dielectric response of transformers rated at 50 kVA 50 Hz and 1500 kVA 50 Hz with different maintenance. By polarization and depolarization current measurements (PDC), frequency domain spectroscopy measurements (FDS), frequency domain spectroscopy combined with polarization and depolarization current (FDS & PDC) and frequency domain spectroscopy and polarization and depolarization current plus (FDS & PDC+). It has been found that voltage levels and

charging times affect PDC testing. Higher voltage levels and longer charging times result in more accurate test results. The test results of each method were similar and tended to be in the same direction. And FDS & PDC+ measurements provide accurate results with the least amount of testing time required. This makes it possible to use the test results for analysis and evaluation of solid insulation conditions in electrical transformers efficiently.

**Keywords:** Transformers, FDS, PDC, FDS & PDC, FDS & PDC+

### 1. บทนำ

หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญต่อระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งทำหน้าที่ปรับระดับแรงดันไฟฟ้า การทำงานของระบบไฟฟ้าจะเชื่อถือได้นั้น ขึ้นอยู่กับความสมบูรณ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า ความผิดพลาดใด ๆ บนหม้อแปลงไฟฟ้าจะลดความน่าเชื่อถือในการทำงานของระบบไฟฟ้าและส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อทั้งผู้ปฏิบัติงานและผู้ใช้ [1] ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการดูแลเป็นพิเศษเพื่อให้แน่ใจว่าหม้อแปลงไฟฟ้าได้รับการป้องกันอย่างดีจากความผิดพลาดทุกประเภท สภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าขึ้นอยู่กับระบบฉนวน ซึ่งมีหน้าที่ในการทำให้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้นเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าทำงาน ดังนั้น การใช้วัสดุฉนวนภายในหม้อแปลงอย่างเหมาะสม จะทำให้หม้อแปลงมีประสิทธิภาพการทำงานที่สอดคล้อง วัสดุฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยเซลลูโลส (กระดาษ/เพอร์สบอร์ด) และน้ำมันเป็นหลัก [2] ปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพของฉนวน เช่น ความร้อน ความชื้น และความเครียดทางกล เป็นต้น ปัจจัยหลักที่มีผลอย่างมาก คือ ความชื้น ดังนั้น การประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยการวัดปริมาณความชื้นในฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าอย่างแม่นยำ จึงมีบทบาทสำคัญในการรักษาอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า [3]

บทความนี้จึงมีการศึกษาและเปรียบเทียบวิธีการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อหาปริมาณความชื้นในฉนวนแข็ง ด้วยวิธีการต่าง ๆ ได้แก่ เทคนิคการวัดกระแสโพลาไรเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และดีโพลารเซชัน (PDC) การวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ (FDS) การวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ร่วมกับการวัดกระแสโพลารเซชันและดีโพลารเซชัน (FDS & PDC) และการวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ร่วมกับการวัดกระแสโพลารเซชันและดีโพลารเซชันพลัส (FDS & PDC+) เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์การเสื่อมสภาพฉนวนแข็งภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

## 2. ทฤษฎี

### 2.1 การวัดกระแสโพลารเซชันและกระแสดีโพลารเซชัน (PDC)

กระบวนการที่ใช้ในการวัดกระแสโพลารเซชันและกระแสดีโพลารเซชัน กระแสโพลารเซชันคือ กระบวนการที่ไม่เสถียรในฉนวนเรียงตัวกันเพื่อตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปในฉนวนอันเกิดจากการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับฉนวน โดยสามารถสังเกตพฤติกรรมของกระบวนการดังกล่าวผ่านกระแสที่เกิดขึ้นจากกระบวนการโพลารเซชันได้ โดยกระแสดังกล่าวที่เกิดขึ้นนี้คือกระแสโพลารเซชัน และเมื่อทำการปลดแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงโมเดลในฉนวนดังกล่าวจะทำการเรียงตัวใหม่อีกครั้งตามสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปจากการหยุดจ่ายแรงดันกระแสตรง กระแสที่ไหลในกระบวนการนี้เรียกว่า กระแสดีโพลารเซชัน

### 2.2 การวัดสเปกตรัมไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ (FDS)

การวัดการตอบสนองของไดอิเล็กทริกทริกในโดเมนความถี่เป็นเทคนิคที่ได้รับการยอมรับอย่างดีในการศึกษาพฤติกรรมโพลารเซชันของระบบฉนวน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อวัสดุฉนวนมีความซับซ้อน ในเทคนิคนี้ กลไกโพลารเซชันในระบบฉนวนจะได้รับการศึกษาโดยการวัดขนาดและเฟสของกระแสเนื่องจากการกระตุ้นด้วยแรงดันกระแสสลับโดยทั่วไป ในการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า การวัด FDS จะดำเนินการระหว่าง 0.1 mHz ถึง 1 kHz เทคนิคนี้ช่วยให้สามารถวัดค่าความจุที่ขึ้นกับความถี่ การนำไฟฟ้า และการสูญเสียแทนเจนต์ของระบบฉนวน ซึ่งสามารถใช้ประเมินค่าความชื้นเฉลี่ยและค่าการนำไฟฟ้าของฉนวนผ่านเทคนิคการสร้างแบบจำลองต่าง ๆ ข้อได้เปรียบที่สำคัญของเทคนิคนี้คือการวัดมักจะดำเนินการที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำ เนื่องจากการลดสัญญาณรบกวนทำได้ค่อนข้างง่ายกว่าในการวัดแถบความถี่แคบ [4]

## 3. การทดสอบ

### 3.1 วัดทดสอบ

หม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 50 kVA 50 Hz และ 1500 kVA 50 Hz เป็นวัตถุทดสอบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยวัตถุทดสอบที่ 1 และ 2 มีการเก็บรักษาที่แตกต่างกัน วัตถุทดสอบที่ 1 เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าสภาพดี และวัตถุทดสอบที่ 2 เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าสภาพไม่ดี (กระบอกชิลิก้าเจดแตก)

### 3.2 การจำลองกรณีศึกษาในวัตถุทดสอบ

ในการศึกษานี้ จะประกอบไปด้วย 12 กรณีศึกษา ดังแสดงดังตารางที่ 3.1

### 3.3 วงจรทดสอบ

วงจรวัด FDS, FDS & PDC, FDS & PDC+ ของเครื่องมือวัด DIRANA ดังแสดงในรูปที่ 1 และวงจรวัด PDC ของเครื่องมือวัด PDC-ANALYSER-1MOD สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2

### 3.4 ขั้นตอนการวัดด้วยเครื่องมือวัด DIRANA

ใช้เครื่องมือวัด DIRANA ในการวัด FDS, FDS & PDC, FDS & PDC+ กับวัตถุทดสอบที่ 1 และ 2 ซึ่งวัตถุทดสอบที่ 1 ทดสอบในห้องปฏิบัติการระบบปิด ที่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของสภาพแวดล้อม ส่วนวัตถุทดสอบที่ 2 ทดสอบภายนอกอาคาร ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของสภาพแวดล้อม โดยมีขั้นตอนการทดสอบ ดังนี้

1. ทำความสะอาดขั้วแรงดันสูงและแรงดันต่ำ ขั้วแรงดันสูงและแรงดันต่ำ
2. ทำการลัดวงจรขั้วแรงดันสูง และขั้วแรงดันต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้า
3. ต่อวงจรวัด ดังแสดงในรูปที่ 1

### 3.5 ขั้นตอนการวัดด้วยเครื่องมือวัด PDC-ANALYSER-1MOD

ใช้เครื่องมือวัด PDC-ANALYSER-1MOD ในการวัด PDC ซึ่งทดสอบในห้องปฏิบัติการทดสอบระบบปิด ที่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของสภาพแวดล้อม แต่ละกรณีศึกษาระยะเวลาและแรงดันที่ใช้ในการชาร์จจะแตกต่างกัน โดยการทดสอบประกอบ 3 ขั้นตอนดังนี้ [5]

1. การวัดเบื้องต้น (Initial measurement)
2. การวัดควบคุม (Control measurement)
3. การวัดทดสอบ (Main measurement)

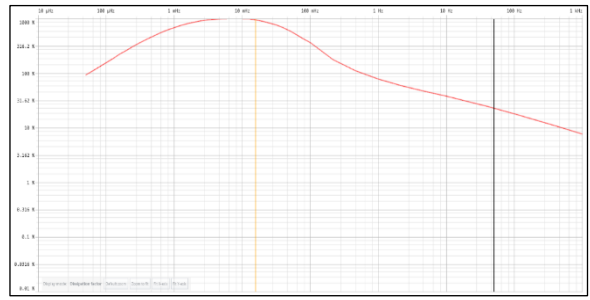
โดยผลกระแสโพลารเซชันและกระแสดีโพลารเซชันที่ได้นั้นจะนำไปวิเคราะห์หาปริมาณความชื้นในฉนวนแข็งต่อไป

