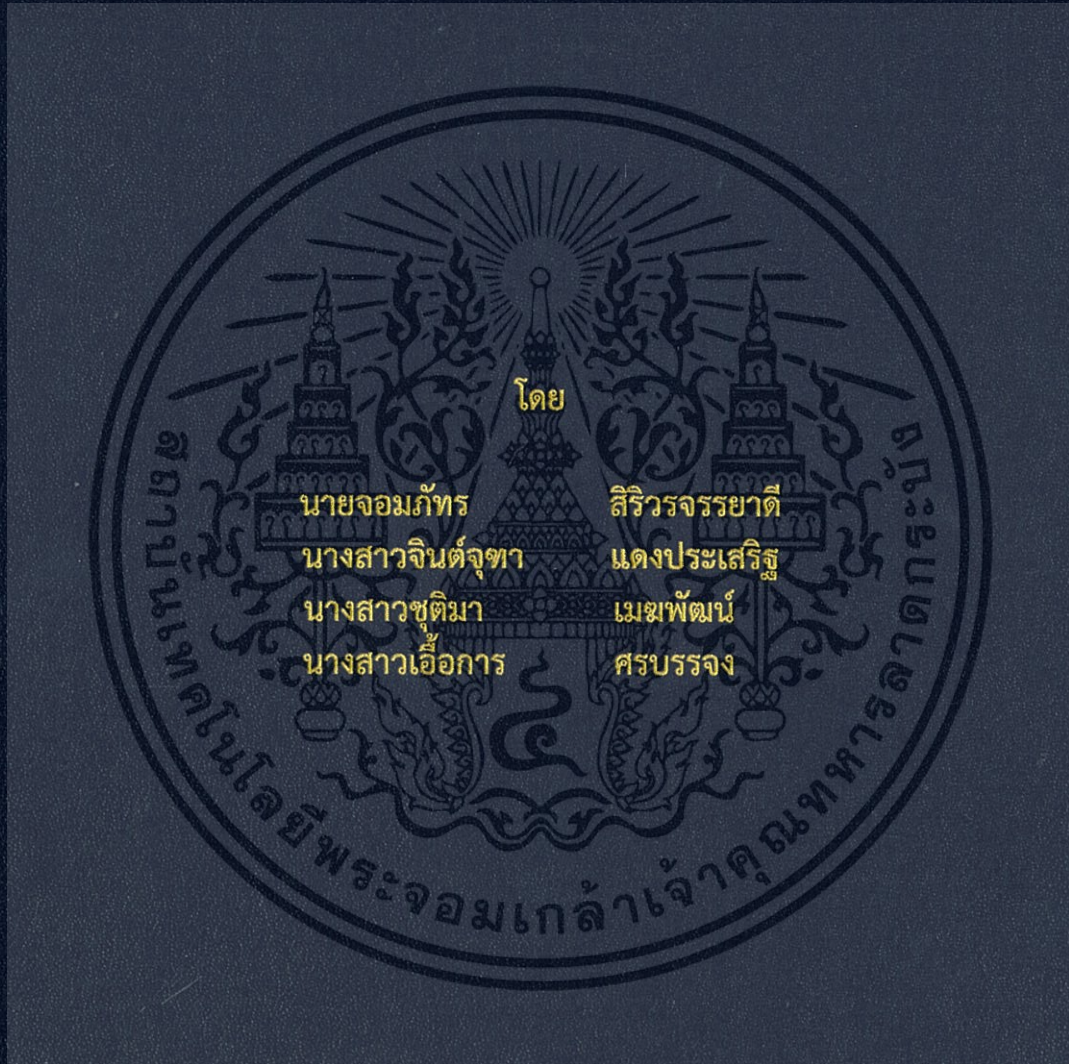


คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ
น้ำมันแร่ เอสเทอร์ธรรมชาติ และน้ำมันปาล์ม ที่มีอนุภาคเจือปน
ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF MINERAL OIL, NATURAL ESTER,
AND PALM OIL WITH VARIOUS TYPES OF PARTICLES



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ
น้ำมันแร่ เอสเทอร์ธรรมชาติ และน้ำมันปาล์ม ที่มีอนุภาคเจือปน
ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF MINERAL OIL, NATURAL ESTER,
AND PALM OIL WITH VARIOUS TYPES OF PARTICLES



TB00115

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF MINERAL OIL, NATURAL ESTER,
AND PALM OIL WITH VARIOUS TYPES OF PARTICLES



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2560

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันแร่ เอสเทอร์ธรรมชาติ และน้ำมันปาล์ม ที่มีอนุภาคเจือปน

ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF MINERAL OIL, NATURAL ESTER,
AND PALM OIL WITH VARIOUS TYPES OF PARTICLES



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2560

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง คุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันแร่ เอสเทอร์ธรรมชาติ และน้ำมันปาล์ม ที่มีอนุภาคเจือปน

ผู้จัดทำ

1. นายจอมภัทร สิริวรจรยาดี
2. นางสาวจินต์จุฑา แดงประเสริฐ
3. นางสาวชุตินา เมฆพัฒน์
4. นางสาวเอื้อการ ศรบรรจง



..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันแร่ เอสเทอร์ธรรมชาติ และน้ำมันปาล์มที่มีอนุภาคเจือปน

นาย จอมภัทร	สิริวรจรยาดี	
นางสาว จินต์จุฑา	แดงประเสริฐ	
นางสาว ชุติมา	เมฆพัฒน์	
นางสาว เอื้อการ	ศรบรรจง	
รศ.ดร.นรเศรษฐ์	พัฒนเดช	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2560		

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาโครงสร้างส่วนประกอบหลักของหม้อแปลงไฟฟ้าและฉนวนเหลวภายในหม้อแปลงไฟฟ้าได้แก่ น้ำมันแร่ เอสเทอร์ธรรมชาติ และน้ำมันปาล์ม รวมถึงศึกษาแนวโน้มผลกระทบของอนุภาคเจือปน ได้แก่ ทองแดง เหล็ก และเซลลูโลส ต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนเหลวภายในหม้อแปลงไฟฟ้า การศึกษาวิจัยจะเริ่มจากการทดสอบค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเหลว (ϵ_r) และ ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) และค่าความคงทนเบรกดาว์นกระแสสลับของฉนวนเหลว ตามมาตรฐาน IEC 60247 และมาตรฐาน IEC 60156 ตามลำดับ เพื่อทำการประเมินคุณภาพของฉนวนเหลวเบื้องต้นก่อนทำการทดสอบ จากนั้นทดสอบค่าความคงทนเบรกดาว์นกระแสสลับของฉนวนเหลวที่มีอนุภาคเจือปน โดยการทดสอบอิงตามมาตรฐาน IEC 60156 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าความคงทนเบรกดาว์นกระแสสลับของฉนวนเหลวได้แก่ ชนิดของฉนวนเหลวและอนุภาคเจือปน ปริมาณอนุภาคเจือปน และอุณหภูมิของฉนวนเหลวขณะทดสอบ จากนั้นศึกษาพฤติกรรมการเรียงตัวของอนุภาคเจือปนภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย พบว่าพฤติกรรมการเรียงตัวของอนุภาคขึ้นกับระดับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน ชนิดของฉนวนเหลวและอนุภาคเจือปน และปริมาณอนุภาคเจือปน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF MINERAL OIL, NATURAL ESTER, AND PALM OIL WITH VARIOUS TYPES OF PARTICLES

Jompatara Siriworachanyadee
Jinjutha Dangprasert
Chutima Mekkhaphat
Auakarn Sornbunjong
Assoc.Prof.Dr.techn.Norasage Pattanadech Advisor

Abstract

The objectives of the project are to study main part structures of a transformer and liquid insulation used in transformer, i.e., mineral oil, natural ester, and palm oil including electrical characteristics of liquid insulation contaminated with various types of particles, i.e., copper, iron, and cellulose. Measuring value of relative permittivity of liquid insulation (ϵ_r), dielectric dissipation factor ($\tan\delta$) and dielectric breakdown strength according to IEC 60247 and IEC 60156 respectively were used to evaluate the quantity of liquid insulation before testing. Then, the AC breakdown testing of the insulating liquid with contaminant was performed in accordance with IEC 60156. The test results show that the factors affecting breakdown voltage characteristics of contaminated liquid insulations were the liquid insulation types, particle types, the particle concentrations, and the liquid temperatures. Besides, the behavior of particle patterns under the slightly uniform field in the liquid insulation was studied. It was found that the factors affecting such patterns were liquid insulation types, particle types and the particle concentrations.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา รวมไปถึง คุณปุ่นยวีร์ ฉายศิริ ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี ขอขอบคุณพีทิตพิศ จรรย์านวัฒน์ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ที่ได้ช่วยเหลือและให้ความเอาใจใส่ในด้านต่างๆ ด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณ บริษัท เมเดนเซ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เรื่องทุนทรัพย์

ขอขอบคุณ บริษัท ละมุลวิศวกรรม จำกัด และบริษัท ดาต้า เอนทรี กรุ๊ป จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านความรู้และข้อมูลที่สำคัญในการจัดทำปริญญานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์เกี่ยวกับเครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบ จนการทดสอบเสร็จสมบูรณ์

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนด้านการเงิน ยานพาหนะ และให้กำลังใจ อีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านคำแนะนำในการจัดหาและใช้อุปกรณ์ รวมถึงการทดสอบในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	3
1.5 แผนการดำเนินงาน	4
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	6
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 ฉนวนไฟฟ้า (Insulator)	7
2.2 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)	7
2.3 โครงสร้างและส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้า	9
2.3.1 ส่วนประกอบภายนอก	9
2.3.2 ส่วนประกอบระหว่างภายในและภายนอก	16
2.3.3 ส่วนประกอบที่เป็นวงจรแม่เหล็ก	17
2.3.4 ส่วนประกอบที่เป็นวงจรไฟฟ้า	18
2.3.5 โครงสร้างที่สำคัญของหม้อแปลงไฟฟ้า	19
2.4 ฉนวนภายในหม้อแปลง (Insulation)	20
2.4.1 ฉนวนแข็ง	20
2.4.2 ฉนวนเหลว	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5 คุณสมบัติของฉนวน	23
2.5.1 ความต้านทานของฉนวน	23
2.5.2 เพอร์มิตติวิตี	23
2.5.3 แพกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก	25
2.5.4 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน (Dielectric Strength)	25
2.6 อนุภาคในน้ำมันหม้อแปลง	26
2.7 สนามไฟฟ้า (Electric field) และความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field stress)	26
2.7.1 ความหมาย	26
2.7.2 วิธีหาค่าสนามไฟฟ้า	27
2.7.3 วิธีหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้า	30
2.8 การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนเหลว	30
2.8.1 กลไกเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวเชิงการค้ำ	30
2.8.2 กลไกเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวบริสุทธิ์	31
บทที่ 3 การออกแบบการทดลองและสร้างชุดทดสอบ	32
3.1 การออกแบบสร้างชุดทดสอบ	32
3.2 การเตรียมฉนวนเหลว และอนุภาคเจือปนสำหรับการทดสอบ	33
3.3 การทดสอบความชื้นในฉนวนเหลว	34
3.4 การทดสอบเพื่อศึกษาผลของความเป็นฉนวนเหลวโดยทดสอบค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเหลว (ϵ_r) และค่าแพกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$)	35
3.5 การทดสอบเพื่อศึกษาผลของความเป็นฉนวนเหลวโดยการทดสอบเบรกดาวน์	36
3.6 การทดสอบเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อศึกษาการเรียงตัวของอนุภาคเจือปน	37

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดสอบ	39
4.1 ผลจากการวัดค่าความชื้นของฉนวนเหลวก่อนทำการทดลอง	39
4.2 ผลการทดสอบวัดค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) ของฉนวนเหลว	40
4.3 ผลการทดสอบค่าแรงดันเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ผ่านฉนวนเหลว	41
4.4 ผลการศึกษาพฤติกรรมการเรียงตัวของอนุภาคเจือปนขณะขึ้นแรงดันในฉนวนเหลว	42
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	56
5.1 สรุป	56
5.2 ข้อเสนอแนะ	58
เอกสารอ้างอิง	59
ภาคผนวก	62
ภาคผนวก ก บทความวิชาการ	63
ภาคผนวก ข บทความวิชาการ	68
ประวัติผู้เขียน	73

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	หม้อแปลงไฟฟ้า	7
2.2	ลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าอย่างง่าย	8
2.3	ถังหม้อแปลง (transformer tank)	9
2.4	เครื่องวัดระดับน้ำมัน (oil level gauge)	10
2.5	ถังพักน้ำมัน (conservator tank)	10
2.6	ชุดกรองความชื้น (Dehydrating Breather) ที่บรรจุซิลิกาเจล	11
2.7	อุปกรณ์ระบายความดัน (Pressure-Relief Device)	12
2.8	บุชโฮลซ์รีเลย์ (Buchholz relay)	13
2.9	การทำงานของบุชโฮลซ์รีเลย์ (Buchholz relay)	13
2.10	เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer)	13
2.11	อุปกรณ์กระจายความร้อน (radiator)	14
2.12	พัดลม (fan)	14
2.13	ปั๊มน้ำมัน (oil circulating pump)	15
2.14	บุชชิงแรงสูง และบุชชิงแรงต่ำ	15
2.15	อาร์กชิงฮอร์น (arcing horn)	16
2.16	ขั้วต่อสาย (terminal)	16
2.17	แท็ปปรับแรงดัน (Tap changer)	17
2.18	แกนเหล็ก (Core)	18
2.19	ขดลวด (Winding)	18
2.20	โครงสร้างที่สำคัญของหม้อแปลงไฟฟ้า	19
2.21	กระดาดอัดแรง	20
2.22	การเชื่อมโยงเอสเทอร์	21
2.23	โครงสร้างของเอสเทอร์ธรรมชาติ	22
2.24	โครงสร้างของน้ำมันปาล์ม	22
2.25	อิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ	27
2.26	อิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย	28
2.27	สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า	28

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.28	อิเล็กโตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง	29
2.29	สนามไฟฟ้ากระจายเปรียบเทียบของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ	29
2.30	การเรียงตัวของอนุภาคระหว่างช่องว่าง (Gap)	30
2.31	การยึดออกของหยดน้ำในฉนวนเหลวภายใต้สนามไฟฟ้าจนนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์	31
3.1	แบบจำลองอิเล็กโตรดแบบ Partially spherical electrodes และ Spherical electrodes	32
3.2	บิกเกอร์ที่บรรจุฉนวนเหลวที่ใช้ทดสอบ	33
3.3	ตู้อบ ติดตั้งเครื่องดูดอากาศเพื่อควบคุมอุณหภูมิและความดันอากาศ	33
3.4	เตรียมอนุภาคเจือปนใส่ลงในกระดาษพอยด์	34
3.5	เครื่องชั่งมวลสาร ทศนิยม 4 ตำแหน่ง เพื่อชั่งอนุภาคเจือปน	34
3.6	เครื่องวัดความชื้น (Compact Karl's Fister Titrator)	34
3.7	การต่อวงจรเพื่อหาค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$)	35
3.8	การต่อวงจรเพื่อหาแรงดันเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ	36
3.9	การต่อวงจรเพื่อหาแรงดันเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อศึกษาการเรียงตัวของอนุภาคเจือปน	37
3.10	ชุดทดสอบและกล่องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ	37
4.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\tan\delta$ กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของฉนวนเหลว	41

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	วิธีการดำเนินงาน	4
2.1	คุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางความร้อนของน้ำมันปาล์มเทียบกับน้ำมันพืชชนิดอื่นๆ	22
2.2	คุณสมบัติทางฟิสิกส์และไฟฟ้าของฉนวนเหลวชนิดน้ำมันแร่และเอสเทอร์	23
2.3	ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของวัสดุ	24
4.1	แสดงค่าความชื้นของฉนวนเหลวแต่ละชนิด	39
4.2	แสดงค่าפקเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของฉนวนเหลว	40
4.3	แสดงค่าแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลว	41
4.4	การแสดงผลการเรียงตัวของอนุภาคเหล็กในน้ำมันแร่ที่แรงดัน 5 kV	42
4.5	การแสดงผลการเรียงตัวของอนุภาคเหล็กในน้ำมันแร่ที่แรงดัน 10 kV	42
4.6	การแสดงผลการเรียงตัวของอนุภาคเหล็กในน้ำมันแร่ที่แรงดัน 15 kV	43
4.7	การแสดงผลการเรียงตัวของอนุภาคทองแดงในน้ำมันแร่ที่แรงดัน 5 kV	43
4.8	การแสดงผลการเรียงตัวของอนุภาคทองแดงในน้ำมันแร่ที่แรงดัน 10 kV	44
4.9	การแสดงผลการเรียงตัวของอนุภาคทองแดงในน้ำมันแร่ที่แรงดัน 15 kV	44
4.10	การแสดงผลการเรียงตัวของอนุภาคเซลลูโลสในน้ำมันแร่ที่แรงดัน 5 kV	45
4.11	การแสดงผลการเรียงตัวของอนุภาคเซลลูโลสในน้ำมันแร่ที่แรงดัน 10 kV	45
4.12	การแสดงผลการเรียงตัวของอนุภาคเซลลูโลสในน้ำมันแร่ที่แรงดัน 15 kV	46
4.13	การแสดงผลการเรียงตัวของอนุภาคเหล็กในน้ำมันเอสเทอร์ที่แรงดัน 5 kV	46
4.14	การแสดงผลการเรียงตัวของอนุภาคเหล็กในน้ำมันเอสเทอร์ที่แรงดัน 10 kV	47
4.15	การแสดงผลการเรียงตัวของอนุภาคเหล็กในน้ำมันเอสเทอร์ที่แรงดัน 15 kV	47
4.16	การแสดงผลการเรียงตัวของอนุภาคทองแดงในน้ำมันเอสเทอร์ที่แรงดัน 5 kV	48
4.17	การแสดงผลการเรียงตัวของอนุภาคทองแดงในน้ำมันเอสเทอร์ที่แรงดัน 10 kV	48
4.18	การแสดงผลการเรียงตัวของอนุภาคทองแดงในน้ำมันเอสเทอร์ที่แรงดัน 15 kV	49
4.19	การแสดงผลการเรียงตัวของอนุภาคเซลลูโลสในน้ำมันเอสเทอร์ที่แรงดัน 5 kV	49
4.20	การแสดงผลการเรียงตัวของอนุภาคเซลลูโลสในน้ำมันเอสเทอร์ที่แรงดัน 10 kV	50
4.21	การแสดงผลการเรียงตัวของอนุภาคเซลลูโลสในน้ำมันเอสเทอร์ที่แรงดัน 15 kV	50
4.22	การแสดงผลการเรียงตัวของอนุภาคเหล็กในน้ำมันปาล์มที่แรงดัน 5 kV	51
4.23	การแสดงผลการเรียงตัวของอนุภาคเหล็กในน้ำมันปาล์มที่แรงดัน 10 kV	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา μX ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.24	การแสดงผลการเรียงตัวของอนุภาคเหล็กในน้ำมันปาล์มที่แรงดัน 15 kV	52
4.25	การแสดงผลการเรียงตัวของอนุภาคทองแดงในน้ำมันปาล์มที่แรงดัน 5 kV	52
4.26	การแสดงผลการเรียงตัวของอนุภาคทองแดงในน้ำมันปาล์มที่แรงดัน 10 kV	53
4.27	การแสดงผลการเรียงตัวของอนุภาคทองแดงในน้ำมันปาล์มที่แรงดัน 15 kV	53
4.28	การแสดงผลการเรียงตัวของอนุภาคเซลลูโลสในน้ำมันปาล์มที่แรงดัน 5 kV	54
4.29	การแสดงผลการเรียงตัวของอนุภาคเซลลูโลสในน้ำมันปาล์มที่แรงดัน 10 kV	54
4.30	การแสดงผลการเรียงตัวของอนุภาคเซลลูโลสในน้ำมันปาล์มที่แรงดัน 15 kV	55



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทำหน้าที่สำหรับแปลงระดับแรงดันจากระดับแรงดันหนึ่งสู่อีกระดับแรงดันหนึ่งโดยอาศัยการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้า ทำให้จำเป็นต่อระบบการส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังเมื่อหม้อแปลงมีการใช้งานไประยะเวลาหนึ่งอาจเกิดการเสื่อมสภาพของฉนวนจากหลายๆ สาเหตุ ซึ่งเป็นอันตรายต่อหม้อแปลงและอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อระบบไฟฟ้า ดังนั้นการเฝ้าระวังก่อนที่ปัญหาจะเกิดขึ้นจึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยตัวชี้วัดที่ใช้ในการตรวจสอบสุขภาพของหม้อแปลงไฟฟ้านั้นคือฉนวนเหลว ดังนั้นการทดสอบและวิเคราะห์ผลของฉนวนเหลวจึงเป็นสิ่งสำคัญในการวินิจฉัยหม้อแปลงไฟฟ้าโดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อดูสถานะที่เหมาะสมของฉนวนเหลวขณะใช้งาน เพื่อหาสภาพความผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้า และเพื่อประเมินอายุที่เหลืออยู่ของหม้อแปลง ผลจากการเสื่อมสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าดังกล่าวอาจทำให้โครงสร้างหรือส่วนประกอบภายในหม้อแปลงเกิดการปนเปื้อนของอนุภาคเจือปนอยู่กับฉนวนเหลว จึงเกิดการศึกษเกี่ยวกับผลกระทบที่เกิดจากการเจือปนของอนุภาค เช่น อนุภาคทองแดงจากขดลวด อนุภาคเหล็กจากแกนเหล็ก รวมถึงตัวถังของหม้อแปลง และอนุภาคของเซลล์โลสจากฉนวนกระดาษ ซึ่งอนุภาคทั้งหมดล้วนเป็นส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสิ้น ในการทดสอบฉนวนเหลวที่มีอนุภาคเจือปนทำให้ทราบได้ว่าหม้อแปลงมีการใช้งานที่เหมาะสมหรือไม่ และสามารถวางแผนในการบำรุงรักษาหม้อแปลงเพื่อยืดอายุการใช้งานหม้อแปลงต่อไป

