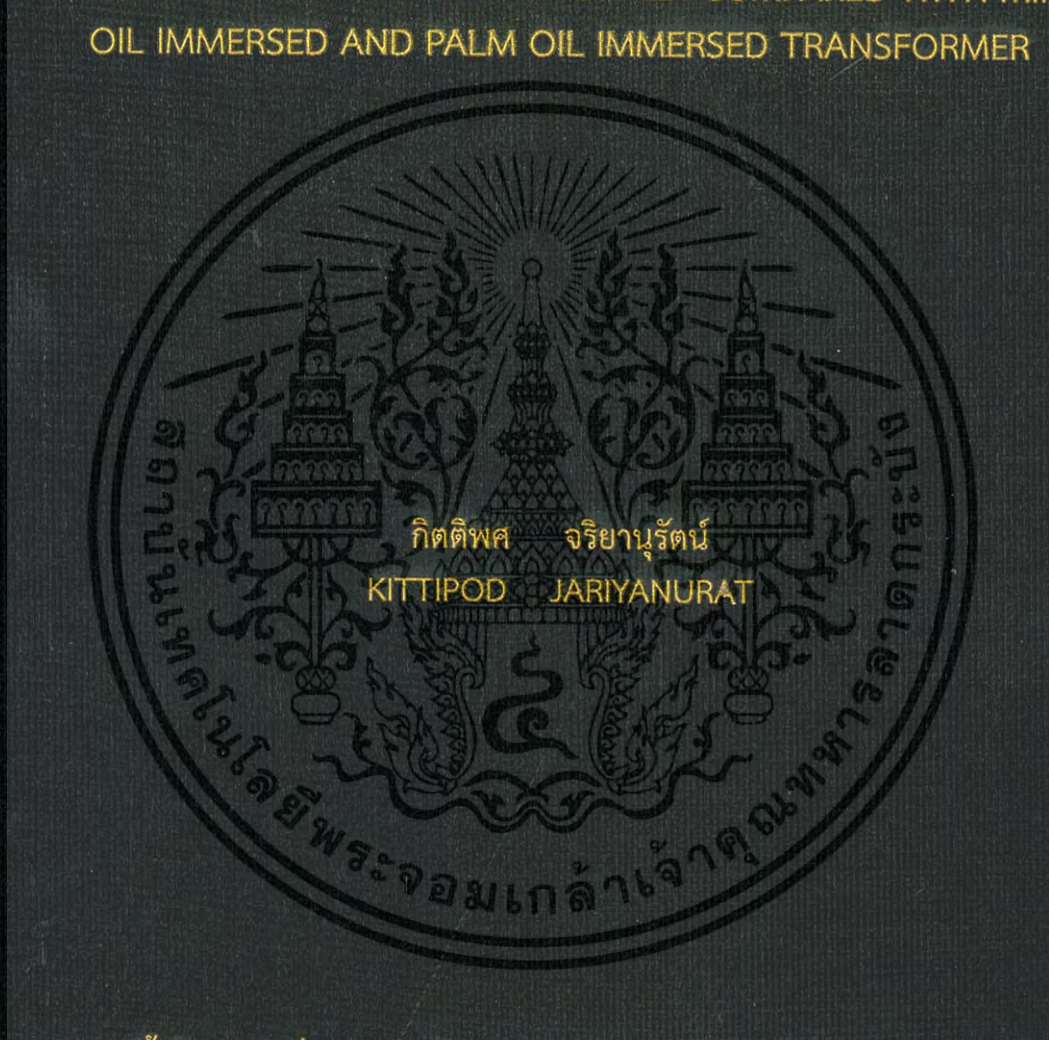


การศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าและทางความร้อนของหม้อแปลงที่ใช้เอสเทอร์
ธรรมชาติเป็นฉนวนเปรียบเทียบกับหม้อแปลงที่ใช้น้ำมันหม้อแปลง
และใช้น้ำมันปาล์มเป็นฉนวน

STUDIES OF ELECTRICAL AND THERMAL CHARACTERISTICS OF
NATURAL ESTER IMMERSSED TRANSFORMER COMPARED WITH MINERAL
OIL IMMERSSED AND PALM OIL IMMERSSED TRANSFORMER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560
KMITL-2017-EN-M-020-031

การศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าและทางความร้อนของหม้อแปลงที่ใช้เอสเทอร์
ธรรมชาติเป็นฉนวนเปรียบเทียบกับหม้อแปลงที่ใช้น้ำมันหม้อแปลง
และใช้น้ำมันปาล์มเป็นฉนวน

STUDIES OF ELECTRICAL AND THERMAL CHARACTERISTICS OF
NATURAL ESTER IMMERSSED TRANSFORMER COMPARED WITH MINERAL
OIL IMMERSSED AND PALM OIL IMMERSSED TRANSFORMER



T148743

กิตติพศ จริยานุรัตน์

KITTIPOD JARIYANURAT

คงพญ. 148743
ตบ. ทะเบียน 23 1119 2560
นับเดือนปี

b. 00267615
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในมหาวิทยาลัยเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจาก KMITL-2017-EN-M-020-031
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDIES OF ELECTRICAL AND THERMAL CHARACTERISTICS OF
NATURAL ESTER IMMersed TRANSFORMER COMPARED WITH MINERAL
OIL IMMersed AND PALM OIL IMMersed TRANSFORMER



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017

KMITL-2017-EN-M-020-031

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017


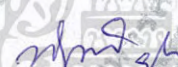



FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าและทางความร้อนของหม้อแปลงที่ใช้เอสเทอร์ธรรมชาติ เป็นฉนวนเปรียบเทียบกับหม้อแปลงที่ใช้ น้ำมันหม้อแปลงและใช้น้ำมันปาล์มเป็นฉนวน
Thesis Title Studies of Electrical and Thermal Characteristics of Natural Ester Immersed Transformer Compared with Mineral Oil Immersed and Palm Oil Immersed Transformer
นักศึกษา นายกิตติพิศ จรรย์านัฐณ์
รหัสประจำตัว 58601162
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-020-031

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ศุภกิตต์	โชติโก	
ผศ.ดร.พีรฤติ	ยุทธโกวิท	
รศ.ดร.ศิริวัฒน์	โพธิเวชกุล	
รศ.ดร.อานันท์วัฒน์	คุณากร	
รศ.ดร.นรเศรษฐ์	พัฒนเดช	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 25 พฤษภาคม พ.ศ. 2560 เวลา 11.00-13.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงแหล่งที่มาของการนำไปใช้

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่ 25 พฤษภาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าและทางความร้อนของหม้อแปลงที่ใช้เอสเทอร์ธรรมชาติเป็นฉนวนเปรียบเทียบกับหม้อแปลงที่ใช้น้ำมันหม้อแปลงและใช้น้ำมันปาล์มเป็นฉนวน

นักศึกษา

นายกิตติพิศ จรรย์านูรัตน์

รหัสนักศึกษา

58601162

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2560

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอการศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าและทางความร้อนของหม้อแปลงที่ใช้เอสเทอร์ธรรมชาติเป็นฉนวนเปรียบเทียบกับหม้อแปลงที่ใช้น้ำมันหม้อแปลงและใช้น้ำมันปาล์มเป็นฉนวน โดยการออกแบบประกอบสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กขนาด 400/1000V 10kVA ขึ้นมา 3 ลูก หม้อแปลงลูกที่หนึ่งใช้น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวน หม้อแปลงลูกที่สองใช้เอสเทอร์ธรรมชาติเป็นฉนวน และลูกที่สามใช้น้ำมันปาล์มเป็นฉนวน เพื่อใช้ในการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าทางความร้อน และทางเคมีภายใต้การใช้น้ำมันเหล่านี้ในหม้อแปลงแต่ละลูก ได้แก่ น้ำมันแร่หรือน้ำมันหม้อแปลง เอสเทอร์ธรรมชาติ และน้ำมันปาล์มโดยการวิจัยทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนเหลวทั้งสามชนิดเบื้องต้นก่อนที่จะนำไปใช้งานจริงโดยได้ทำการทดสอบในหัวข้อ การทดสอบคุณสมบัติความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลว ตามมาตรฐาน IEC 60156 การทดสอบหาค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าเปอร์มิตติวิตี ตามมาตรฐาน ASTM D924-99 การทดสอบคุณสมบัติความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของกระดาษฉนวนที่ทำกรอิมเพร็กเนตด้วยฉนวนเหลว ตามมาตรฐาน IEC 60243-1 ในส่วนของการทดสอบทางเคมีได้ทำการทดสอบหาค่าความชื้นตามมาตรฐาน ASTM D1533-00 หาค่าแรงตึงผิวตามมาตรฐาน ASTM D0971-99 และค่าความเป็นกรดตามมาตรฐาน ASTM D974-02 และหลังจากที่ได้ทำการออกแบบประกอบสร้างหม้อแปลงแล้วเสร็จได้ทำการทดสอบหม้อแปลงตามมาตรฐาน IEC 60076 และได้นำมาต่อกับโหลดอินดักเตอร์ทดสอบที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดแรงดันหม้อแปลง และได้ทำการบันทึกค่าแรงดันกระแส และอุณหภูมิทั้งภายในและภายนอกหม้อแปลงในทุกๆ ชั่วโมงเป็นระยะเวลา 4 เดือนโดยทุกๆ 2 เดือนจะทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันเพื่อนำไปทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า และทางเคมีซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า เอสเทอร์ มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีที่สามารถที่จะเป็นตัวเลือกหนึ่งที่จะใช้แทนน้ำมันหม้อแปลงได้ส่วนน้ำมันปาล์มมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเบื้องต้นที่ดีแต่ยังมีข้อเสียในเรื่องของค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก และความเป็นกรดที่มีค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับฉนวนเหลวทั้งสองชนิดที่ได้ศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	STUDIES OF ELECCTRICAL AND THERMAL CHARACTERISTICS OF NATURAL ESTER IMMERSSED TRANSFORMER COMPARED WITH MINERAL OIL IMMERSSED AND PALM OIL IMMERSSED TRANSFORMER
Student	Mr. Kittipod Jariyanurat
Student ID	58601162
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Norasage Pattanadech

Abstract

This thesis represents studies of electrical and thermal characteristics of natural ester immersed transformer compared with mineral oil immersed and palm oil immersed transformer by designing and constructing three transformers with rated 400/1000V 10kVA, the first transformer used mineral oil, the second transformer used natural ester, and the last one used palm oil, for studying about electrical properties, thermal properties and chemical properties under different types of liquid insulation in each transformer such as mineral oil, natural ester, and palm oil. First of all, three types of liquid insulation were tested with many properties such as dielectric breakdown strength according to IEC 60156, dielectric dissipation factor and dielectric permittivity following to ASTM D924-99, dielectric breakdown strength of impregnated pressboard following to IEC 60243-1. And in the chemical properties, the insulations were tested with many properties such as moisture content according to ASTM D1533-00, interfacial tension according to ASTM D0971-99, acidity according to ASTM. D974-02. After that, transformers were designed and constructed. Each transformer was operated in 100 % of equipment rated with inductor load in four month with the record of temperature, current, and voltage in every hour. In every two months, each transformer was sampled the oil for many properties test. From the test results, they can concluded that natural ester are the alternative liquid insulation for using instead of mineral oil. In part of palm oil, it has good properties but it has the weak points about dielectric dissipation factor and acidity which are higher than the others.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ต้องขอขอบคุณ รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ ที่คอยให้คำปรึกษา แนะนำ และมอบความรู้ให้กับข้าพเจ้า ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง และขอขอบคุณ ผศ.ดร.พีรฤทธิ ยุทธโกวิท ที่ช่วยอบรมสั่งสอน ให้คำชี้แนะต่างๆกับข้าพเจ้าตลอดมา

ขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ ที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ที่ได้ให้ความรู้และแนะนำการใช้งาน อุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง รวมถึงช่วยเหลือในการทดสอบและแสดงความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาด้วยดีตลอดจนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีได้กล่าวถึงที่ให้การสนับสนุนด้านการเรียนตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน รวมทั้งกำลังใจที่ดีจากเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (The Thailand Research Fund) ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยนี้ และขอขอบคุณพี่ๆ เจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และน้อง ๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคนที่เป็นกำลังใจที่ดีให้แก่ข้าพเจ้าเสมอมา

สุดท้ายนี้สำหรับคุณความดีที่เกิดจากการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบพระคุณกับบิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าซึ่งข้าพเจ้ารักและเคารพยิ่ง ตลอดจนถึงครู อาจารย์ที่ข้าพเจ้าเคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และการใช้ชีวิตให้กับข้าพเจ้า

กิตติพิศ จรรย์นุรัตน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.7 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 การออกแบบหม้อแปลง.....	6
2.1.1 การสูญเสียเนื่องจากไดโอดีล็คทริก.....	7
2.1.2 การสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์รีซิสในแกนเหล็ก.....	8
2.1.3 การสูญเสียในแกนเหล็กเนื่องจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก.....	8
2.1.4 ขนาดกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดและน้ำหนักของขดลวด.....	8
2.1.5 คุณสมบัติทางความร้อนของหม้อแปลง.....	10
2.1.6 การคำนวณหาค่าอินดักแตนซ์ของหม้อแปลงทดสอบ.....	10
2.1.7 น้ำมันหม้อแปลง.....	10
2.1.8 กระดาษฉนวน.....	11
2.1.9 เสนลวดอาบนํ้าฉนวน.....	11
2.1.10 ตัวถัง.....	11
2.1.11 แกนเหล็ก.....	12
2.1.12 แรงดันกระจายของขดลวด.....	12
2.2 ฉนวนเหลว.....	12
2.2.1 น้ำมันหม้อแปลง.....	12
2.2.2 เอสเตอร์.....	13
2.2.3 น้ำมันปาล์ม.....	17
2.3 ฉนวนแข็งในหม้อแปลงไฟฟ้า.....	17
2.3.1 ชนิดของฉนวนแข็ง.....	18
2.3.2 ขอบเขตในการใช้งาน ลักษณะของกระดาษฉนวนที่ใช่.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบประกอบสร้างหม้อแปลง และการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า.....	21
3.1 การออกแบบสร้างหม้อแปลง และการทดสอบประจำ.....	21
3.1.1 การออกแบบหม้อแปลง.....	21
3.1.2 การสร้างหม้อแปลง.....	34
3.1.3 การทดสอบประจำ.....	39
3.2 การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของฉนวนก่อนนำไปประยุกต์ใช้.....	44
3.2.1 การทดสอบการหาค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ ของฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60156.....	44
3.2.2 การทดสอบหาค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก และคาเปอริตตีวีตตามมาตรฐาน ASTM D924-99.....	45
3.2.3 การทดสอบการหาค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนกระดาษ อิมพีเร็กเนตด้วยฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60243-1.....	46
3.3 การติดตั้งหม้อแปลงพร้อมเครื่องมือวัด และการวัดค่าทางไฟฟ้า.....	47
3.4 การเก็บตัวอย่างน้ำมัน.....	50
3.5 การทดสอบคุณสมบัติทางเคมี.....	51
3.5.1 การทดสอบหาค่าความชื้น ตามมาตรฐาน ASTM D1533-00.....	51
3.5.2 การทดสอบหาความเป็นกรด ตามมาตรฐาน ASTM D974-02.....	52
3.5.3 การทดสอบหาค่าแรงตึงผิว ตามมาตรฐาน ASTM D0971-99.....	54
บทที่ 4 ผลการทดสอบ.....	55
4.1 การทดสอบประจำ.....	55
4.2 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	59
4.2.1 การทดสอบหาค่าพิกัดของหม้อแปลง.....	59
4.2.2 การทดสอบการหาค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ ของฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60156.....	61
4.2.3 การทดสอบหาค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ASTM D924-99.....	62
4.2.4 การทดสอบการหาค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนกระดาษ อิมพีเร็กเนตด้วยฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60243-1.....	65
4.3 การทดสอบคุณสมบัติทางความร้อน.....	66
4.3.1 การทดสอบวัดค่าอุณหภูมิของน้ำมันภายในหม้อแปลงทั้งสามลูก.....	66
4.4 การทดสอบคุณสมบัติทางเคมี.....	67
4.4.1 การทดสอบหาค่าความชื้นตามมาตรฐาน ASTM D1533-00.....	67
4.4.2 การทดสอบหาความเป็นกรด ตามมาตรฐาน ASTM D974-02.....	68
4.4.3 การทดสอบหาค่าแรงตึงผิว ตามมาตรฐาน ASTM D0971-99.....	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ.....	72
5.1 สรุปผลการทดสอบ.....	72
5.1.1 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนเหลว.....	72
5.1.2 การทดสอบคุณสมบัติความร้อนของฉนวนเหลว.....	72
5.1.3 การทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของฉนวนเหลว.....	72
5.1.4 การทดสอบการวัดค่าทางไฟฟ้าของหม้อแปลง.....	72
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	73
เอกสารอ้างอิง.....	74
ภาคผนวก.....	75
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	76
ประวัติผู้เขียน.....	95



สารบัญตาราง

			หน้า
ตารางที่	2.1	คุณสมบัติทางฟลิกส เคมี และไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง.....	13
ตารางที่	2.2	เปรียบเทียบคุณสมบัติหลักของฉนวนเหลวชนิดต่างๆโดยบริษัท MIDEL.....	15
ตารางที่	2.3	คุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางความร้อนของน้ำมันปาล์ม เทียบกับน้ำมันพีชนิดอื่น ๆ มีผลที่ศึกษาได้ดังนี้.....	17
ตารางที่	2.4	การแบ่งประเภทของฉนวนแข็ง.....	17
ตารางที่	2.5	คาเปอร์มิตติวิตีของกระดาษชุบน้ำมันฉนวนที่ 20 องศาเซลเซียส.....	19
ตารางที่	2.6	คุณสมบัติของ insulation paper และ pressboard ตาม JIS C-2305 (class 2).....	20
ตารางที่	3.1	สรุปลักษณะของแกนเหล็ก.....	27
ตารางที่	3.2	สรุปลักษณะของขดลวดแรงต่ำ.....	30
ตารางที่	3.3	สรุปลักษณะของขดลวดแรงสูง.....	33
ตารางที่	4.1	ผลการทดสอบ Routine Test ของหม้อแปลงที่ใช้น้ำมันแร่เป็นฉนวน.....	56
ตารางที่	4.2	ผลการทดสอบ Routine Test ของหม้อแปลง ที่ใช้อัลตราเซรามิกเป็นฉนวน.....	57
ตารางที่	4.3	ผลการทดสอบ Routine Test ของหม้อแปลงที่ใช้น้ำมันปาล์มเป็นฉนวน.....	58
ตารางที่	4.4	ผลการวัดค่าทางไฟฟ้า(แรงดัน).....	59
ตารางที่	4.5	ผลการวัดค่าทางไฟฟ้า(กระแส).....	59
ตารางที่	4.6	ผลการทดสอบการหาค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลว ตามมาตรฐาน IEC 60156 ของฉนวนเหลวก่อนนำไปใช้ในหม้อแปลง.....	61
ตารางที่	4.7	ผลการทดสอบการหาค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลว ตามมาตรฐาน IEC 60156 ของฉนวนเหลวที่ผ่านการใช้งานไปแล้ว 2 เดือน.....	61
ตารางที่	4.8	ผลการทดสอบการหาค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลว ตามมาตรฐาน IEC 60156 ของฉนวนเหลวที่ผ่านการใช้งานไปแล้ว 4 เดือน.....	61
ตารางที่	4.9	การทดสอบหาค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ตามมาตรฐาน ASTM D924-99 ของฉนวนเหลวก่อนนำไปใช้ในหม้อแปลง.....	62
ตารางที่	4.10	การทดสอบหาค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ตามมาตรฐาน ASTM D924-99 ของฉนวนเหลวที่ผ่านการใช้งานไปแล้ว 2 เดือน.....	63
ตารางที่	4.11	การทดสอบหาค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ตามมาตรฐาน ASTM D924-99 ของฉนวนเหลวที่ผ่านการใช้งานไปแล้ว 4 เดือน.....	63
ตารางที่	4.12	ผลการทดสอบการหาค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนกระดาษ อิมเพอร์เนตด้วยฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60243-1 ก่อนนำไปใช้ในหม้อแปลง.....	65
ตารางที่	4.13	ผลการทดสอบวัดค่าอุณหภูมิของน้ำมันภายในหม้อแปลงทั้งสามลูก.....	66
ตารางที่	4.14	ผลการทดสอบหาค่าความชื้น ตามมาตรฐาน ASTM D1533-00 ของฉนวนเหลวก่อนนำไปใช้ในหม้อแปลง.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบหาคาความชื้น ตามมาตรฐาน ASTM D1533-00 ของฉนวนเหลวที่ผ่านการใช้งาน 2 เดือน.....	67
ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบหาคาความชื้น ตามมาตรฐาน ASTM D1533-00 ของฉนวนเหลวที่ผ่านการใช้งาน 4 เดือน.....	67
ตารางที่ 4.17 การทดสอบหาความเป็นกรด ตามมาตรฐาน ASTM D974-02 ของฉนวนเหลวก่อนนำไปใช้ในหม้อแปลง.....	68
ตารางที่ 4.18 การทดสอบหาความเป็นกรด ตามมาตรฐาน ASTM D974-02 ของฉนวนเหลวหลังผ่านการใช้งานไปแล้ว 2 เดือน.....	69
ตารางที่ 4.19 การทดสอบหาความเป็นกรด ตามมาตรฐาน ASTM D974-02 ของฉนวนเหลวหลังผ่านการใช้งานไปแล้ว 4 เดือน.....	69
ตารางที่ 4.20 ผลการทดสอบหาคาแรงดึงผิว ตามมาตรฐาน ASTM D0971-99 ของฉนวนเหลวก่อนนำไปใช้ในหม้อแปลง.....	70
ตารางที่ 4.21 ผลการทดสอบหาคาแรงดึงผิว ตามมาตรฐาน ASTM D0971-99 ของฉนวนเหลวที่ผ่านการใช้งานไปแล้ว 2 เดือน.....	70
ตารางที่ 4.22 ผลการทดสอบหาคาแรงดึงผิว ตามมาตรฐาน ASTM D0971-99 ของฉนวนเหลวที่ผ่านการใช้งานไปแล้ว 4 เดือน.....	70
ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ของฉนวนที่ได้ทำการทดสอบ.....	73