ตารางที่ 3.1 การจำลองกรณีศึกษา (กรณีที่ 7-12 ถูกทดสอบในวัตถุทดสอบที่ 1 เท่านั้น)

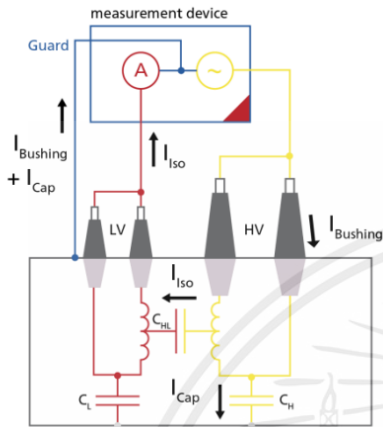
กรณีศึกษา	คำอธิบาย
1	วัด FDS วัตถุทดสอบที่ 1 แรงดัน 200 V
2	วัด FDS วัตถุทดสอบที่ 2 แรงดัน 100 V
3	วัด FDS & PDC วัตถุทดสอบที่ 1 แรงดัน 200 V
4	วัด FDS & PDC วัตถุทดสอบที่ 2 แรงดัน 100 V
5	วัด FDS & PDC+ วัตถุทดสอบที่ 1 แรงดัน 200 V
6	วัด FDS & PDC+ วัตถุทดสอบที่ 2 แรงดัน 100 V
7	วัด PDC แรงดัน 1000 V เวลาชาร์จ 3000 วินาที
8	วัด PDC แรงดัน 500 V เวลาชาร์จ 3000 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีศึกษา	คำอธิบาย
9	วัด PDC แรงดัน 500 V เวลาชาร์จ 500 วินาที
10	วัด PDC แรงดัน 200 V เวลาชาร์จ 5000 วินาที
11	วัด PDC แรงดัน 200 V เวลาชาร์จ 1000 วินาที
12	วัด PDC แรงดัน 200 V เวลาชาร์จ 500 วินาที



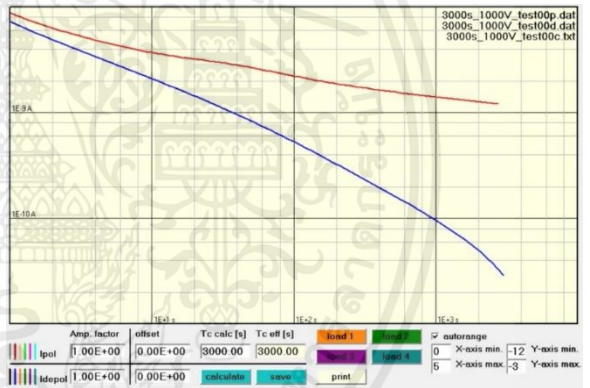
รูปที่ 2 ผลการทดสอบด้วยเครื่องมือวัด DIRANA



รูปที่ 1 ไดอะแกรมการทดสอบ FDS, FDS & PDC, FDS & PDC+ (Dirana circuit diagram)

กรณีศึกษาที่ 7 - 12 เปรียบเทียบปริมาณความชื้นในฉนวนแข็งจากการวัดด้วยวิธี PDC ที่มีแรงดันและระยะเวลาในการชาร์จแตกต่างกันของวัตถุทดสอบที่ 1

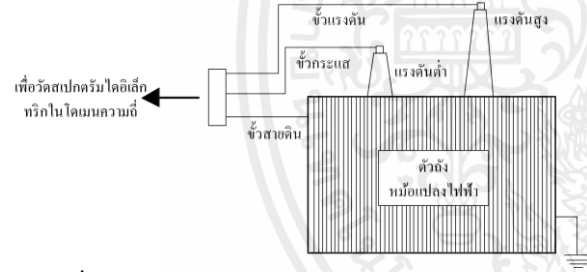
จากผลการทดสอบพบว่าขนาดแรงดันและระยะเวลาในการชาร์จ มีผลต่อค่าปริมาณความชื้นที่วัดได้ โดยระยะเวลาที่ใช้ในการชาร์จที่นานขึ้นและขนาดแรงดันที่มากขึ้น ส่งผลให้ค่าความชื้นของฉนวนแข็งที่วัดได้มีความแม่นยำมากขึ้น