ในอุตสาหกรรมโดยส่วนใหญ่จะใช้งานหม้อแปลงที่มีฉนวนเหลวที่เป็นชนิดน้ำมันแร่ แต่ในปัจจุบันได้มีการวิจัยฉนวนเหลวที่อาจจะสามารถใช้ทดแทนกันได้ เช่น เอสเทอร์ธรรมชาติ และน้ำมันปาล์ม ซึ่งฉนวนเหลวทั้ง 3 ชนิดมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันตามคุณสมบัติ ดังนั้นฉนวนเหลวแต่ละชนิดอาจมีผลกระทบจากอนุภาคที่เจือปนต่างกัน ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวสามารถเป็นแนวทางในการเลือกใช้งานชนิดของฉนวนเหลวได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาโครงสร้างและส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งภายในและภายนอก
2. เพื่อศึกษาวิธีการทดสอบคุณภาพของฉนวนเหนียวตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง
3. เพื่อศึกษาเกี่ยวกับอนุภาคจากส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้าที่สามารถเจือปนได้ในฉนวนเหนียว
4. เพื่อศึกษาผลกระทบของอนุภาคเจือปนในฉนวนเหนียวที่มีต่อคุณภาพของฉนวนเหนียว
5. เพื่อศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนเหนียวเมื่อมีอนุภาคเจือปน

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษาโครงสร้างและส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งภายในและภายนอก
2. ศึกษาวิธีการทดสอบคุณภาพของฉนวนเหนียวเฉพาะวิธีการทดสอบค่าเปอร์เซ็นต์วัตต์สัมพัทธ์ของฉนวนเหนียว และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$)
3. ศึกษาอนุภาคที่สามารถเจือปนอยู่ในฉนวนเหนียวได้โดยเลือกศึกษาเฉพาะ อนุภาคของทองแดง อนุภาคเหล็ก และอนุภาคเซลลูโลส
4. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเบรกดาวนและการทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนเหนียว
5. ศึกษาผลกระทบจากอุณหภูมิและปริมาณของอนุภาคเจือปนต่อการเกิดเบรกดาวนในฉนวนเหนียวที่มีอนุภาคเจือปน
6. ศึกษาพฤติกรรมการเรียงตัวของอนุภาคเจือปนภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย
7. ศึกษาการใช้งานโปรแกรม Microsoft Visio และ SolidWorks

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาโครงสร้างและส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งภายในและภายนอก
2. ศึกษาวิธีการทดสอบคุณภาพของฉนวนเหลวเฉพาะการทดสอบหาค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเหลว และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) ตามมาตรฐาน IEC 60247
3. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับอนุภาคที่สามารถเจือปนอยู่ในฉนวนเหลวได้โดยเลือกศึกษาเฉพาะอนุภาคทองแดง อนุภาคเหล็ก และอนุภาคเซลลูโลส
4. สร้างแบบจำลอง 2 มิติ และ 3 มิติ โดยใช้โปรแกรม Microsoft Visio และ SolidWorks
5. ออกแบบการทดสอบฉนวนเหลวทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ น้ำมันแร่ เอสเทอร์ธรรมชาติ และน้ำมันปาล์มซึ่งมีการเจือปนของอนุภาคที่ปริมาณต่างๆ และที่อุณหภูมิแตกต่างกัน
6. ทำการทดสอบฉนวนเหลวทั้ง 3 ชนิด โดยวิธีการทดสอบหาค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเหลว และ ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) ตามมาตรฐาน IEC 60247
7. ทดสอบการเกิดการเบรกดาว์นของฉนวนเหลวทั้ง 3 ชนิดตามมาตรฐาน IEC 60156 โดยมีอนุภาคเจือปนในปริมาณต่างๆ และมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
8. ศึกษาพฤติกรรมการเรียงตัวของอนุภาคเจือปนภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย
9. วิเคราะห์ผลของข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองเมื่อมีอนุภาคเจือปนในฉนวนเหลว
10. จัดทำปริญญานิพนธ์

1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 วิธีการดำเนินงาน

วิธีการดำเนินการ	ปีการศึกษา 2560									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาโครงสร้างและส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้า	←-----→	←-----→								
2. สร้างแบบจำลอง 2 มิติ และ 3 มิติ โดยใช้ AutoCAD และ SolidWorks		←-----→								
3. ศึกษาวิธีการทดสอบคุณภาพของฉนวนเฉพาะการทดสอบค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเหลว และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) ตามมาตรฐาน IEC 60247 และ IEC 60554-2		←-----→								
4. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับอนุภาคที่เจือปนอยู่ในฉนวนเหลวได้โดยเลือกศึกษาเฉพาะอนุภาคทองแดง อนุภาคเหล็ก และอนุภาคเซลลูโลส			←-----→							
5. ออกแบบการทดสอบฉนวนเหลวทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ชนิดของน้ำมันแร่ เอสเทอร์ธรรมชาติ และน้ำมันปาล์มที่มีการเจือปนของอนุภาค				←-----→						


←-----→ วางแผน

←-----→ ปฏิบัติจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1(ต่อ) วิธีการดำเนินงาน

วิธีการดำเนินการ	ปีการศึกษา 2560									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
6. ทดสอบคุณภาพของฉนวน เฉพาะการทดสอบหาค่า เปอร์มีตติวิตีสัมพัทธ์ของ ฉนวนเหลว และค่าแฟกเตอร์ พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) ตามมาตรฐาน IEC 60247 และ IEC 60554-2										
7. ทำการทดสอบการเกิดการ เบรกดาวน์ของฉนวนเหลวทั้ง 3 ชนิด ตามมาตรฐาน IEC 60156 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณ ของอนุภาคเจือปนและอุณหภูมิ										
8. ทำการศึกษาพฤติกรรมของ อนุภาคเจือปนในการทดสอบ ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ของฉนวนเหลวทั้ง 3 ชนิด เมื่อ มีการเปลี่ยนแปลงจำนวน อนุภาคเจือปนที่อุณหภูมิห้อง										
9. วิเคราะห์ผลของข้อมูลเพื่อ เปรียบเทียบผลการทดลองเมื่อ มีอนุภาคเจือปนในฉนวนเหลว										
10. สรุปผลการทดลอง										
11. จัดทำปริญญานิพนธ์										


 ←-----→ วางแผน ←-----→ ปฏิบัติจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจโครงสร้างและส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งภายในและภายนอก
2. เข้าใจวิธีการทดสอบคุณภาพของฉนวนเหลวตามมาตรฐานวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง
3. เข้าหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบการเบรกตาวินด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในฉนวนเหลว
4. เข้าใจผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อคุณภาพฉนวนเหลวเมื่อมีอนุภาคเจือปนในฉนวนเหลว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

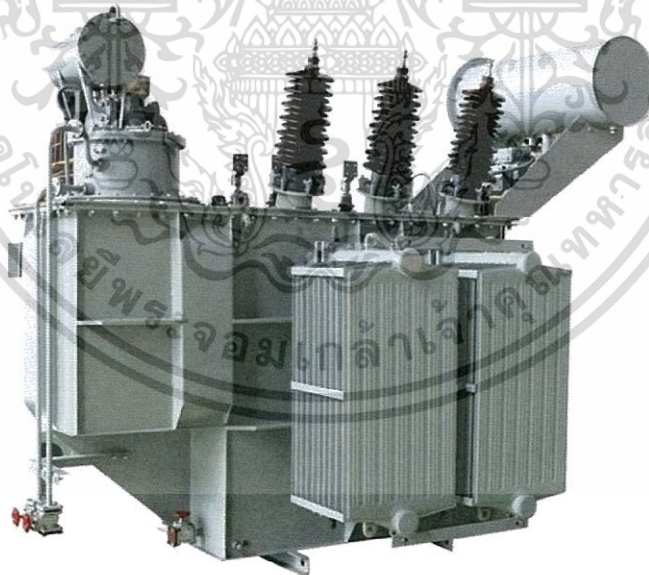
บทที่ 2 ทฤษฎีบทที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฉนวนไฟฟ้า (Insulator)

ฉนวนไฟฟ้า หรือ ไดอิเล็กตริก คือวัสดุที่มีคุณสมบัติในการกีดกันหรือขัดขวางการไหลของกระแสไฟฟ้าหรือวัสดุที่กระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลผ่านได้ ฉนวนที่ดีจะต้องสามารถป้องกันตัวนำไฟฟ้าจากความร้อนหรือของเหลวที่สามารถกัดกร่อนตัวนำไฟฟ้า และสามารถกันน้ำได้ดี ฉนวนเป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งของระบบไฟฟ้า เมื่อมีไฟฟ้าจะต้องมีฉนวนอยู่ด้วยเสมอ เพื่อป้องกันการเกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต หรือ ป้องกันการลัดวงจรไฟฟ้าอันจะนำมาสู่ความเสียหายทางทรัพย์สินด้วย ไม่ว่าจะเป็นระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ หรือระบบไฟฟ้าแรงดันสูงต่างต้องมีการออกแบบการเลือกใช้ฉนวนให้ดี ทั้งยังจำเป็นต้องมีความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับแรงดัน สนามไฟฟ้า ความเครียดสนามไฟฟ้า และสมบัติของฉนวนต่างๆ

โดยฉนวนมีอยู่หลายประเภท ทั้งประเภทฉนวนแข็ง ฉนวนก๊าซ ฉนวนเหลว และอื่นๆ ในที่นี้เราจะเน้นศึกษาไปที่ฉนวนเหลวของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งมีรายละเอียดดังหัวข้อ 2.4

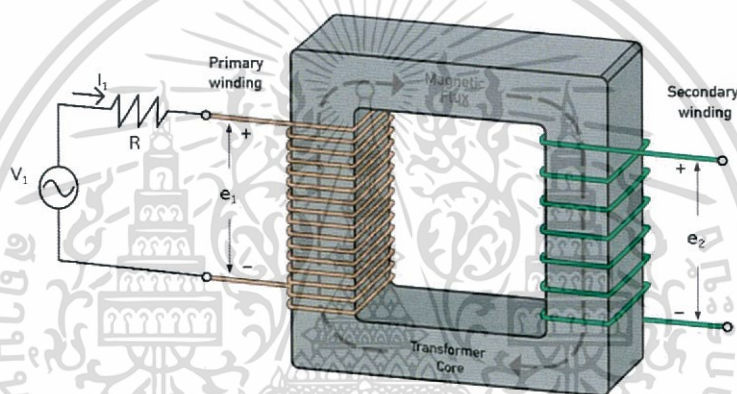
2.2 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) [1]



รูปที่ 2.1 หม้อแปลงไฟฟ้า [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับชนิดหนึ่งที่มีการถ่ายทอดพลังงานไฟฟ้าจากวงจรหนึ่งไปสู่อีกรวงจรหนึ่งโดยอาศัยการเหนี่ยวนำจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งใช้สำหรับเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เพิ่มมากขึ้นหรือลดต่ำลงตามความต้องการที่เหมาะสมกับการใช้งานโดยที่ความถี่ของระบบยังคงที่ หม้อแปลงไฟฟ้านับว่าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบอื่นๆ เนื่องจากไม่มีร่องสล็อตและส่วนเคลื่อนที่ได้ หม้อแปลงจึงเป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญอย่างมากต่อระบบไฟฟ้ากำลังอาทิเช่น การใช้หม้อแปลงในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (transmission system) เพื่อแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าจากระบบผลิต (generating system) ไปยัง ระบบจำหน่าย (distribution system) ดังนั้นการผลิตและติดตั้งหม้อแปลงต้องเป็นไปตามมาตรฐาน และมีการบำรุงรักษาที่เหมาะสมเพื่อไม่ให้เกิดการชำรุดเสียหายหรือเกิดปัญหาที่เป็นอันตรายต่อหม้อแปลงไฟฟ้าได้ เพื่อที่จะรักษาความปลอดภัยและเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง



รูปที่ 2.2 Basic transformer working and construction [1]

ส่วนประกอบพื้นฐานที่สำคัญของหม้อแปลงมีอยู่ 3 ส่วน ได้แก่ แกนเหล็กของหม้อแปลง (transformer core) ขดลวดปฐมภูมิ (primary winding) และขดลวดทุติยภูมิ (secondary winding) โดยที่ขดลวดปฐมภูมิจะพันอยู่ที่แกนด้านหนึ่งของแกนเหล็กส่วนขดลวดทุติยภูมิจะพันอยู่ที่แกนอีกด้านหนึ่ง ซึ่งขดลวดทั้งสองอาจมีจำนวนรอบเท่ากันหรือไม่ก็ได้โดยอัตราส่วนระหว่างจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ และขดลวดทุติยภูมิจะเป็นตัวกำหนดว่า แรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมินั้นจะถูกแปลงให้เพิ่มขึ้นหรือลดลงทางด้านทุติยภูมิ เมื่อแหล่งจ่ายป้อนแรงดันกระแสสลับให้ขดลวดปฐมภูมิ จะเกิดเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้ากระแสสลับขึ้นในแกนเหล็กเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะเคลื่อนที่ไปตามแกนเหล็กและไปตัดกับขดลวดทุติยภูมิ ทำให้มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นที่ขดลวดทุติยภูมิตามกฎของฟาราเดย์ จึงทำให้ขดลวดทุติยภูมิสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าและพลังงานได้

2.3 โครงสร้างและส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้า [2,3]

2.3.1 ส่วนประกอบภายนอก

1. ถังหม้อแปลง (transformer tank)

ถังหม้อแปลงเป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นมากสำหรับหม้อแปลงชนิดที่ใช้ของเหลวช่วยในการระบายความร้อน ซึ่งถังหม้อแปลงมีหน้าที่ห่อหุ้มชิ้นส่วนที่สำคัญภายในของหม้อแปลง เช่น แกนเหล็ก ขดลวด และฉนวน เป็นต้น โดยปกติแล้วขนาดของถังหม้อแปลงนั้นขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้ โดยมักจะต้องมีน้ำหนักเบา ราคาถูก มีการสั่นสะเทือนน้อย มีระดับความดังของเสียงต่ำ มีความน่าเชื่อถือสูง และมีอายุการใช้งานที่นาน นอกจากนี้ผู้ผลิตยังต้องคำนึงถึงแรงกดดันของของเหลวที่ถังหม้อแปลงจะทนได้ และยังต้องทนต่อสุญญากาศได้ในระหว่างที่มีการเปลี่ยนน้ำมัน

วัสดุที่ใช้ในการผลิตถังหม้อแปลงนั้นคือเหล็กแผ่น (steel plate) ที่มีคุณภาพสูง มีความแข็งแรง สามารถทนความร้อนได้และจะต้องเป็นเหล็กที่ไม่เป็นตัวสื่อแม่เหล็ก (non-magnetic steel) อันเป็นสาเหตุให้มีเส้นแรงแม่เหล็กค้างอยู่ได้



รูปที่ 2.3 ถังหม้อแปลง (transformer tank) [5]

2. ฉนวนเหลว (transformer oil)

น้ำมันที่ใช้ในหม้อแปลงนั้น มีหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้าและพาความร้อนออกจากขดลวด (winding) และแกนเหล็ก (iron core) ซึ่งสิ่งสำคัญของฉนวนเหลวคือจะต้องไม่มีความชื้น (moisture) ปะปนอยู่ เพราะหากมีความชื้นเกิดขึ้นจะทำให้ความเป็นฉนวนของฉนวนเหลวเสื่อมไป ฉนวนเหลวยังมีหน้าที่ป้องกันการผุกร่อนของแกนเหล็กและขดลวดจากสารเคมี และป้องกันการสะสมของตะกอนภายในหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เครื่องวัดระดับน้ำมัน (oil level gauge)

โดยทั่วไปเครื่องวัดระดับน้ำมัน (oil level gauge) จะติดตั้งอยู่ที่ข้างๆ ของถังพักน้ำมัน (conservator tank) ทำหน้าที่แสดงระดับน้ำมันภายในถังหม้อแปลง แบ่งออกเป็น 2 ชนิดด้วยกันคือ ชนิดที่ใช้หลอดแก้ว และชนิดที่มีหน้าปัดเข็มชี้ ซึ่งการบอกระดับน้ำมันมีอยู่หลายวิธีทั้งแบบตัวเลขและแบบอักษร นอกจากนั้นเครื่องวัดระดับน้ำมันยังสามารถเพิ่มจุดสัมผัสที่เข็มเพื่อติดตั้งเครื่องเตือน ให้มีเสียงดังไปยังห้องควบคุมเครื่อง เมื่อน้ำมันตกถึงระดับต่ำสุด



รูปที่ 2.4 เครื่องวัดระดับน้ำมัน (oil level gauge) [6,7]

4. ถังพักน้ำมัน (conservator tank)

ถังพักน้ำมันเป็นถังทรงกระบอกอยู่เหนือถังหม้อแปลง ทำด้วยโลหะเชื่อมอย่างดีอากาศภายนอกไม่สามารถเข้าไปได้ และต้องสามารถรองรับส่วนขยาย 11-12% ของน้ำมันทั้งหมดในถังหม้อแปลงได้ ถังพักน้ำมันนี้มีหน้าที่สำหรับรองรับการขยายตัวและหดตัวของน้ำมันจากตัวถังหม้อแปลง ขณะหม้อแปลงกำลังใช้งาน โดยปกติแล้วน้ำมันในถังหม้อแปลงจะอยู่ที่ขีดหนึ่งที่อุณหภูมิห้อง หลังจากมีการใช้งานมีภาระผ่านหม้อแปลงแล้ว ทำให้อุณหภูมิของน้ำมันภายในถังหม้อแปลงสูงขึ้น ปริมาตรของน้ำมันจะขยายตัวและไหลเข้าสู่ถังพักน้ำมันนี้ภายในถังพักน้ำมันอาจมีไนโตรเจนบรรจุอยู่ หรืออาจมีถุงลมยางกั้นอยู่ระหว่างน้ำมันและอากาศ เพื่อรักษาคุณภาพของน้ำมันไม่ให้ถูกความชื้น สันดาปกับอากาศ ซึ่งจะทำลายสภาพความเป็นฉนวนของฉนวนแห้งไป



รูปที่ 2.5 ถังพักน้ำมัน (conservator tank) [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ชุดกรองความชื้น (Dehydrating Breather)

ชุดกรองความชื้นทำหน้าที่สำหรับปรับความดันภายในหม้อแปลง และป้องกันความชื้นของอากาศและฝุ่นเข้าไปในหม้อแปลงได้โดยจะบรรจุสารดูดความชื้นคือ ซิลิกาเจล (Silica gel) อยู่ภายใน เพื่อดูดความชื้นที่มีอยู่ในอากาศก่อนเข้าสู่หม้อแปลง เนื่องจากในกรณีที่หม้อแปลงมีการใช้งาน ฉนวนเหลวจะเกิดการขยายตัวจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งอากาศจะถ่ายเทสู่ภายนอกทางชุดกรองความชื้น และเมื่อหม้อแปลงมีการะทางไฟฟ้าลดลงอุณหภูมิน้ำมันจะลดลง อากาศภายนอกที่มีความกดดันมากกว่าจะไหลเข้าสู่ตัวถังโดยผ่านชุดกรองความชื้นนี้เพื่อกรองความชื้นก่อนเข้าสู่หม้อแปลง โดยสารดูดความชื้นในสภาพที่ใช้งานได้จะมีสีน้ำเงิน และจะเปลี่ยนเป็นสีชมพูเมื่อเสื่อมคุณภาพซึ่งต้องทำการเปลี่ยนสารใหม่



รูปที่ 2.6 ชุดกรองความชื้น (Dehydrating Breather) ที่บรรจุซิลิกาเจล [9]

ความชื้นที่มีอยู่ในหม้อแปลงนั้นจะลดค่า dielectric strength ของน้ำมันลง และอากาศชื้นยังสามารถจะทำปฏิกิริยา oxidation กับน้ำมันเกิดเป็นมูลน้ำมัน (sludge) รวมตัวกันเป็นตะกอนเกาะติดตามร่องของขดลวด และแกนเหล็ก ทำให้ความร้อนที่เกิดจากความสูญเสียในขดลวดและแกนเหล็กไม่สามารถระบายออกสู่น้ำมันได้ จึงทำให้ฉนวนของขดลวดเสื่อมคุณภาพลง

6. อุปกรณ์ระบายความดัน (Pressure-Relief Device)

อุปกรณ์ระบายความดันทำหน้าที่ระบายความดันภายในถังหม้อแปลง ที่มากเกินไปกำหนดไม่ให้เกิดความเสียหายกับตัวหม้อแปลง อุปกรณ์ระบายความดันมีลักษณะเป็นท่อที่ต่อออกจากตัวหม้อแปลงติดตั้งบริเวณข้างตัวถัง ภายในท่อจะมีแผ่นระบายความดันที่ทำจากแผ่นพลาสติกหรือแผ่นทองแดงบางๆ ทำหน้าที่รับความดันโดยทางด้านบนของอุปกรณ์ระบายความดันจะสัมผัสกับอากาศซึ่งระหว่างถังพักน้ำมันและอุปกรณ์ระบายความดันนั้นจะมีท่อต่อเพื่อถ่ายเทให้ความดันทั้งสองแห่งเท่ากัน โดยหลักการจะใช้กลไกสปริงในการระบายความดัน เมื่อภายในหม้อแปลงเกิดแรงดันสูงจนสามารถเอาชนะแรงสปริง ความดันจะถูกระบายออก

ความผิดปกติภายในหม้อแปลง เช่น การเกิดประกายไฟ (arcing) จะทำให้ภายในหม้อแปลงเกิดแรงดันก๊าซอย่างสูงขึ้นไปกระแทกแผ่นระบายแรงดันของอุปกรณ์ระบายความดันเพื่อออกสู่ภายนอก



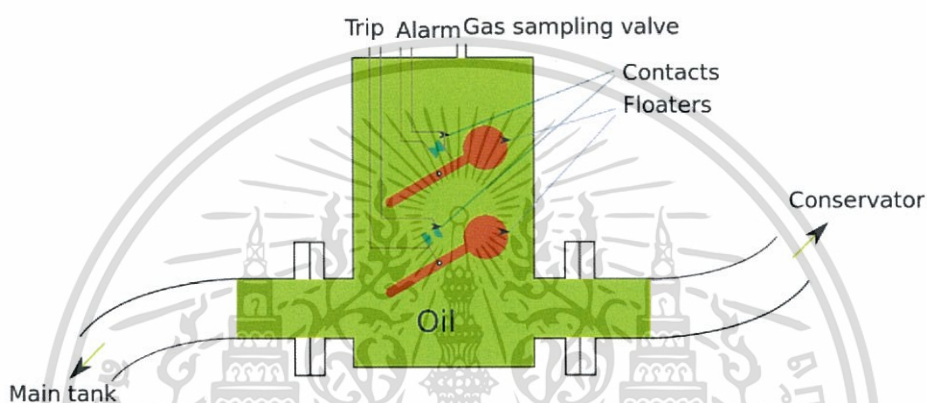
รูปที่ 2.7 อุปกรณ์ระบายความดัน (Pressure-Relief Device) [10]

7. บุษโฮลซ์รีเลย์ (Buchholz relay)