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบวงจรแม่เหล็กไฟฟ้า.....	6
รูปที่ 2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวนกับ Moisture Content ของฉนวนเหลวชนิดต่างๆ.....	16
รูปที่ 2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการย่อยสลายกับเวลาของฉนวนเหลวชนิดต่างๆ.....	16
รูปที่ 2.4 Pressboard.....	19
รูปที่ 2.5 Kraft paper.....	19
รูปที่ 3.1 การไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก.....	26
รูปที่ 3.2 การพันขดลวดด้านแรงต่ำ.....	34
รูปที่ 3.3 การพันฉนวนชั้นระหว่างชั้นของขดลวด.....	34
รูปที่ 3.4 การพันขดลวดด้านแรงสูง.....	35
รูปที่ 3.5 การเรียงแกนเหล็กเพื่อใช้เป็นแกนในหม้อแปลงไฟฟ้า.....	35
รูปที่ 3.6 ประกอบขดลวดเข้ากับแกนเหล็กที่ได้รับการออกแบบ.....	36
รูปที่ 3.7 ตัวถังหม้อแปลงที่ใช้บรรจุขดลวด.....	36
รูปที่ 3.8 ขดลวดพร้อมที่จะบรรจุลงในตัวถังหม้อแปลง.....	37
รูปที่ 3.9 การพันฉนวนใยแก้วเพื่อเป็นฉนวนกันความร้อนให้กับหม้อแปลงหลังจากเดิมฉนวนเหลว.....	37
รูปที่ 3.10 หม้อแปลงพร้อมสำหรับการทดสอบ.....	38
รูปที่ 3.11 การทดสอบ routine test ตามมาตรฐาน IEC 60076.....	38
รูปที่ 3.12 วงจรทดสอบวัดค่าความต้านทานของขดลวด.....	39
รูปที่ 3.13 วงจรการทดสอบความต้านทานฉนวนระหว่างขั้วแรงต่ำกับขั้วแรงสูง.....	40
รูปที่ 3.14 วงจรการทดสอบหาค่าอัตราส่วนแรงดัน.....	40
รูปที่ 3.15 วงจรการทดสอบหาค่าลิ่งไฟฟ้าสูญเสียขณะลัดวงจร.....	41
รูปที่ 3.16 วงจรการทดสอบหาค่าลิ่งไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด.....	41
รูปที่ 3.17 วงจรทดสอบ Induce Overvoltage (การทดสอบแรงดันและความถี่เกินพิกัดชั่วคราว.....	42
รูปที่ 3.18 วงจรทดสอบ Dielectric Strength (Hi-Pot test).....	43
รูปที่ 3.19 ระดับความดันการอัดก๊าซไนโตรเจนทดสอบรอยรั่ว.....	43
รูปที่ 3.20 เครื่องมือทดสอบน้ำมันตามมาตรฐาน IEC 60156.....	45
รูปที่ 3.21 เครื่องมือทดสอบน้ำมันตามมาตรฐาน ASTM D924-99.....	46
รูปที่ 3.22 การทดสอบการหาค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวนของฉนวนกระดาษอิมพีเร็กเนตด้วยฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60243-1.....	47
รูปที่ 3.23 การติดตั้งหม้อแปลงที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง.....	47
รูปที่ 3.24 แผ่นป้ายบอกรายละเอียดของหม้อแปลง.....	48
รูปที่ 3.25 แผ่นป้ายบอกรายละเอียดของโหลดเหนี่ยวนำที่นำมาใช้.....	48
รูปที่ 3.26 การเชื่อมต่ออุปกรณ์การวัดที่ตัวหม้อแปลง.....	49
รูปที่ 3.27 การต่อวัดอุปกรณ์เพื่อใช้บันทึกค่าไฟฟ้าและทางความร้อน.....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.28 การเก็บตัวอย่างน้ำมันโดยใช้ขวด.....	50
รูปที่ 3.29 การทดสอบหาค่าความชื้น ตามมาตรฐาน ASTM D1533-00.....	52
รูปที่ 3.30 การทดสอบหาค่าความปนกรด ตามมาตรฐาน ASTM D974-02.....	53
รูปที่ 3.31 การทดสอบหาค่าแรงดึงผิว ตามมาตรฐาน ASTM D0971-99.....	54
รูปที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยแรงดันดันไฟฟ้าของหม้อแปลงที่ไซนวนเหลวแตกต่างกัน 3 ชนิด.....	59
รูปที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงที่ไซนวนเหลวแตกต่างกัน 3 ชนิด.....	60
รูปที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวของหม้อแปลงที่ไซนวนเหลวแตกต่างกัน 3 ชนิดในระยะเวลาการใช้งานที่แตกต่างกัน.....	62
รูปที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยค่าפקเตอร์พลังงานสูญเสียไปได้อิเล็กตริกของฉนวนเหลวของหม้อแปลงที่ไซนวนเหลวแตกต่างกัน 3 ชนิดในระยะเวลาการใช้งานที่แตกต่างกันที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	64
รูปที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยค่าפקเตอร์พลังงานสูญเสียไปได้อิเล็กตริกของฉนวนเหลวของหม้อแปลงที่ไซนวนเหลวแตกต่างกัน 3 ชนิดในระยะเวลาการใช้งานที่แตกต่างกันที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส.....	64
รูปที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวของหม้อแปลงที่ไซนวนเหลวแตกต่างกัน 3 ชนิด.....	65
รูปที่ 4.7 แนวโน้มค่าเฉลี่ยค่าอุณหภูมิของน้ำมันของหม้อแปลงที่ไซนวนเหลวแตกต่างกัน 3 ชนิดในระยะเวลา 4 เดือน.....	66
รูปที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยค่าความชื้นของฉนวนเหลวของหม้อแปลงที่ไซนวนเหลวแตกต่างกัน 3 ชนิดในระยะเวลาการใช้งานที่แตกต่างกัน.....	68
รูปที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยค่าความปนกรดของฉนวนเหลวของหม้อแปลงที่ไซนวนเหลวแตกต่างกัน 3 ชนิดในระยะเวลาการใช้งานที่แตกต่างกัน.....	69
รูปที่ 4.10 ค่าเฉลี่ยค่าแรงดึงผิวฉนวนเหลวของหม้อแปลงที่ไซนวนเหลวแตกต่างกัน 3 ชนิดในระยะเวลาการใช้งานที่แตกต่างกัน.....	71

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมโยงระหว่างระบบไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้าต่างกัน โดยจะทำหน้าที่เพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะกับการส่ง การจ่าย และการใช้ไฟฟ้า โดยหม้อแปลงประกอบของค้ประกอบภายในหลายองค์ประกอบไม่ว่าจะเป็น ขดลวด แกนเหล็ก และฉนวน ระบบฉนวนภายในหม้อแปลงประกอบด้วยฉนวนหลัก อยู่ 2 ประเภทได้แก่ ฉนวนแข็ง และฉนวนเหลว โดยฉนวนแข็งส่วนใหญ่จะทำมาจากกระดาษอัดแรงมีหน้าที่ในการเป็นฉนวนภายในหม้อแปลงและรับแรงทางกลให้กับหม้อแปลง ในส่วนของฉนวนเหลวนั้นเป็นฉนวนที่มีหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้าภายในหม้อแปลงและระบายความร้อนโดยฉนวนเหลวที่มีการใช้มากที่สุดในปัจจุบันจะเป็นน้ำมันหม้อแปลงหรือน้ำมันแร่ แต่อย่างไรก็ตาม การใช้งานน้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนยังมีข้อจำกัดอยู่บางประการ เช่น เมื่อมีปริมาณความชื้นเจือปนในน้ำมันหม้อแปลงมากขึ้นความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงจะลดลงเป็นอย่างมากนอกจากนี้ น้ำมันหม้อแปลงมีจุดติดไฟที่ไม่สูงมากนักและยังเป็นสารที่สามารถย่อยสลายตามธรรมชาติได้น้อยมาก ดังนั้นจึงทำให้เอสเตอรฺธรรมชาติได้รับความสนใจในการนำมาใช้แทนน้ำมันหม้อแปลง โดยที่เอสเตอรฺธรรมชาติมีจุดเด่นอยู่หลายประการ เช่น งานวิจัยบางชิ้นพบว่าเอสเตอรฺมีความคงทนต่อการเกิดเบรกดาวน์สูงถึงแม้จะมีปริมาณความชื้นเจือปนอยู่เป็นปริมาณมากซึ่งแตกต่างกับกรณีของน้ำมันหม้อแปลงความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีความชื้นเจือปนเพียงเล็กน้อย การใช้งานเอสเตอรฺธรรมชาตินี้จะช่วยลดปัญหาด้านการเกิดลุกไหม้หรือระเบิดของหม้อแปลงเนื่องจากเอสเตอรฺเป็นฉนวนเหลวที่มีจุดติดไฟและจุดวาบไฟสูงกว่าน้ำมันหม้อแปลงถึงสองเท่า ในด้านสิ่งแวดล้อมเอสเตอรฺธรรมชาติเป็นฉนวนเหลวที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติซึ่งสามารถย่อยสลายได้ดี จึงมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่อย่างไรก็ตามด้วยข้อจำกัดทางความรู้และเทคนิคการใช้งานเอสเตอรฺเพื่อเป็นฉนวนเหลวให้กับหม้อแปลงนั้นมีอยู่น้อยมากเมื่อไม่กี่ปีมานี้อุตสาหกรรมการผลิตหม้อแปลงสำหรับระบบจำหน่ายภายในประเทศไทยเริ่มมีการนำเอาเอสเตอรฺมาใช้เป็นฉนวนหลัก และมีการนำไปติดตั้งใช้งานแล้วในบางสถานที่ ซึ่งจะส่งผลต่อความปลอดภัยในชีวิตและทรัพย์สินของผู้ปฏิบัติงาน ต่อชุมชนที่มีการติดตั้งหม้อแปลงฉนวนเหลวเอสเตอรฺธรรมชาติหากตัวหม้อแปลงทำงานผิดพลาดขึ้นมา รวมทั้งจะส่งผลเสียต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าและเศรษฐกิจของชุมชนและประเทศชาติตามมา ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาวิจัยถึงคุณสมบัติต่างๆของเอสเตอรฺธรรมชาติในการใช้งานเป็นฉนวนให้กับหม้อแปลงต่อไป

ในส่วนของน้ำมันปาล์มจากการวิจัยพบว่าน้ำมันปาล์มเป็นน้ำมันจากพืชที่มีคุณสมบัติคล้ายน้ำมันหม้อแปลงโดยมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า และค่าเปอร์มิททิวิตี้ที่เหมาะสมอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งหากสามารถนำน้ำมันปาล์มมาใช้งานเป็นฉนวนหม้อแปลงได้ จะเป็นการสนับสนุนภาคการเกษตรของประเทศไทย และยังเป็นการลงทุนในการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยเนื่องจากน้ำมันปาล์มมีราคาถูกและสามารถผลิตได้ในประเทศ แต่อย่างไรก็ตามก่อนที่จะนำมาใช้กับหม้อแปลงจำเป็นต้องศึกษาคุณสมบัติต่างๆที่เกี่ยวข้องอย่างละเอียด

โครงการนี้ออกแบบมาเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางความร้อนของน้ำมันหม้อแปลง น้ำมันปาล์ม และเอสเตอรฺธรรมชาติโดยจะทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางความร้อนที่ เช่น ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า ค่าเปอร์มิตติวิตีที่อุณหภูมิใช้งาน ค่าแฟคเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริก ค่าความเป็นกรด เป็นต้น ผลการศึกษาที่ได้จะช่วยให้เกิดความรู้ความเข้าใจในการนำเอาเอสเตอรฺธรรมชาติ และน้ำมันปาล์มมาใช้เป็นฉนวนเหลวทางไฟฟ้าของหม้อแปลงต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาคุณลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า และ ทางความร้อน เมื่อนำเอสเตอรฺธรรมชาติและน้ำมันปาล์มมาใช้เป็นฉนวนเหลวเปรียบเทียบกับการใช้น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนเหลวสำหรับหม้อแปลงขนาดเล็ก(10kVA 400/1000V)
2. ศึกษาพฤติกรรมการเสื่อมคุณภาพของระบบการฉนวนหม้อแปลงเมื่อใช้เอสเตอรฺธรรมชาติ น้ำมันปาล์ม และน้ำมันหม้อแปลง
3. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเอาเอสเตอรฺธรรมชาติหรือน้ำมันปาล์มมาเป็นฉนวนแทนน้ำมันหม้อแปลง

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อทำการทดสอบการใช้ฉนวนเหลวที่แตกต่างกันสามชนิด เพื่อศึกษาข้อแตกต่างและความเป็นไปได้ในการนำฉนวนเหลวมาใช้ทดแทนฉนวนเหลวแบบเก่าที่มีอยู่พบว่าหม้อแปลงที่ใช้ฉนวนเหลวแต่ละชนิดนั้น ระบบฉนวนได้แก่ ฉนวนเหลวและฉนวนแข็ง ควรจะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้า และทางเคมีที่แตกต่างกัน การออกแบบและการทดลองจะทำให้ทราบถึงความเหมาะสมในการเลือกฉนวนเหลวที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อให้เหมาะสมกับสิ่งแวดล้อมในประเทศไทย

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

การศึกษาในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ เป็นการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่แตกต่างกันทั้งสามชนิด หม้อแปลงที่ได้ออกแบบสร้างจะถูกทดสอบตามมาตรฐาน มอก. 384 หลังจากนั้นจะต่อภาระทางไฟฟ้าชนิดอินดักแตนซ์เข้าไปพร้อมทั้งทำการบันทึกค่าตัวแปร ทางไฟฟ้า ทางความร้อน และทางเคมีตามมาตรฐาน IEC และ ASTM

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

หลังจากได้หารือกับทางบริษัท ละมุลวิศกรรม จำกัด ผู้วิจัย และ ทางบริษัท ละมุลวิศกรรม จำกัด มีความเห็นตรงกันจะร่วมมือที่จะพัฒนาโครงการการศึกษาคุณลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางความร้อนของหม้อแปลงที่ใช้เอสเตอรฺธรรมชาติเป็นฉนวนเปรียบเทียบกับหม้อแปลงที่ใช้ น้ำมันหม้อแปลงและใช้น้ำมันปาล์มเป็นฉนวน โดยผู้วิจัยและบริษัท ละมุลวิศกรรม จำกัด จะร่วมมือกัน ออกแบบและสร้างหม้อแปลงขนาดเล็ก 10 kVA 220/1000 V โดยบริษัท ละมุลวิศกรรม จำกัด จะผลิตหม้อแปลงต้นแบบให้ทั้งหมด 3 ลูกโดยใช้ฉนวนเหลวที่ต่างกัน หม้อแปลงลูกแรกใช้น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนหม้อแปลงลูกถัดมาใช้เอสเตอรฺธรรมชาติเป็นฉนวน และ ลูกสุดท้ายใช้น้ำมันปาล์มเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉนวนโดยกระบวนการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าทุกขั้นตอนจะทำที่โรงงานหม้อแปลงของบริษัท ละครุวิศวกรรม จำกัด หลังจากนั้นจะนำมาศึกษาวิจัยที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง หม้อแปลงถูกนำไปติดตั้งใช้งานที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดหม้อแปลงด้วยโหลดอินดักเตอร์ และเริ่มทำการวัดค่าตัวแปรต่างๆ เช่น อุณหภูมิของฉนวนเหลวตลอดระยะเวลาการทดสอบหม้อแปลง ส่วนค่าความหนืดของน้ำมัน ค่าความเป็นกรด ค่าความชื้น ค่าแพคเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริก และค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวจะทำการวัดทุก 2 เดือน การตรวจวัดวิเคราะห์คุณสมบัติของหม้อแปลงจะใช้เวลา 4 เดือน หลังจากทำการวิจัยเสร็จคาดว่า จะสามารถเข้าใจถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้า และทางความร้อนของเอสเทอร์ธรรมชาติ น้ำมันปาล์ม และน้ำมันหม้อแปลง สามารถวิเคราะห์ถึงความ เป็นไปได้ในการนำเอสเทอร์ และ น้ำมันปาล์มมาใช้เป็นตัวเลือกหรือแทนน้ำมันหม้อแปลง สามารถ นำความรู้ที่ได้ไปพัฒนาต่อยอดสำหรับอุตสาหกรรมหม้อแปลงไฟฟ้า และถ่ายทอดให้บุคลากร ผู้ปฏิบัติงานเกี่ยวกับหม้อแปลงจำหน่ายที่ใช้เอสเทอร์เป็นฉนวน ความรู้ที่ได้จะช่วยให้สามารถใช้ในการวางแผนเพื่อให้งานหม้อแปลงที่ใช้เอสเทอร์ธรรมชาติ เป็นฉนวนเหลวทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และในด้านอุตสาหกรรมจะได้รับความน่าเชื่อถือในด้านความปลอดภัยที่มากขึ้นและยังคงไว้ซึ่งคุณภาพของหม้อแปลง