รูปที่ 3 กระแสไหลไรเซนชันและกระแสไหลไรเซนชันที่ได้จากเครื่องมือวัด PDC-ANALYSER-1MOD



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบกราฟเพื่อหาค่าความนำไฟฟ้าของน้ำมันและความชื้นของฉนวนแข็ง



รูปที่ 2 ไดอะแกรมวงจรการทดสอบ PDC ของหม้อแปลงไฟฟ้า

#### 4. ผลการทดสอบ

กรณีศึกษาที่ 1 - 6 เปรียบเทียบปริมาณชื้นในฉนวนแข็งจากการวัดโดยวิธี FDS, FDS & PDC, FDS & PDC+ ของวัตถุทดสอบที่ 1 และ 2

จากผลการทดสอบพบว่าปริมาณความชื้นของวัตถุทดสอบที่ 1 และวัตถุที่ 2 มีความแตกต่างกันอย่างมาก โดยปริมาณความชื้นที่สามารถวัดได้จากทั้ง 3 วิธี มีค่าใกล้เคียงกัน แต่มีความแตกต่างกันคือระยะเวลาที่ใช้ในการวัด โดยวิธี FDS & PDC+ ใช้เวลาน้อยที่สุด ปริมาณความชื้นในฉนวนแข็งของวัตถุทดสอบที่ 1 อยู่ที่ (1.9 - 2.1)% ส่วนปริมาณความชื้นในฉนวนแข็งของวัตถุทดสอบที่ 2 นั้นสูงเกินที่เครื่องมือวัด DIRANA จะวัดได้ ทำให้ค่าที่วัดได้จำกัดอยู่ที่ 5% ทั้ง 3 วิธี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 2** ค่าความชื้นในฉนวนแข็งที่วัดได้และเวลาที่ใช้ในการวัดด้วยวิธีการต่าง ๆ

กรณีศึกษา	วิธีการวัด	ความชื้นในฉนวนแข็ง (%)	เวลาที่ใช้
1	FDS	2.1	51 นาที
2	FDS	5	51 นาที
3	FDS & PDC	1.9	55 นาที
4	FDS & PDC	5	55 นาที
5	FDS & PDC+	1.9	9 นาที
6	FDS & PDC+	5	9 นาที
7	PDC ที่แรงดัน 1000 V เวลาชาร์จ 3000 วินาที	1.5-2.0	102 นาที 56 วินาที
8	PDC ที่แรงดัน 500 V เวลาชาร์จ 3000 วินาที	1.5-2.0	100 นาที 2 วินาที
9	PDC ที่แรงดัน 500 V เวลาชาร์จ 500 วินาที	2.0-2.5	183 นาที 39 วินาที
10	PDC ที่แรงดัน 200 V เวลาชาร์จ 5000 วินาที	1.5-2.0	268 นาที 51 วินาที
11	PDC ที่แรงดัน 200 V เวลาชาร์จ 1000 วินาที	2.0-2.5	55 นาที 24 วินาที
12	PDC ที่แรงดัน 200 V เวลาชาร์จ 500 วินาที	2.5-3.0	36 วินาที 47 วินาที

**หมายเหตุ** ค่าความชื้นของฉนวนเหลวของหม้อแปลงไฟฟ้าตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ที่วัดได้จากเครื่อง Karl Fischer Titrators ได้ 23.829 ppm และ 100.186 ppm ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความชื้นในกระดาษ (เส้นโค้ง Fabre-Pichon) ที่ 5.1% และ 10% (\*เส้นโค้ง Fabre-Pichon สามารถอ้างอิงค่าความชื้นได้สูงสุดที่ 10%) ตามลำดับ

## 5. สรุปผล

จากการศึกษาระบบฉนวนแบบผสมภายในหม้อแปลงไฟฟ้า และการตรวจสอบความชื้นภายในฉนวนแข็งที่เป็นเซลลูโลส ทั้งด้วยวิธีการวัดจากการเก็บตัวอย่างน้ำมัน และวิธีการวัดผลตอบสองไดอิเล็กทริก ได้แก่ PDC, FDS, FDS & PDC และ FDS & PDC+ ส่วนมีความแตกต่างกัน ทั้งในด้านทฤษฎี ปฏิบัติ และผลลัพธ์ที่ได้ เริ่มต้นที่วิธีดั้งเดิมหรือการทดสอบจากตัวอย่างน้ำมันโดยใช้ Karl Fischer Titrators กระบวนการต่าง ๆ ในการทำการทดสอบถึงแม้จะปฏิบัติตามหลักการทำการทดลองอย่างรัดกุมแล้ว ก็ยังสามารถเกิดความผิดพลาดจากมนุษย์ได้ ทำให้ค่าความชื้นที่ได้นั้นมีค่าที่แตกต่างกับการวัดความชื้นในฉนวนแข็งเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่วิธี PDC เริ่มมีการ