บุชโฮลซ์รีเลย์เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตรวจจับการสะสมของก๊าซและอัตราการไหลของน้ำมันที่ผิดปกติ บุษโฮลซ์รีเลย์จะติดตั้งกับหม้อแปลงชนิดที่มีถังพักน้ำมัน โดยเมื่อมีความผิดปกติเนื่องจากการเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวด หรือการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน ซึ่งจะเกิดความร้อนจะทำให้มีก๊าซเกิดขึ้นภายในฉนวนน้ำมัน กรณีที่ความผิดปกติไม่รุนแรงจะเกิดก๊าซขึ้นอย่างช้าๆ และก๊าซที่เกิดขึ้นนี้จะลอยตัวสู่ด้านบนและไปสะสมที่ตัวของบุชโฮลซ์รีเลย์ทำให้ลูกกลอยลูกบนลดระดับลงไปกดหน้าสัมผัสและส่งสัญญาณเตือนไปยังห้องควบคุม แต่หากเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลงที่รุนแรงขึ้น ก๊าซที่เกิดขึ้นจะมีจำนวนมากและเกิดขึ้นทันทีทันใดทำให้เกิดแรงดันน้ำมันไหลย้อนกลับเข้าไปในถังพักน้ำมันผ่านบุชโฮลซ์รีเลย์เมื่อความเร็วน้ำมันที่ไหลผ่านเกินกว่าที่กำหนดบุชโฮลซ์รีเลย์จะส่งสัญญาณไปสั่งปลดเบรกเกอร์ของหม้อแปลงออกจากระบบ



รูปที่ 2.8 บูชโฮลซ์รีเลย์ (Buchholz relay) [11]



รูปที่ 2.9 การทำงานของบูชโฮลซ์รีเลย์ (Buchholz relay) [12]

8. เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer)

เทอร์โมมิเตอร์ เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับแสดงอุณหภูมิของหม้อแปลงในขณะที่ใช้งาน เช่น แสดงอุณหภูมิส่วนบนของฉนวนเหลวซึ่งมีตัวรับความร้อนจะอยู่ในฉนวนเหลวส่วนที่ร้อนที่สุด หรือใช้แสดงอุณหภูมิของขดลวดโดยใช้วิธีการเปรียบเทียบความร้อนได้จากการวัดค่ากระแสที่ไหลผ่าน เทอร์โมมิเตอร์จะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ชนิดที่อ่านค่าไม่มีหน้าสัมผัส และชนิดที่อ่านค่ามีหน้าสัมผัสที่นำไปใช้ได้เมื่ออุณหภูมิของหม้อแปลงมีค่าสูงกว่าค่าที่ปรับตั้งไว้จะไปสั่งให้รีเลย์ความร้อนทำงานซึ่งจะทำให้พัดลม (Fan) ทำงาน มีสัญญาณเตือน (Alarm) และการตัดวงจร (Trip) ตามลำดับตามอุณหภูมิที่ได้ปรับตั้งค่าไว้



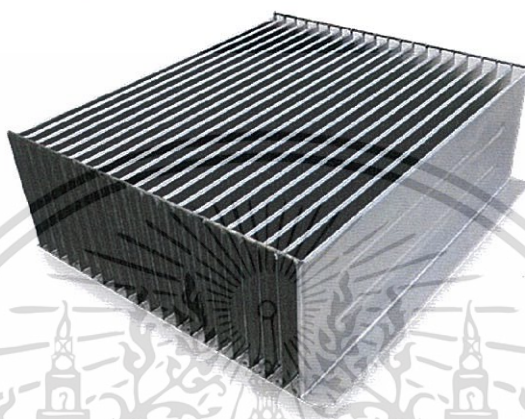
รูปที่ 2.10 เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer) [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในหอพักนักเรียน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. อุปกรณ์กระจายความร้อน (radiator)

อุปกรณ์กระจายความร้อน ได้แก่ ครีบ (fins) ของหม้อแปลงเป็นอุปกรณ์สำหรับรับภาระในการรับความร้อนจากน้ำมันเพื่อส่งต่อให้แก่อากาศรอบนอกทั่วไปแต่ละบริษัทย่อมมีการออกแบบเฉพาะที่แตกต่างกัน

โดยโครงสร้างภายในของครีบ (fins) กลวง เพื่อให้ น้ำมันไหลผ่านเข้าออกได้ตลอด ส่วนจำนวนครีบจะขึ้นอยู่กับขนาดของหม้อแปลงและการออกแบบซึ่งอาจคำนึงถึงกำลังของหม้อแปลงและขนาดที่เหมาะสมสำหรับสถานที่ติดตั้ง



รูปที่ 2.11 อุปกรณ์กระจายความร้อน (radiator) [5]

10. พัดลม (fan)

พัดลมเป็นอุปกรณ์ระบายความร้อนนอกจากการระบายความร้อนด้วยวิธีธรรมชาติซึ่งจะติดตั้งพัดลมบริเวณครีบ (fins) ของหม้อแปลง โดยหน้าที่ของพัดลมคือการลดอุณหภูมิของหม้อแปลงลงด้วยการระบายความร้อนที่ตัวถังให้เร็วขึ้น เป็นการยืดอายุการใช้งานของหม้อแปลงให้นานขึ้น หม้อแปลงที่ติดตั้งพัดลมจะสามารถเพิ่มอัตรากำลังรับภาระของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ 20-30 % ซึ่งการควบคุมพัดลมของหม้อแปลงนั้น กระทำได้ 2 วิธี คือควบคุมโดยอัตโนมัติ และวิธีเปิดปิดโดยคน



รูปที่ 2.12 พัดลม (fan) [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. ปั๊มน้ำมัน (oil circulating pump)

ปั๊มน้ำมัน เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สำหรับดันน้ำมันในหม้อแปลงให้หมุนเวียนเร็วขึ้น แทนที่จะอาศัยหลักการลอยตัวของของเหลวเมื่อมีอุณหภูมิสูง ซึ่งจะส่งผลให้หม้อแปลงสามารถระบายความร้อนได้ดีขึ้น



รูปที่ 2.13 ปั๊มน้ำมัน (oil circulating pump) [15]

12. บุชชิง (bushing)

บุชชิง ทำมาจากกระเบื้องเคลือบ (Porcelain) ทำหน้าที่เป็นฉนวนกั้นระหว่างขั้วไฟฟ้าแรงสูงแรงต่ำ กับตัวถังของหม้อแปลงซึ่งมีแกนนำอยู่ภายในสำหรับเชื่อมต่อสายวงจรไฟฟ้าภายในตัวหม้อแปลงกับภายนอก ในหม้อแปลงแต่ละลูกจะมีบุชชิงอยู่ 2 ชุด คือ บุชชิงแรงสูง และบุชชิงแรงต่ำ



รูปที่ 2.14 บุชชิงแรงสูง และบุชชิงแรงต่ำ [16,17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. อาร์กชิงฮอร์น (arcing horn)

อาร์กชิงฮอร์น หรืออุปกรณ์สำหรับล่อฟ้าทำหน้าที่เป็นทางผ่านของแรงดันไฟฟ้าในภาวะแรงดันเกิน (Surge) โดยเฉพาะที่เกิดจากฟ้าผ่าเพื่อป้องกันไม่ให้หม้อแปลงชำรุดเสียหาย โดยจะติดตั้งบริเวณบุชชิ่งของหม้อแปลงช่วยให้เกิดอาร์กที่อาร์กชิงฮอร์น แทนที่จะเกิดที่บุชชิ่ง ส่งผลให้ความเสียหายของบุชชิ่งเนื่องจากฟ้าผ่าลดลงและช่วยยืดอายุการใช้งานได้



รูปที่ 2.15 อาร์กชิงฮอร์น (arcing horn) [18]

2.3.2 ส่วนประกอบระหว่างภายในและภายนอก

1. ขั้วต่อสาย (terminal) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างขดลวดของหม้อแปลงกับสายไฟฟ้า โดยปกติแล้วหม้อแปลงขนาดใหญ่จะใช้แท่งทองแดง (bus bar) กับบุชชิ่งกระเบื้องเคลือบซึ่งอยู่บนถังของหม้อแปลง แล้วต่อเข้าระหว่างปลายขดลวดกับสายไฟฟ้าภายนอก หากเป็นหม้อแปลงขนาดเล็กจะใช้ขั้วต่อไฟฟ้าต่อเข้าระหว่างปลายขดลวดกับสายไฟฟ้าภายนอก



รูปที่ 2.16 ขั้วต่อสาย (terminal) [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แท้ปปรับแรงดัน (Tap changer)

แท้ปปรับแรงดันเป็นอุปกรณ์ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดหม้อแปลง ให้เพิ่มหรือลด เพื่อปรับให้ระดับแรงดันไฟฟ้าทางด้านผู้ใช้ไฟฟ้าคงที่หรืออยู่ในพิสัยตามต้องการ โดยแท้ปปรับแรงดันแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ แบบ Off-Load Tap Changer หรือชนิดเปลี่ยนแท้ป ขณะไม่จ่ายโหลดโดยการปรับแท้ปแต่ละครั้งต้องทำการดับไฟฟ้าก่อนที่จะเปลี่ยน และอีกชนิดคือแบบ On-Load Tap Changer หรือชนิดเปลี่ยนแท้ปขณะจ่ายโหลดอยู่ซึ่งการปรับแท้ปนั้นไม่ต้องดับไฟ ก่อนทำให้การจ่ายไฟฟ้ามีความต่อเนื่อง และช่วยแก้ไขปัญหาเรื่องแรงดันไฟฟ้าตกหรือแรงดันไฟฟ้าเกินซึ่งจะช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟให้มากยิ่งขึ้น โดยทั่วไปแท้ปปรับแรงดันของหม้อแปลงจะอยู่ทางด้านขดลวดแรงสูงเพราะมีจำนวนรอบของขดลวดมากและมีกระแสไหลน้อย ปกติแท้ปปรับแรงดันจะมี 5 แท้ป แต่ละแท้ปจะทำให้แรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนไปประมาณ 2.5%

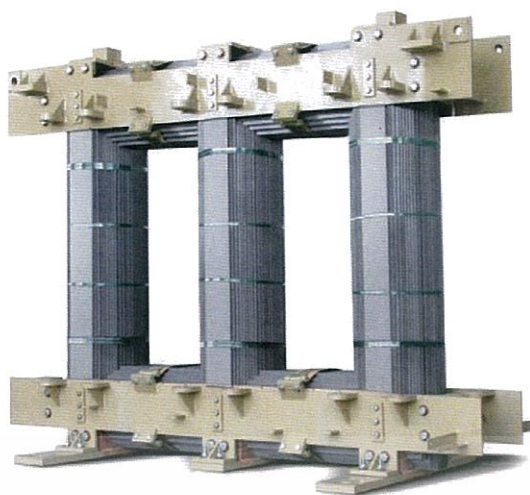


รูปที่ 2.17 แท้ปปรับแรงดัน (Tap changer) [3,19]

2.3.3 ส่วนประกอบที่เป็นวงจรแม่เหล็ก

1. แกนเหล็ก (Core)

แกนเหล็ก เป็นโครงสร้างหลักของหม้อแปลง ซึ่งทำหน้าที่เป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก เพื่อเหนี่ยวนำวงจรไฟฟ้าระหว่างขดลวดทางปฐมภูมิ และขดลวดทางทุติยภูมิ โดยแผ่นเหล็กที่ใช้ทำแกนเหล็กของหม้อแปลงจะมีส่วนผสมของสารซิลิกอนเพื่อรักษาความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบขดลวดไว้ ซึ่งแผ่นเหล็กแต่ละชั้นเป็นแผ่นเหล็กบางเรียงต่อกันหลายๆ ชั้น ทำให้มีความต้านทานสูงและช่วยลดการสูญเสียบนแกนเหล็กที่ส่งผลให้เกิดความร้อนหรือที่เรียกว่ากระแสไหลวนบนแกนเหล็ก(eddy current loss) แล้วยึดด้วยแคลมป์บน-ล่าง ประกอบขึ้นเป็นแกนเหล็กของหม้อแปลง ซึ่งมีการจัดวางแกนเหล็กของหม้อแปลงจำแนกออกเป็น 2 แบบ คือแบบ core type ที่จะมีเส้นแรงแม่เหล็กรวมอยู่ที่แกนเหล็กของหม้อแปลง และแบบ shell type ที่จะมีเส้นแรงแม่เหล็กอยู่รอบนอกขดลวดของหม้อแปลงซึ่งเหมาะกับหม้อแปลงที่มีกระแสพิสัยสูงๆ

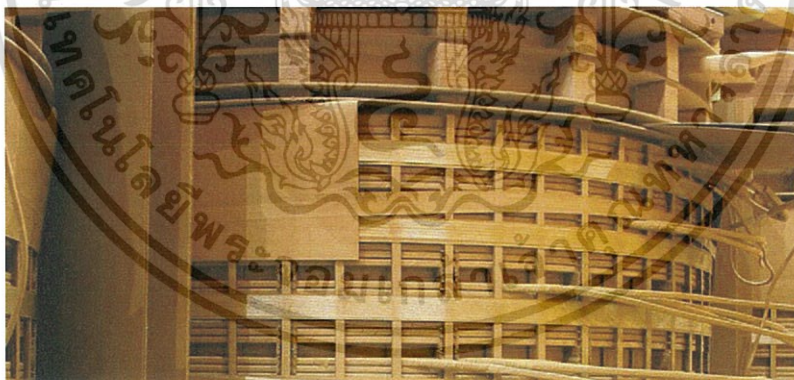


รูปที่ 2.18 แกนเหล็ก (Core) [20]

2.3.4 ส่วนประกอบที่เป็นวงจรไฟฟ้า

1. ขดลวด (Winding)

ขดลวดในหม้อแปลง จะมีขดลวดแรงสูง-ขดลวดแรงต่ำ (High voltage - Low Voltage Winding) ซึ่งแบ่งเป็นส่วนขดลวดปฐมภูมิ และขดลวดทุติยภูมิ ขดลวดเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในวงจรไฟฟ้า ซึ่งมีลักษณะเป็นลวดทองแดงกลมหรือแบนเคลือบน้ำยาหรือหุ้มด้วยกระดาษฉนวนพันรอบแกนเหล็กทำหน้าที่เป็นวงจรไฟฟ้าโดย ขดลวดปฐมภูมิจะรับพลังงานไฟฟ้ามาสร้างเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กเพื่อเหนี่ยวนำขดลวดทุติยภูมิให้ได้แรงดันตามต้องการ



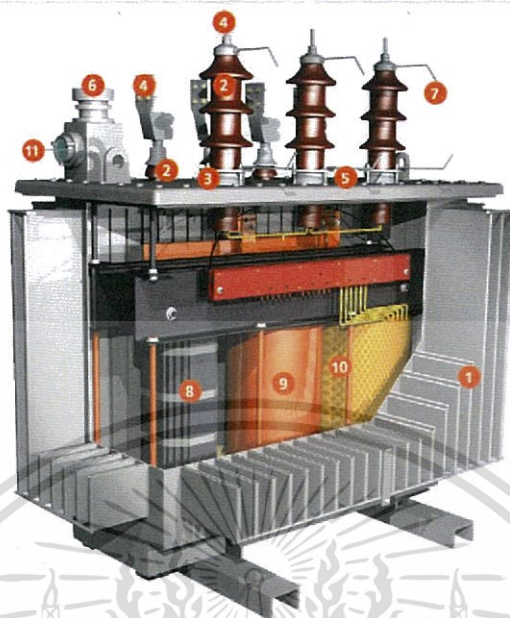
รูปที่ 2.19 ขดลวด (Winding) [21]

2. ฉนวน (Insulation)

ฉนวนในหม้อแปลงแบ่งเป็น 2 ประเภทได้แก่ฉนวนแข็ง เช่นกระดาษเพรสบอร์ด และฉนวนเหลว เช่นฉนวนเหลว โดยฉนวนจะมีหน้าที่ป้องกัน การเกิดการลัดวงจรในหม้อแปลงโดยไม่ให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างส่วนที่เป็นแกนเหล็กและส่วนที่เป็นขดลวดของหม้อแปลง และป้องกันการสัมผัสของขดลวดของหม้อแปลงในแต่ละชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.5 โครงสร้างที่สำคัญของหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 2.20 โครงสร้างที่สำคัญของหม้อแปลงไฟฟ้า [3]

โครงสร้างที่สำคัญของหม้อแปลงไฟฟ้ามีดังนี้

1. ตัวถัง (tank) และ ครีป (fin)
2. บุษชิงแรงสูงและบุษชิงแรงต่ำ
3. วัสดุที่ใช้ป้องกันการรั่วซึมของน้ำมัน
4. ขั้วต่อสาย (terminal) แรงสูงและแรงต่ำ
5. แท็ปปรับแรงดัน (tap changer)
6. อุปกรณ์ระบายความดัน (Pressure-Relief Device)
7. อาร์กชิงฮอร์น (Arcing horn)
8. แกนเหล็ก (Core)
9. ขดลวดแรงสูง (High voltage Winding)
10. ขดลวดแรงต่ำ (Low Voltage Winding)
11. เครื่องวัดระดับน้ำมัน (oil level gauge)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ฉนวนภายในหม้อแปลง (Insulation)

ฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 2 ชนิดได้แก่

2.4.1 ฉนวนแข็ง [23]

ฉนวนแข็งนอกจากจะทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าแล้วบางส่วนยังจะต้องทำหน้าที่ยึดหรือรับแรงกลอันเกิดจากน้ำหนักของโครงสร้าง หรือแรงกลไดนามิกส์ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าอีกด้วย โดยฉนวนแข็งที่ใช้หลักๆ ในหม้อแปลงไฟฟ้าคือกระดาษอัดแรง (Press Board)

กระดาษอัดแรงเป็นวัสดุประเภทเซลลูโลสหลายชั้นที่มาจากกระดาษที่ถูกบีบอัดด้วยแรงดันและความร้อน โดยขึ้นรูปเป็นวัสดุแข็งที่มีความหนาแน่นสูง โดยเพอร์สบอร์ดถือเป็นพอลิเมอร์อินทรีย์ที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางกลอย่างดี เนื่องจากเซลลูโลสเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีการซ้อนทับกันไปมาทำให้มีลักษณะเป็นรูพรุน จึงทำให้มีความไวต่อความชื้น และอุณหภูมิ โดยไฟเบอร์ (Fiber) แต่ละเส้นในเซลลูโลส ประกอบด้วย พอลิเมอร์เรียงตัวขนานกัน โดยพอลิเมอร์แต่ละเส้นที่ขนานกันจะยึดติดกันด้วยไฮโดรเจน เมื่อโมเลกุลของน้ำสัมผัสกับผิวหน้าของเซลลูโลสไฟเบอร์ จะทำให้เกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างอะตอมออกซิเจนกับไฮโดรเจน ทำให้กระดาษฉนวนสามารถดูดซับความชื้นได้ดี



รูปที่ 2.21 กระดาษอัดแรง

2.4.2 ฉนวนเหลว [24]

ฉนวนเหลวเป็นฉนวนทางไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ยิมนำมาใช้เป็นหลักการออกแบบระบบฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ฉนวนเหลวที่อยู่ในหม้อแปลงจะมีหน้าที่หลักในการเป็นฉนวนของหม้อแปลง และถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงออกสู่สิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ น้ำมันที่ใช้ในหม้อแปลงยังช่วยป้องกัน การเกิดปฏิกิริยาเคมีภายในหม้อแปลง ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังส่วนใหญ่จะใช้น้ำมันแร่ เป็นฉนวนเหลวภายในหม้อแปลง ฉนวนเหลวที่ใช้ในหม้อแปลงมีหลายประเภท แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงน้ำมันแร่ เอสเทอร์ธรรมชาติ และน้ำมันพืช ดังนี้

1. น้ำมันแร่

น้ำมันแร่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกิดจากการกลั่นน้ำมันดิบ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่มีประโยชน์และต้นทุนต่ำ น้ำมันแร่จึงเป็นฉนวนเหลวที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมหม้อแปลง น้ำมันแร่เป็นของเหลวโปร่งแสงและไม่มีสี

ประเภทต่างๆ ของไฮโดรคาร์บอนของน้ำมันแร่ ได้แก่

- แอลเคนแบบโซ่ตรง
- แอลเคนแบบกิ่ง
- พาราฟิน
- อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

น้ำมันแร่ที่ใช้สำหรับหม้อแปลง มีอยู่ 2 ประเภทหลักๆ ซึ่งมาจากกระบวนการกลั่นน้ำมันที่แตกต่างกัน

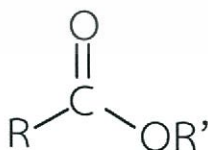
น้ำมันพาราฟิน ที่ได้มาจากน้ำมันดิบที่มีปริมาณของ n-paraffins มากกว่าแนฟทาโนคโดยเกิดขึ้นตามธรรมชาติ น้ำมันพาราฟิน มีจุดไหลเทค่อนข้างสูงและอาจต้องเติมสารบางอย่างเพื่อลดจุดไหลเท

น้ำมันแนฟทา ที่ได้มาจากน้ำมันดิบที่มีปริมาณของ n-paraffins ต่ำมาก(หรือไม่มี) น้ำมันแนฟทามีจุดไหลเทต่ำโดยไม่ต้องเติมสารใดๆ เพื่อลดจุดไหลเท และน้ำมันแนฟทามีลักษณะขี้มากกว่าน้ำมันพาราฟิน

น้ำมันแร่ใหม่ที่มีการผลิตเพื่อให้สอดคล้องกับ IEC 60296 [25] หรือ ASTM D3487 [26] เพราะ น้ำมันแร่ถูกใช้เป็นระยะเวลาที่ยาวนาน ฐานข้อมูลขนาดใหญ่ของข้อมูลที่สามารถตีความหมายของการเปลี่ยนแปลงลักษณะของฉนวนและทำให้คาดการณ์ความผิดปกติของหม้อแปลง IEC 60422 [27] เป็นเครื่องมือที่ดีในการประเมินคุณภาพของฉนวนน้ำมันที่ใช้ในหม้อแปลง

2. เอสเทอร์ธรรมชาติ

ปฏิกิริยาของแอลกอฮอล์และ กรดไขมัน ทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลระหว่างเอสเทอร์ แสดงดังรูป 2.22



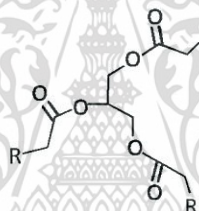
รูปที่ 2.22 การเชื่อมโยงเอสเทอร์ [24]