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถแบ่งเป็นหัวข้อตามลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ค้นหาวิจัยที่น่าสนใจ
- 2) ศึกษาทฤษฎีและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง
- 3) ศึกษาการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า
- 4) ศึกษาคุณสมบัติของฉนวนเหลว
- 5) ออกแบบและสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า
- 6) ทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าตามมาตรฐาน
- 7) ทำการติดตั้งหม้อแปลงพร้อมบันทึกค่าอุณหภูมิ และตัวแปรทางไฟฟ้า
- 8) นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบและวิเคราะห์
- 9) สรุปผลการทดสอบ
- 10) จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐานแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการศึกษา และทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วย การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อใช้ในการทดสอบฉนวนเหลวทั้งสามชนิด ฉนวนภายในหม้อแปลง การเปรียบเทียบคุณสมบัติของ ฉนวนเหลวหม้อแปลง คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนเหลว การเปรียบเทียบคุณสมบัติของฉนวนแข็งของ หม้อแปลง

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบหม้อแปลง และการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า ทางเคมี และ ทางความร้อนของหม้อแปลงที่ใช้ฉนวนเหลวแตกต่างกันสามชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า ทางเคมี และทางความร้อนของหม้อแปลงภายใต้การทดสอบในสภาพแวดล้อมเดียวกัน

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยที่ได้ทดสอบมาทั้งหมด และสรุปเกี่ยวกับความเป็นไปได้ในการนำฉนวนเหลว คือ เอสเตอร์ธรรมชาติ และน้ำมันปาล์มมาใช้ทดแทนน้ำมันหม้อแปลงชนิดเก่า

1.7 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในปี พ.ศ.2545 มีการนำเสนอเรื่อง “Performance and New Application of Ester Liquids” [1] ใน “2002 IEEE 14th International Conference on Dielectric Liquids” เขียนโดย E. Gockenbach and H. Borsi พบว่า คุณสมบัติของฉนวนผสมระหว่างเอสเตอร์กับน้ำมันหม้อแปลง พบว่าหากทำการผสมน้ำมันหม้อแปลงด้วยเอสเตอร์ในอัตราส่วนที่เหมาะสม จะทำให้คุณสมบัติการเป็นฉนวนของฉนวนเหลวดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงเพียงอย่างเดียว

ในปี พ.ศ.2551 มีการนำเสนอเรื่อง “The Duval Triangle for Load Tap Chargers, Non-Mineral Oils and Low Temperature Faults in Transformers” [2] ใน “IEEE Electrical Insulation Magazine November/December 2008--Vol. 24 No. 6, pp. 22-29” เขียนโดย M. Duval พบว่า ได้ทำการศึกษาเพื่อนำเสนอวินิจฉัยสภาพปัญหาการใช้งานฉนวนเหลวประเภทเอสเตอร์ และได้พัฒนา Duval Triangle แบบใหม่ขึ้นมาสำหรับการวินิจฉัยปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อใช้งานเอสเตอร์ในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยอาศัยการวินิจฉัยปริมาณและชนิดของแก๊สที่เกิดขึ้น

ในปี พ.ศ. 2553 มีการนำเสนอเรื่อง “Experiences in Service with New Insulating Liquids” [3] ใน “CIGRE 436” เขียนโดย CIGRE Working Group A2.35 พบว่า แนวโน้มการใช้ฉนวนเหลว เอสเตอร์ธรรมชาติเป็นฉนวนหลักของหม้อแปลงระบบจำหน่าย ว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมากตั้งแต่ปี ค.ศ. 2003 เป็นต้นมา

ในปี พ.ศ.2556 มีการนำเสนอเรื่อง “Alternative Insulating Fluids in Comparison to Traditional Mineral Oil” [4] ใน “May 2013, Dissertation, Graz University of Technology.” เขียนโดย E.Pagger พบว่า มีการศึกษาความเข้ากันได้ของวัสดุที่ใช้ภายในหม้อแปลงโดยพบว่าปริมาณ corrosive sulfur ที่เกิดจากการใช้น้ำมันหม้อแปลงร่วมกับทองแดงจะมีค่าสูงกว่าการใช้งาน เอสเตอร์ร่วมกับทองแดง ประมาณ 2 เท่า corrosive sulfur เป็นสาเหตุสำคัญประการหนึ่งที่ทำให้เกิดความล้มเหลวในการฉนวน ทำให้หม้อแปลงเกิดลัดวงจร และเกิดความเสียหายต่างๆตามมาหลายประการต่อทั้งชีวิตและทรัพย์สิน ดังนั้น จึงเป็นแนวโน้มที่สำคัญสำหรับการใช้งานเอสเตอร์เป็นฉนวนเหลวสำหรับหม้อแปลงเนื่องจากโอกาสเกิดความล้มเหลวของการเป็นฉนวนเนื่องจากผลของ corrosive sulfur เกิดได้ยากขึ้น

ในปี พ.ศ.2559 มีการนำเสนอเรื่อง “Comparative Studies on the Aging of Thermally Upgraded Paper Insulation in Palm Fatty Acid Ester, Mineral Oil, and Natural Ester” [5] ใน “IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 23, No. 1; February 2016” เขียนโดย Junko Tokunaga และคณะ พบว่า เพรสบอร์ดที่ผ่านการอิมเพกเนตด้วยน้ำมันปาล์มนั้นเมื่อมีการเร่งอายุโดยใช้ความร้อนพบว่า ค่าอายุของฉนวนมีค่ามากกว่าเพรสบอร์ดที่อิมเพกเนตด้วยน้ำมันหม้อแปลงแต่มีค่าน้อยกว่าเพรสบอร์ดที่อิมเพกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ และยังให้ข้อสังเกตว่าชนิดของฉนวนก็มีผลต่อการเสื่อมสภาพเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี พ.ศ.2560 มีการนำเสนอเรื่อง “Studying the Loss of Life of NaturalEster-Filled Transformer Insulation: Impact of Moisture on the Aging Rate of Paper” [6] ใน “IEEE Electrical Insulation Magazine, Year: 2017, Volume: 33 ” เขียนโดย Belén García และคณะ พบว่า เพรสบอร์ดที่ผ่านการอิมเพิร์กเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติเมื่อเวลาผ่านไปพบว่าอายุที่คงเหลือของฉนวนมีค่ามากกว่าเพรสบอร์ดที่อิมเพิร์กเนตด้วยน้ำมันหม้อแปลง ค่าเริ่มต้นของความชื้นที่มีอยู่ในฉนวนมีผลต่ออายุของฉนวนที่อิมเพิร์กเนตด้วยน้ำมันหม้อแปลงเป็นอย่างมาก แต่ส่งผลกับฉนวนที่อิมเพิร์กเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติเพียงเล็กน้อย ในทางกลับกันฉนวนที่อิมเพิร์กเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติจะไวต่อความชื้นมากกว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

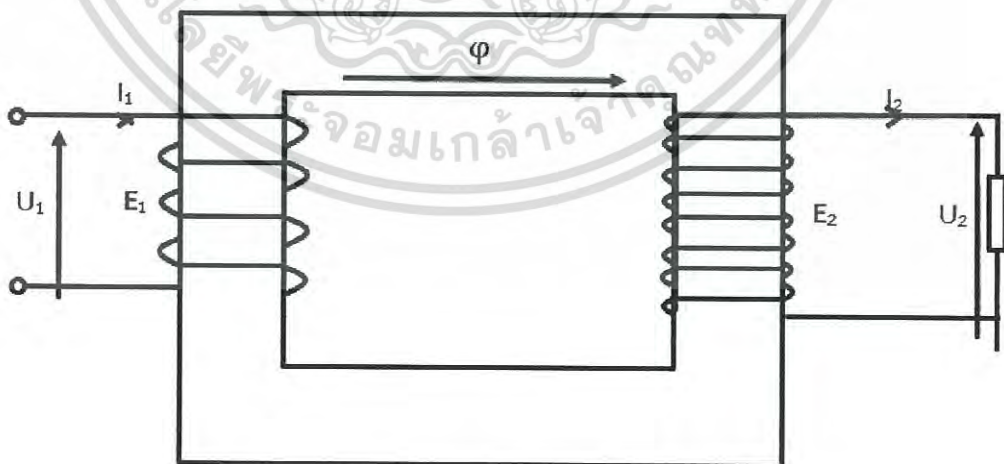
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การออกแบบหม้อแปลง

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากแรงดันระดับหนึ่งไปยังแรงดันอีกระดับหนึ่ง อาจสูงขึ้นหรือต่ำลง หรือเท่าเดิมก็ได้ เช่น หม้อแปลงขดลวดแยก หลักการทำงานของหม้อแปลงอาศัยการเหนี่ยวนำของขดลวด ที่อยู่ในสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ส่วนประกอบที่สำคัญของหม้อแปลง ประกอบด้วย แกนเหล็ก เป็นทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็ก และมีขดลวดสองชุด ชุดหนึ่งเป็นด้านป้อนแรงดันเข้า อีกชุดหนึ่งเป็นด้านจ่ายแรงดันออก พันอยู่บนแกนเหล็ก ดังรูป นอกจากนี้แกนเหล็กและขดลวดแล้ว ก็มีฉนวนซึ่งถือเป็นส่วนประกอบสำคัญในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทุกชนิด [7]

โดยที่

Φ	คือ	ฟลักซ์แม่เหล็ก (Wb)
N_1	คือ	จำนวนรอบขดลวดด้านป้อนเข้า (Turn)
N_2	คือ	จำนวนรอบขดลวดด้านจ่ายออก (Turn)
U_1	คือ	แรงดันที่ป้อนเข้า (V)
U_2	คือ	แรงดันที่จ่ายออก (V)
E_1	คือ	แรงดันที่เหนี่ยวนำด้านป้อนเข้า (V)
E_2	คือ	แรงดันที่เหนี่ยวนำด้านจ่ายออก (V)
I_1	คือ	กระแสด้านป้อนเข้า (A)
I_2	คือ	กระแสด้านจ่ายออก (A)



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบวงจรแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำบนขดลวดเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์

$$e(t) = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

เมื่อป้อนแรงดันกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ให้กับขดลวดทางด้านกำลังไฟฟ้าเข้าทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กเป็นรูปคลื่นไซน์ด้วย

$$\phi(t) = \phi_{\max} \sin \omega t \quad (2.2)$$

ดังนั้นแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดอีกชุดหนึ่งในทางด้านจ่ายกำลังไฟฟ้าออกเปลี่ยนไปตามเวลา คือ

$$e(t) = -N\omega \phi_{\max} \cos \omega t \quad (2.3)$$

ซึ่งจะเห็นว่าได้แรงดันเหนี่ยวนำ $e(t)$ นำหน้าเส้นฟลักซ์แม่เหล็ก $\phi(t)$ เป็นมุมทางไฟฟ้า $90^\circ (\pi/2)$ แรงดันเหนี่ยวนำค่า r.m.s. คือ

$$\begin{aligned} E &= \frac{2}{\sqrt{2}} \pi f n \phi_{\max} \\ E &= 4.44 \pi f n \phi_{\max} \end{aligned} \quad (2.4)$$

โดย $\phi_{\max} = B_{\max} A$ จะได้สมการพื้นฐานของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดของหม้อแปลงคือ

$$E_{\text{กัล้า}} = 4.44 \pi f n B_{\max} A \quad (2.5)$$

2.1.1 การสูญเสียเนื่องจากไดอิเล็กตริก (Dielectric losses)

โดยทั่วไปกระแสกระแสดำเนินของหม้อแปลงทดสอบมีค่าประมาณ 3-5% ของกระแสโหลดเต็ม (Full load current) ดังนั้นการสูญเสีย I^2R ในขดลวดเนื่องจากกระแสกระแสดำเนินจึงจำเป็นที่จะต้องนำมาพิจารณาด้วยแต่แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงจำหน่ายมีระดับต่ำ จึงทำให้การสูญเสียเนื่องมาจาก ไดอิเล็กตริกไม่ต้องนำมาพิจารณา ดังนั้นกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดจะประกอบกับการสูญเสียเนื่องจากและฮิสเตอรีซิส การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก และการสูญเสียในขดลวดแรงดันสูงโดยมีสมการในการคำนวณดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{0(Rhv)} = I^2 R \quad (2.6)$$

2.1.2 การสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์รีซิสในแกนเหล็ก (Hysteresis loss component)

เป็นกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปในการกลับทิศทางแม่เหล็ก การลดการสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์รีซิสสามารถทำได้โดยการใช้แกนเหล็กที่มีส่วนผสมของซิลิคอน การสูญเสียนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพหรือเกรดของแกนเหล็ก และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เลือกใช้ และเป็นสัดส่วนกับความถี่ของแรงดันไฟฟ้า สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P_h = f a_1 B^{c_1} \Delta P_h(B) \quad (2.7)$$

$$\Delta P_h(B) = f a_2 (B - B_h)^{c_2} \quad (2.8)$$

เมื่อ a_1 เท่ากับ 2.147×10^{-3}
 c_1 เท่ากับ 2.079
 a_2 เท่ากับ 2.793

2.1.3 การสูญเสียในแกนเหล็กเนื่องจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก (Eddy current loss component)

แกนเหล็กจะเป็นทั้งตัวนำไฟฟ้าและเป็นตัวนำเส้นแรงแม่เหล็กด้วย การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแกนเหล็กเกิดจากการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็ก ทำให้เกิดการไหลของกระแสในแกนเหล็กกระแสนี้เรียกว่ากระแสไหลวน ซึ่งจะให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าและเกิดความร้อนขึ้นตามมา การลดความสูญเสียนี้สามารถทำได้โดยการใช้แผ่นเหล็กบาง ๆ มาประกอบกัน และแผ่นเหล็กแต่ละแผ่นต้องถูกเคลือบด้วยฉนวน กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากกระแสไหลวนนั้นจะเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับกำลังสองของความหนาของแผ่นเหล็กแต่ละแผ่นและกำลังสองของความถี่แรงดันไฟฟ้าจะเป็นไปตามสมการ

$$P_e(B_u) = f^2 a_e B^2 \quad (2.9)$$

ดังนั้นในการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในหม้อแปลงขณะไม่มีโหลดนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการข้างต้น

2.1.4 ขนาดกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดและน้ำหนักของขดลวด

กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดในหม้อแปลงอาจเรียกว่าการสูญเสียในขดลวดทองแดง(Copper loss) เกิดขึ้นจากการไหลของกระแสขณะมีโหลดในขดลวดของหม้อแปลงซึ่งจะประกอบด้วย การสูญเสียจากส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1. กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะต่อโหลด

ความต้านทานของขดลวดสามารถคำนวณได้ตามการ

$$R = \frac{\rho LN}{a_w} \quad (2.10)$$

โดยที่ ρ คือ ความต้านทานจำเพาะของตัวนำ มีค่าเท่ากับ 2.78×10^{-8} ที่ 75 องศาเซลเซียส
 L คือ ความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวด (m)
 N คือ จำนวนรอบของขดลวด (turn)
 A_w คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ (m^2)

ดังนั้นเมื่อหาค่าความต้านทานของขดลวดแรงต่ำและขดแรงสูงได้ก็สามารถคำนวณหา กำลังไฟฟ้าสูญเสีย หาได้จากสมการ

$$P_L = I_p^2 R_p + I_s^2 R_s \quad (2.11)$$

โดยที่ I_p คือ กระแสของขดลวดแรงต่ำ (A)
 I_s คือ กระแสของขดลวดแรงสูง (A)
 R_p คือ ความต้านทานของขดลวดแรงต่ำ (Ω)
 R_s คือ ความต้านทานของขดลวดแรงสูง (Ω)

สำหรับการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในขดลวดและการสูญเสียปฏิกิริยาสามารถหาได้จากการปฏิบัติและทดลอง โดยกำหนดแฟคเตอร์ความสูญเสียในขดลวด (K_d) มีค่าประมาณ 7% ของการสูญเสียในขดลวด ดังนั้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดคำนวณได้ตามสมการ

$$W_L = P_L + K_d P_L \quad (2.12)$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียของหม้อแปลงจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ โดยอ้างอิงที่อุณหภูมิที่ 75 องศาเซลเซียส

2. น้ำหนักของขดลวด

น้ำหนักของตัวนำที่ใช้เป็นวัสดุในการพันขดลวดขึ้นอยู่กับความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของวัสดุตัวนำ จำนวนรอบขดลวดและพื้นที่หน้าตัดตัวนำสามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$W_{cu} = D_w a_w LN \quad (2.13)$$

D_w = ความหนาแน่นของวัสดุตัวนำโดยทองแดงโดยมีความหนาแน่นเท่ากับ

$8.92 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ที่อุณหภูมิเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 คุณสมบัติทางความร้อนของหม้อแปลง

กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แกนเหล็กและขดลวดของหม้อแปลง เป็นสาเหตุทำให้เกิดความร้อนขึ้น และความร้อนต้องถูกระบายออกจากหม้อแปลง โดยมีอุณหภูมิที่ไม่ทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพอุณหภูมิในหม้อแปลงนั้นมีผลต่อ kVA ที่กำหนด (Rate ,kVA) และอายุการใช้งานของหม้อแปลง

1. มาตรฐานของอุณหภูมิ (Temperature standards)

ตามมาตรฐาน IEC 60296 [1] ได้กำหนดขีดจำกัดอุณหภูมิของหม้อแปลงน้ำมัน ระบายความร้อนด้วยวิธีธรรมชาติ และมีอุณหภูมิแวดล้อมสูงสุดเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส

2. การถ่ายเทความร้อน (Mode of heat transfer)

ความร้อนในน้ำมันหม้อแปลงน้ำมันมีระบบถ่ายเทความร้อน 2 ขั้นตอน คือ

- 1) ระบบความร้อนของแกนเหล็กและขดลวดถ่ายเทสู่น้ำมัน
- 2) ระบบความร้อนของน้ำมันถ่ายเทสู่อากาศ

โดยความร้อนจะถูกถ่ายเทด้วยวิธีใด วิธีหนึ่งในสามวิธีนี้ คือ วิธีการนำความร้อน(conduction) การแผ่รังสีความร้อน (Conduction) วิธีการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) วิธีพาความร้อน (Convection)

2.1.6 การคำนวณหาค่าอินดักแตนซ์ของหม้อแปลงทดสอบ

หม้อแปลงทดสอบจะไม่พิจารณาค่ากระแสชั่วขณะเพราะในการกระตุ้นจะทำลักษณะค่อย ๆ เพิ่มแรงดันเข้าที่ขดลวดแรงดันต่ำ สำหรับหม้อแปลงทดสอบการคำนวณค่าอินดักแตนซ์ดังต่อไปนี้

$$L = \frac{X_{sc}}{2\pi f} \quad (2.14)$$

เมื่อ	L	คือ	ค่าอินดักแตนซ์ของหม้อแปลงทดสอบ (H)
	X _{sc}	คือ	ค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวด (Ω)
	f	คือ	ความถี่ของแรงดันไฟฟ้า (Hz)

2.1.7 น้ำมันหม้อแปลง

น้ำมันหม้อแปลงนำมาใช้เป็นฉนวนภายใน โดยน้ำมันหม้อแปลงนั้นทำหน้าที่เป็นฉนวนแทรกซึมและช่วยในการระบายความร้อน จึงต้องมีคุณสมบัติทั้งทางฟิสิกส์ ทางเคมี และทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60296

2.1.8 กระดาษฉนวน

กระดาษฉนวนใช้เป็นฉนวนระหว่างชั้นขดลวดระหว่างขดลวดแรงสูงกับแรงต่ำและระหว่างขดลวดกับแกนเหล็ก เนื่องจากกระดาษมีรูพรุน จึงต้องอบแห้งและแช่น้ำมันหม้อแปลง กระดาษฉนวนที่ใช้กันทั่วไปคือ

1. กระดาษคราฟท์ ผลิตจากเส้นใย (Fibers) ของไม้ซึ่งมีความหนาของกระดาษ ตั้งแต่ 0.045 mm. ถึง 0.380 mm. และมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