ใช้อุปกรณ์มาวัดกับหม้อแปลงทดสอบโดยตรง และขั้นตอนการวัดถูกสั่งการผ่านโปรแกรม ทำให้ลดความผิดพลาดจากมนุษย์ลงได้ และสามารถกำหนดเวลาที่ใช้ในการทดสอบได้เอง แต่การเปรียบเทียบกราฟเพื่อหาค่าความชื้นของฉนวนแข็งนั้นยังมีความซับซ้อนอยู่บ้าง และไม่สามารถระบุค่าความชื้นได้อย่างชัดเจน ทำให้สามารถคาดการณ์ค่าความชื้นที่ได้เท่านั้น และจากกรณีศึกษาที่ 7-12 ทำให้ทราบ เทรนด์ของการวัด PDC ว่าระยะเวลาที่ใช้ในการชาร์จที่นานขึ้น ส่งผลให้ค่าความชื้นของฉนวนแข็งที่วัดได้มีความแม่นยำมากขึ้น ส่วนการวัด ด้วยเครื่องมือวัด DIRANA (วิธี FDS, FDS & PDC, FDS & PDC+) สามารถบอกค่าความชื้นของฉนวนแข็งได้อย่างชัดเจนและง่ายคายเพียงแค่กดปุ่มเปรียบเทียบอัตโนมัติ ซึ่งค่าความชื้นที่ได้จากวิธีการต่าง ๆ ที่ใช้เครื่อง DIRANA ในการวัดนั้น มีความสอดคล้องกับวิธีการวัด PDC ที่ใช้เครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD ในการวัด จากการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการทดสอบแล้วสรุปได้ว่า วิธี FDS & PDC+ เป็นวิธีที่ให้ความแม่นยำสูงที่สุด และใช้เวลาน้อยที่สุด ในขณะที่วิธีการทดสอบจากตัวอย่างน้ำมัน มีความคลาดเคลื่อนสูงที่สุด

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Martin J. Heathcote, **J & P Transformer Book**, 13th Ed., Burlington, Elsevier, 2007.
- [2] Abderrahmane Beroual, Christophe Perrier, and Jean-Luc Bessedé, “Dielectric Materials for Electric Engineering, Toulouse”, **ISTE publishing knowledge**, 2010.
- [3] S. R. Arsal et al., “Water Content in Transformer Insulation System: A Review on the Detection and Quantification Methods”, **Energies**, vol. 16, no. 4. MDPI AG, p. 1920, Feb. 15, 2023.
- [4] Tapan Kumar Saha and Prithwiraj Purkait, **Transformer Ageing: Monitoring and Estimation Techniques**, 1st Ed., Singapore, John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2017.
- [5] Working Group D1.01 (TF14), “Dielectric Response Diagnoses For Transformer Windings” CIGRE, **cigre 414**, 2010.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นายศิริวุฒิ พงษ์พิทักษ์

วัน เดือน ปีเกิด 8 มีนาคม 2544

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า (กำลัง)

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การศึกษามัธยมปลาย โรงเรียนสารสาสน์วิเทศร่มเกล้า

สถานที่ฝึกงาน บริษัท ธิรไทย จำกัด (มหาชน)



ชื่อ-นามสกุล นางสาวศุภิสรา ไววิชา

วัน เดือน ปีเกิด 8 ธันวาคม 2543

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า (พลังงาน)

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การศึกษามัธยมปลาย โรงเรียนนวมินทราชินูทิศ สวนกุหลาบวิทยาลัย ปทุมธานี

สถานที่ฝึกงาน การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย กองทดสอบไฟฟ้าแรงสูง

แผนกทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง (บางพลี)



ชื่อ-นามสกุล นายสุกฤษฎ์ ตรงจิตรจริง

วัน เดือน ปีเกิด 3 สิงหาคม 2543

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า (กำลัง)

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การศึกษามัธยมปลาย โรงเรียนพรตพิทยพยัต

สถานที่ฝึกงาน บริษัท ธิรไทย จำกัด (มหาชน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้