ในรูปที่ 2.22 O แทน ออกซิเจน, C แทนคาร์บอน , R และ R' แทนโซ่คาร์บอน ซึ่งอาจจะเหมือนหรือต่างกัน เส้นเดี่ยวแสดงให้เห็นถึงพันธะเดี่ยวและสองเส้นหมายถึงพันธะคู่



รูปที่ 2.23 โครงสร้างของเอสเทอร์ธรรมชาติ

3. น้ำมันปาล์ม



รูปที่ 2.24 โครงสร้างของน้ำมันปาล์ม [24]

ได้จากการบีบอัดเนื้อผล (Fruit pulp) ของปาล์มน้ำมัน ส่วนผนังผลชั้นกลางซึ่งมีน้ำประมาณ 45-50% องค์ประกอบส่วนใหญ่ คือกรดปาล์มมิติก (Palmitic acid) แต่ยังมีกรดไขมันไม่อิ่มตัว ได้แก่ กรดโอเลอิก และกรดลิโนเลอิกด้วยเช่นกัน น้ำมันปาล์มอีกชนิดหนึ่งได้จากการบีบอัดเมล็ด เรียกว่า palm kernel oil มีองค์ประกอบคล้ายน้ำมันมะพร้าวมากจึงสามารถนำมาใช้แทนกันได้ น้ำมันปาล์มยังถูกใช้เป็นส่วนผสมมากในอุตสาหกรรมการทำสบู่ เทียน มากา린 และใช้เป็นน้ำมันปรุงอาหาร คุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันปาล์มเปรียบเทียบกับ น้ำมันชนิดอื่นแสดงดังตารางที่ 1.3

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางความร้อนของน้ำมันปาล์มเทียบกับน้ำมันพืชชนิดอื่นๆ [32]

คุณสมบัติ	น้ำมันปาล์ม	น้ำมันเมล็ดทานตะวัน	น้ำมันข้าวโพด
ค่าความคงทนต่อแรงดัน(kV)	46	27.8	12.2
ค่าเปอร์มิตติวิตี	3.10	3.11	3.13
ค่าความชื้น(ppm)	535.3	546.2	561.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และไฟฟ้าของฉนวนเหลวชนิดน้ำมันแร่และเอสเทอร์ [23]

Properties		Mineral Oil (Nynas)	น้ำมันพีช	Mineral Oil
Electrical Properties	Unit	10 GBN Mineral Oil	FR3	BIOTEMP
Breakdown Strength IEC 60156 2.5mm	kV	>70	56 (ATSM 1816)	>75
Dielectric dissipation factor at 90°C	-	<0.02	0.005	0.014
Permittivity at 20°C	-	2.2	3.2	3.2

2.5 คุณสมบัติของฉนวน

ฉนวนในระบบไฟฟ้ากำลัง มีลักษณะสำคัญที่เป็นตัวชี้บ่งถึงคุณสมบัติ และคุณภาพของไดอิเล็กตริก 4 ประการ คือ

2.5.1 ความต้านทานของฉนวน (Resistance) [23]

ฉนวนไฟฟ้าเป็นสารที่นำไฟฟ้าได้น้อยมากหรือไม่นำไฟฟ้าเลยเมื่อมีสนามไฟฟ้ามากระทำต่อฉนวนโดยฉนวนที่สมบูรณ์จริงๆ เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าจะไม่มีเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ นั่นคือจะไม่มีสภาพนำไฟฟ้าอยู่เลย หรือกล่าวอีกแบบหนึ่งก็คือ สารฉนวนนั้นมีค่าความต้านทานสูงเป็นอนันต์ แต่ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในทางปฏิบัตินั้นมักจะนำกระแสแต่มีค่าน้อยมาก เมื่อนำฉนวนไปคั่นระหว่างอิเล็กโตรดที่บ่อนแรงดันกระแสตรงเป็นเวลานานพอจะมีกระแสไหลผ่านฉนวนนั้นแต่น้อยเรียกว่ากระแสรั่ว หรือกระแสค้ำ กระแสรั่วที่ไหลผ่านฉนวนที่แบ่งออกเป็นสองทาง คือ หนึ่งไหลผ่านในฉนวน เนื่องจากฉนวนมีสภาพนำไฟฟ้าอยู่บ้างดังกล่าวแล้ว ส่วนอีกทางหนึ่งไหลผ่านตามผิวฉนวนเนื่องจากผิวฉนวนมีสภาพนำไฟฟ้า เนื่องจากสิ่งเปื้อนและความชื้นที่ผิว ด้วยเหตุนี้การวัดความต้านทานฉนวนจึงแยกเป็นความต้านทานเชิงปริมาตร (Volume resistance) และความต้านทานเชิงผิว (Surface resistance)

2.5.2 เพอร์มิตติวิตี [22]

เพอร์มิตติวิตีเป็นค่าตัวเลขที่บอกให้ทราบว่าฉนวนดังกล่าวจะมีค่าคาปาซิแตนซ์เป็นกี่เท่าของฉนวนสุญญากาศ โดยกำหนดให้ฉนวนที่พิจารณาและฉนวนสุญญากาศอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ใช้อิเล็กโตรดเดียวกันหรืออาจจะพิจารณาค่า ϵ เป็นอัตราส่วนดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิด

ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของวัสดุคำนวณได้จาก

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \text{ F/m}$$

(2.1)

เมื่อ ϵ คือค่าเปอร์มิตติวิตี้ของวัสดุ

ϵ_0 คือค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสุญญากาศ = 8.854×10^{-12} F/m

ϵ_r คือค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของวัสดุ

ค่า ϵ_r สามารถที่จะนิยามได้จากค่าอัตราส่วนระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ใช้วัสดุจำเพาะเป็นฉนวน (C) ต่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ใช้สุญญากาศ (C_0) เป็นฉนวนชั้นระหว่างอิเล็กโทรด

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (2.2)$$

เมื่อ C คือค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ใช้วัสดุจำเพาะเป็นฉนวน

C_0 คือค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ใช้สุญญากาศเป็นฉนวน

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสนามไฟฟ้า และค่าความเข้มสนามไฟฟ้า

$$D = \epsilon E = \epsilon_0 \epsilon_r E \text{ (C/m}^2\text{)} \quad (2.3)$$

ตารางที่ 2.2 ค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของวัสดุ [23]

วัสดุ	ϵ_r	วัสดุ	ϵ_r	วัสดุ	ϵ_r	วัสดุ	ϵ_r
Vacuum	1	Polyethylene	2.25	Polyvinyl chloride	3.18	Germanium	16
Air(1 atm)	1.00059	Benzene	2.28	Plexiglas	3.4	Glycerin	42.5
Air(100 atm)	1.0548	Mica	3-6	Glass	5-10	Water	80.4
Teflon	2.1	Mylar	3.1	Neoprene	6.7	Strontium titanate	310

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 แพกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก [22]

การใช้งานฉนวนในระบบไฟฟ้ากำลังนั้น ค่าแพกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่จะต้องพิจารณา ค่าแพกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกจะเป็นดัชนีชี้วัดตัวหนึ่งของอายุการใช้งานฉนวน ค่าแพกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

1. ค่าความสูญเสียเนื่องจากการที่ฉนวนไม่ได้เป็นฉนวนบริสุทธิ์ เมื่อฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้ามีผลให้เกิดสภาพนำไฟฟ้าขึ้นมา ทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากมีกระแสรั่วไหลฉนวน
2. ค่าความสูญเสียเนื่องจากพฤติกรรมกรรมที่มีขั้วโดยสภาวะปกตินั้นโมเลกุลของฉนวนจะดำรงอยู่อย่างอิสระ เมื่อฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า ประจุบวกและลบของโมเลกุลจะแยกออกจากกันและประพัตตัวเสมือนไดโพลที่มีขนาดของประจุเท่ากันแต่มีขั้วตรงกันข้ามแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าจะกระทำต่อไดโพลให้เกิดการปรับทิศทางให้วางตัวอยู่ในแนวของสนามไฟฟ้า ในกรณีที่มีฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับไดโพลจะต้องเกิดการเรียงตัวสลับที่ไปมาตลอดเวลาซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียในรูปของความร้อน
3. ค่าความสูญเสียเนื่องจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายในเนื้อฉนวน การเกิดดิสชาร์จบางส่วน(Partial discharge) ภายในเนื้อฉนวนจะเกิดขึ้นได้ในกรณีที่เนื้อฉนวนไม่ได้เป็นเนื้อเดียวสมบูรณ์ทั้งหมด (Nonhomogeneous) ภายในเนื้อฉนวนอาจจะมีโพรงอากาศหรือวัสดุแปลกปลอมรวมอยู่ด้วย โพรงอากาศหรือวัสดุแปลกปลอมจะมีค่าความจุไฟฟ้าและค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ต่ำกว่าเนื้อฉนวนเมื่อฉนวนได้รับแรงดันไฟฟ้ามักจะเกิดการเบรกดาวน์ขึ้นภายในโพรงอากาศหรือวัสดุแปลกปลอม กระแสดิสชาร์จจะอยู่ในโพรงอากาศเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนชนกับผนังโพรงเกิดปฏิกิริยาเคมีและความร้อนขึ้น การเกิดดิสชาร์จบางส่วนดังกล่าวภายในเนื้อฉนวนจะทำให้อายุการใช้งานของฉนวนลดลง

2.5.4 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน (Dielectric Strength) [22]

ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน หมายถึงค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric Field Strength) สูงสุดที่ฉนวนนั้นจะสามารถทนอยู่ได้ โดยไม่เกิดความเสียหาย หรือเกิดการเบรกดาวน์ หรือทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ลักษณะมิติของอิเล็กโตรด, ลักษณะสมบัติของไดอิเล็กตริก, คุณสมบัติของแรงดันที่ฉนวนนั้นได้รับ, ระยะเวลาที่ฉนวนได้รับแรงดันไฟฟ้า โดยปกติไดอิเล็กตริกแข็งจะทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ได้สูงกว่าไดอิเล็กตริกเหลว การเบรกดาวน์ในฉนวนเหลวสภาพการฉนวนจะกลับสู่สภาพปกติได้หลังจากเบรกดาวน์ผ่านไปแล้ว แต่ในฉนวนแข็งเกิดเบรกดาวน์แล้วสภาพการฉนวนจะเสียไป ทำให้ไม่สามารถใช้งานเพื่อการฉนวนได้อีก

2.6 อนุภาคในฉนวนเหลว

อนุภาคที่ปะปนอยู่ภายในฉนวนเหลวแสดงการเสื่อมสภาพของหม้อแปลง อายุของหม้อแปลง บอกรถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง ซึ่งอนุภาคที่เกิดขึ้นอาจมีสาเหตุมาความเสื่อมของกระดาษฉนวน การสลายตัวของโลหะ และฝุ่นผงภายในหม้อแปลง อนุภาคเหล่านี้อาจส่งผลให้เกิดความเสียหาย ภายในหม้อแปลง เช่น ความเสื่อมของฉนวนเหลว ประสิทธิภาพในการระบายความร้อนลดลง ไดอิเล็กทริกเบรกดาวน์ต่ำลง โดยในแต่ละอนุภาคจะมีความรุนแรงที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของแต่ละอนุภาค

ด้วยเหตุนี้เราจึงต้องมีการตรวจสอบอนุภาคในฉนวนเหลว เพื่อทำการวิเคราะห์สุขภาพของหม้อแปลง เมื่อพบปัญหาจะได้มีการแก้ไขปัญหาได้อย่างทันท่วงที เพราะเมื่อใดที่หม้อแปลงไฟฟ้า ชัดข้อง เมื่อนั้นจะเกิดผลกระทบต่อผู้ใช้นั้นที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบอุตสาหกรรมจะทำให้เกิดการสูญเสียในระบบธุรกิจมูลค่าสูง

อนุภาคเจือปนที่สามารถพบเจอได้ในหม้อแปลงมีสามารถเกิดได้จากหลายๆ ส่วนประกอบ ภายในของหม้อแปลง เช่น ทองแดงเป็นวัสดุที่สามารถนำมาใช้งานที่หลากหลาย เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการใช้งาน เช่น มีความแข็งแรง มีสภาพความเป็นตัวนำ และความต้านทานการกัดกร่อน ในหม้อแปลงไฟฟ้าทองแดงถูกนำมาใช้ในการทำขดลวด โดยกระดาษที่ทำหน้าที่หุ้มขดลวดทองแดงเพื่อเป็นฉนวนระหว่างชั้นของขดลวดระหว่างเฟส และเหล็กที่อาจเกิดจากจากกัดกร่อนของตัวถัง

2.7 สนามไฟฟ้า (Electric field) และ ความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field stress) [22]

2.7.1 ความหมาย

สนามไฟฟ้า (electric field) คือค่าสมมุติที่ไม่สามารถมองเห็นได้ แต่สามารถตรวจจับได้ในระดับอนุภาคของประจุไฟฟ้า ซึ่งเกิดขึ้นในกลุ่มของอนุภาคที่มีประจุ แล้วเกิดการแลกเปลี่ยนกันของโพตอนเสมือน ทำให้เกิดแรงกระทำกับอนุภาคบริเวณโดยรอบประจุไฟฟ้า บริเวณที่ใกล้ประจุที่สุดจะมีความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงสุด และน้อยลงเมื่อระยะนั้นห่างออกไป หน่วยของสนามไฟฟ้าคือนิวตันต่อคูลอมบ์ หรือโวลต์ต่อเมตร

ความเครียดสนามไฟฟ้าคือ ค่าแรงที่ประจุต่างๆ กระทำต่อประจุ Q ถ้าคิดเป็นแรงต่อหนึ่งหน่วยประจุ โดยค่านั้นจะขึ้นอยู่กับ เฟอร์มิตติวิตี หรือค่าคงตัวไดอิเล็กทริก

2.7.2 วิธีหาค่าสนามไฟฟ้า

สนามไฟฟ้าจะมีค่ามากหรือน้อยอาจแสดงหรือวัดในรูปของแรงที่เกิดขึ้นตามกฎของคูลอมบ์ (Coulomb's Law)

การหาสนามไฟฟ้าจากประจุไฟฟ้าต้นกำเนิดสนาม Q นิยาม ค่าสนามไฟฟ้า หมายถึง " แรงที่เกิดขึ้นบนประจุ +1 คูลอมบ์ ที่เอาไปวางในสนามไฟฟ้านั้น " สนามไฟฟ้าจากประจุ Q ใดๆ มีค่าดังนี้

$$E = \frac{KQ}{r^2} \quad (2.4)$$

เมื่อ E = สนามไฟฟ้าที่เกิดจากประจุ Q (N/C)

Q = ประจุแหล่งกำเนิดที่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้า หน่วยคูลอมบ์ (C)

r = ระยะจากแหล่งกำเนิดถึงจุดที่ต้องการรู้ค่าสนามไฟฟ้า หน่วย เมตร (m)

โดย ทิศของสนามไฟฟ้า ที่เกิดจากจุดประจุต้นกำเนิดสนาม Q

หากมีประจุ Q_1 และ Q_2 ขนาดเล็กเป็นจุดวางห่างกันระยะ r จะเกิดแรงกระทำต่อกันในแนวทิศต่อเชื่อมโยงระหว่างสองประจุนั้น แรงที่เกิดขึ้นคำนวณได้จาก

$$F_{Q_1 \rightarrow Q_2} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{Q_2 Q_1 \vec{r}}{r^3} = \frac{Q_2 Q_1 \vec{r}}{4\pi\epsilon r^3} \quad (2.5)$$

เมื่อ \vec{r} คือ เวกเตอร์ตำแหน่งสัมพันธ์ของประจุ Q_2 เทียบกับ Q_1 ซึ่งมีเวกเตอร์หน่วย $\hat{r} = \frac{\vec{r}}{r}$

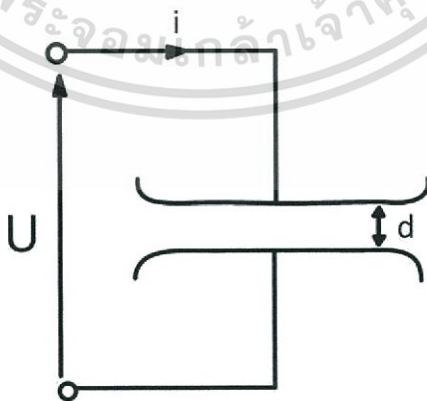
ϵ คือ เปรอริมิตติวิตี้ของตัวกลาง มีค่าเท่ากับ $\epsilon_r \epsilon_0$

ϵ_0 คือ เปรอริมิตติวิตี้ของสุญญากาศ หรือที่ว่าง มีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m

ϵ_r คือ เปรอริมิตติวิตี้ของตัวกลาง (ไม่มีหน่วย)

แบ่งตามลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้า จะแบ่งได้ 3 แบบ นั่นคือ

1. สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform field)



รูปที่ 2.25 อิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หมายถึงสนามไฟฟ้าเท่ากันทุกจุด ดังเช่นในช่องระหว่างอิเล็กโทรดระนาบถึงระนาบ ซึ่งคำนวณได้จากความสัมพันธ์

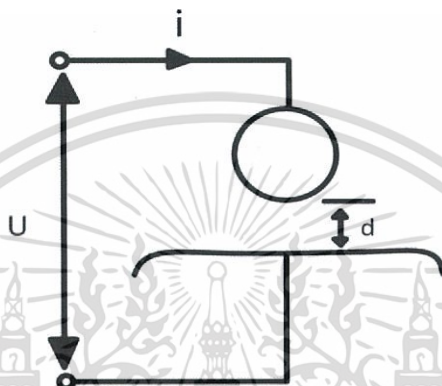
$$E = \frac{U}{d} \quad (2.6)$$

เมื่อ U คือ แรงดันที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโทรด

d คือระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด

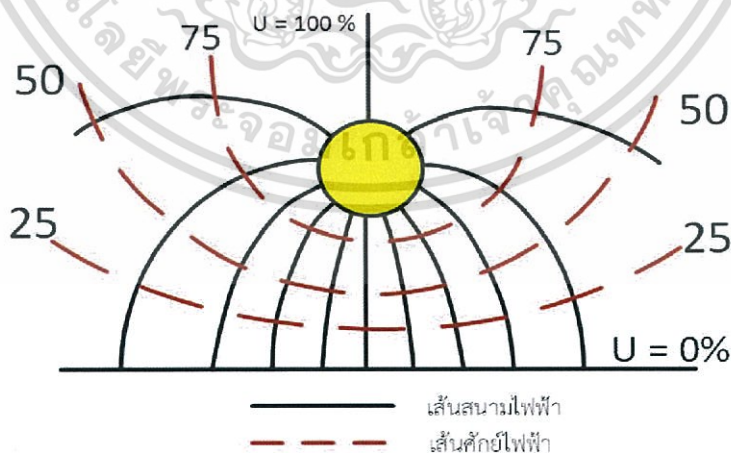
E คือความเครียดสนามไฟฟ้า ณ จุดใดๆ ระหว่างอิเล็กโทรด

2. สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (slightly nonuniform field)



รูปที่ 2.26 อิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย

สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้น ความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆ จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโทรด ที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย ดังเช่น อิเล็กโทรดในรูปที่ 2.32 ถ้าเส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า จะได้ดังรูป 2.33



รูปที่ 2.27 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า

ในรูปที่ 2.33 จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโทรดทรง

กลมซึ่งคำนวณได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{\max} = \frac{U}{d\eta^*} \quad (2.7)$$

เมื่อ η^* คือแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า มีนิยามว่า

$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}} \quad 0 < \eta^* \leq 1 \quad (2.8)$$

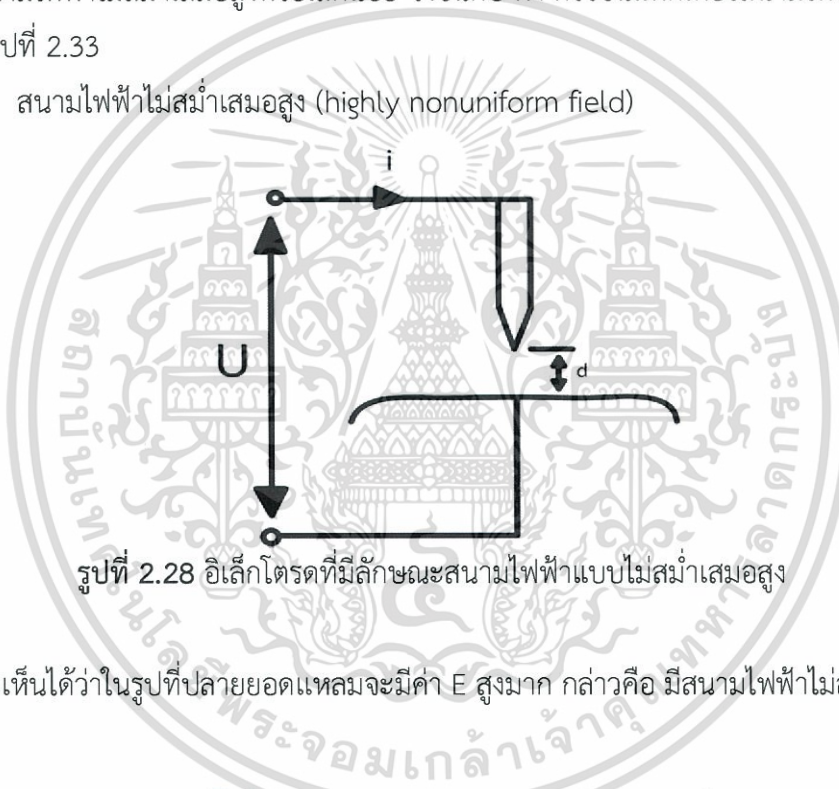
โดยที่ E_{av} คือค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ U/d

สมการคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ของฉนวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยคือ

$$E_b = \frac{U_b}{d \cdot \eta^*} \quad (2.9)$$

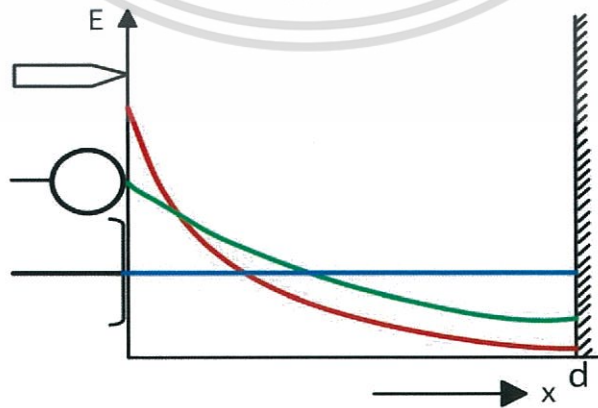
สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงหรือเล็กน้อย จึงขึ้นกับ ค่า ดรรชนีแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า η^* นั้นเอง ดังรูปที่ 2.33

3. สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (highly nonuniform field)



รูปที่ 2.28 อิเล็กโตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง

จะเห็นได้ว่าในรูปที่ปลายยอดแหลมจะมีค่า E สูงมาก กล่าวคือ มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงนั้นเอง



รูปที่ 2.29 สนามไฟฟ้ากระจายเปรียบเทียบของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3 วิธีหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้า

คือแรงต่อหนึ่งหน่วยประจุ เป็นแรงในสนามไฟฟ้า มีความสัมพันธ์ ดังสมการ

$$E = \frac{D}{\epsilon} \quad (2.10)$$

โดยกฎของคูลอมบ์ จึงเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ว่า

$$F = QE \quad (2.11)$$

$$\bar{J} = \sigma \bar{E} \quad (2.12)$$

เมื่อ \bar{J} คือความหนาแน่นของกระแส นำ เป็นเวกเตอร์ มีหน่วยเป็น A/m^2

σ คือสภาพความนำของตัวนำ มีหน่วยเป็น $S/m = \text{siemens/meter} = 1/\rho$

เมื่อ ρ คือ สภาพต้านทาน หน่วยเป็น $\Omega-m$

2.8 การเกิดเบรกดาวนในฉนวนเหลว [22]

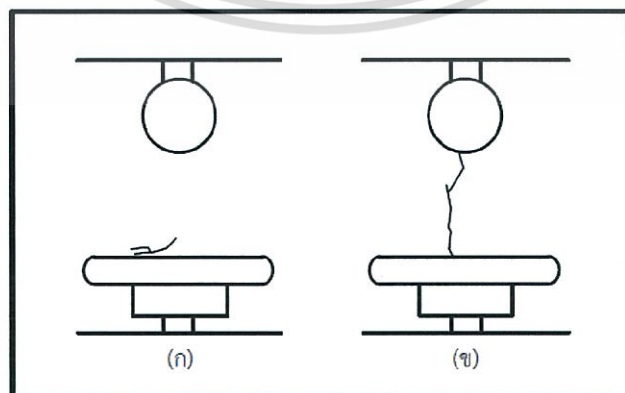
ฉนวนเหลวสามารถระบายความร้อนได้ดี ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวสามารถพิจารณาได้หลากหลายรูปแบบ ถ้าพิจารณาจากโครงสร้าง

2.8.1 กลไกเบรกดาวนของฉนวนเหลวเชิงการค้ำ

การเบรกดาวนเชิงการค้ำ คือ ฉนวนที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่ไม่บริสุทธิ์ อาจเกิดได้จากสาเหตุดังนี้

1. เบรกดาวนเนื่องจากอนุภาคเจือปนของแข็ง

สิ่งเจือปนของแข็งที่ปะปนอยู่ในฉนวนเหลวอาจเป็นอนุภาคตัวนำ ไฟเบอร์หรืออนุภาคละออง หากอนุภาคอยู่บนสนามไฟฟ้าจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วทางไฟฟ้า และแรงทางไฟฟ้าซึ่งส่งผลให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูงสุดหรืออาจจะกระทำต่ออนุภาคในทิศตรงกันข้ามเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าต่ำ โดยทำให้อนุภาคเรียงตัวกันเป็นสะพานเชื่อมต่อระหว่างอิเล็กโทรดทำให้เกิดเบรกดาวนดังรูป



รูปที่ 2.30 การเรียงตัวของอนุภาคระหว่างช่องว่าง (Gap) (ก) อนุภาคก่อนป้อนแรงดัน

(ข) การจัดเรียงตัวเชื่อมระหว่างอิเล็กโทรดของอนุภาคหลังจากป้อนแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เบรกดาวน์เนื่องจากฟองแก๊ส

ปริมาณของฟองแก๊สขึ้นอยู่กับสถานะความดันและอุณหภูมิ ในฉนวนเหลวฟองแก๊สอาจเกิดได้จากการเสื่อมของฉนวนหรือฉนวนที่มีคุณภาพต่ำ ในบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง เช่น บริเวณปลายแหลมของอิเล็กโทรด รวมไปถึงเกิดจากปัจจัยภายนอก คือการเติมฉนวนเหลวในภาชนะทำให้มีแก๊สบริเวณผิวอิเล็กโทรด การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความดัน และการชนของไอออนกับอิเล็กตรอนจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีภายในฉนวนเหลว และอาจจะเกิดจากผลของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่บริเวณผิวของอิเล็กโทรดที่มีความเครียดของสนามไฟฟ้าสูง ฟองแก๊สเมื่อได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าจะทำการลดพลังงานศักย์ไฟฟ้าลงโดยการขยายตัวตามแนวของสนามไฟฟ้า เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าของฟองแก๊สมีค่าเท่ากับความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของแก๊สจะทำให้เกิดดิสชาร์จผ่านฟองแก๊ส ทำให้เกิดการเบรกดาวน์ได้ในที่สุด

3. กลไกการเกิดเบรกดาวน์จากหยดของเหลวเจือปน

การหยดของเหลวในฉนวนเหลวสามารถทำให้เกิดการเบรกดาวน์ได้ เนื่องมาจากการเปลี่ยนรูปร่างของหยดของเหลวเจือปนที่มีการยืดออกตามแนวของสนามไฟฟ้า ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนเหลวที่ปลายทั้งสองข้างของหยดของเหลวมีค่าสูงขึ้น เมื่อสูงเกินค่าวิกฤตจะนำไปสู่การเกิดดิสชาร์จบางส่วน เกิดโพรงแก๊ส และเบรกดาวน์ในที่สุด



รูปที่ 2.31 การยืดออกของหยดน้ำในฉนวนเหลวภายใต้สนามไฟฟ้าจนนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์

2.8.2 กลไกเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวบริสุทธิ์

การเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวบริสุทธิ์สามารถเกิดได้จากหลายสาเหตุ คือ เกิดจากการชนกันของอิเล็กตรอนกับอนุภาคในสนามไฟฟ้า หรือเป็นผลมาจากความร้อน โดยเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าสูง กระแสไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดจะมีการไหลโดยการปล่อยอิเล็กตรอนจากแคโทดด้วยสนามไฟฟ้ามากกว่าการปล่อยด้วยความร้อน การเบรกดาวน์จึงเกิดจากการเคลื่อนที่ของไอออนบวกที่มาสู่แคโทด ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณแคโทดเพิ่มสูงขึ้นพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวแคโทดได้ โดยอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเหล่านี้ จะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าที่มากจากการป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรด อิเล็กตรอนจึงมีการเคลื่อนที่ไปยังแอโนด ทำให้มีการชนกับโมเลกุลของฉนวนเหลวและสูญเสียพลังงานไปในกระบวนการดังกล่าว ถ้าอิเล็กตรอนเหล่านี้ถูกเร่งจนมีพลังงานสูงพอที่จะชนกับโมเลกุลแล้วจะทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนและก่ออะวาลานซ์ นำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ในที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบการทดสอบและสร้างชุดทดสอบ

บทนี้นำเสนอการออกแบบและการสร้างชุดทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบจากอนุภาคเจือปนในน้ำมันแร่ น้ำมันเอสเทอร์ และน้ำมันปาล์ม พร้อมทั้งวิเคราะห์ผลจากการทดสอบต่อไป

การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของฉนวนเหลวเมื่อมีอนุภาคเจือปน

1. การวัดความชื้นของฉนวนเหลว
2. การทดสอบวัดค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเหลว (ϵ_r) และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) ของฉนวนเหลว
3. การทดสอบการเกิดเบรกดาวนด์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านฉนวนเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
4. การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านฉนวนเหลวเพื่อศึกษาพฤติกรรมของอนุภาคเจือปนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ

3.1. การออกแบบสร้างชุดทดสอบ

3.1.1 การออกแบบชุดอิเล็กโตรด

ออกแบบชุดทดสอบ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม Solid Works 2013 x64 Edition โดยบรรจุน้ำมันใส่ suitable cell อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC-60156 ซึ่งมี electrode 2 แบบ คือ Spherical electrodes และ Partially spherical electrodes เมื่อเติมอนุภาคเจือปน 3 ชนิด ได้แก่ กระจกแดง และเหล็ก ซึ่งเปรียบเสมือนส่วนประกอบของหม้อแปลงเพื่อทดสอบอิทธิพลของอนุภาคเจือปนต่อสนามไฟฟ้า



รูปที่ 3.1 แบบจำลองอิเล็กโตรดแบบ Partially spherical electrodes และ Spherical electrodes

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การเตรียมฉนวนเหลวและอนุภาคเจือปนสำหรับการทดสอบ

3.2.1 ชนิดของฉนวนเหลว และอนุภาค

3.2.1.1 ชนิดของฉนวนเหลว

1. น้ำมันแร่
2. น้ำมันเอสเทอร์
3. น้ำมันพาล์ม

3.2.1.2 ชนิดของอนุภาคเจือปน

1. เซลลูโลส
2. ทองแดง
3. เหล็ก

3.2.2 ขั้นตอนการเตรียมฉนวนเหลว

1. ตวงฉนวนเหลวที่ต้องการทดสอบลงในบีกเกอร์ตามที่ต้องการ



รูปที่ 3.2 บีกเกอร์ที่บรรจุฉนวนเหลวที่ใช้ทดสอบ
โดย 1.น้ำมันแร่ 2.น้ำมันพาล์ม 3.เอสเทอร์ธรรมชาติ

2. นำบีกเกอร์ที่บรรจุฉนวนเหลวมาอบที่อุณหภูมิ 60 °C ความดันอากาศ 200 mbar



รูปที่ 3.3 ตู้อบ ติดตั้งเครื่องดูดอากาศเพื่อควบคุมอุณหภูมิและความดันอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 ขั้นตอนการเตรียมอนุภาคเจือปน

1. เตรียมอนุภาคเจือปนมา 3 ชนิด



รูปที่ 3.4 เตรียมอนุภาคเจือปนใส่ลงในกระดาษฟอยด์

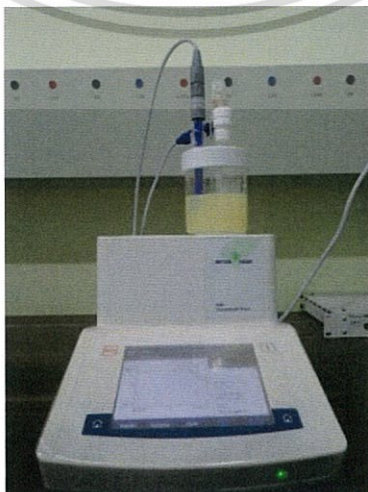
2. ชั่งอนุภาคเจือปนตามขนาดที่ต้องการเพื่อนำไปใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.5 เครื่องชั่งมวลสาร ทศนิยม 4 ตำแหน่ง เพื่อชั่งอนุภาคเจือปน

3.3 การทดสอบความชื้นในฉนวนเหลว

3.3.1 เครื่องทดสอบ



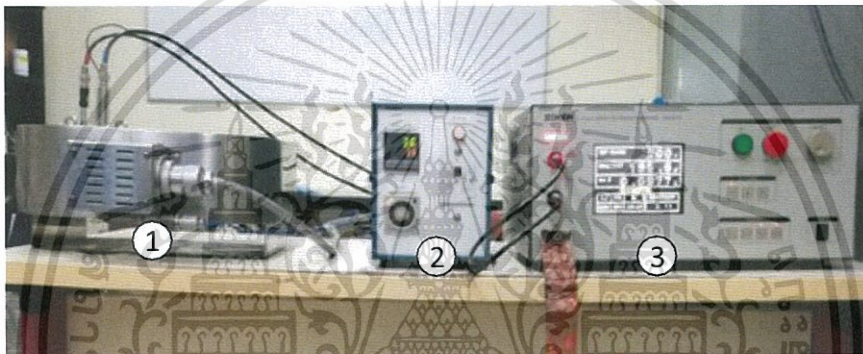
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 3.6 เครื่องวัดความชื้น (Compact Karl's Fister Titrator) ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 วิธีการทดสอบ

1. นำตัวอย่างน้ำมันที่ต้องการทดสอบมาไม่เกิน 5ml.
2. วัดน้ำหนักของปริมาณน้ำมันดังกล่าว เป็นหน่วยกรัมเพื่อใส่ข้อมูลในเครื่องวัดความชื้น
3. กดปุ่มเพื่อเริ่มทำการวัด พร้อมกับการฉีดตัวอย่างน้ำมันดังกล่าวลงในเครื่องวัด
4. บันทึกค่าความชื้นที่วัดได้

3.4 การทดสอบเพื่อศึกษาผลของความเป็นฉนวนของฉนวนเหลวโดยทดสอบค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเหลว (ϵ_r) และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$)

3.4.1 วงจรทดสอบ



รูปที่ 3.7 การต่อวงจรเพื่อหาค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) โดย 1. ที่ควบคุมอุณหภูมิชุดทดสอบ 2. ควบคุมอุณหภูมิ 3. อุปกรณ์วัดประจุและค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก

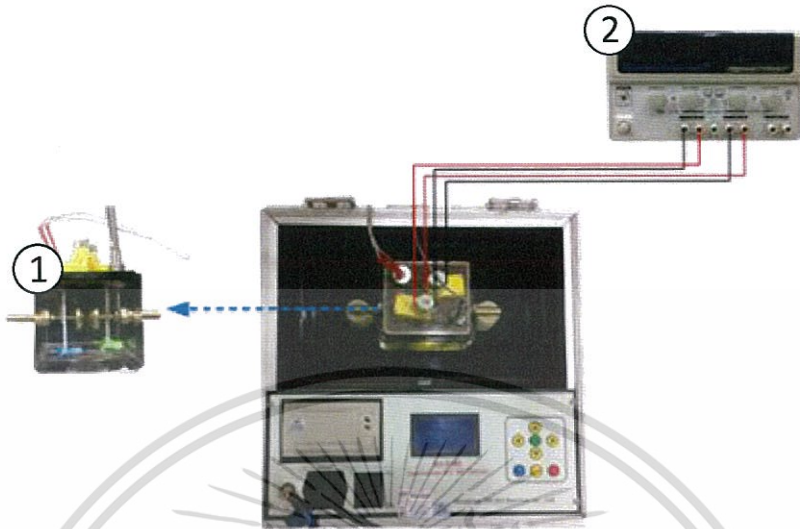
3.4.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. ต่อวงจรตามรูปที่ 3.7
2. นำฉนวนเหลวใส่ลงในกระบอกของ Liquid Electrode เพื่อทำการทดสอบ
3. นำ Liquid Electrode ที่บรรจุฉนวนเหลวแล้วใส่ในชุดทดสอบชุดใดชุดหนึ่ง
5. เปิดเครื่อง Temperature Adjust เพื่อปรับอุณหภูมิที่ต้องการทดสอบ โดยต้องการวัดค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าของฉนวนเหลวในช่วงอุณหภูมิ 25 - 90 °C โดยเพิ่มอุณหภูมิขึ้นทีละ 5 °C
6. บันทึกค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) และค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเหลว (ϵ_r) จากเครื่องทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 25 -90 °C โดยบรรทุกค่าทุกๆ 5 °C
7. หลังจากบันทึกค่าที่ต้องการเสร็จ ให้ทำการทดลองซ้ำโดยเพิ่มอุณหภูมิไปยังค่าใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การทดสอบเพื่อศึกษาผลของความเป็นฉนวนของฉนวนเหลวโดยทดสอบเบรกดาวน์

3.5.1 วงจรทดสอบ



รูปที่ 3.8 การต่อวงจรเพื่อหาแรงดันเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดย 1.ชุดทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC60156[31] 2.แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับควบคุมไบพัต

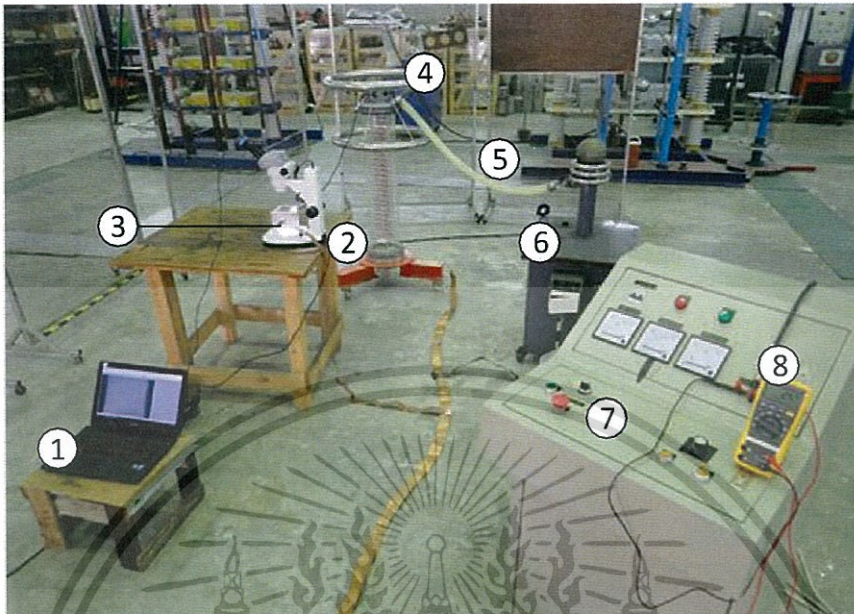
3.5.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. ทำการทดสอบค่าแพกเจอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) ดังหัวข้อ 3.3
2. จัดบันทึกค่า $\tan\delta$ ที่ได้เพื่อตรวจสอบคุณภาพของฉนวนน้ำมันก่อนนำไปทดสอบเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
3. ต่อวงจรทดสอบดังรูปที่ 3.8
4. นำฉนวนเหลวที่ได้จากการทดสอบค่า $\tan\delta$ ใส่ในชุดทดสอบเบรกดาวน์ที่ได้ออกแบบมา
5. เติมอนุภาคเจือปนลงในฉนวนเหลวที่ทำการทดสอบ โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของอนุภาคดังกล่าวที่ 0.001 0.003 และ 0.005 เปอร์เซ็นต์
6. ทดสอบเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC60156[31]
7. บันทึกผลที่ได้จากการทดลอง

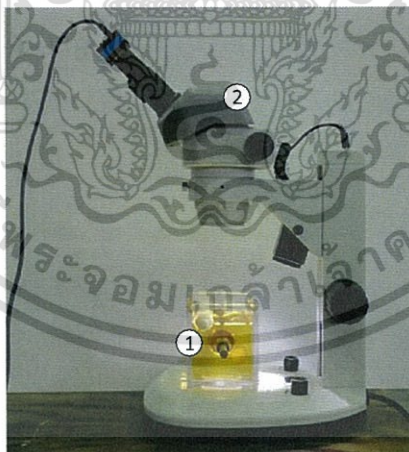
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อศึกษาการเรียงตัวของอนุภาคเจือปน

3.6.1 วงจรทดสอบ



รูปที่ 3.9 การต่อวงจรเพื่อทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อศึกษาการเรียงตัวของอนุภาคเจือปน โดย 1.คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก 2.กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ 3.ชุดทดสอบ 4.โวลเตจดีไวเดอร์ 5.ตัวต้านทานน้ำ 6.หม้อแปลงทดสอบ 7.ชุดควบคุมแรงดัน 8.โวลเตจดีไวเดอร์



รูปที่ 3.10 ชุดทดสอบและกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ โดย 1.ชุดทดสอบ 2.กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. นำฉนวนเหลวที่ได้จากการทดสอบค่า $\tan\delta$ ใส่ในชุดทดสอบเบรกดาวน
2. ต่อยางตามรูปที่ 3.9
3. ต่อกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอเข้ากับคอมพิวเตอร์ ดังรูป 3.9
4. ทำการขึ้นแรงดัน 5kv
5. อัดวิดีโอบันทึกผลหลังจากขึ้นแรงดันถึง 5 kV เป็นเวลา 1800 วินาที เพื่อดูพฤติกรรมของอนุภาคเจือปนในฉนวนเหลว
6. บันทึกผลการทดสอบ หลังจากนั้นทำข้อ 2 – 5 ใหม่ โดย ขึ้นแรงดันที่ 10 kV และ 15 kV ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบแบ่งออกเป็น 3 การทดสอบ ดังนี้

1. การวัดค่าความชื้นของฉนวนเหลวก่อนการทดลองในหัวข้อ 4.2 - 4.4
2. การทดสอบวัดค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเหลว (ϵ_r) และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสีย-เปล่าไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) ของฉนวนเหลว
3. การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านฉนวนเหลว (น้ำมันแร่ น้ำมันเอสเทอร์ และน้ำมันปาล์ม) โดยมีอนุภาคเจือปน (ผงเหล็ก ทองแดง และเซลลูโลส)
4. การศึกษาพฤติกรรมการณ์เรียงตัวของอนุภาคเจือปนภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย

4.1 ผลจากการวัดค่าความชื้นของฉนวนเหลวก่อนทำการทดลอง

ตารางที่ 4.1 ความชื้นของฉนวนเหลวแต่ละชนิด

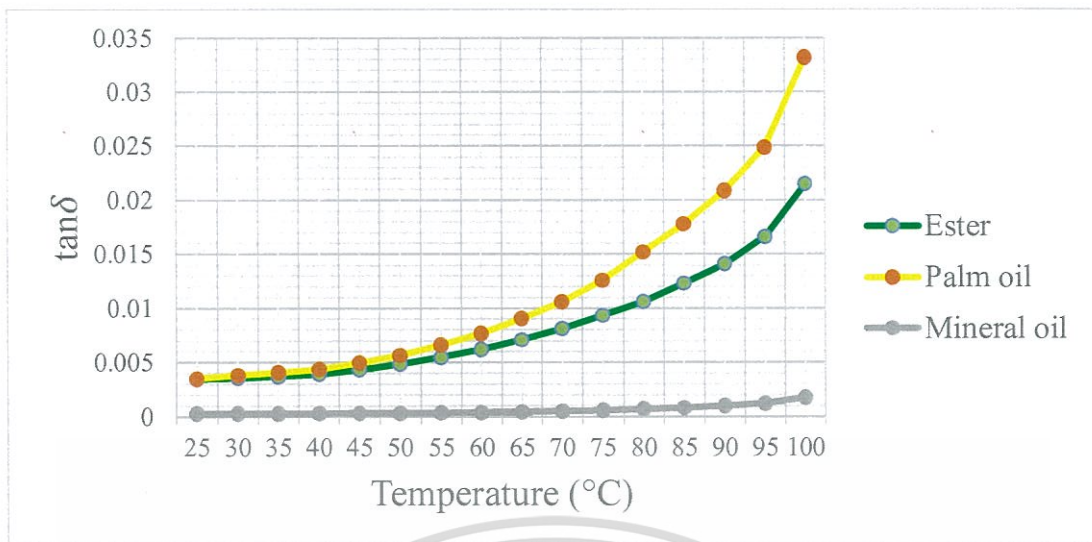
ชนิดของฉนวนเหลว	ค่าความชื้น (ppm)
น้ำมันแร่	17
น้ำมันเอสเทอร์	170
น้ำมันปาล์ม	223