2. เพรสบอร์ด เป็นกระดาษแข็งและหนากว่ากระดาษคราฟท์คือหนาตั้งแต่ 0.8 mm. ถึง 3.2 mm. ซึ่งมีความคงทนความร้อนได้เท่ากับ 105 °C โดยที่ไม่ทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพลงเมื่อกระดาษแห้งจะมีความคงทนของไดอิเล็กตริกได้ดีและการสูญเสียของไดอิเล็กตริกต่ำแต่กระดาษสามารถดูดซับความชื้นได้ง่าย ดังนั้นในการสร้างหม้อแปลงจะอบส่วนแกนเหล็กและขดลวดที่ประกอบขึ้นรูปให้แห้งแล้วนำไปจุ่มน้ำมันในถังหม้อแปลงเพื่อป้องกันความชื้นและรักษาความคงทนของไดอิเล็กตริกของกระดาษ และกระดาษอัดแรงมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง

2.1.9 เส้นลวดอบน้ำยาฉนวน

ขดลวดพันด้วยเส้นลวดอบน้ำยาฉนวน Poly Formol Rasin (PVF) ซึ่งทนน้ำมันได้ดี มีความเหนียวยืดหยุ่นเป็นพิเศษ ทนต่อการขีดถู และสามารถนำความร้อนได้ถึง 180 °C การคำนวณรอบของขดลวดสามารถประมาณได้จากการคำนวณของสมการ

$$N = \frac{E}{4.44fBA} \quad (2.15)$$

N คือ จำนวนรอบขดลวด (turn)

F คือ ความถี่ที่ใช้งาน (Hz)

B คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่คล่องขดลวด (T)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (m²)

การเลือกชนิดวัสดุที่นำมาทำเป็นขดพิจารณาจากน้ำหนักต่อปริมาตร สภาพต้านทาน ความแข็งแรงทางกล ความคงทนต่อความกัดกร่อน การขยายตัว ราคาของวัสดุรูปแบบและขนาดของขดลวดแรงสูงและขดลวดแรงต่ำต้องคำนึงถึงค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดต่างๆของขดลวดให้ไม่เกินค่าที่ทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนหรือเกิดเบรกดาวในฉนวน

2.1.10 ตัวถัง

ตัวถังโลหะจะทำหน้าที่รับแรงทางกลที่เกิดจากน้ำมันของหม้อแปลงและทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการระบายความร้อนที่เกิดจากกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลง การถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าในตัวนำไฟฟ้าที่มีค่าความต้านทานของขดลวด ฟลักซ์แม่เหล็กที่ไหลในสารเฟอร์โรแมกเนติก รวมทั้งเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วไหลในตัวถังและฝาปิดของหม้อแปลง ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของหม้อแปลงสูงขึ้นจากอุณหภูมิรอบข้าง โดยกรณีทั่วไปจะเป็นอากาศ โดยความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ดังนั้นการออกแบบหม้อแปลงควรมีพื้นที่ผิวสัมผัสอากาศเพียงพอโดยอุณหภูมิขดลวดต้องไม่เกินค่าที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.11 แกนเหล็ก

แกนเหล็กจะทำหน้าที่เป็นทางของเส้นแรงแม่เหล็กเพื่อให้เกิดความเหนี่ยวนำทางแม่เหล็ก โดยพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก จำนวนรอบขดลวดและแรงดันจะสัมพันธ์ตามสมการ 2.11 แกนเหล็กจะประกอบขึ้นจากแผ่นเหล็กบางเนื่องจากต้องการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก อันเกิดจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก การออกแบบพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมหลายชั้นอัดกันในวงกลมเพื่อให้สามารถใช้พื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าพื้นที่หน้าตัดขวางเป็นรูปสี่เหลี่ยม และเหตุผลทางกายภาพในการพันขดลวดให้มีลักษณะเป็นวงกลมได้ง่ายขึ้นคือ ลดการเสียดสีระหว่างขดลวดกับแกนเหล็ก และเมื่อขณะใช้งานจะเกิดแรงระหว่างขดลวดก็จะไม่ทำให้ขดลวดเสียรูป และแกนเหล็กภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะใช้เหล็กผสมซิลิคอน เพื่อเพิ่มค่าความต้านทานจำเพาะทำให้การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนลดลง (Eddy Current) เหล็กที่ผสมซิลิคอนสูงจะทำให้ฮิสเทอรีซิสลูป (Hysteresis Loop) แคบลง การสูญเสียฮิสเทอรีซิสก็จะลดลงด้วย เหล็กซิลิคอนจะมีเปอร์เซ็นต์ที่สูงทำให้ใช้กระแสกระตุ้นในวงจรแม่เหล็กลดลง เหล็กที่ใช้อาจเป็นเหล็กกรีดร้อนหรือเหล็กกรีดเย็น เหล็กกรีดร้อนจะมีความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุด 1.45 Wb/m^2 ส่วนเหล็กกรีดเย็นจะมีความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุดมากกว่า 1.8 Wb/m^2 โดยส่วนใหญ่แล้วโรงงานหม้อแปลงไฟฟ้าจะใช้เหล็กกรีดเย็นประกอบแกนเหล็ก แม้ว่าราคาแพงแต่สามารถลดน้ำหนักของแกนเหล็กได้มากกว่า

2.1.12 แรงดันกระจายของขดลวด

หม้อแปลงในภาวะคงตัว แรงดันบนขดลวดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวของขดลวด ในภาวะ ทรานเซียนต์หรือแรงดันอิมพัลส์ การกระจายของแรงดันบนขดลวดหม้อแปลง จะไม่สม่ำเสมอตามแนวความยาวขดลวด เนื่องจากผลของค่าเก็บประจุไฟฟ้าสแตตริกของขดลวด จะทำให้การฉนวนของขดลวดรอบต้นทาง หรือใกล้ขั้วแรงสูงมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่ารอบที่อยู่ห่างขั้วแรงสูงออกไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งแรงดันอิมพัลส์ที่มีความชันสูง อันเนื่องมาจากคลื่นจร จากฟ้าผ่าหรือเกิดคลื่นตัดจากการทดสอบ ซึ่งเป็นสิ่งหนึ่งที่จะต้องพิจารณาคำนึงถึงในการออกแบบจัดวางขดลวด

2.2 ฉนวนเหลว [8]

ฉนวนเหลวสามารถผลิตได้จากกระบวนการกลั่นปิโตรเลียมและการสังเคราะห์ทางเคมี กระบวนการดังกล่าวทำให้โครงสร้างทางเคมีของฉนวนที่ได้มีความแตกต่างกันโดยทั่วไป สามารถแบ่งฉนวนเหลวเป็นประเภทใหญ่ๆ 2 ประเภทคือ ประเภทสารอินทรีย์กับ ประเภทสารอนินทรีย์

2.2.1 น้ำมันหม้อแปลง

น้ำมันหม้อแปลงเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากการกลั่นปิโตรเลียมที่ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนหลายชนิด สามารถจำแนกตามโครงสร้างโมเลกุลได้ 3 ประเภท คือ พาราฟินิก (Paraffinic) แนฟทีนิก (Naphthenic) และอโรมาติก (Aromatic) โดยพาราฟินิกและแนฟทีนิกเป็นประเภทที่มีเสถียรภาพ เนื่องจากเป็นไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว ส่วนอโรมาติกไม่เสถียรภาพเนื่องจากเป็นไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว น้ำมันหม้อแปลงแต่ละประเภทยังประกอบไปด้วยโมเลกุลที่มีขนาดและความซับซ้อนของโครงสร้างต่างกัน ไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กและมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนจะอยู่สถานะก๊าซที่อุณหภูมิห้อง ส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลสูงมากและมีโครงสร้างสลับซับซ้อนจะมีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง เช่น ชีผึ้งพาราฟิน (Paraffin wax) แอสฟัลท์ (Asphaltic bitumen) เป็นต้น

ลักษณะสมบัติที่ต้องการของน้ำมันหม้อแปลงสำหรับการฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจะกำหนดด้วยคุณสมบัติทางฟิสิกส์เคมี และไฟฟ้า ซึ่งต้องทำให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์การใช้งาน คุณสมบัติดังกล่าวแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ เคมี และไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง

คุณสมบัติทางฟิสิกส์	คุณสมบัติทางเคมี	คุณสมบัติทางไฟฟ้า
การระบายความร้อน - ความหนาแน่น - ความหนืด - สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Coefficient of thermal expansion) - สภาพนำความร้อน (Thermal conductivity) - ความถ่วงความร้อนจำเพาะ (Specific heat) การเก็บรักษา และปฏิบัติงาน - จุดติดไฟ - จุดวาบไฟ - ความดันไอ - อุณหภูมิติดไฟทันที (Auto ignition temperature)	องค์ประกอบทางเคมี - โครงสร้างโมเลกุล - อัตราส่วนปริมาณของพาราฟินิก แนฟทีนิก และอโรมาติก - ค่าความเป็นกลาง - แรงตึงผิว (Interfacial tension)	- ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า - ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก - ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ - ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า - ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ - การดิสชาร์จบางส่วน และแรงดันเริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วน

2.2.2 เอสเตอร์ [9]

เอสเตอร์ธรรมชาติที่มีใช้งานมานาน เพื่อเป็นฉนวนไฟฟ้าแรงสูงได้แก่ เอสเตอร์ธรรมชาติ เช่น น้ำมันแคสเตอร์ (Castor oils) ซึ่งได้นำมาใช้เป็นฉนวนของคาปาซิเตอร์และเมื่อไม่นานมานี้ได้มีการนำเอสเตอร์ธรรมชาติ และ ฟอสเฟตเอสเตอร์ (phosphate esters) มาใช้งาน เอสเตอร์ธรรมชาติ มีจุดติดไฟสูง มีค่าเปอร์มิตติวิตีสูงกว่า organic esters ได้ถูกนำไปใช้ในคาปาซิเตอร์ สำหรับ phosphate esters มีค่าจุดเดือดและจุดติดไฟสูงมีค่าเปอร์มิตติวิตีสูงกว่าน้ำมันหม้อแปลงและน้ำมันซิลิโคน จึงนิยมนำไปใช้กับหม้อแปลงที่ติดตั้งในบริเวณที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดอันตรายสูง (Hazardous areas) และหม้อแปลงที่ใช้ในสวิตช์เกียร์ เอสเตอร์สังเคราะห์ และ เอสเตอร์ธรรมชาติ เป็นที่นิยมมากขึ้นเนื่องจากเอสเตอร์สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติถึง 90% ภายในระยะเวลาประมาณ 1 เดือน นอกจากนี้แล้ว แรงดันเบรกดาวนักระแสสลับของเอสเตอร์ยังคงสูงอยู่ แม้ว่าจะมีความชื้นหรือปริมาณน้ำผสมอยู่ในเอสเตอร์สูงถึง 300 ppm และเนื่องจากการที่เอสเตอร์มีค่าเปอร์มิตติวิตีสูงกว่าน้ำมันหม้อแปลงทำให้การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าในระบบการฉนวนหม้อแปลง (เอสเตอร์และเซลลูโลส)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่เช่นงานตีพิมพ์ การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของฉนวนทั้งสองชนิด มีความใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตามเอสเตอรืนั้นมีความหนืดสูงกว่าน้ำมันหม้อแปลง ดังนั้นที่พิกัดกำลังหม้อแปลงเดียวกัน เมื่อใช้เอสเตอรืเป็นฉนวนจะต้องคำนึงถึงการระบายความร้อนมากขึ้น

1) ข้อดีของการใช้เอสเตอรืธรรมชาติเป็นฉนวนเหลวในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

- Fire Safety (ความปลอดภัยต่ออัคคีภัย)

เอสเตอรืธรรมชาติสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าน้ำมันหม้อแปลง ซึ่งจะช่วยให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน และทรัพย์สินต่างๆ ได้เป็นอย่างดี

- ความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

เอสเตอรืสามารถใช้งานได้ดีและไม่อันตรายกับสิ่งแวดล้อมเนื่องจาก

- เป็นน้ำมันที่ผลิตจากเมล็ดพืช

- Low carbon footprint

- ย่อยสลายได้ตามมาตรฐาน IEC 61039

- จัดว่าเป็นฉนวนเหลวที่ไม่อันตรายได้รับการรับรองจาก UBA (Utility Business Alliance)

- ไม่เป็นพิษและไม่อันตรายต่อสัตว์น้ำ

- ไม่ระเหยออกไปสู่สิ่งแวดล้อม

- ไม่เป็นอันตรายกับตะกอนในระบบบำบัดน้ำ

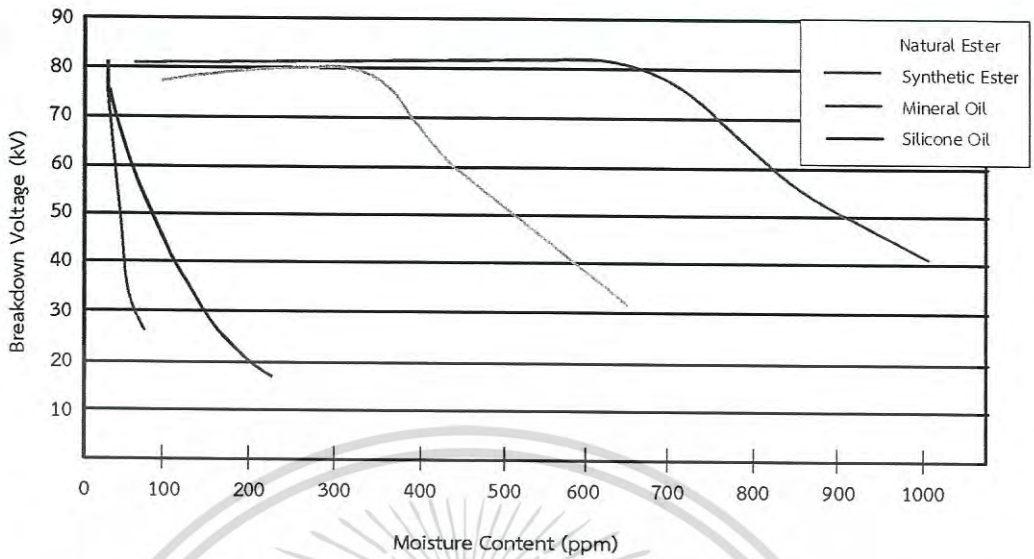
- การยืดอายุของหม้อแปลง

เนื่องจากเอสเตอรืธรรมชาติเป็นฉนวนเหลวที่จะถนอมเซลล์ลูลอสในกระดาษฉนวนของหม้อแปลงเนื่องจากเป็นฉนวนที่ดูดซับความชื้นได้สูงก่อนที่จะเสียสภาพความเป็นฉนวนดังนั้นจึงทำให้กระดาษฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้ารับความชื้นได้ยากมากขึ้นมีผลให้กระดาษฉนวนมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น และเนื่องจากอายุของหม้อแปลงโดยส่วนใหญ่ขึ้นขึ้นอยู่กับสภาพของกระดาษฉนวนในน้ำมันหม้อแปลงเหตุผลนี้จึงทำให้เอสเตอรืธรรมชาติ มีผลให้หม้อแปลงไฟฟ้ามีอายุการใช้งานที่นานมากขึ้น คุณสมบัติของเอสเตอรืธรรมชาติเปรียบเทียบกับน้ำมันหม้อแปลงแสดงในตารางที่ 2.2 และรูปที่ 2.2-2.3 ตามลำดับ

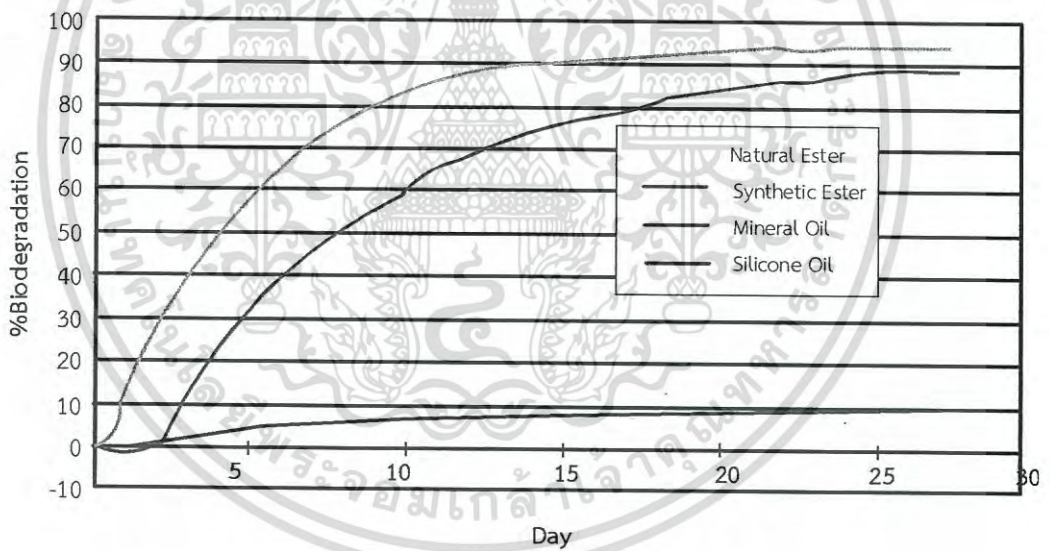
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติหลักของฉนวนเหลวชนิดต่างๆโดยบริษัท MIDEL

	Unit	Midel7131	Silicone Liquid	Mineral Oil	Midel eN
General Properties					
Density at 20°C	Kg/dm ³	0.97	0.96	0.88	0.92
Specific Heat at 20°C	J/kg K	1880	1510	1860	1848
Thermal Conductivity at 20°C	W/m K	0.144	0.181	0.126	0.177
Kinetic Viscosity at 20°C	mm ² /s	70	50	22	84.8
Kinetic Viscosity at 100°C	mm ² /s	5.25	15	2.6	9.3
Pour Point	°C	-60	<-50	-50	-31
Expansion Coefficient	/°C	0.00075	0.00104	0.00075	0.00074
Flash Point to ISO 2719	°C	260	260	150	327
Fire Point to ISO 2592	°C	316	>350	170	360
Fire Hazard Classification to IEC 61100/IEC 61039		K3	K3	0	K2
Biodegradability at 28 Days					
- OECD 301 F	%	89	N/A	N/A	97
- OECD 301 D	%	N/A	<5	<10	N/A
Chemical Properties					
Neutralization Value	mg KOH/g	<0.03	<0.01	<0.03	<0.05
Net calorific Value	MJ/kg	31.6	28.0	46.0	37.5
Dielectric Properties					
Breakdown Voltage	kV	>75	50	>70	>75
Dielectric Dissipation Factor at 90 °C		<0.008	<0.001	<0.002	<0.005
Permittivity at 20°C		3.2	2.7	2.2	3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวน์กับ Moisture Content ของฉนวนเหลวชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการย่อยสลายกับเวลาของฉนวนเหลวชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 น้ำมันปาล์ม(Palm Oil) [10]

ได้จากการบีบอัดเนื้อผล (Fruit pulp) ของปาล์มน้ำมัน ส่วนผนังผลชั้นกลางซึ่งมีน้ำประมาณ 45-50% องค์ประกอบส่วนใหญ่ คือกรดปาล์มมิติก (Palmitic acid) แต่ยังมีกรดไขมันไม่อิ่มตัว ได้แก่ กรดโอเลอิก และกรดลิโนเลอิกด้วยเช่นกัน น้ำมันปาล์มอีกชนิดหนึ่งได้จากการบีบอัดเมล็ด เรียกว่า palm kernel oil มีองค์ประกอบคล้ายน้ำมันมะพร้าวมากจึงสามารถนำมาใช้แทนกันได้ น้ำมันปาล์ม ยังถูกใช้เป็นส่วนผสมมากในอุตสาหกรรมการทำสบู่ เทียน มากา린 และใช้เป็นน้ำมันปรุงอาหาร คุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันปาล์มเปรียบเทียบกับ น้ำมันชนิดอื่นแสดงดังตารางที่ 1.3 โดย น้ำมันปาล์มที่ได้นำมาใช้ในการศึกษาในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้เติมสาร Anti-oxidation ได้แก่ สาร Butylated hydroxyanisole (BHA) และ Butylated hydroxytoluene (BHT) อย่างละ 0.1% โดยมวลต่อปริมาตรเพื่อให้ไวต่อความชื้นน้อยลง