4.2 ผลการทดสอบวัดค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) ของฉนวนเหลว

ตารางที่ 4.2 แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของฉนวนเหลว

อุณหภูมิ	แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) ของฉนวนเหลว (%)		
	น้ำมันแร่	น้ำมันเอสเทอร์	น้ำมันปาล์ม
25	0.000275	0.00347	0.00351
30	0.000279	0.00355	0.00382
35	0.000285	0.00369	0.00407
40	0.000294	0.00391	0.00438
45	0.000307	0.00432	0.00497
50	0.000315	0.00483	0.00567
55	0.000328	0.00546	0.00662
60	0.000375	0.00621	0.00768
65	0.000433	0.00708	0.00906
70	0.000496	0.00811	0.01060
75	0.000578	0.00934	0.01260
80	0.000684	0.01060	0.01520
85	0.000813	0.01230	0.01780
90	0.000974	0.01410	0.02090
95	0.001200	0.01660	0.02490
100	0.001760	0.02150	0.03320

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\tan \delta$ กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของฉนวนเหลวทั้ง 3 ชนิด

4.3 ผลการทดสอบค่าแรงดันเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านฉนวนเหลว

ตารางที่ 4.3 แรงดันเบรกดาวนของฉนวนเหลว

อุณหภูมิ	ชนิด อนุภาค	ความเข้มข้น (%)											
		น้ำมันแร่				น้ำมันเอสเทอร์				น้ำมันปาล์ม			
		ไม่มี	0.00	0.00	0.00	ไม่มี	0.00	0.00	0.00	ไม่มี	0.00	0.00	0.00
อุณหภูมิ ห้อง	เซลลูโลส	50.9	48.9	46.4	42.7	52	51	49.1	45	49.5	47.5	44.4	40.7
	เหล็ก	50.9	44.3	40.3	36.1	52	47.5	43.2	38.6	49.5	42.2	38.5	33.4
	ทองแดง	50.9	39.4	34.2	28.9	52	41.3	36	31.9	49.5	37.5	32	26
50 °C	เซลลูโลส	56.3	52.3	49.6	45.6	56	55.2	52.1	48.4	53.2	50.5	47.7	44
	เหล็ก	56.3	48.9	46.4	38.8	56	53.1	48.1	42	53.2	46.8	44.1	36.6
	ทองแดง	56.3	43.5	38.1	32.9	56	47.9	40.6	35.9	53.2	40.2	35.9	30.3
70 °C	เซลลูโลส	71.8	60.4	55.4	51.3	70	62.7	59.6	55.7	64.7	58.4	53	48.8
	เหล็ก	71.8	58.8	51.2	45.8	70	62.1	56.8	49.2	64.7	57.3	48.8	43.1
	ทองแดง	71.8	48.8	43.7	37	70	52.9	48.4	40.7	64.7	46.3	41.1	34.6
90 °C	เซลลูโลส	74.8	67.3	64.3	59.7	77	70.8	67.6	63	70.6	64.3	61.2	56
	เหล็ก	74.8	65.1	58.5	53.7	77	68.3	61.4	57.7	70.6	62.3	56.3	50.1
	ทองแดง	74.8	61.9	54	46.5	77	65.2	57.3	50.8	70.6	58.4	50.7	42.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการศึกษาพฤติกรรมการเรียงตัวของอนุภาคเจือปนภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย

ตารางที่ 4.4 การเรียงตัวของอนุภาคเหล็กในน้ำมันแร่ที่แรงดัน 5 kV

0.005 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.025 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.050 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800

ตารางที่ 4.5 การเรียงตัวของอนุภาคเหล็กในน้ำมันแร่ที่แรงดัน 10 kV

0.005 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.025 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.050 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 การเรียงตัวของอนุภาคเหล็กในน้ำมันแร่ที่แรงดัน 15 kV

0.005 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.025 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.050 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800

ตารางที่ 4.7 การเรียงตัวของอนุภาคทองแดงในน้ำมันแร่ที่แรงดัน 5 kV

0.005 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.025 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.050 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 การเรียงตัวของอนุภาคทองแดงในน้ำมันแร่ที่แรงดัน 10 kV

0.005 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.025 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.050 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800

ตารางที่ 4.9 การเรียงตัวของอนุภาคทองแดงในน้ำมันแร่ที่แรงดัน 15 kV

0.005 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.025 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.050 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 การเรียงตัวของอนุภาคเซลลูโลสในน้ำมันแร่ที่แรงดัน 5 kV




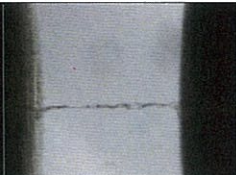
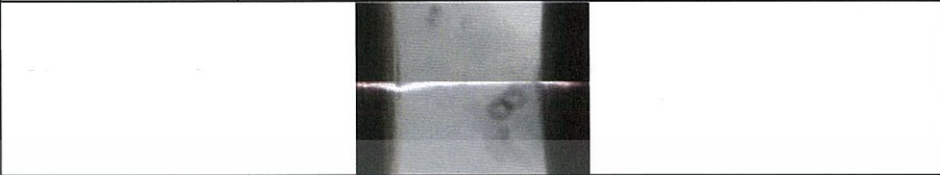
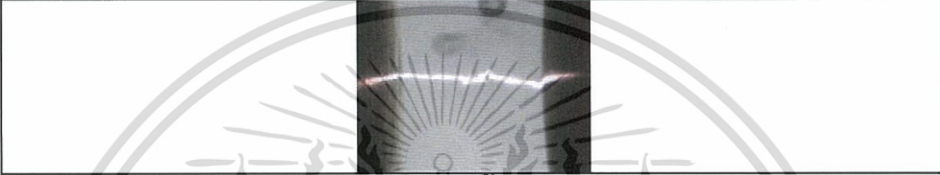
0.005 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.025 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.050 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800

ตารางที่ 4.11 การเรียงตัวของอนุภาคเซลลูโลสในน้ำมันแร่ที่แรงดัน 10 kV






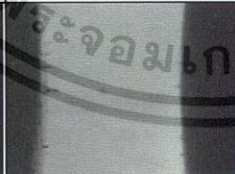

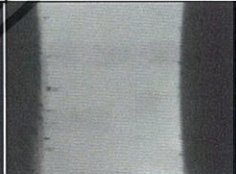
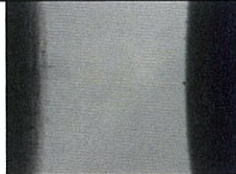


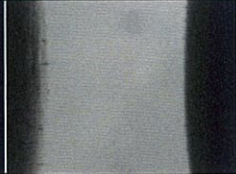
0.005 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.025 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.050 กรัม				
	เกิดการเบรกดาวนหลังจากขึ้นแรงดันได้ 12 วินาที			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 การเรียงตัวของอนุภาคเซลลูโลสในน้ำมันแร่ที่แรงดัน 15 kV

0.005 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.025 กรัม				
	เกิดการเบรกตาวนขณะขึ้นแรงดันได้ 12.76 kV			
0.050 กรัม				
	เกิดการเบรกตาวนขณะขึ้นแรงดันได้ 13.24 kV			

ตารางที่ 4.13 การเรียงตัวของอนุภาคเหล็กในน้ำมันเอสเทอร์ที่แรงดัน 5 kV

0.005 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.025 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.050 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 การเรียงตัวของอนุภาคเหล็กในน้ำมันเอสเทอร์ที่แรงดัน 10 kV

0.005 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.025 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.050 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800

ตารางที่ 4.15 การเรียงตัวของอนุภาคเหล็กในน้ำมันเอสเทอร์ที่แรงดัน 15 kV

0.005 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.025 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.050 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 การเรียงตัวของอนุภาคทองแดงในน้ำมันเอสเทอร์ที่แรงดัน 5 kV

0.005 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.025 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.050 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800

ตารางที่ 4.17 การเรียงตัวของอนุภาคทองแดงในน้ำมันเอสเทอร์ที่แรงดัน 10 kV

0.005 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.025 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.050 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.18 การเรียงตัวของอนุภาคทองแดงในน้ำมันเอสเทอร์ที่แรงดัน 15 kV


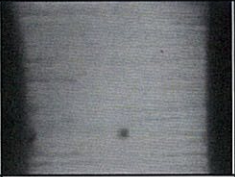
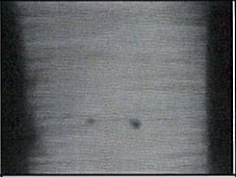
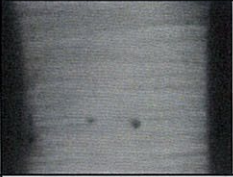

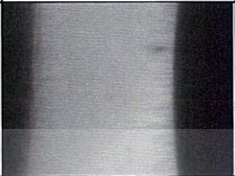
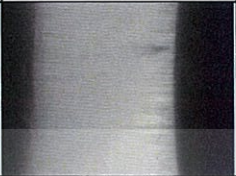



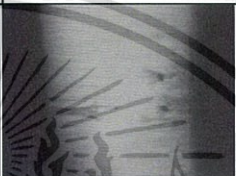
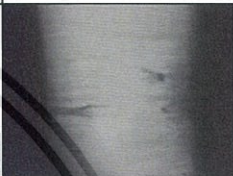
0.005 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.025 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.050 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800

ตารางที่ 4.19 การเรียงตัวของอนุภาคเซลลูโลสในน้ำมันเอสเทอร์ที่แรงดัน 5 kV










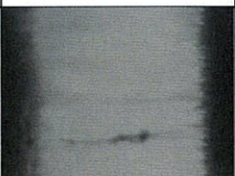
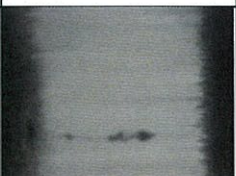
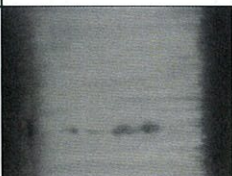
0.005 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.025 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.050 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.20 การเรียงตัวของอนุภาคเซลลูโลสในน้ำมันเอสเทอร์ที่แรงดัน 10 kV

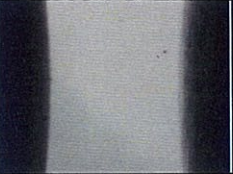



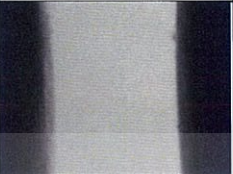
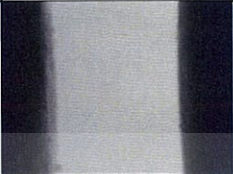
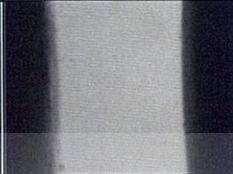





0.005 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.025 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.050 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800

ตารางที่ 4.21 การเรียงตัวของอนุภาคเซลลูโลสในน้ำมันเอสเทอร์ที่แรงดัน 15 kV








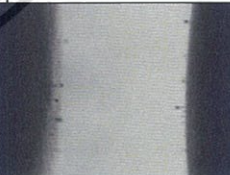
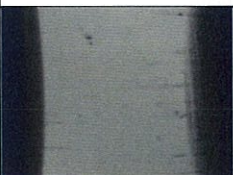
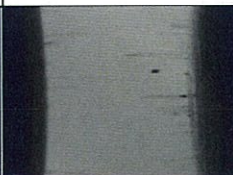

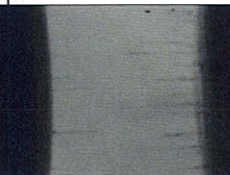
0.005 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.025 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.050 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.22 การเรียงตัวของอนุภาคเหล็กในน้ำมันปาล์มที่แรงดัน 5 kV


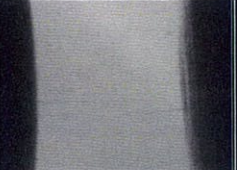
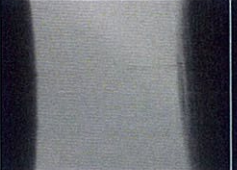
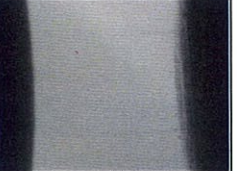

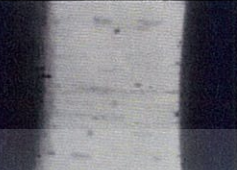
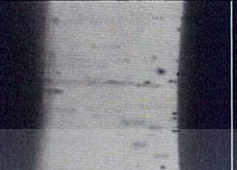
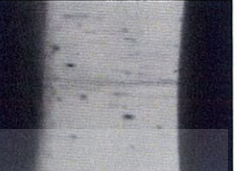

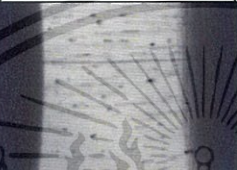
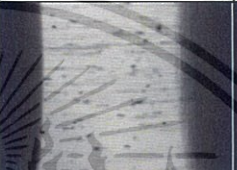

0.005 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.025 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.050 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800

ตารางที่ 4.23 การเรียงตัวของอนุภาคเหล็กในน้ำมันปาล์มที่แรงดัน 10 kV






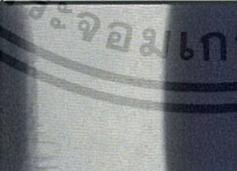
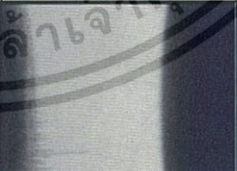





0.005 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.025 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.050 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.24 การเรียงตัวของอนุภาคเหล็กในน้ำมันปาล์มที่แรงดัน 15 kV

0.005 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.025 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.050 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800

ตารางที่ 4.25 การเรียงตัวของอนุภาคทองแดงในน้ำมันปาล์มที่แรงดัน 5 kV

0.005 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.025 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.050 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.26 การเรียงตัวของอนุภาคทองแดงในน้ำมันปาล์มที่แรงดัน 10 kV





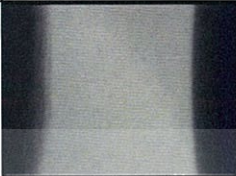


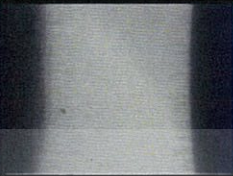

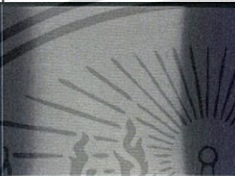

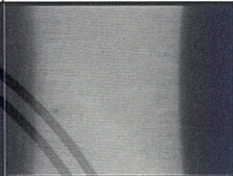
0.005 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.025 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.050 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800

ตารางที่ 4.27 การเรียงตัวของอนุภาคทองแดงในน้ำมันปาล์มที่แรงดัน 15 kV






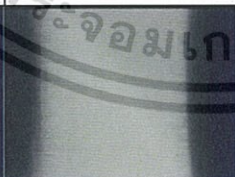

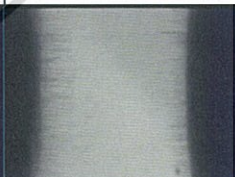


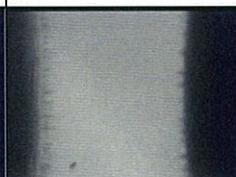
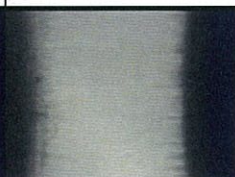
0.005 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.025 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.050 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.28 การเรียงตัวของอนุภาคเซลลูโลสในน้ำมันปาล์มที่แรงดัน 5 kV

0.005 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.025 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.050 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800

ตารางที่ 4.29 การเรียงตัวของอนุภาคเซลลูโลสในน้ำมันปาล์มที่แรงดัน 10 kV

0.005 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.025 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.050 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.30 การเรียงตัวของอนุภาคเซลลูโลสในน้ำมันปาล์มที่แรงดัน 15 kV

0.005 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.025 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800
0.050 กรัม				
	วินาทีที่ 0	วินาทีที่ 600	วินาทีที่ 1200	วินาทีที่ 1800

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

จากการทดสอบศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันแร่ เอสเทอร์ธรรมชาติ และน้ำมันปาล์มที่มีอนุภาคเจือปน สามารถสรุปออกมาได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.1.1 การทดสอบค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเหลว (ϵ_r) และ ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) ตามมาตรฐาน IEC 60247 เพื่อทำการประเมินคุณภาพของฉนวนเหลวเบื้องต้นก่อนทำการทดสอบ

1) ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์

จากการทดสอบฉนวนเหลวแต่ละชนิด พบว่า ที่อุณหภูมิห้อง ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของ เอสเทอร์ธรรมชาติ และน้ำมันปาล์ม มีค่าอยู่ในช่วง 3.1 – 3.3 ส่วนค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของน้ำมันแร่ มีค่าอยู่ในช่วง 2 – 2.2 ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

2) ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก

จากการทดสอบฉนวนเหลวแต่ละชนิด พบว่า

2.1) ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกเรียงจากมากไปน้อย ได้แก่ น้ำมันปาล์ม เอสเทอร์ธรรมชาติ และน้ำมันแร่ ตามลำดับในทุกช่วงอุณหภูมิ ซึ่งค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกที่ อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส มีค่าน้อยกว่า 0.05 เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60247 สามารถนำไปทดสอบศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่อได้

2.2) เมื่ออุณหภูมิฉนวนเหลวทั้ง 3 ชนิด มีค่าเพิ่มขึ้น ตั้งแต่ อุณหภูมิห้องถึง 90 °C ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก จะมีค่าเพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูง

3) ค่าคาปาซิแตนซ์ และเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์

จากการทดสอบฉนวนเหลวแต่ละชนิด พบว่า ค่าคาปาซิแตนซ์ และเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ ของน้ำมันแร่ เอสเทอร์ธรรมชาติ และน้ำมันปาล์ม มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจาก 25 องศาเซลเซียส ถึง 100 องศาเซลเซียส

5.1.2 การทดสอบค่าแรงดันเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

5.1.2.1 แรงดันเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ขณะไม่มีอนุภาคเจือปน

ค่าแรงดันเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ในน้ำมันแร่ เอสเทอร์ธรรมชาติ และ น้ำมันปาล์ม ขณะไม่มีอนุภาคเจือปน ที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า

- 1) ที่อุณหภูมิห้อง ค่าแรงดันเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เรียงจากมากไปน้อย ได้แก่ น้ำมันแร่ น้ำมันปาล์ม และเอสเทอร์ธรรมชาติ ตามลำดับ
- 2) ที่อุณหภูมิ 50 °C ค่าแรงดันเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เรียงจากมากไปน้อย ได้แก่ น้ำมันปาล์ม น้ำมันแร่ และเอสเทอร์ธรรมชาติ ตามลำดับ
- 3) ที่อุณหภูมิ 70 °C ค่าแรงดันเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เรียงจากมากไปน้อย ได้แก่ น้ำมันแร่ เอสเทอร์ธรรมชาติ และน้ำมันปาล์ม ตามลำดับ
- 4) ที่อุณหภูมิ 90 °C ค่าแรงดันเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เรียงจากมากไปน้อย ได้แก่ เอสเทอร์ธรรมชาติ น้ำมันแร่ และน้ำปาล์ม ตามลำดับ
- 5) เมื่ออุณหภูมิฉนวนเหลวทั้ง 3 ชนิด มีค่าเพิ่มขึ้น ตั้งแต่ อุณหภูมิห้องถึง 90 °C ค่าแรงดันเบรกดาวน์ด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ จะมีค่าสูงขึ้น

5.1.2.2 แรงดันเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ขณะมีอนุภาคเจือปน

ค่าแรงดันเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ในน้ำมันแร่ เอสเทอร์ธรรมชาติ และ น้ำมันปาล์ม ขณะมีอนุภาคเจือปน ได้แก่ อนุภาคทองแดง อนุภาคเหล็ก และอนุภาคเซลลูโลส ที่เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น 0.001% , 0.003% และ 0.005% ของอุณหภูมิทั้ง 4 อุณหภูมิ พบว่า

- 1) ในทุกช่วงอุณหภูมิ ค่าแรงดันเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เรียงจากมากไปน้อย ได้แก่ เอสเทอร์ธรรมชาติ น้ำมันแร่ และ น้ำมันปาล์ม ตามลำดับ
- 2) เมื่อเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของอนุภาคเจือปนเพิ่มขึ้น ค่าแรงดันเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ จะลดลง
- 3) น้ำมันปาล์ม มีค่าแรงดันเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ต่ำกว่า เอสเทอร์ธรรมชาติในทุกกรณี
- 4) เมื่ออุณหภูมิฉนวนเหลวทั้ง 3 ชนิด มีค่าเพิ่มขึ้น ตั้งแต่ อุณหภูมิห้องถึง 90 °C ค่าแรงดันเบรกดาวน์ด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ จะมีค่าสูงขึ้น
- 5) อนุภาคเจือปนที่มีผลทำให้แรงดันเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับต่ำสุด ไปสูงสุด เมื่อเทียบอนุภาคทั้ง 3 ชนิด คือ อนุภาคทองแดง อนุภาคเหล็ก และ อนุภาคเซลลูโลส

5.1.3 การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านฉนวนเหลวเพื่อศึกษาพฤติกรรมของอนุภาคเจือปนด้วยกลีโกลเจอร์รอสันแบบสเตอริโอ

เมื่อทำการทดสอบความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 5kV , 10kV และ 15 kV เป็นเวลา 30 นาทีในแต่ละกรณี ในน้ำมันแร่ เอสเทอร์ธรรมชาติ และน้ำมันปาล์ม ขณะมีอนุภาคเจือปนเป็นอนุภาคทองแดง อนุภาคเหล็ก และอนุภาค ที่เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น 0.001% , 0.003% และ 0.005% พบว่า เมื่อแรงดันที่ป้อนและเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของอนุภาคเจือปนเพิ่มขึ้น การเรียงตัวของอนุภาคทั้ง 3 ระหว่างอิเล็กโตรด จะมีความหนาแน่นมากขึ้น