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางความร้อนของน้ำมันปาล์มเทียบกับน้ำมันพืชชนิดอื่นที่มีผลที่ศึกษาได้ดังนี้ [10]

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

2.3 ฉนวนแข็งในหม้อแปลงไฟฟ้า [11]

ฉนวนแข็งนอกจากจะทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าแล้วบางส่วนยังจะต้องทำหน้าที่ยึดหรือรับแรงกลอันเกิดจากน้ำหนักของโครงสร้าง หรือแรงกลไดนามิกส์ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าอีกด้วย ฉนวนแข็งเมื่อทำการแบ่งประเภทโดยการอาศัยโครงสร้างทางเคมีจะสามารถจำแนกได้เป็น สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และโพลิเมอร์ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การแบ่งประเภทของฉนวนแข็ง

Organic	Inorganic	Synthetic polymers	
		Thermoplastic	Thermosetting
Amber	Ceramics	Prespex	Epoxy
Paper	Glass	Ployethylene	Phemolics
Pressboard	Mica	Polypropylene	Melamine
Rubber	Fiber glass	Polystyrene	Urea formaldehyde
Wood	Enamel	Polyvinyl chloride	Crosslinked
Resins		Polyamic	polystyrene
		Polycarbonate	Elastomers

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาหรือข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉนวนแข็งที่เป็นสารอินทรีย์ที่เกิดจากพืช และสัตว์นั้นจะให้คุณสมบัติความเป็นฉนวนที่ดีแต่จะเสื่อมสภาพเร็วโดยเฉพาะเมื่ออุณหภูมิขณะทำงานของฉนวนมากกว่า 100 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงต้องนำฉนวนแข็งดังกล่าวไปปรับปรุงคุณสมบัติเสียก่อน ก่อนที่จะนำไปใช้งานซึ่งมักจะนำไปใช้งานร่วมกับฉนวนเหลวในการเป็นฉนวนของสายเคเบิล ตัวเก็บประจุของหม้อแปลง ฉนวนแข็งที่เป็นสารอนินทรีย์ จะมีคุณสมบัติแตกต่างกันชัดเจน ทั้งคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้า ซึ่งจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางโครงสร้างของฉนวนดังกล่าวอุณหภูมิในการทำงานอาจสูงถึง 250 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปแล้วฉนวนแข็งที่เป็นสารอนินทรีย์จะนำไปใช้ทำลูกถ้วยฉนวนหรือปลอกฉนวนนำสาย ฉนวนแข็งประเภทสุดท้ายได้แก่ โพลีเมอร์ซึ่งอาจแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือเทอร์โมพลาสติก และเทอร์โมเซตติ้งโพลีเมอร์จะมีคุณสมบัติเด่นในเรื่องความคงทนต่อการกัดกร่อน คงทนต่อแรงดันไฟฟ้าและการเกิดโคโรนา มีน้ำหนักเบา และคุณสมบัติการไม่ชอบน้ำซึ่งจะมีประโยชน์ในการผลิตลูกถ้วยฉนวนที่นำไปใช้ในบริเวณที่มีมลภาวะ ลักษณะสมบัติที่ต้องการของฉนวนแข็งอาจกำหนดด้วยคุณสมบัติที่สำคัญคือ

1. ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric strength)
2. เพอร์มิตติวิตี (ϵ)
3. แฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$)
4. ความคงทนต่อแรงกล
5. ความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมีและความร้อน

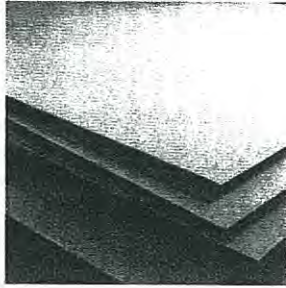
2.3.1 ชนิดของฉนวนแข็ง

ฉนวนแข็งที่ดัดนั้นจะต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง มีความต้านทานสูงทุกระดับแรงดัน มีกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำ ทนต่อแรงกลได้สูง ปลอดภัยจากฟองก๊าซและความชื้น และไม่ดูดซึมความชื้น ทนความร้อนได้สูง และทนต่อปฏิกิริยาเคมีได้ดี และไม่เปื้อนพิษเมื่อติดไฟ ฉนวนแข็งที่มีใช้งานทางไฟฟ้าด้านแรงสูงได้แก่

- 1) กระดาษและกระดาษอัดแรง (Paper and Boards)

กระดาษที่มีใช้งานอาจแบ่งออกเป็น กระดาษบาง (Paper) หรือกระดาษอัดแรง (Board) โดยทั่วไปกระดาษบางจะมีความหนาน้อยกว่า 0.8 มิลลิเมตร ส่วนกระดาษอัดแรงจะมีความหนา มากกว่า 0.8 มิลลิเมตร กระดาษอัดแรงที่กล่าวถึงในที่นี้จะมีความหมายครอบคลุมไปถึง pressboards transformer boards และfuller boards กระดาษที่ใช้เป็นฉนวนโดยทั่วไปจะรู้จักกันในชื่อของกระดาษครีฟ (Kraft paper) ความหนาและความแน่นของกระดาษขึ้นอยู่กับหน้าที่การใช้งานกระดาษที่มีความหนาแน่นต่ำ (0.8 g/cm^3) เหมาะกับการใช้เป็นไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุ ความถี่สูงและฉนวนของเคเบิล ความหนาแน่นปานกลาง (1 g/cm^3) ใช้เป็นไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุของไฟฟ้ากำลัง กระดาษที่มีความหนาแน่นสูงใช้ในตัวเก็บประจุที่มีขั้วเพื่อเก็บพลังงาน หรือใช้ในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงเนื่องจากกระดาษมีคุณสมบัติดูดซึมความชื้นได้ ฉะนั้นการใช้กระดาษเป็นฉนวนจึงจำเป็นต้องทำให้แห้งแล้วชุบฉนวนเหลว เช่น น้ำมันฉนวน ค่าเปอร์มิตติวิตีของกระดาษชุบฉนวนเหลวขึ้นอยู่กับค่าเปอร์มิตติวิตีของเซลลูโลสของกระดาษและของฉนวนเหลวที่ชุบและความหนาแน่นของกระดาษซึ่งค่าเปอร์มิตติวิตีรวมนี้สามารถคำนวณได้ ตัวอย่างค่าเปอร์มิตติวิตีของกระดาษชุบน้ำมันฉนวนแสดงในตารางที่ 2.5 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของกระดาษครีฟ และpaper polypropylene paper (PPP) ชุบน้ำมันฉนวนแสดงในตารางที่ 2.4 และ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 Pressboard



รูปที่ 2.5 Kraft paper

ตารางที่ 2.5 ค่าเปอร์มิตติวิตีของกระดาษชุบน้ำมันฉนวนที่ 20 องศาเซลเซียส (ϵ_{res})

ฉนวนเหลวที่ใช้ชุบ	เปอร์มิตติวิตีของกระดาษฉนวนเหลว (ϵ_{res})		
	0.8 g/cm ³	1 g/cm ³	1.2 g/cm ³
Trichlorodiphenyl $\epsilon_r = 6.1$	6.28	6.3	6.4
Pentachlorodiphenyl	5.71	5.88	6.06
Transformer oil	3.26	3.72	4.3

2.3.2 ขอบเขตในการใช้งาน ลักษณะของกระดาษฉนวนที่ใช้แบ่งออกเป็น 4 ประเภท

1) Insulation paper (Kraft)

ใช้เป็นฉนวนกั้นระหว่างชั้นของขดลวด หรือกั้นระหว่างขดลวดแรงต่ำและขดลวดแรงสูง

2) Pressboard

1. ใช้เป็นฉนวนปิดหัวและท้ายของขดลวด

2. ใช้ทำกระดาษลูกฟูก หรือกระดาษรองน้ำมัน เพื่อการไหลหมุนเวียนของน้ำมัน ช่วยในการระบายความร้อน

3. เป็นลิ้มในการรองรับระหว่างขดลวดและโครงสร้าง

4. ใช้เป็นฉนวนชั้นรูป สำหรับพันขดลวดแรงต่ำ หรือขดลวดแรงสูง

3) Creped paper

ใช้สำหรับพันสายตัวนำ ที่ต้องการความยืดหยุ่น

4) Thermopox

ใช้เป็นฉนวน (Insulation Layer) สำหรับแผ่น foil แบบ double sides

คุณสมบัติพื้นฐาน : มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง JIS C-2305 (class2)

IEC 641-3-1 (type B.2.1, B.3.1, B.4.1)

DIN 7733

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติของ insulation paper และ pressboard ตาม JIS C-2305 (class 2)

Thickness (mm.)	Density (g/cm ³)	Tensile strength (MPa)		Elongation (%)		Moisture Content (%) Max	Ash Content (%) Max	Dielectric Breakdown (kV/mm)		Shrinkage (%)		
		MD	CD	MD	CD			AVE.	Min.	Max	Max	Max
		Min.	Min.	Min.	Min.							
0.13-0.8	0.95- 1.30	70	30	1.5	4	10	1	9	6.5	1	2	8
0.8≤t≤3	0.95- 1.30	70	35	1.5	4	10	1	7	5	1	2	8
3.0≤t	0.95- 1.30	60	35	1.5	5	10	1	6	4	1	2	8

MD: Machine direction, CD: Cross direction, TD: Thickness direction

≤:มากกว่าหรือเท่ากับ เช่น 1≤ คือค่าที่ต้องการต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบประกอบสร้างหม้อแปลง และการทดสอบ หม้อแปลงไฟฟ้า

3.1 การออกแบบสร้างหม้อแปลง และการทดสอบประจำ [12, 13]

3.1.1 การออกแบบหม้อแปลง

การออกแบบสร้างหม้อแปลงทดสอบขนาดพิกัด 400/1000 kV 10 kVA ซึ่งมีส่วนประกอบหลักคือ แกนเหล็ก ขดลวดแรงดันต่ำ และขดลวดแรงดันสูง

ค่ากำหนดของหม้อแปลงทดสอบที่ออกแบบ

กำลังไฟฟ้า (S_n)	=	10	kVA
แรงดันป้อนเข้า (U_1)	=	400	V
แรงดันจ่ายออก (U_2)	=	1000	V
กระแสป้อนเข้า (I_1)	=	25	A
กระแสจ่ายออก (I_2)	=	10	A
จำนวนเฟส	=	1	Phase
ความถี่ (f)	=	50	Hz

1) การออกแบบแกนเหล็ก

แกนเหล็กเป็นส่วนประกอบหลักของหม้อแปลงที่ทำหน้าที่เป็นเส้นทางเดินของแรงแม่เหล็ก ซึ่งแกนเหล็กของหม้อแปลงนั้นจะมีการเรียงแผ่นเหล็กแบบ Step Lap โดยสร้างจากแผ่นเหล็กบางๆ หลายแผ่นนำมาประกอบกัน และการเรียงแบบ Step Lap นี้จะทำให้เกิดช่องว่างอากาศระหว่างแผ่นเหล็กน้อยที่สุด เพราะช่องว่างอากาศจะมีผลทำให้เกิดกระแสและความสูญเสียสูงขณะไม่มีโหลด และทำให้เกิดระดับความดังของเสียงรบกวนที่สูง แผ่นเหล็กแต่ละแผ่นจะต้องตัดรอยต่อเป็นมุม 45 องศา และนำมาประกอบกัน เพื่อลดค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กที่เกิดจากการไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก โดยแผ่นเหล็กที่ใช้ในการประกอบสร้างจะเป็นชนิด M-4 โดยแผ่นเหล็กชนิดนี้จะมีการผสมซิลิคอน ประมาณ 3-5 % เพื่อเพิ่มค่าความต้านทานและค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็กของแผ่นเหล็ก โดยจะส่งผลให้ค่ากระแสไหลวนลดน้อยลง และวงจรฮิสเตอร์ริซิสลดลง นั่นคือลดกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก และลดกระแสสร้างแม่เหล็ก [6]

เนื่องจากรูปคลื่นของแรงดันทดสอบต้องใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์มากที่สุด ดังนั้นค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก (B_m) จะต้องอยู่ในย่านเชิงเส้น โดยค่า B_m ของเหล็กชนิด M-4 เข้าใกล้ย่านอิ่มตัวประมาณ 1.624 Wb/m^2 ในการออกแบบจึงเลือกค่า B_m เท่ากับ 1.7 Wb/m^2 ซึ่งพื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็กสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2

$$E = 4.44NB_mA_mF_s \quad (3.1)$$

$$A_m = \frac{\left(\frac{E}{N}\right)}{4.44fB_mF_s} \quad (3.2)$$

โดย	E	คือ	ค่า r.m.s. ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวด (V)
	N	คือ	จำนวนรอบของการพันขดลวด (Turn)
	f	คือ	ความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ (Hz)
	B_m	คือ	ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (Tesla) หรือ (Wb/m^2)
	A_m	คือ	พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก (m^2)
	F_s	คือ	สแตคกิ้งแฟคเตอร์

การหาขนาดแกนเหล็กต้องมีการกำหนดค่า $\frac{E}{N}$ ขึ้นมาโดยหาได้จากค่าที่ทางบริษัทกำหนดให้

โดย N มีค่าเท่ากับ 110 รอบต่อขดลวดแรงดันต่ำ 2 ขด ขดละ 200 V

$$\begin{aligned} \frac{E}{N} &= \frac{200}{110} \\ &= 1.82 \text{ V/T} \end{aligned}$$

ค่าสแตคกิ้งแฟคเตอร์ มีค่าเท่ากับ 0.97 ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของเหล็กชนิด M-4 แทนค่าในสมการ 3.2

$$\begin{aligned} A_m &= \frac{1.82}{4.44 \times 50 \times 1.7 \times 0.97} \\ &= 4,971 \times 10^{-3} \text{ m}^2 = 4,971 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก

$$\begin{aligned} \phi &= B_m \times A_m \times F_s \\ &= 1.7 \times 4,971 \times 10^{-6} \times 0.97 \\ &= 0.0082 \text{ Wb} \end{aligned} \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบหน้าตัดของแกนเหล็กอาจจะเป็นหลายชั้น คือ รูปสี่เหลี่ยมอัดภายในวงกลม เพื่อให้สามารถใช้พื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงขึ้นกว่าพื้นที่หน้าตัดวงที่เป็นสี่เหลี่ยม และเหตุผลทางกายภาพในการพันขดลวดให้มีลักษณะเป็นวงกลมได้ง่ายขึ้น ลดการเสียดสีระหว่างขดลวดกับแกนเหล็ก และเมื่อขณะใช้งานจะเกิดแรงระหว่างขดลวดก็จะไม่ทำให้ขดลวดเสียรูป การออกแบบหน้าตัดแกนเหล็กแบบหลายชั้นเพื่อให้มีประสิทธิภาพการใช้พื้นที่สูงสุดสามารถคำนวณได้ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์แต่การออกแบบหน้าตัดแกนเหล็กให้มีหลายชั้น จะทำให้มีความยุ่งยากในการตัดและเรียงแกนเหล็กมากขึ้น ดังนั้นจึงเลือกที่จะเรียงแกนเหล็กเพียง 5 ชั้น

การออกแบบแกนเหล็กต้องคำนึงถึงขนาดความกว้างของแผ่นเหล็กที่สามารถตัดได้ในเชิงการผลิต ซึ่งความหนาของแกนเหล็ก M-4 มีขนาด 0.27 mm แกนเหล็กเป็นแบบ Core Type มีพื้นที่ภาคตัดขวางเป็นแบบสี่เหลี่ยม 5 ชั้น บรรจุอยู่ในวงกลมโดยเลือกใช้หน้าเหล็ก ชั้นที่ 1 (a) เป็น 80 mm ชั้นที่ 2 (b) เป็น 70 mm ชั้นที่ 3 (c) เป็น 60 mm ชั้นที่ 4 (d) เป็น 50 mm และชั้นที่ 5 (e) เป็น 40 mm

แกนเหล็กแบบ 5 ชั้นนี้จะให้ค่าแฟคเตอร์พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กในวงกลม (F_c) เป็น

$$F_c = 84.65 \%$$

F_c ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบย้อนกลับ เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนเหล็กหาได้จากสมการที่ 3.4

$$\frac{\pi}{4} \times D^2 = \frac{A_m}{F_c} \quad (3.4)$$

โดย D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลม (mm)
 A_m คือ พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก (m^2)
 F_c คือ Factor พื้นที่หน้าตัดในวงกลม

$$\text{ดังนั้น} \quad D = \sqrt{(A_m \times 4) / (\pi \times F_c)} \quad (3.5)$$

$$= \sqrt{\frac{4971 \times 4}{\pi \times 0.8465}}$$

$$= 86.4$$

$$\approx 86 \text{ mm.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาของแกนเหล็กชั้นที่ 1

$$\begin{aligned} d_1 &= \sqrt{D^2 - a^2} \\ &= \sqrt{86^2 - 80^2} \\ &= 31.56 \text{ mm.} \end{aligned} \quad (3.6)$$

แผ่นเหล็ก M-4 หนา 0.27 mm. ใช้จำนวนแผ่นเหล็ก M-4 จำนวน

$$\frac{31.56}{0.27} = 117 \text{ แผ่น}$$

ดังนั้น ความหนาของแกนเหล็ก = 31.56 mm.

ความหนาของแกนเหล็กแผ่นที่ 2

$$\begin{aligned} d_2 &= \sqrt{D^2 - b^2} - d_1 \\ &= \sqrt{86^2 - 70^2} - 31.56 \\ &= 18.40 \text{ mm.} \end{aligned} \quad (3.7)$$

แผ่นเหล็ก M-4 หนา 0.27 mm. ใช้จำนวนแผ่นเหล็ก M-4 จำนวน $\frac{18.40}{0.27} = 68$ แผ่น

ดังนั้น ความหนาของแกนเหล็ก = 18.40 mm.

ความหนาของแกนเหล็กแผ่นที่ 3

$$\begin{aligned} d_3 &= \sqrt{D^2 - b^2} - d_1 - d_2 \\ &= \sqrt{86^2 - 60^2} - 31.56 - 18.40 \\ &= 11.65 \text{ mm.} \end{aligned} \quad (3.8)$$

แผ่นเหล็ก M-4 หนา 0.27 mm. ใช้จำนวนแผ่นเหล็ก M-4 จำนวน

$$\frac{11.65}{0.27} \approx 43 \text{ แผ่น}$$

ดังนั้น ความหนาของแกนเหล็ก = 43×0.27

$$= 11.65 \text{ mm.}$$

ความหนาของแกนเหล็กแผ่นที่ 4

$$\begin{aligned} d_4 &= \sqrt{D^2 - b^2} - d_1 - d_2 - d_3 \\ &= \sqrt{86^2 - 50^2} - 31.56 - 18.40 - 11.65 \\ &= 8.36 \text{ mm.} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นเหล็ก M-4 ทหนา 0.27 mm. ใช้จำนวนแผ่นเหล็ก M-4 จำนวน

$$\frac{8.40}{0.27} \approx 31 \text{ แผ่น}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ความหนาของแกนเหล็ก} &= 31 \times 0.27 \\ &= 8.36 \text{ mm.} \end{aligned}$$

ความหนาของแกนเหล็กแผ่นที่ 5

$$\begin{aligned} d_5 &= \sqrt{D^2 - b^2} - d_1 - d_2 - d_3 - d_4 \\ &= \sqrt{86^2 - 40^2} - 31.56 - 18.40 - 11.65 - 8.36 \\ &= 6.16 \text{ mm.} \end{aligned}$$

แผ่นเหล็ก M-4 ทหนา 0.27 mm. ใช้จำนวนแผ่นเหล็ก M-4 จำนวน

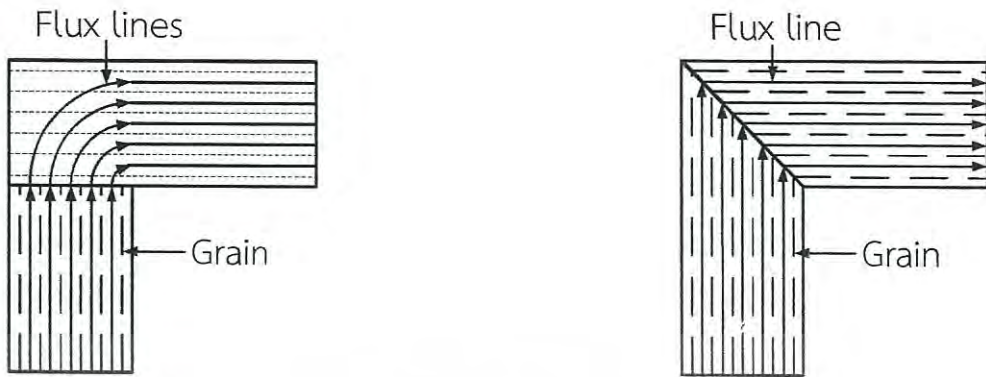
$$\frac{6.16}{0.27} \approx 23 \text{ แผ่น}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ความหนาของแกนเหล็ก} &= 23 \times 0.27 \\ &= 6.16 \text{ mm.} \end{aligned}$$

พื้นที่ตัดของแกนเหล็กใหม่

$$\begin{aligned} A_{m,new} &= (80 \times 31.56) + (70 \times 18.40) + (60 \times 11.65) \\ &\quad + (50 \times 8.36) + (40 \times 6.16) \\ &= 5176 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

การเรียงแกนเหล็กแบบต่อกันเป็นมุมฉากจะทำให้การไหลของเส้นแรงแม่เหล็กนั้นไม่สะดวก เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กต้องวิ่งข้ามรอยต่อของแผ่นเหล็ก และการที่เส้นแรงแม่เหล็กข้ามแผ่นเหล็กจากแผ่นหนึ่งไปอีกแผ่นหนึ่งเส้นแรงแม่เหล็กจะไหลในทิศทางตั้งฉากกับการเรียงตัวของเกรนเหล็ก ซึ่งทิศทางนี้จะมีค่าความซึมซับแม่เหล็ก (μ) เป็นหนึ่งในสิบถึงหนึ่งในเจ็ดเท่าของทิศทางที่เกรนแม่เหล็กนั้นเรียงตัวอยู่ ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กจะกลับทิศทางไหลเป็นผลให้กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก การแก้ปัญหานี้จะทำได้โดยตัดแผ่นเหล็กเป็นมุม 45° ซึ่งจะทำให้การไหลของเส้นแรงแม่เหล็กสะดวกมากขึ้น ลดค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กและลดค่ากระแสทำแม่เหล็ก



ก) แบบมุมฉาก

ข) แบบมุม 45

รูปที่ 3.1 การไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก

แกนเหล็กที่ใช้เป็นแบบคอร์ (core type transformer) ซึ่งมีลักษณะการพันขดลวดเป็นแบบพันล้อมรอบแกนเหล็ก และเนื่องจากแกนเหล็กของหม้อแปลงจะถูกต่อลงดินตั้งนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการฉนวนจะทำการพันขดลวดแรงต่ำไว้ด้านใน และพันขดลวดแรงสูงทับขดลวดแรงต่ำ

ความยาวรอบเฉลี่ยของแกนเหล็ก (l_{fe})

$$\begin{aligned} l_{fe} &= (2 \times 240) + (2 \times 160) \\ &= 800 \text{ mm} \end{aligned}$$

ปริมาตรแกนเหล็ก

$$\begin{aligned} V_c &= A_{m,new} \times F_s \times l_{fe} \\ V_c &= 5,176 \times 800 \times 0.97 \\ &= 4,016.58 \text{ cm}^3 \end{aligned} \quad (3.9)$$

น้ำหนักแกนเหล็กคิดจากความหนาแน่น 7.65 g/cm^3

$$\begin{aligned} W_c &= V_{c2} \times \text{Density} \\ &= 4,016.58 \times 7.65 \times 10^{-3} \\ &= 30.72 \text{ kg} \end{aligned} \quad (3.10)$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กเหล็กหาได้จากกราฟผู้ผลิตเหล็กซิลิคอนกำหนดให้ในที่นี่ กำลังไฟฟ้าสูญเสียต่อน้ำหนักแกนเหล็กที่ 1.7 Wb/m^2 มีค่าเท่ากับ 1.23 W/kg ดังนั้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก (P_c)

$$\begin{aligned} P_c &= 30.72 \times 1.23 \\ &= 37.79 \text{ W} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Exciting Volt- Ampere ในแกนเหล็ก 1.7 Wb/m^2 มีค่าเท่ากับ 3 VA/kg
 ดังนั้น Exciting Volt-Ampere ในแกนเหล็ก (P_{VA})

$$\begin{aligned} P_{VA} &= 3 \times 30.72 \\ &= 92.16 \text{ VA} \end{aligned}$$

ตารางที่ 3.1 สรุปลักษณะของแกนเหล็ก

ชนิดของแกนเหล็ก	M-4
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (T)	1.7
ความหนาของแผ่นเหล็ก (mm)	0.27
พื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็ก (mm^2)	5,176
เส้นผ่านศูนย์กลางแกนเหล็ก (mm)	86
ความกว้างของแกนเหล็ก (mm)	240
ความสูงของแกนเหล็ก (mm)	320
ความยาวเฉลี่ยแกนเหล็ก (mm)	800
ปริมาตรของแกนเหล็ก (cm^3)	4,016.58
น้ำหนักของแกนเหล็ก (kg)	30.72 kg
ความสูญเสียในแกนเหล็ก (W)	37.79

2) การออกแบบขดลวด

- การออกแบบขดลวดแรงต่ำ

ขดลวดแรงต่ำจะกำหนดความหนาแน่นกระแสอยู่ที่ 2.5 A/mm^2 ซึ่งจะสอดคล้องกับขนาดของขดลวดที่มีขายในเชิงพาณิชย์ ขดลวดที่มีขนาดใหญ่กว่านี้แม้จะให้ความหนาแน่นของกระแสที่ต่ำกว่า แต่จำนวนชั้นการพันของขดลวดจะเพิ่มขึ้นอาจทำให้เปอร์เซ็นต์ลัดวงจรสูงเกินไป และต่อขดลวดด้านแรงต่ำเป็น 2 กรณี คือ ต่อแบบขนาน และ ต่อแบบอนุกรม

1. ขนาดพื้นที่ของขดลวดแรงต่ำ

$$A_1 = \frac{I_1}{J_1} \quad (3.11)$$

โดย A_1 คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวดแรงต่ำ (mm^2)
 I_1 คือ กระแสที่ป้อนเข้าพิกัด (A)
 J_1 คือ ความหนาแน่นกระแส (A/mm^2)

แทนค่าในสมการที่ (3.11)

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } A &= \frac{25}{2.5} \\ &\approx 10 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

พื้นที่หน้าตัดใช้งานจริง (A_1) 10 mm^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. จำนวนรอบขดลวด

$$N = \frac{V_1}{\left(\frac{E}{N}\right)} \quad (3.12)$$

โดย N_1 คือ จำนวนรอบของขดลวดแรงต่ำ (รอบ)

V_1 คือ แรงดันป้อนเข้า (V)

E/N คือ แรงดันต่อจำนวนรอบ (V/T)

แทนค่าในสมการที่ 3.12

$$N = \frac{200}{(1.82)} = 110 \text{ รอบ}$$

3. การพันขดลวดแรงต่ำ

จำนวนขดลวดมี 2 ชุด แต่ละชุดพัน 4 layer

layer ที่ 1 27.5 รอบ

layer ที่ 2 27.5 รอบ

layer ที่ 3 27.5 รอบ

layer ที่ 4 27.5 รอบ

รวม 110 รอบ

$$\text{ความกว้างของขดลวด} = (\text{ความกว้างของเส้นลวดรวมกับฉนวน} + \text{ระยะห่างระหว่างเส้นลวด}) \times (\text{จำนวนรอบ/layer} + 1) \quad (3.13)$$

แทนค่าในสมการที่ 3.13

$$\begin{aligned} \text{ความกว้างของขดลวด} &= (2 + 0.13) \times (28.5) \\ &= 60.71 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความหนาของขดลวด} &= [(\text{ความหนาของเส้นลวดรวมฉนวน} + \text{ระยะห่างระหว่างเส้นลวด}) \times \text{จำนวน Layer}] + [(\text{จำนวน Layer} - 1) \times \text{ความหนาของกระดาษคราฟท์}] \quad (3.14) \end{aligned}$$

แทนค่าในสมการที่ 3.14

$$\begin{aligned} \text{ความหนาของขดลวด} &= [(5 + 0.13) \times 4] + [3 \times 1] \\ &= 23.52 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\text{แรงดันสูงสุดระหว่างชั้น} = 2 \times \text{จำนวนรอบ/layer} \times \text{Volt/turn} \quad (3.15)$$

แทนค่าในสมการที่ 3.15

$$\text{แรงดันสูงสุดระหว่างชั้น} = 2 \times 27.5 \times 1.82$$

$$= 100 \text{ V}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวดแรงต่ำ

เนื่องจากแกนเหล็กมีรัศมี 86 mm ระหว่างแกนเหล็กกับขดลวดแรงดันต่ำมีช่องว่าง 0.13 mm และใช้ Press board หนา 1.6 mm เป็นแกนของขดลวดแรงต่ำ ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{รัศมีวงในของขดลวดแรงดันต่ำ} &= 86.13 + 1.6 \\ &= 87.73 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{รัศมีวงนอก} &= 87.6 + \text{ความหนาของขดลวด} \\ &= 87.13 + 23.52 \\ &= 111.25 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\text{รัศมีเฉลี่ย}(r_1) = \frac{87.73 + 111.25}{2}$$

$$\begin{aligned} &= 99.49 \text{ mm} \\ \text{ความยาวรอบเฉลี่ย}(l_{av}) &= 2 \times \pi \times r_1 \quad (3.16) \\ \text{แทนค่าในสมการที่ 3.16} &= 2 \times \pi \times 99.36 \\ &= 625.11 \text{ mm} \end{aligned}$$

5. น้ำหนักทองแดงและขดลวด

$$W = N \times A_1 \times l_{av} \times \text{Density} \quad (3.17)$$

โดย W คือ น้ำหนักของขดลวด (kg)
 N คือ จำนวนรอบขดลวดแรงต่ำ (Turn)
 A₁ คือ พื้นที่หน้าตัดเส้นลวด (mm²)
 Density คือ ความหนาแน่นของทองแดง (kg/m³)
 l_{av} คือ ความยาวรอบเฉลี่ย (mm)

แทนค่าในสมการที่ 3.17

$$\begin{aligned} W &= 110 \times 10 \text{ mm}^2 \times 625.11 \text{ mm} \times 8900 \\ &\quad \text{kg/m}^3 \times 10^{-9} \\ &= 6.12 \text{ kg} \end{aligned}$$

เนื่องจากขดลวดแรงต่ำมี 2 ชุด น้ำหนักทั้งหมดของขดลวด = 11.3 kg

6. ความต้านทานของขดลวด

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (3.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย	R	คือ	ความต้านทานของขดลวด (Ω)
	ρ	คือ	สภาพความต้านทานของทองแดง ($\Omega \cdot m$)
	L	คือ	ความยาวของขดลวด (mm)
	A_1	คือ	พื้นที่หน้าตัดเส้นลวด (mm^2)

แทนค่าในสมการที่ 3.18

$$R = 2 \times 0.01707 \times 10^{-6} \Omega \cdot m \frac{110 \times 625.10 \text{ mm}}{10 \text{ mm}^2}$$

$$= 0.234 \Omega$$

7. กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดแรงต่ำ ($P_{CU LV}$)

$$P_{CU LV} = I_1^2 R \quad (3.19)$$

โดย	$P_{CU LV}$	คือ	กำลังสูญเสียในขดลวดแรงต่ำ (W)
	I_1	คือ	กระแสป้อนเข้า (A)
	R	คือ	ความต้านทานของขดลวด (Ω)

แทนค่าในสมการที่ 3.19

$$P_{CU LV} = 25^2 \times 0.234$$

$$= 146.25 \text{ W}$$

ตารางที่ 3.2 สรุปลักษณะของขดลวดแรงต่ำ

ชนิดของวัสดุ	ลวดทองแดง
ขนาดของตัวนำ (mm^2)	2×5
ฉนวนห่อหุ้มเส้นลวด	Insulated Paper
จำนวนรอบต่อ 1 ชุด (รอบ)	110
จำนวนชุดขดลวด (ชุด)	2
จำนวน layer (layer)	4
จำนวนรอบ/layer	27.5
รัศมีด้านในของขดลวด (mm)	87.73
รัศมีด้านนอกของขดลวด (mm)	111.25
รัศมีเฉลี่ยของขดลวด (mm)	99.49
น้ำหนักของขดลวด (kg)	6.12
กำลังสูญเสียในขดลวด (W)	146.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การออกแบบขดลวดแรงสูง

ขดลวดแรงดันสูงเป็นขดลวดที่ถูกห่อหุ้มอย่างมิดชิด ด้วยกระดาษฉนวนเนื่องจากมีความเครียดสูงดังนั้นอุณหภูมิเพิ่มในขดลวดจะมีค่าสูง การกำหนดความหนาแน่นกระแสต้องกำหนดให้มีค่าต่ำจึงเลือกค่าที่อยู่ที 2 A/mm² เพราะเมื่อคำนวณขนาดของขดลวดออกมาแล้วมีขนาดที่เหมาะสม

1. ขนาดพื้นที่หน้าตัดของขดลวดแรงสูง

$$A_2 = \frac{I_2}{J_2} \quad (3.20)$$

โดย A_2 คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวด (mm²)
 I_2 คือ กระแสจ่ายออกที่พิกัด (A)
 J_2 คือ ความหนาแน่นกระแส (A/mm²)

แทนค่าในสมการที่ 3.20

$$A_2 = \frac{10}{2} = 5 \text{ mm}^2$$

2. จำนวนรอบขดลวด

$$N_2 = \frac{V_2}{\left(\frac{E}{N}\right)} \quad (3.21)$$

โดย N_2 คือ จำนวนรอบของขดลวดแรงต่ำ (Turn)
 V_2 คือ แรงดันจ่ายหนัก (V)
 $\frac{E}{N}$ คือ แรงดันต่อจำนวนรอบ (V/T)

แทนค่าในสมการที่ 3.21

$$N_2 = \frac{500}{1.82} = 275$$

3. การพันขดลวด

การพันขดลวดแรงดันสูงจะพันแบบชั้นทรงกระบอกโดยมีการแบ่งขดลวดแรงสูงเป็น 5 ชุด

$$\text{ความกว้างของขดลวด} = (\text{ความกว้างของเส้นลวดรวมฉนวน} + \text{ระยะห่างระหว่างเส้นลวด}) \times (\text{จำนวนรอบ/layer} + 1) \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned} \text{ความกว้างของขดลวด} &= (2.3) \times (55 + 1) \\ &= 128.8 \text{ mm} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{ความหนาของขดลวด} &= \text{จำนวน layer} \times (\text{ความหนาของเส้นลวดรวมฉนวน} \\ &+ \text{ความหนาของกระดาษคราฟท์}) \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned} \text{ความหนาของขดลวด} &= 5 \times (2.3 + 0.13) \\ &= 12.50 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{แรงดันสูงสุดระหว่างชั้น} &= 2 \times \text{จำนวนรอบ/layer} \times \text{Volt/Turn} \\ \text{แรงดันสูงสุดระหว่างชั้น} &= 2 \times 55 \times 1.82 \\ &= 200 \text{ V} \end{aligned} \quad (3.24)$$

4. ความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวดแรงดันสูง

$$\begin{aligned} \text{รัศมีวงใน} &= 110 + (0.5 \times 10) \\ &= 115 \text{ mm} \\ \text{รัศมีวงนอก} &= \text{รัศมีวงใน} + \text{ความหนาของขดลวด} + \text{แกนปิดแรงสูง} \\ &= 115 + 30 + 2 \\ &= 147 \text{ mm} \\ \text{รัศมีเฉลี่ย (r}_{21}\text{)} &= \frac{115 + 147}{2} \\ &= 131 \text{ mm} \\ \text{ความยาวรอบเฉลี่ย (l}_{av}\text{)} &= 2 \times \pi \times r_{21} \\ &= 2 \times \pi \times 131 \\ &= 823.10 \text{ mm} \end{aligned} \quad (3.25)$$

น้ำหนักทองแดงของขดลวด

$$W = N \times A_1 \times l_{av} \times \text{Density} \quad (3.26)$$

แทนค่าในสมการที่ 3.26

$$\begin{aligned} W &= 275 \times 4.15 \text{ mm}^2 \times 823.10 \text{ mm} \times 8,900 \\ &\text{ kg/m}^3 \\ W &= 8.36 \text{ kg} \end{aligned}$$

ความต้านทานของขดลวด

$$R = \rho \frac{l}{A_1} \quad (3.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าในสมการที่ 3.27

$$R = 2 \times 0.01724 \times 10^{-6} \times \frac{275 \times 823.10 \text{ mm}}{4.15 \text{ mm}^2}$$

$$R = 1.538 \ \Omega$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวด (P_{Cu})

$$P_{\text{Cu}} = I_{\text{HV}}^2 R$$

$$P_{\text{Cu}} = 10^2 \times 0.769$$

$$P_{\text{Cu}} = 153.80 \text{ W}$$

ตารางที่ 3.3 สรุปลักษณะของขดลวดแรงสูง

ชนิดของวัสดุ	ทองแดง
ขนาดของตัวนำ (mm^2)	4.15
จำนวนรอบ (รอบ)	275
จำนวนชุดขดลวด (ชุด)	2
จำนวนรอบต่อชุด (รอบ)	55
รัศมีด้านในของขดลวด (mm)	115
รัศมีด้านนอกของขดลวด (mm)	147
รัศมีเฉลี่ยของขดลวด (mm)	131
น้ำหนักของขดลวด (kg)	8.36
กำลังสูญเสียในขดลวด (W)	153.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การสร้างหม้อแปลง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการออกแบบประกอบสร้างหม้อแปลงขนาดเล็กพิกัด 400/1000V 10kVA เพื่อใช้ในการทดสอบฉนวนเหลวสามชนิดได้แก่ น้ำมันแร่หรือน้ำมันหม้อแปลง เอสเตอร์ธรรมชาติ และน้ำมันปาล์มโดยมีขั้นตอนการออกแบบประกอบสร้างดังนี้