5.1.3.1 น้ำมันแร่

ลักษณะการเรียงตัวของทั้งสามอนุภาคมีลักษณะคล้ายกัน โดยมีการจัดเรียงตัวเป็นเส้นระหว่างอิเล็กโตรด

5.1.3.2 น้ำมันเอสเทอร์และน้ำมันปาล์ม

- 1) ลักษณะการเรียงตัวของอนุภาคเซลลูโลส คือ เกาะทั่วทั้งพื้นผิวอิเล็กโตรด จากนั้นค่อยหนาแน่นขึ้นทั้งสองฝั่งจนใกล้กันมากขึ้น
- 2) ลักษณะการเรียงตัวของอนุภาคทองแดง คือ เกิดเส้นอนุภาค 1-2 เส้น วิ่งไปมา ระหว่างอิเล็กโตรด เมื่อมีความหนาแน่นมากขึ้น เส้นนั้นจะหยุดอยู่ที่จุดใดจุดหนึ่งบนอิเล็กโตรด โดยส่วนใหญ่จะเกิดบริเวณกลางอิเล็กโตรดพอดี ซึ่งสามารถทำให้เกิดการเบรกดาวนขึ้นได้
- 3) ลักษณะการเรียงตัวของอนุภาคเหล็ก คือ อนุภาควิ่งลอยอยู่ในฉนวนเหลว ระหว่างอิเล็กโตรด เมื่อมีความหนาแน่นมากขึ้นจะค่อยๆขยายขนาดจนใกล้อิเล็กโตรดทั้งสองด้าน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรหาเครื่องมือที่ใช้ทำการวัดค่าแพกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ขณะมีอนุภาคเจือปนได้ เพื่อให้เกิดการวิเคราะห์ผลปัจจัยที่มีต่อการเบรกดาวนในฉนวนเหลวที่ถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น

2) ควรศึกษาปัจจัยทางด้านรูปร่างการเรียงตัวของอนุภาคเจือปนเพิ่มเติม เนื่องจากลักษณะการเรียงตัวต่างกัน อาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ค่าแรงดันเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับต่างกัน

3) นอกจากการวัดความชื้นในฉนวนเหลว ควรควบคุมความชื้นในอนุภาคเจือปนที่เติมลงไป ในฉนวนเหลว เพื่อเป็นตัวแปรที่ควบคุมและสามารถวิเคราะห์ปัจจัยได้ถูกต้องมากขึ้น

4) ศึกษาเพิ่มเติมเรื่องการใช้หัวอิเล็กโตรดชนิดอื่นๆ เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่เกิดขึ้น

5) ควรทำการทดสอบในวัน เวลาและสถานที่ที่ใกล้เคียงกัน เพื่อลดผลของความแตกต่างของ

ปัจจัยภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ประสิทธิ์ ภูสมมา. “หม้อแปลงไฟฟ้า”. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี, 2553.
- [2] ไสว ฐานิพานิชสกุล. “หม้อแปลง”. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: หจก.ฟีนี่ พับบลิชซิ่ง, 2525.
- [3] บริษัท เจริญชัยหม้อแปลงไฟฟ้า จำกัด. Transformer & Maintenance CHAROENCHAI. สืบค้นเมื่อวันที่ 13 พฤศจิกายน 2560, จาก [www.charoenchai.com/File/Transformer AndMaintenance.pdf](http://www.charoenchai.com/File/TransformerAndMaintenance.pdf)
- [4] Oil filled power transformer. สืบค้นเมื่อวันที่ 13 พฤศจิกายน 2560, จาก <http://www.rockwell-transformer.com/products/6604kv-power-transformer-id1833.html>
- [5] TRANSFORMER FIN WALLS TYPE RADIATOR. สืบค้นเมื่อวันที่ 13 พฤศจิกายน 2560, จาก [http://www.prowessengg.com /](http://www.prowessengg.com/)
- [6] Magnetic Oil Level Gauges. สืบค้นเมื่อวันที่ 13 พฤศจิกายน 2560, จาก <http://www.nuwatt.co.za/magnetic-oil-level-gauges/>
- [7] Oil Level Indicator. สืบค้นเมื่อวันที่ 13 พฤศจิกายน 2560, จาก <http://www.datstan.com.tr/fr/products/transformer-accessories/oil-level-indicators.html>
- [8] Oil Immersed Power Transformer. สืบค้นเมื่อวันที่ 13 พฤศจิกายน 2560, จาก <http://dbeco.tradekorea.com/product/detail/P584741/Oil-Immersed-Power-Transformer.html?minisiteprodgroupno=14833>
- [9] Silica Gel Breathers. สืบค้นเมื่อวันที่ 13 พฤศจิกายน 2560, จาก <https://www.indiamart.com/yogya/>
- [10] Pressure Relief Devices. สืบค้นเมื่อวันที่ 13 พฤศจิกายน 2560, จาก <https://www.qualitrolcorp.com/products/pressure-controls-gauges-and-relays/pressure-relief-devices/>
- [11] Buchholz Relay. สืบค้นเมื่อวันที่ 13 พฤศจิกายน 2560, จาก <http://www.nuwatt.co.za/products/buchholz-1/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] **Buchholz relay contacts.** สืบค้นเมื่อวันที่ 13 พฤศจิกายน 2560, จาก https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Buchholz_relay_contacts.svg
- [13] **Liquid Filled Thermometers.** สืบค้นเมื่อวันที่ 13 พฤศจิกายน 2560, จาก <http://www.nuwatt.co.za/liquid-filled-thermometers/>
- [14] **A fan rotates at power transformer at electric substation.** สืบค้นเมื่อวันที่ 14 พฤศจิกายน 2560, จาก <https://www.shutterstock.com/video/clip-9312374-stock-footage-a-fan-rotates-atpower-transformer-at-electric-substation.html>
- [15] **Transformer Oil Circulation Pump.** สืบค้นเมื่อวันที่ 14 พฤศจิกายน 2560, จาก <http://www.sulzer.com/sl/Products-and-Services/Pumps-and-Systems/Single-Stage-Pumps/Transformer-Oil-Circulation-Pump-VMOA>
- [16] **ลูกถ้วย รุ่น 53-2.** สืบค้นเมื่อวันที่ 14 พฤศจิกายน 2560, จาก <https://www.dohome.co.th/dohome/th/product/Insulator-Model-53-2-10051307>
- [17] **Ceramic transformer insulator.** สืบค้นเมื่อวันที่ 14 พฤศจิกายน 2560, จาก <https://www.alibaba.com/showroom/ceramic-transformer-insulator.html>
- [18] **630A High Voltage Transformer Bushing.** สืบค้นเมื่อวันที่ 14 พฤศจิกายน 2560, จาก <http://yachendianqi.company.weiku.com/item/630A-High-Voltage-Transformer-Bushing-14133668.html>
- [19] **On load tap changers.** สืบค้นเมื่อวันที่ 14 พฤศจิกายน 2560, จาก <http://koncaring.mk/en/RegulacioniSklopki.aspx>
- [20] **Stacked Transformer Core.** สืบค้นเมื่อวันที่ 15 พฤศจิกายน 2560, จาก https://www.alibaba.com/product-detail/Stacked-Transformer-Core_342873569.html
- [21] **Classic Power Transformer Windings.** สืบค้นเมื่อวันที่ 15 พฤศจิกายน 2560, จาก <https://www.transformers-magazine.com/component/k2/957-classic-power-transformer-windings.html>
- [22] รศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช, “วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า (เล่ม 1) ฉนวนและวัสดุฉนวนไฟฟ้า **Electrical Engineering Materials**”, พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพมหานคร: ห้างหุ้นส่วนจำกัด มินเซอร์วิส ซีพพลาย, 2557.
- [23] นายภัทริน กิจเจริญ และคณะ, “การวินิจฉัยฉนวนเหลวสำหรับหม้อแปลง”, ปรียญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2558.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [24] CIGRE, “Experiences in Service with New Insulating Liquids”, CIGRE WORKING Group A2.35, UK, 2010.
- [25] IEC 60296, Edition 4.0 -2012, Fluids for electrotechnical applications - Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear.
- [26] ASTM D3487 –09, Standard Specification for Mineral Insulating Oil Used in Electrical Apparatus.
- [27] IEC 60422, Edition 4.0 -2013, Mineral insulating oils in electrical equipment Supervision and maintenance guidance.
- [28] IEEE C57.147 -2008, Guide for Acceptance and Maintenance of Natural Ester Fluids in Transformers.
- [29] ASTM D6871 -03, Standard Specification for Natural (Vegetable Oil) Ester Fluids Used in Electrical Apparatus.
- [30] IEC 60247, Edition 3.0 -2004, Insulating liquid measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor (tan d) and d.c.resistivity.
- [31] IEC 60156, Edition 2.0 -1995, Insulating liquid determination of the breakdown voltage at power frequency – test method.
- [32] ปุณยวีร์ ฉายศิริ, “การศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันพืชเพื่อนำไปใช้เป็นฉนวนเหลวในอุปกรณ์ไฟฟ้า แรงสูง”, ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ
น้ำมันแร่ เอสเทอร์ธรรมชาติ และน้ำมันปาล์ม ที่มีอนุภาคเจือปน**
***ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF MINERAL OIL, NATURAL ESTER,
AND PALM OIL WITH VARIOUS TYPES OF PARTICLES***

จอมภัทร สิริวรจรราชดี จินต์จุฑา แดงประเสริฐ ชูติมา เมฆพัฒน์ เอื้อการ ศรีบรรจง

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-mail: 57010154@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาโครงสร้างส่วนประกอบหลักของหม้อแปลงไฟฟ้าและจนวนเหลวภายในหม้อแปลงไฟฟ้าได้แก่ น้ำมันแร่ เอสเทอร์ธรรมชาติ และน้ำมันปาล์ม รวมถึงวินิจฉัยแนวโน้มผลกระทบของอนุภาคของส่วนประกอบหม้อแปลงที่ต่างชนิดกัน ได้แก่ ทองแดง เหล็ก และ เซลลูโลส ต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของจนวนเหลวภายในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยทดสอบค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของจนวนเหลว (ϵ_r) และ ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) ตามมาตรฐาน IEC 60247 เพื่อทำการประเมินคุณภาพของจนวนเหลวเบื้องต้นก่อนทำการทดสอบ จากนั้นทดสอบค่าความคงทนเบรกคาวน์กระแสสลับของจนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60156 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าความคงทนเบรกคาวน์กระแสสลับของจนวนเหลวได้แก่ ชนิดของจนวนเหลวและอนุภาคเจือปน ปริมาณอนุภาคเจือปน และอุณหภูมิของจนวนเหลวขณะทดสอบ จากนั้นศึกษาพฤติกรรมการเรียงตัวของอนุภาคเจือปนภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย พบว่าพฤติกรรมการเรียงตัวของอนุภาคขึ้นกับระดับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน ชนิดของจนวนเหลวและอนุภาคเจือปน และปริมาณอนุภาคเจือปน

คำสำคัญ : หม้อแปลงไฟฟ้า, อนุภาคเจือปน

Abstract

The objectives of the project are to study main part structures of a transformer and liquid insulation used in transformer, i.e., mineral oil, natural ester, and palm oil including electrical characteristics of liquid insulation contaminated with various types of particles, i.e., copper, iron, and cellulose. Measuring value of relative permittivity of liquid insulation (ϵ_r) and value of dielectric dissipation factor ($\tan \delta$) according to IEC 60247 to basically check purify of liquid insulation before testing.

Then, the breakdown testing was performed in accordance with IEC 60156. The test results show that the factors affecting breakdown voltage characteristics of contaminated liquid insulations were the liquid insulation types, particle types, the particle concentrations, and the liquid temperatures. Besides, the behavior of particle patterns under the slightly uniform field in the liquid insulation was studied. It was found that the factors affecting such patterns were liquid insulation types, particle types and the particle concentrations.

Keywords: transformer, contaminated particle

1. บทนำ

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทำหน้าที่สำหรับแปลงระดับแรงดันจากระดับแรงดันหนึ่งสู่อีกระดับแรงดันหนึ่ง โดยอาศัยการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้า เมื่อหม้อแปลงมีการใช้งานไประยะเวลาหนึ่งอาจเกิดการเสื่อมสภาพของจนวนจากหลายสาเหตุซึ่งเป็นอันตรายต่อหม้อแปลงและส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าได้ ดังนั้นควรตรวจสอบสุขภาพของหม้อแปลงไฟฟ้านั้นคือจนวนน้ำมัน ดังนั้นการทดสอบและวิเคราะห์ผลน้ำมันหม้อแปลงจึงเป็นสิ่งสำคัญ ผลจากการเสื่อมสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้างกล่าวอาจทำให้โครงสร้างหรือส่วนประกอบภายในหม้อแปลงเกิดการปนเปื้อนของอนุภาคเจือปนอยู่กับจนวนน้ำมัน จึงเกิดการศึกษเกี่ยวกับผลกระทบที่เกิดจากการเจือปนของอนุภาค ในการทดสอบจนวนเหลวที่มีอนุภาคเจือปนจึงอาจทำให้ทราบได้ว่าหม้อแปลงมีการใช้งานที่เหมาะสมหรือไม่ และสามารถวางแผนในการบำรุงรักษาหม้อแปลงเพื่อยืดอายุการใช้งานของหม้อแปลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโครงการวิจัยนี้ เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

1. ฉนวนแข็ง [1]

ฉนวนแข็งนอกจากจะทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าแล้วบางส่วน ยังจะต้องทำหน้าที่ยึดหรือรับแรงกลอันเกิดจากน้ำหนักของ โครงสร้าง หรือแรงกลไดนามิกส์ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าอีกด้วย โดยฉนวนแข็งที่ใช้หลักๆ ในหม้อแปลงไฟฟ้าก็คือกระดาษอัดแรง (Press Board)

2. ฉนวนเหลว [2]

ฉนวนเหลวที่อยู่ในหม้อแปลงจะมีหน้าที่หลักในการเป็นฉนวน ของหม้อแปลงและถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลง ออกสู่สิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ น้ำมันที่ใช้ในหม้อแปลงยังช่วย ป้องกัน การเกิดปฏิกิริยาเคมีภายในหม้อแปลง ซึ่งหม้อแปลง ไฟฟ้ากำลังส่วนใหญ่จะใช้น้ำมันแร่ เป็นฉนวนเหลวภายใน หม้อแปลง ฉนวนเหลวที่ใช้ในหม้อแปลงมีหลายประเภท แต่ใน ที่นี้จะกล่าวถึงน้ำมันแร่ เอสเทอร์ธรรมชาติ และน้ำมันพืช ดังนี้

1. น้ำมันแร่: น้ำมันแร่ที่ใช้สำหรับหม้อแปลง มีอยู่ 2 ประเภทหลักๆ ซึ่งมาจากกระบวนการกลั่นน้ำมันที่ แตกต่างกันได้แก่ น้ำมันพาราฟิน และ น้ำมันแนฟทา
2. เอสเทอร์ธรรมชาติ
3. น้ำมันปาล์ม

2.2 อนุภาคเจือปนในฉนวนเหลว

อนุภาคเจือปนที่สามารถพบเจอได้ในหม้อแปลงมีสามารถเกิด ได้ จากทุกๆ ส่วนประกอบภายในของหม้อแปลง เช่น ทองแดงเป็น วัสดุที่สามารถนำมาใช้งานที่หลากหลาย เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ เหมาะสมในการใช้งาน เช่น มีความแข็งแรง มีสภาพความเป็น ตัวนำ และความต้านทานการกัดกร่อน ในหม้อแปลงไฟฟ้า ทองแดงถูกนำมาใช้ในการทำขดลวด โยกระคายที่ทำหน้าที่หุ้ม ขดลวดทองแดงเพื่อเป็นฉนวนระหว่างชั้นของขดลวดระหว่าง เฟส และเหล็กที่อาจเกิดจากจากกักร่อนของตัวถัง

3. การออกแบบการทดลองและสร้างชุดทดสอบ

การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของฉนวนเหลวที่มีอนุภาคเจือปน

1. การวัดความชื้นของฉนวนเหลว

2. การทดสอบวัดค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ (ϵ_r) และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) ของฉนวนเหลว

3. การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้า

กระแสสลับผ่านฉนวนเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

4. การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดัน ไฟฟ้า

กระแสสลับผ่านฉนวนเหลวเพื่อศึกษาพฤติกรรมของอนุภาคเจือปนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ

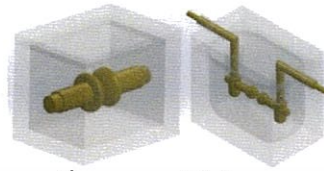
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 การออกแบบสร้างชุดทดสอบ

การออกแบบชุดอิเล็กทรอนิกส์

การออกแบบชุดทดสอบ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม Solid Works 2013 x64 Edition โดยบรรจุน้ำมันใส่ Suitable cell อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60156 [3] ซึ่งมีหัวอิเล็กโทรด 2 แบบ คือ Spherical electrodes และ partially spherical electrodes



รูปที่ 1 แบบจำลองอิเล็กโทรดแบบ

Partially spherical electrodes (ซ้าย) และ Spherical electrodes (ขวา)

3.2 การเตรียมฉนวนเหลวและอนุภาคเจือปน

1. ชนิดของฉนวนเหลว

ได้แก่ น้ำมันแร่ น้ำมันเอสเทอร์ และน้ำมันปาล์ม และชนิดของ อนุภาค ได้แก่ เซลลูโลส ทองแดง และเหล็ก

2. ขั้นตอนการเตรียมฉนวนเหลว

ดวงฉนวนเหลวนำมาอบที่อุณหภูมิ 60°C , 200 mbar

3. ขั้นตอนการเตรียมอนุภาคเจือปน

เตรียมอนุภาคเจือปน 3 ชนิด ชั่งน้ำหนักตามที่ต้องการเพื่อ นำไปใช้ในการทดลอง

3.3 การทดสอบความชื้นในฉนวนเหลว

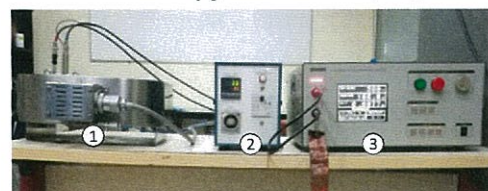


รูปที่ 2 เครื่องวัดความชื้น (Compact Karl's Fister Titrator)

3.4 การทดสอบเพื่อศึกษาผลของความเป็นฉนวน

โดยทดสอบค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเหลว (ϵ_r)

และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$)

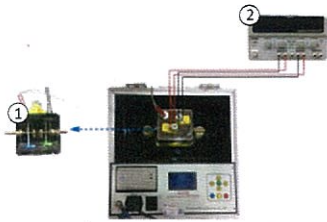


รูปที่ 3 การต่อวงจรเพื่อหาค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก

($\tan\delta$) โดย 1. ที่ควบคุมอุณหภูมิชุดทดสอบ 2. ควบคุมอุณหภูมิ 3.

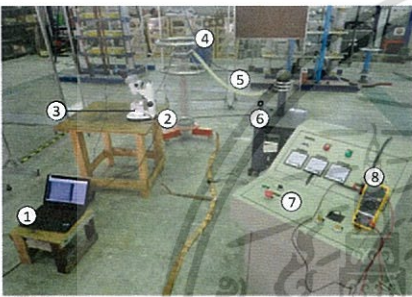
อุปกรณ์วัดประจุและค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก

3.5 การทดสอบเพื่อศึกษาผลของความเป็นควานของควานเหลวโดยทดสอบเบรคดาวน์



รูปที่ 4 การต่อวงจรเพื่อหาแรงดันเบรคดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดย 1.ชุดทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC60156[31] 2. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับควบคุมมอเตอร์

3.6 การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อศึกษาการเรียงตัวของอนุภาคเจือปน



รูปที่ 5 การต่อวงจรทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อศึกษาการเรียงตัวของอนุภาคเจือปน โดย 1.คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก 2.กล่องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ 3.ชุดทดสอบ 4.โวลต์จลิตไวเซอร์ 5.ตัวต้านทานน้ำ 6.หม้อแปลงทดสอบ 7.ชุดควบคุมแรงดัน 8.โวลต์จลิตไวเซอร์

4. ผลการทดลอง

4.1 ค่าความชื้นของฉนวนเหลว

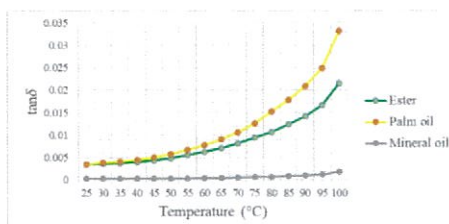
ตารางที่ 1 แสดงค่าความชื้นของฉนวนเหลว

ชนิดของฉนวนเหลว	ค่าความชื้น (ppm)
น้ำมันแร่	17
น้ำมันเอสเทอร์	170
น้ำมันปาล์ม	223

4.2 ตัวอย่างผลการทดลองการวัดค่า tanδ ของน้ำมันแร่ที่ 60°C

ตารางที่ 2 แสดงค่า tanδ ของน้ำมันแร่

อุณหภูมิ	ค่า tanδ ของน้ำมันแร่ (%)
60	0.000375



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง tanδ กับอุณหภูมิของฉนวน

4.3 ตัวอย่างค่าแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันแร่ที่อุณหภูมิ 70°C

ตารางที่ 3 แสดงค่าแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันแร่ที่ใส่อนุภาค

อุณหภูมิ	ชนิดอนุภาค	ความเข้มข้น (%)			
		ไม่มี	0.001	0.003	0.005
70°C	เซลลูโลส	71.8	60.4	55.4	51.3
	เหล็ก		58.8	51.2	45.8
	ทองแดง		48.8	43.7	37.0

4.4 ตัวอย่างผลของพฤติกรรมการเรียงตัวของอนุภาคในฉนวนเหลว

ตารางที่ 4 แสดงการเรียงตัวของอนุภาคเหล็กในน้ำมันแร่ที่ 15 kV

รูปภาพ	เวลา			
0 นาที	10 นาที	20 นาที	30 นาที	

5. สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุป

จากการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันแร่ เอสเทอร์ธรรมชาติ และน้ำมันปาล์มที่มีอนุภาคเจือปน สามารถสรุปออกมาได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.1.1 การทดสอบค่าเปอร์มิตทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเหลว (Er) และ ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียโคอีเล็กทริก (tanδ) ตามมาตรฐาน IEC 60247[4] เพื่อทำการประเมินคุณภาพของฉนวนเหลวเบื้องต้นก่อนทำการทดสอบ