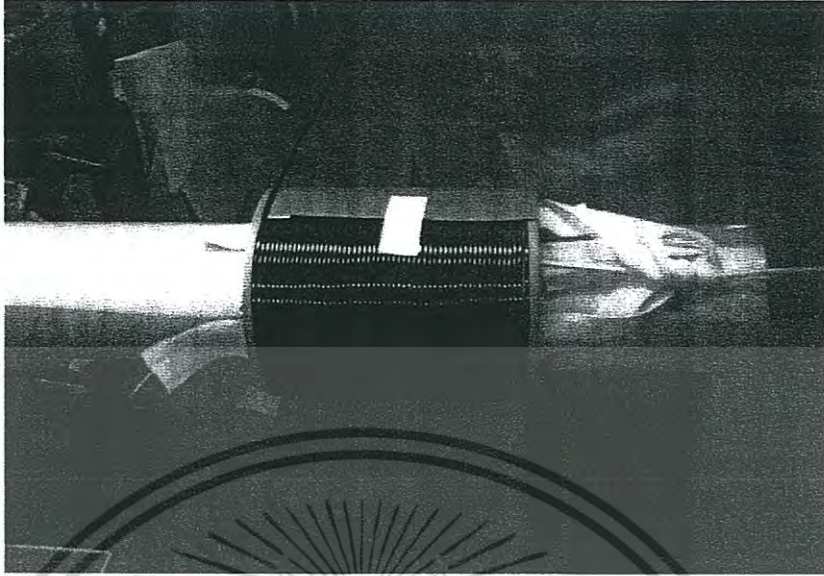


รูปที่ 3.2 การพันขดลวดด้านแรงต่ำ

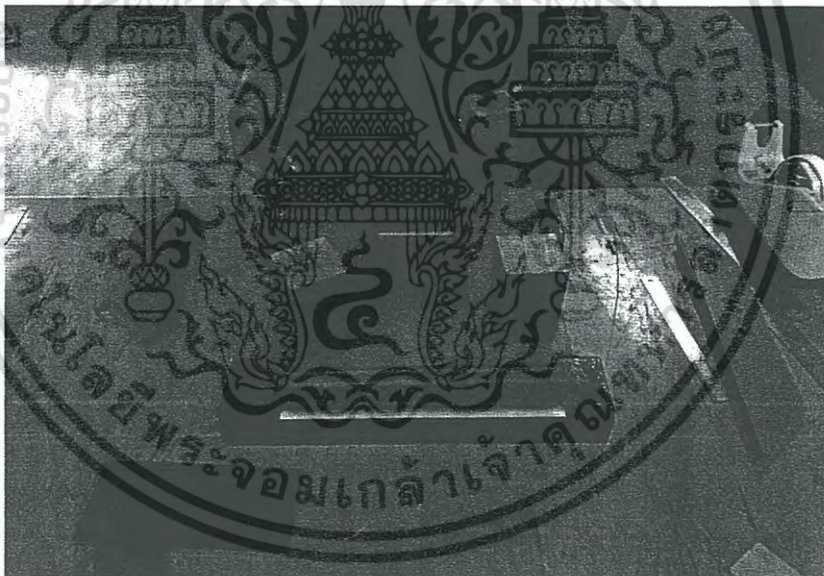


รูปที่ 3.3 การพันฉนวนชั้นระหว่างชั้นของขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

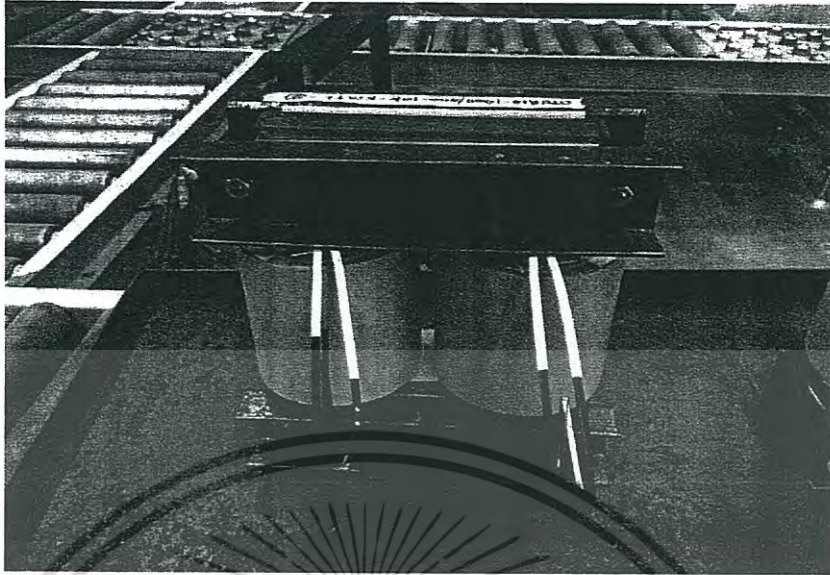


รูปที่ 3.4 การพันขดลวดด้านแรงสูง

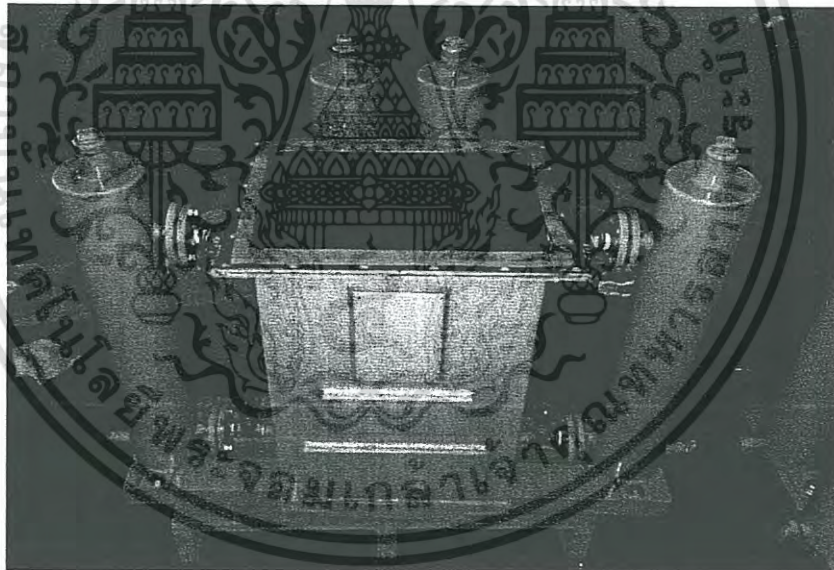


รูปที่ 3.5 การเรียงแกนเหล็กเพื่อใช้เป็นแกนในหม้อแปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

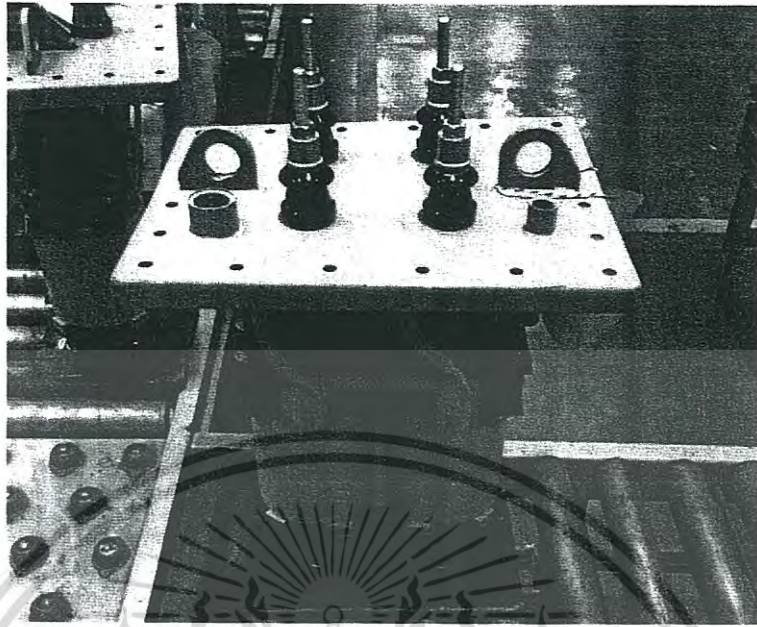


รูปที่ 3.6 ประกอบชุดลดเข้ากับแกนเหล็กที่ได้รับการออกแบบ

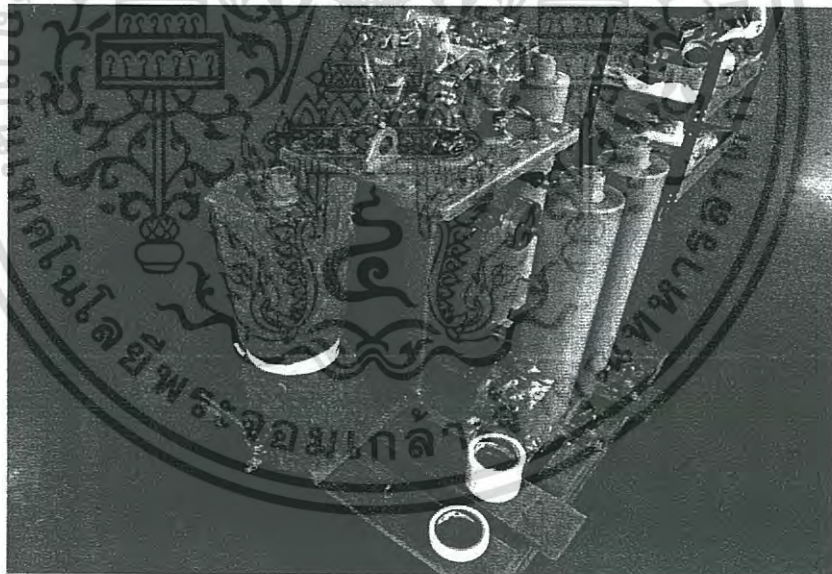


รูปที่ 3.7 ตัวถังหม้อแปลงที่ใช้บรรจุชุดลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

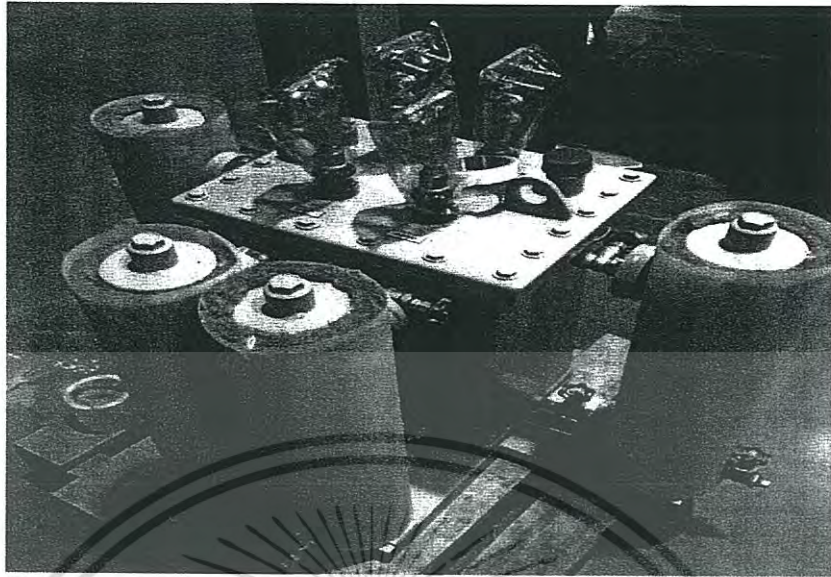


รูปที่ 3.8 ขดลวดพร้อมที่จะบรรจุลงในตัวถังหม้อแปลง

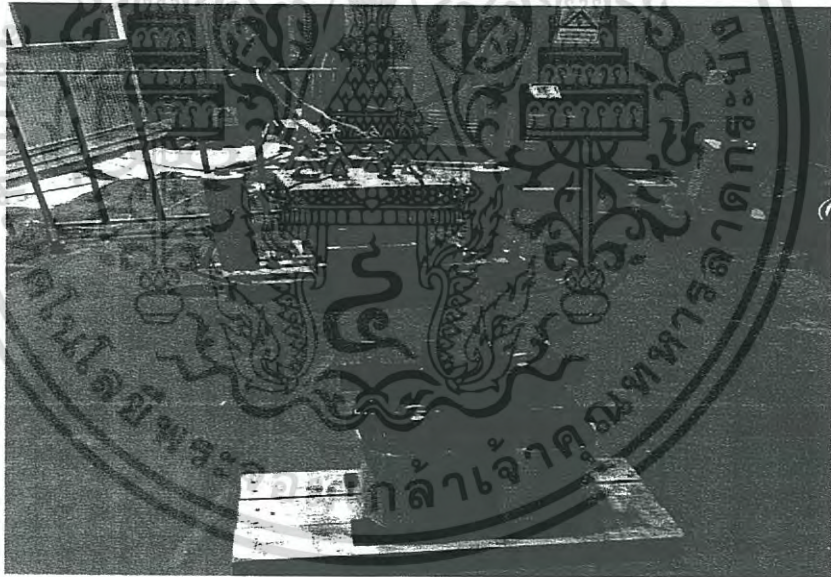


รูปที่ 3.9 การพันฉนวนใยแก้วเพื่อเป็นฉนวนกันความร้อนให้กับหม้อแปลงหลังจากเติมฉนวนเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 หม้อแปลงพร้อมสำหรับการทดสอบ



รูปที่ 3.11 การทดสอบ routine test ตามมาตรฐาน IEC 60076

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

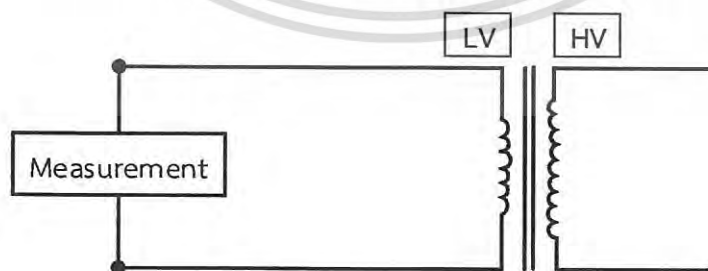
3.1.3 การทดสอบประจำ (Routine Test)

การทดสอบหม้อแปลงที่ประกอบสร้างขึ้นเพื่อตรวจสอบว่าลักษณะคุณสมบัติของหม้อแปลงเป็นไปตามที่ออกแบบหรือไม่ แต่เนื่องจากไม่มีมาตรฐานสำหรับหม้อแปลงทดสอบโดยตรง ฉะนั้นการทดสอบจะทำตามมาตรฐาน IEC Plub.No.76-1976 Power Transformers และ มอก. 384

- 1) ทดสอบวัดค่าความต้านทานของขดลวด (Winding Resistance)
- 2) ทดสอบวัดค่าความเป็นฉนวนของขดลวด (Insulation Resistance)
- 3) ทดสอบวัดค่า Turns Ratio หรือ Voltage Ratio
- 4) ทดสอบวัดค่า load- Loss
- 5) ทดสอบวัดค่า No-Load Loss
- 6) ทดสอบวัดค่า Induce Overvoltage
- 7) ทดสอบวัดค่า Dielectric Strength (Hi-pot)
- 8) ทดสอบรอยการรั่วของฉนวนหม้อแปลง

1) การทดสอบวัดค่าความต้านทานของขดลวด
วัดค่าความต้านทานของขดลวด ทั้งด้านไฟเข้า(Primary) และด้านไฟออก(Secondary) ทำการวัดค่าความต้านทานของขดลวด โดยใช้เครื่องมือวัด QA-OH-68

1. ทำการต่อสายสำหรับวัดค่า เข้ากับเครื่องวัด
2. ปรับย่านการวัดไปที่ 10mA เริ่มทำการวัดค่าความต้านทาน อ่านค่าที่วัดได้
3. วัดค่าความต้านทานของขดลวดด้านแรงสูง
4. ย้ายสายวัด ของเครื่องวัดไปที่ Connector ด้านแรงต่ำ (Secondary) เพื่อทำการวัดค่าความต้านทานของขดลวดเช่นกัน
5. ปรับย่านวัด ของเครื่องวัดค่าความต้านทาน ไปที่ตำแหน่ง 10 A สำหรับการวัดขดลวดแรงต่ำ
6. วัดค่าความต้านทานของขดลวดด้านแรงต่ำ (Secondary)

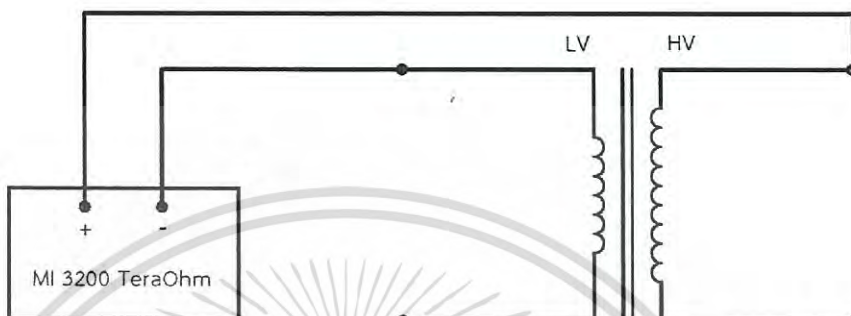


รูปที่ 3.12 วงจรทดสอบวัดค่าความต้านทานของขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การวัดค่าความต้านทานฉนวน

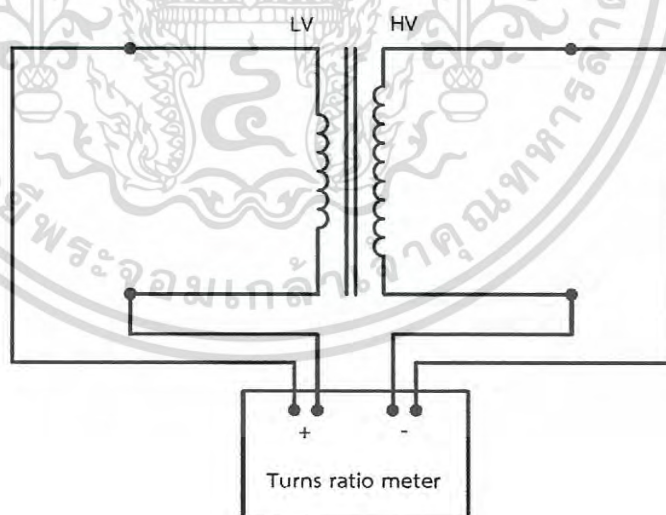
การวัดค่าความต้านทานฉนวนใช้เครื่อง MI 3200 TeraOhm 10 kV โดยจะทำการวัดในส่วน
ของฉนวนที่กั้นอยู่ของระหว่างขดลวดแรงต่ำกับขดลวดแรงสูง ขดลวดแรงต่ำกับกราวด์ และ ขดลวด
แรงสูงกับกราวด์ ซึ่งมีวงจรการทดสอบตามรูป 3.13



รูปที่ 3.13 วงจรการทดสอบความต้านทานฉนวนระหว่างขั้วแรงต่ำกับขั้วแรงสูง

3) การทดสอบหาค่าอัตราส่วนแรงดัน

Turns ratio meter เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการหาค่าอัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลง จากการ
ทดสอบจะต่ออนุกรมที่ขั้วแรงต่ำ ซึ่งทำให้หม้อแปลงมีพิกัด 400/1000 V โดยมีวงจรการทดสอบตาม
รูป 3.14

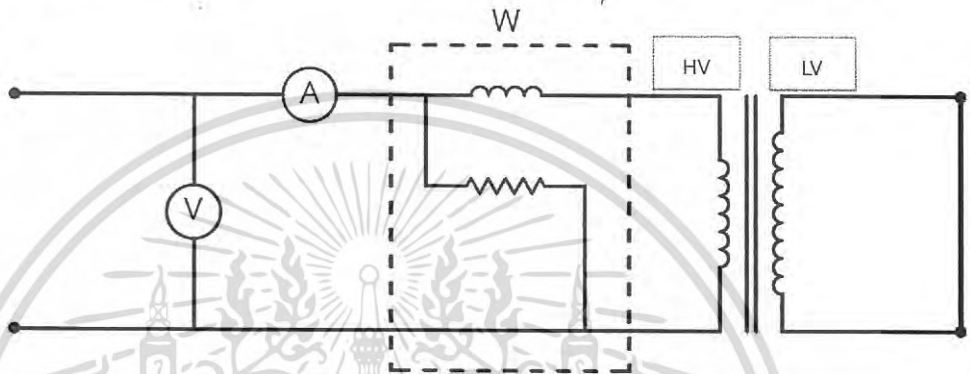


รูปที่ 3.14 วงจรการทดสอบหาค่าอัตราส่วนแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) การทดสอบวัดค่า Load Loss (Short Circuit Test)