พบว่า คุณภาพของฉนวนเหลวทั้ง 3 ชนิดสามารถนำไปทำการทดสอบได้เนื่องจากมีคุณสมบัติตรงตามมาตรฐาน

5.1.2 การทดสอบค่าแรงดันเบรคดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

1. แรงดันเบรคดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ขณะไม่มีอนุภาคเจือปน พบว่า ค่าแรงดันเบรคดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของน้ำมันปาล์ม จะมีค่าต่ำที่สุด ในขณะที่ของเอสเทอร์ธรรมชาติ และ น้ำมันแร่ จะมีค่าแรงดันเบรคดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับใกล้เคียงกัน และ ค่าแรงดันเบรคดาวน์ด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ จะมีค่าสูงขึ้น จนกระทั่ง อุณหภูมิฉนวนเหลวทั้ง 3 ชนิด มีค่า 90 °C

2. แรงดันเบรคดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ขณะมีอนุภาคเจือปน ค่าแรงดันเบรคดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในน้ำมันแร่ เอสเทอร์ธรรมชาติ และ น้ำมันปาล์ม ขณะมีอนุภาคเจือปน ได้แก่ เหล็ก ทองแดง และเซลลูโลส เปรียบเห็นค่าความเข้มข้น 0.001%, 0.003% และ 0.005% ที่อุณหภูมิทั้ง 4 อุณหภูมิ

รค่า
การใช้น้ำเพื่อการ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่า ในทุกช่วงอุณหภูมิ ค่าแรงดันเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเรียงจากมากไปน้อย ได้แก่ เอสเทอร์ธรรมชาติ น้ำมันแร่ และ น้ำมันปาล์ม ตามลำดับ เมื่อเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของอนุภาคเจือปนเพิ่มขึ้น ค่าแรงดันเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ จะลดลง ส่วน น้ำมันปาล์ม มีค่าแรงดันเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ต่ำกว่าเอสเทอร์ธรรมชาติในทุกกรณี เมื่ออุณหภูมิจนวนเหลวทั้ง 3 ชนิด มีค่าเพิ่มขึ้น ตั้งแต่ อุณหภูมิห้องถึง 90°C ค่าแรงดันเบรกดาวน์ด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ จะมีค่าสูงขึ้น และผลของอนุภาคเจือปนทำให้แรงดันเบรกดาวน์ด้วยแรงดัน ไฟฟ้ากระแสสลับต่ำสุด ไปสูงสุด เมื่อเทียบอนุภาคทั้ง 3 ชนิด คือ อนุภาคทองแดง อนุภาคเหล็ก และ อนุภาคเซลลูโลส

5.1.3 การศึกษาการเรียงตัวของอนุภาคเจือปน ที่แรงดันเบรกดาวน์ด้วยแรงดัน ไฟฟ้ากระแสสลับ ด้วยกล้อง stereo microscope

เมื่อทำการทดสอบความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 5 kV, 10 kV และ 15 kV เป็นเวลา 30 นาทีในแต่ละกรณี ในน้ำมันแร่ เอสเทอร์ธรรมชาติ และ น้ำมันปาล์ม ขณะมีอนุภาคเจือปนเป็น เหล็ก ทองแดง และเซลลูโลส เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น 0.001%, 0.003% และ 0.005% พบว่า เมื่อแรงดันที่ใช้เพิ่มขึ้นการเรียงตัวของอนุภาคทั้ง 3 ระหว่างอิเล็กโตรดจะมีความหนาแน่นมากขึ้น ลักษณะการเรียงตัวของอนุภาคเซลลูโลส คือ จะเกาะทั่วทั้งพื้นผิวอิเล็กโตรด แล้วค่อยหนาแน่นขึ้นทั้งสองฝั่งจนใกล้กันมากขึ้น ส่วนลักษณะการเรียงตัวของอนุภาคทองแดง คือ จะเกิดเส้นอนุภาค 1-2 เส้น วิ่งไปมาทั่วอิเล็กโตรด เมื่อมีความหนาแน่นมากขึ้น เส้นนั้นจะหยุดอยู่ที่จุดใดจุดหนึ่งในอิเล็กโตรด โดยส่วนใหญ่จะเกิดบริเวณกลางอิเล็กโตรดพอดี และเกิดการเบรกดาวน์ขึ้นได้ และ ลักษณะการเรียงตัวของอนุภาคเหล็ก คือ อนุภาค จะวิ่งลอยอยู่ในจนวนเหลวในพื้นที่ ตรงกลางระหว่างอิเล็กโตรด เมื่อมีความหนาแน่นมากขึ้นจะค่อยๆ ขยายขนาดของกลุ่มจนใกล้อิเล็กโตรดทั้ง 2 มากยิ่งขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา รวมไปถึงคุณปณณวีร์ ฉายศิริ ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี ขอขอบคุณที่กิตติพศ จริยานุวัฒน์ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูง ที่ได้ช่วยเหลือและให้ความเอาใจใส่ในด้านต่างๆ ด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณ บริษัท เมคเนซ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ เรื่องทุนทรัพย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอขอบคุณ บริษัท ละมุลวิศวกรรม จำกัด และบริษัท ดาต้า เอนทร์ กรุ๊ป จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านความรู้และข้อมูลที่ สำคัญในการจัดทำปริญญานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ที่เกี่ยวกับเครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการ ทดสอบ จนการทดสอบเสร็จสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] นายภัทริน กิจเจริญ และคณะ, “การวินิจฉัยจนวนเหลวสำหรับหม้อแปลง”, ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2558.
- [2] CIGRE, “Experiences in Service with New Insulating Liquids”, CIGRE WORKINGGroup A2.35, UK, 2010.
- [3] IEC 60156, Edition 2.0 -1995, Insulating liquid determination of the breakdown voltage at power frequency – test method
- [4] IEC 60247, Edition 3.0 -2004, Insulating liquid measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor(tan d) and d.c.resistivity



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Study of Contamination effect on Breakdown Characteristic of Mineral Oil

J. Siritworachanyadee, J. Dangprasert, C. Mekkhaphat, A. Sornbunjong, K. Jariyanurat and N. Pattanadech

Faculty of Engineering, King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang
1 Soi Chalongkung 1 Ladkrabang Bangkok 10520 Thailand
E-mail 57010154@kmitl.ac.th

Abstract

This paper represents electrical characteristics of mineral oil contaminated with various types of particles.

In total, mineral oil with three contamination types, i.e., 20 μm particle size of cellulose, spherical iron and copper particles with approximately 20 μm diameter;

three contaminant concentrations, i.e., 0.001% m/V, and 0.003% m/V; and four mineral oil temperatures, i.e., 25°C, 50°C, 70°C, and 90°C were investigated with mushroom shaped electrodes according to IEC 60156 [1].

The breakdown testing was performed in accordance with IEC 60156 [1] whereby the testing was carried out 6 times for each liquid test sample. The test results show that the presence of particles, whether insulation material, i.e., cellulose or conducting material, i.e., copper and iron, in the tested dielectric liquids always reduced the breakdown voltage. The reduction factor depended on the particle types, the particle concentrations, and the liquid temperatures.

Keywords: AC breakdown voltage, particles, mineral oil

1. Introduction

A Transformer is an electrical device that used to transfer electrical energy from one circuit to another circuit. Therefore, transformers are very necessary for power transmission and distribution system. After transformers have been used for a long time, transformer insulation may be deteriorated from many factors. The proper maintenance of transformers is very important to avoid the consequential loss. However, it is very difficult to avoid the failure of the transformers which is generally initiated from the deteriorated insulation in the transformer. There are many factors to degrade the integrity of transformer insulation such as water, hot spot, and contaminant in the mineral oil and so on. This paper aims to investigate the breakdown voltage characteristics of the mineral oil contaminated with different types of

particles. The test results should be useful for engineers who deal with transformer operation.

2. Theory

2.1 Electrical insulation in transformer

Electrical Insulation in the transformer can be divided into 2 groups i.e., solid insulation and liquid insulation

A. Solid insulation - the main solid insulation in transformer is a press board or a transformer board. Press board is organic polymer which is made from compression multi-layer of cellulose. Pressboard provides the insulation function and mechanical support. Normally, the life of transformer is approximately calculated from degree of polymerization of the pressboard.

B. Liquid insulation - dielectric liquid is used as electrical insulation, coolant media and arc extinguishing. Generally, mineral oil is widely in transformer industry. Mineral oil used in the transformers must meet the requirement according to IEC 60296 [2] or ASTM D 3487 [3] standard. There are two types of mineral oil in transformer, naphthenic oil and paraffinic oil. The relative permittivity of the mineral oil (50 Hz 25°C) is approximately 2.2.

The breakdown strength of an insulating liquid is one of the most important parameters to be investigated, because foreign particles or contaminant in an insulating liquid have a strong tendency to greatly reduce the breakdown voltage of the insulating liquid. This paper investigates breakdown characteristics of the mineral oil with different types and concentrations of particles.

2.2 Particle in liquid insulation

Various types of particles are commonly found in transformers, such as copper, iron, carbon and cellulose. Particles in transformer may occur from the deterioration of the insulation paper, decomposition of metals and dust inside the transformer. These particles may reduce the properly properties of the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

insulation system of the transformer such as deterioration of liquid insulation, decreasing of cooling capability, decreasing of dielectric breakdown and so on. The contaminated particles that found in liquid insulation can occur from every parts of the transformer such as copper from transformer coil, cellulose from insulating paper, and iron that corroded from transformer tank.

3. Experiment

The experiments were divided into two sections. The first section was capacitance and dielectric dissipation factor ($\tan \delta$) measurement. The second section dealt with the effect of contamination on the breakdown strength of the mineral oil.

3.1 C and $\tan \delta$ measurement

The capacitance and dielectric dissipation factor ($\tan \delta$) of the uninhibited mineral oil ELECTROL®-A was tested with different temperatures using the test devices and test arrangement as shown in Fig.1.

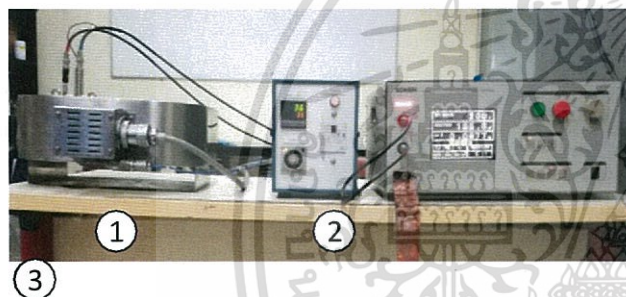
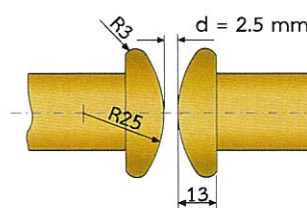


Fig. 1. The capacitance and dielectric dissipation factor test. Where 1 is temperature control test cell, 2 is temperature control unit and 3 is capacitance and dielectric dissipation factor measurement device.

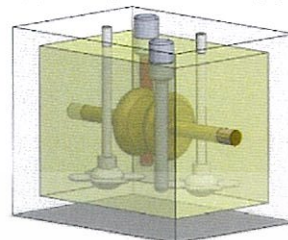
3.2 AC breakdown voltage test

A. Liquid test cell

The liquid test cell used in these experiments as shown in Fig.2 was an improved version of the standard IEC 60156 [1] test cell. In the liquid test cell, the mushroom shaped electrodes were set with a gap spacing of 2.50 ± 0.05 mm. These mushroom shaped electrodes were used. In addition, two sets of double-bladed motor driven impellers were used, which were designed as an improvement over the standard single electro-magnetic stirrer set-up. Besides, a heater and a thermo-couple were equipped in the liquid test cell.



(a) Hemi-sphere electrodes [3].



(b) The improved AC breakdown test cell.

Fig. 2. AC breakdown voltage test cell for the experiment.

B. AC breakdown voltage test set-up

The AC breakdown voltage of the mineral oil with contaminant was investigated using the test diagram as represented in Fig.3

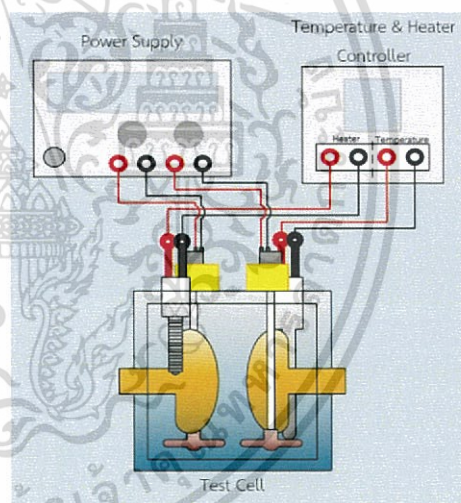


Fig. 3. Test circuit arrangement for AC breakdown voltage of liquid insulation

C. Liquid insulation preparation

Before performing the experiment, the unused mineral oil was heated to 60°C in a vacuum oven at approximately 200 mbar for 12 hours in order to remove any remaining moisture, and then cooled to room temperature. Then the mineral oil was carefully poured into the test cells until filled to the required volume, and then cellulose particles of 0.001% mass per volume (m/v) concentration were mixed in. Another test cell was then prepared by mixing 0.003% concentrations of cellulose particles. Similarly, four additional samples were also prepared by separately mixing in copper particles and iron particles at three different concentrations, i.e. 0.001% m/v and 0.003%

m/v.

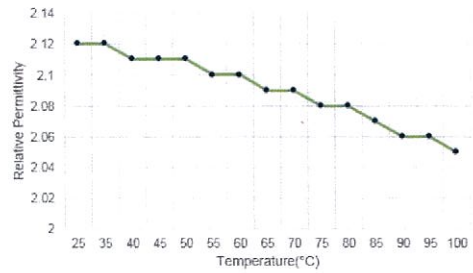
D. AC breakdown voltage test procedure

The breakdown voltage of the prepared liquids containing the particles was measured in the test cell according to IEC 60156 [1] after the cell had been filled to the required level and left to stand for three minutes. An AC voltage was then applied across the electrodes with a rate-of-rise of 2 kV/s and a total of 6 breakdown events were recorded for each liquid sample, thus allowing average breakdown voltages to be calculated. The tests were performed at atmospheric pressure and at liquid temperatures of room temperature, 50°C, 70°C, and 90°C.

4. Result

4.1 Mineral oil characteristics

Fig.4 a - c present relative permittivity, $\tan \delta$ and capacitance of the mineral oil as a function of temperatures respectively.

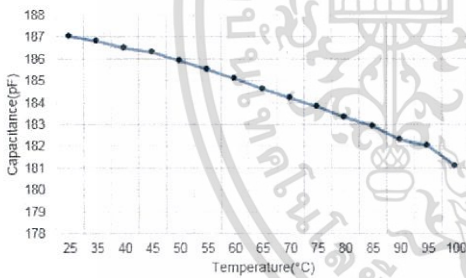


(c) Relationship between relative permittivity and temperatures of mineral oil.

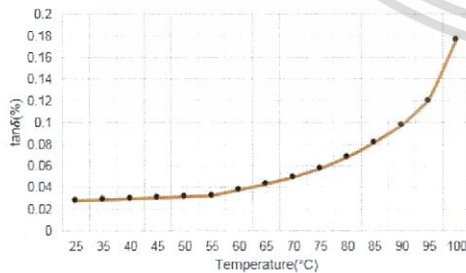
Fig.4. permittivity, $\tan \delta$ and capacitance of the mineral oil as a function of temperatures.

4.2 AC Breakdown voltage of mineral oil with contamination

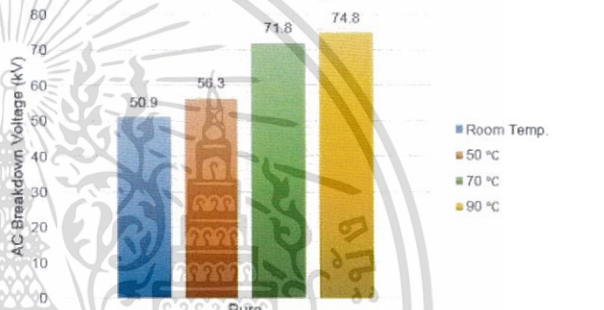
Fig.5 a – e illustrate AC breakdown voltages of mineral oil and mineral oil with contaminant under various temperature respectively.



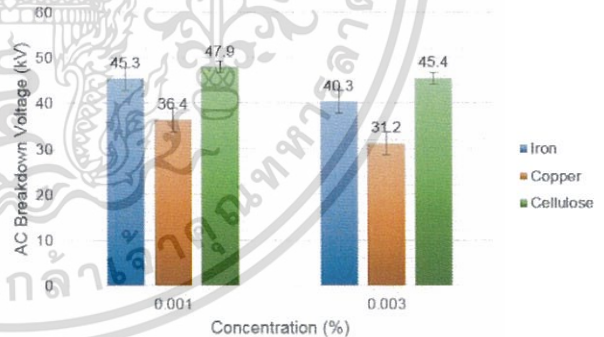
(a) Relationship between capacitance and temperatures of mineral oil.



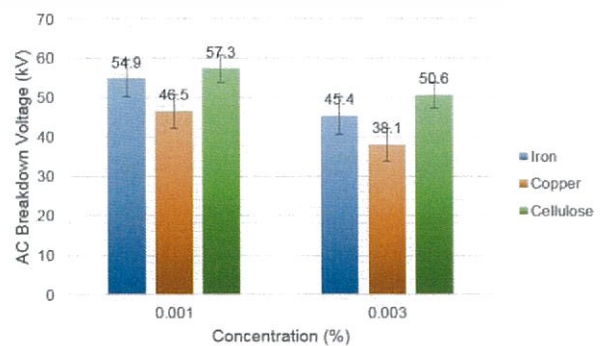
(b) Relationship between $\tan \delta$ and temperatures of mineral oil.



(a) AC breakdown voltages of clean mineral oil in different temperatures

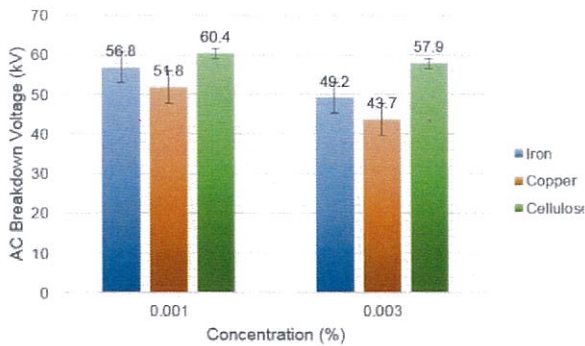


(b) AC breakdown voltages of mineral oil with 0.001% m/v and 0.003% m/v contaminant concentration under room temperature

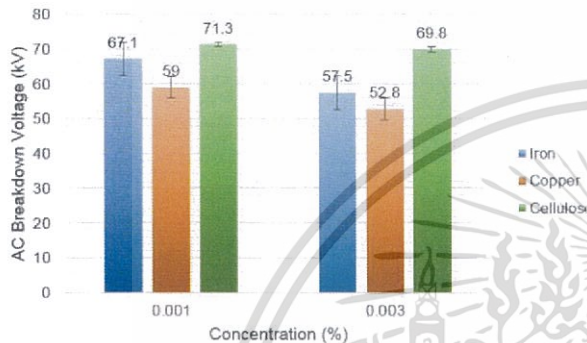


(c) AC breakdown voltages of mineral oil with 0.001% m/v and 0.003% m/v contaminant concentration at 50°C oil temperature.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(d) AC breakdown voltages of mineral oil with 0.001% m/v and 0.003% m/v contaminant concentration at 70°C oil temperature.



(e) AC breakdown voltages of mineral oil with 0.001% m/v and 0.003% m/v contaminant concentration at 90°C oil temperature.

Fig.5. AC breakdown voltages of mineral oil with 0.001% m/v and 0.003% m/v contaminant concentration under various oil temperature.

5. Conclusion

From the test result it was found that for the particle concentration 0.001 % m/v; at room temperature, 50 °C, 70 °C and 90 °C the value of AC breakdown voltage approximately decrease 11-29%, 1.7-17.5%, 15.8-20.9% , and 4.5-21.2% respectively compared with that of clean mineral oil. In case of the particle concentration 0.003% m/v; at room temperature, 50 °C, 70 °C and 90 °C the value of AC breakdown voltage approximately decrease 10.8-39 %, 10-33%, 15-28% and 6.6-29.5% respectively compared with that of the clean mineral oil.

ACKNOWLEDGMENT

The authors wish to acknowledge Lamool Transformers Co., Ltd. and Data Entry Group Co., Ltd. Besides, the authors would like to express their thanks for project financial support from Meidensha Corporation.

References

- [1] IEC 60156, Edition 2.0 -1995, Insulating liquid – determination of the breakdown voltage at power frequency – test method
- [2] IEC 60296, Edition 4.0 –2012, Fluids for electro technical applications –Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear.
- [3] ASTM D3487 –09, Standard Specification for Mineral Insulating Oil Used in Electrical Apparatus.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นายจอมภัทร สิริวรจรรยาดี

เกิดวันที่ 5 ธันวาคม พ.ศ. 2538

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนนวมินทราชินูทิศ
เตรียมอุดมศึกษาน้อมเกล้า

เข้าศึกษาที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2557

ฝึกงานที่ บริษัท เอกรัฐวิศวกรรม จำกัด (มหาชน)

ระหว่างเดือน มิถุนายน ถึง กรกฎาคม พ.ศ. 2560



ชื่อ-นามสกุล นางสาวจินต์จุฑา แต่งประเสริฐ

เกิดวันที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2538

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนมงฟอร์ต
วิทยาลัย

เข้าศึกษาที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2557

ฝึกงานที่ บริษัท เอสซีจี แพคเกจจิ้ง จำกัด (มหาชน)

ระหว่างเดือน มิถุนายน ถึง กรกฎาคม พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ชื่อ-นามสกุล นางสาวชุติมา เมฆพัฒน์

เกิดวันที่ 22 ตุลาคม พ.ศ. 2539

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนอุดมครุณี
จังหวัดสุโขทัย

เข้าศึกษาที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2557

ฝึกงานที่ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตภาคใต้ จังหวัดกระบี่

ระหว่างเดือน มิถุนายน ถึง กรกฎาคม พ.ศ. 2560



ชื่อ-นามสกุล นางสาวเอือการ ศรีบรรจง

เกิดวันที่ 14 มกราคม พ.ศ. 2539

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนหอวัง

เข้าศึกษาที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2557

ฝึกงานที่ บริษัท บางจาก คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน)

ระหว่างเดือน มิถุนายน ถึง กรกฎาคม พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้