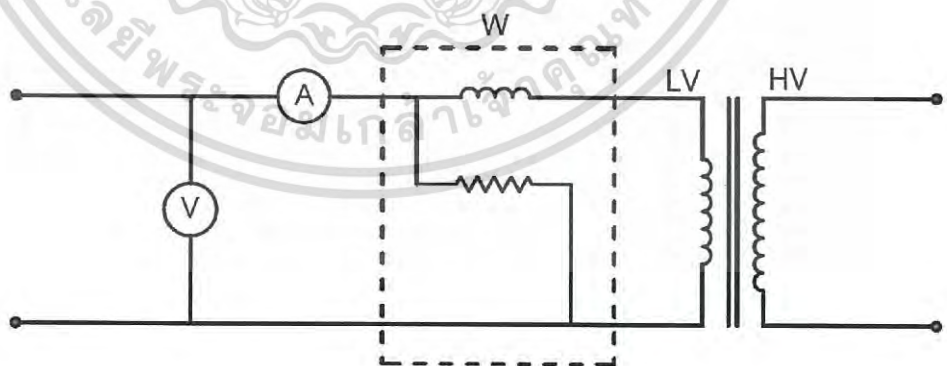
1. ทำการ Short circuit ขั้วด้านแรงต่ำของหม้อแปลงฯ โดยใช้สายไฟหรือ บัสบาร์ ที่สามารถรับกระแส ได้เท่ากับหรือมากกว่า กระแสพิกัดด้านแรงต่ำของหม้อแปลงฯ
2. ต่อสายวัดจากตู้ทดสอบเข้าทางด้านแรงสูง (Pri) ของตัวหม้อแปลงฯ
3. ป้อนกระแสไฟฟ้า จนได้กระแสพิกัดด้านแรงสูงของหม้อแปลง
4. ป้อนกระแสไฟฟ้า จนได้กระแสพิกัดด้านแรงสูงของหม้อแปลง ตรวจสอบค่าทางไฟฟ้าต่างๆ ที่วัดได้นำไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่กำหนดไว้ของแต่ละแบบการผลิต และบันทึกผลที่ได้



รูปที่ 3.15 วงจรการทดสอบหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะลัดวงจร

5) การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด

การทดสอบกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด ทดสอบเพื่อหาค่าการสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) ซึ่งการทดสอบนี้ จะต่ออนุกรมที่ขั้วแรงต่ำ และเปิดวงจรที่ด้านแรงสูง แล้วทำการปรับแรงดันที่ด้านแรงต่ำให้ได้เท่ากับพิกัดของหม้อแปลงหรือ 400 V นั้นเอง โดยมีวงจรการทดสอบดังรูป 3.16



รูปที่ 3.16 วงจรการทดสอบหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) ทดสอบ Induce Overvoltage (การทดสอบแรงดันและความถี่เกินพิกัดชั่วคราว)

1. การต่อสายวัดค่าของอุปกรณ์ทดสอบ ปฏิบัติเช่นเดียวกับการทดสอบวัดค่า No-Load Load คือต่อเข้ากับ Bushing Terminal ด้านแรงต่ำ ของหม้อแปลงฯ

2. ปรับความถี่ของเครื่องทดสอบ (AC Power Source) เพื่อกำหนดความถี่ที่จะใช้ในการทดสอบ ให้ตรงตามข้อกำหนดพิกัดแรงดันไฟฟ้า ด้านแรงต่ำของแต่ละผลิตภัณฑ์นี้ความถี่ทดสอบ 100 Hz.

3. ปรับตั้งระยะเวลาในการทดสอบ ของเครื่องทดสอบ (AC Power Source) สามารถคิดได้จากสูตร

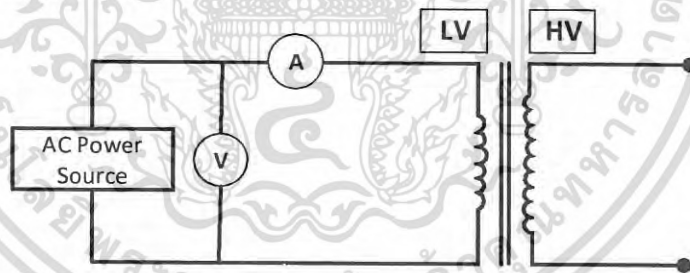
$$120 \times (\text{Rated Frequency} / \text{Test Frequency}) = \text{Sec}$$

เวลาที่ใช้ในการทดสอบ มีหน่วยเป็น วินาที (Sec) และต้องไม่น้อยกว่า 15 วินาที

เวลาในการทดสอบ 60 วินาที (Sec) สำหรับความถี่ทดสอบ 100 Hz.

4. เมื่อปรับตั้งความถี่ตรงตามขนาดพิกัดของผลิตภัณฑ์ ที่กำหนดแล้ว ขั้นตอนต่อไปให้จ่ายแรงดันไฟฟ้าทดสอบ จากตู้ทดสอบ โดยป้อนแรงดันฯ ขึ้นเป็น 2 เท่าของแรงดันพิกัด ดังนี้ ป้อนแรงดันทดสอบ 800 Volt ที่พิกัดด้านแรงสูง เป็นระบบ 2 kV.

5. เมื่อปรับแรงดันไฟฟ้า ได้ตามพิกัด 2 เท่าแล้ว เริ่มจับเวลาในการทดสอบ และบันทึกค่ากระแสที่วัดได้จากเครื่องทดสอบ



รูปที่ 3.17 วงจรทดสอบ Induce Overvoltage (การทดสอบแรงดันและความถี่เกินพิกัดชั่วคราว)

7) ทดสอบ Dielectric Strength (Hi-Pot test)

เป็นการทดสอบความคงทนของฉนวนที่กั้นระหว่างขดลวดแรงสูง(Pri) กับขดลวดแรงต่ำ(Sec) และขดลวดแรงสูงกับกราวด์ ขดลวดแรงต่ำกับกราวด์ โดยการคงค่าแรงดันที่ทดสอบค้างไว้ เป็นเวลา 60 วินาที ฉนวนต่างๆต้องไม่เสียหาย

ระบบแรงดันไฟฟ้าทดสอบที่แรงดัน 3 kV.

1. ทำการเตรียมผลิตภัณฑ์เพื่อทดสอบ โดยการใช้สายไฟหรือสายตัวนำต่อวงจรไฟฟ้า (Short) ที่ Terminal ของขดลวดแต่ละด้าน

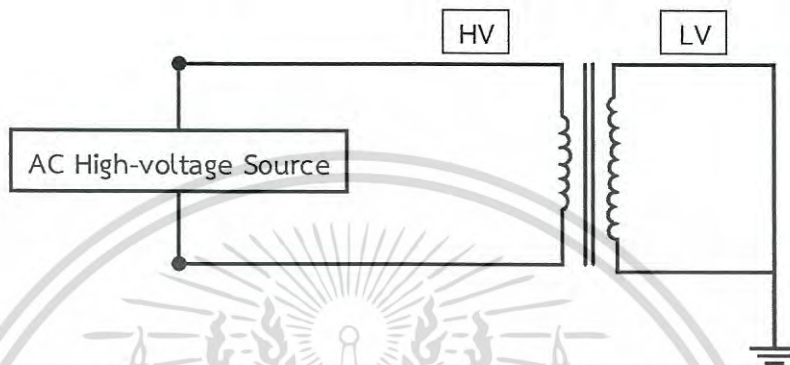
2. การทดสอบระหว่างขดลวดแรงสูงกับกราวด์ (P-E) ต่อสายเครื่องทดสอบ Hi-Pot เข้าที่ Bushing Terminal ด้านแรงสูง และขั้วสายกราวด์เข้ากับขั้วหรือส่วนที่เป็นกราวด์หม้อแปลงฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การทดสอบระหว่างขดลวดแรงต่ำกับกราวด์ (S-E) ต่อสายเครื่องทดสอบ Hi-Pot เข้าที่ Bushing Terminal ด้านแรงต่ำ และขั้วสายกราวด์เข้ากับขั้วหรือส่วนที่เป็นกราวด์หม้อแปลงฯ สำหรับการทดสอบหัวข้อนี้ ใช้แรงดันไฟฟ้าในการทดสอบ ที่ 3 kV.

4. การทดสอบระหว่างขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ (P-S) ต่อสายเครื่องทดสอบ Hi-Pot เข้าที่ Bushing Terminal ด้านแรงสูง และขั้วสายกราวด์เข้ากับ Terminal ด้านแรงต่ำ

5. ให้บันทึกผลการทดสอบแต่ละขั้นตอน



รูปที่ 3.18 วงจรทดสอบ Dielectric Strength (Hi-Pot test)

8) การตรวจสอบรอยรั่วน้ำมันของถังหม้อแปลง

1. อัดก๊าซไนโตรเจนเข้าในถังหม้อแปลงฯ ผ่านทางวาล์วระบายน้ำมัน โดยกำหนดความดันภายในถังที่ 3-7 PSI โดยการสังเกตจากหน้าปัดของเกจวัดความดัน และปล่อยเวลาทิ้งไว้ ไม่น้อยกว่า 3 โมงและคอยสังเกตรอบๆ ตัวถังของหม้อแปลงฯ ว่ามีรอยหรือจุดรั่วซึมหรือไม่



รูปที่ 3.19 ระดับความดันการอัดก๊าซไนโตรเจนทดสอบรอยรั่ว

3.2 การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของฉนวนก่อนนำไปประยุกต์ใช้

3.2.1 การทดสอบการหาค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาว์นของฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60156

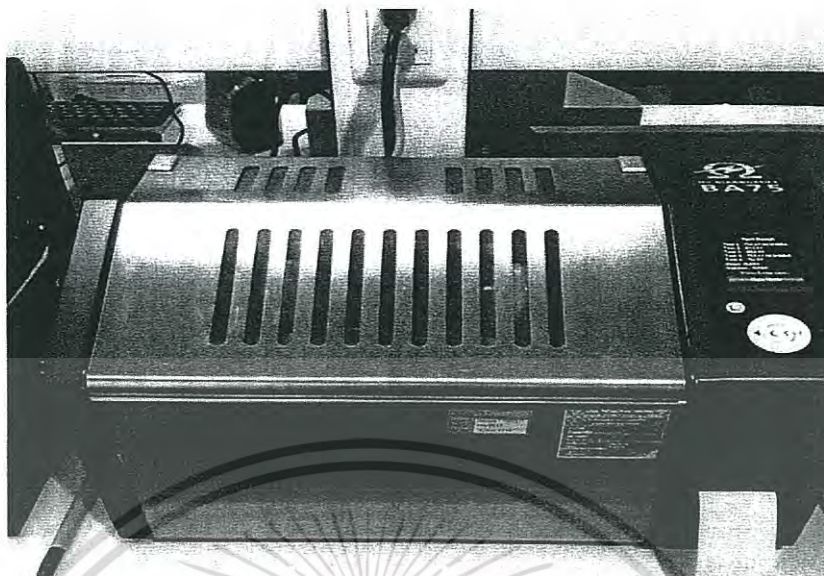
การทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมัน หรือการทดสอบการหาค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาว์นเป็นการทดสอบที่บอกถึงสารเจือปน ในน้ำมัน เช่น น้ำ, ฟูลerate, ความสกปรกต่างๆ โดยน้ำมันที่มีความสกปรกปนอยู่มากจะมีค่าเบรกดาว์นต่ำ น้ำมันที่สะอาดหรือผ่านการกรองมาใหม่ๆ จะมีค่าเบรกดาว์นสูง โดยปกติทดสอบทุก 6 เดือน สำหรับหม้อแปลงที่มีความสำคัญมาก และทุก 1 ปี สำหรับหม้อแปลงปกติ ในการทดสอบนั้นเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60156 หรือ ATSM D877, ASTM D1816

หากค่าแรงดันทดสอบไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบการหาค่าแรงดันเบรกดาว์นมีค่าสูง หมายความว่าน้ำมันหม้อแปลงมีความเป็นฉนวนสูง ก็ไม่ได้หมายความว่าไม่มีการเจือปนเกิดขึ้นในน้ำมันหม้อแปลง อาจเป็นเพราะว่าน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้านั้นมีความแห้งมากๆ จึงทำให้สิ่งเจือปนไม่เป็นสื่อไฟฟ้าได้ แต่หากวันใดวันหนึ่งมีความชื้นเกิดขึ้นที่น้ำมันหม้อแปลงทั้งที่เกิดจากภายในหรือภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า น้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้านั้นจะกลายเป็นตัวนำทางไฟฟ้าอย่างดีและทำให้ น้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นสื่อไฟฟ้าและเกิดลัดวงจรในที่สุด

โดยสรุปแล้วการทดสอบการหาค่าแรงดันเบรกดาว์นไม่ใช่การทดสอบที่จะบ่งชี้สภาพของหม้อแปลงได้ทั้งหมด เนื่องจากยังมีปัจจัยอื่นๆ อีกที่ทำให้ฉนวนของหม้อแปลงเสื่อมสภาพ ตัวอย่างเช่น ปริมาณเจือปนในน้ำมันหม้อแปลง และความร้อน

ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ทำการ flush แทนที่ใช้ในการใส่น้ำมันและหัวอิเล็กโทรดด้วยตัวอย่างน้ำมันที่จะนำมาใช้ในการทดสอบ โดยก่อนการทำการ flush หัวอิเล็กโทรดนั้นควรมีการชำระน้ำมันเก่าออกก่อนด้วย
- 2) เติมตัวอย่างน้ำมันที่จะใช้ในการทดสอบลงในชุดทดสอบที่มีไว้สำหรับการใส่น้ำมัน หลังจากนั้นนำชุดทดสอบที่ใช้ในการใส่น้ำมันเข้าเครื่องทดสอบ
- 3) เริ่มเปิดเครื่องที่ใช้ในการทดสอบโดยเริ่มจากการเลือกมาตรฐานที่ต้องการใช้ในการทดสอบ และเลือกหัวอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดสอบ โดยหัวอิเล็กโทรดนั้นจะมีผลต่อจำนวนครั้งในการทดสอบด้วย ว่าต้องทำการทดสอบทั้งหมดกี่ครั้ง
- 4) จดค่าแรงดันเบรกดาว์นเฉลี่ยที่ได้ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เกิดขึ้น



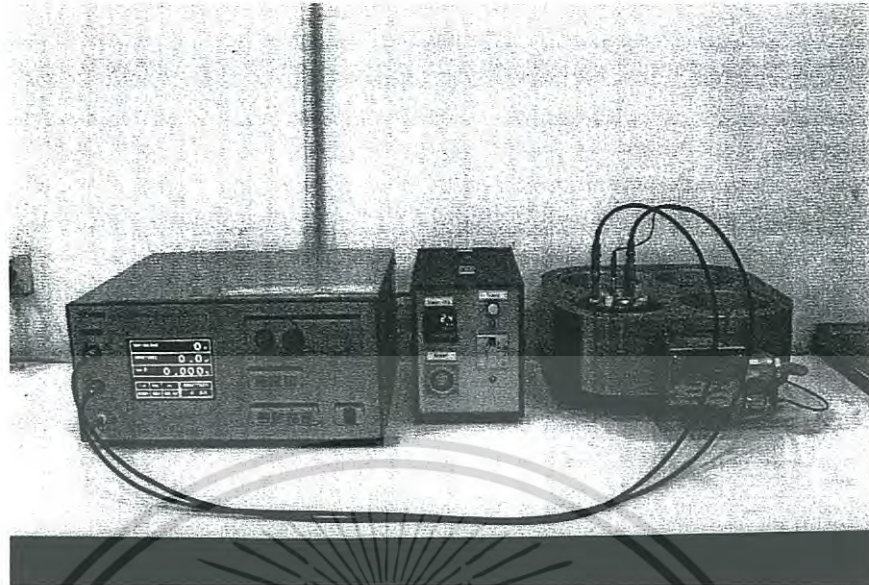
รูปที่ 3.20 เครื่องมือทดสอบน้ำมันตามมาตรฐาน IEC 60156

3.2.2 การทดสอบหาค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกและค่าเปอร์มิตติวิตี
ตามมาตรฐาน ASTM D924-99

ขั้นตอนการทำการทดลอง

- 1) ทำการต่อวงจรตามรูปที่ 3.21
- 2) นำน้ำมันที่ต้องการทดสอบเทลงในกระบอกของ Liquid Electrode
- 3) นำ Liquid Electrode ที่บรรจุน้ำมันแล้วใส่ลงในช่องใดช่องหนึ่งของ Test Cell
- 4) จากนั้นเปิดเครื่อง Temperature Adjust ปรับอุณหภูมิที่ต้องการ ซึ่งในการทดสอบได้กำหนดให้วัดค่าที่อุณหภูมิ 25 และ 100 องศาเซลเซียส
- 5) เมื่อปรับอุณหภูมิตามค่าที่ต้องการแล้ว รอจนอุณหภูมิของ Test Cell ถึงค่าที่อุณหภูมิที่ต้องการแล้วก็ทำการบันทึกค่า $\tan\delta$ โดยจะทำการบันทึกอยู่สองค่าที่อุณหภูมิ 25 และ 100 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



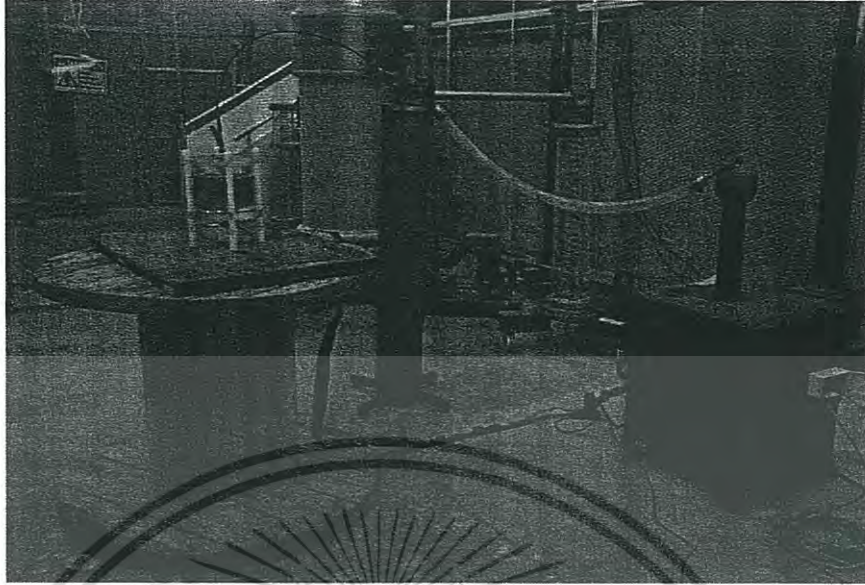
รูปที่ 3.21 เครื่องมือทดสอบน้ำมันตามมาตรฐาน ASTM D924-99

3.2.3 การทดสอบการหาค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาว์นของฉนวนผสมตามมาตรฐาน IEC 60243-1

ขั้นตอนการทดสอบ

1. ทำการต่อวงจรทดสอบตามรูปที่ 3.22
2. นำเพรสบอร์ดที่อิมเพกเน็ตแล้ว ใส่ลงในชุดทดสอบจากนั้นเทฉนวนเหลวลงในชุดทดสอบ โดยให้ฉนวนเหลวอยู่ในระดับที่ห่างจากขอบบนของชุดทดสอบ 0.8-1.0 cm.
3. ตรวจสอบฉนวนเหลวที่ถูกเทลงในชุดทดสอบว่ามีฟองอากาศอยู่หรือไม่ ถ้ามีฟองอากาศใช้แท่งแก้วคนเบาๆ จนกว่าฟองอากาศที่มีจะหายไปจนหมด
4. จดบันทึกค่าอุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันบรรยากาศ
5. ทำการขึ้นแรงดัน โดยให้อัตราการเพิ่มแรงดันคงที่อย่างช้าๆ โดยให้อยู่ในระดับที่ 2 kV/s ขึ้นไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดการเบรกดาว์นผ่านเพรสบอร์ด
6. บันทึกค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับที่อ่านได้จากมิเตอร์วัดแรงดัน
7. เมื่อฉนวนเหลวที่ใช้ทดสอบเกิดการเบรกดาว์นแล้วให้นำเพรสบอร์ดออกจากชุดทดสอบ ทำความสะอาดอิเล็กทรอนิกส์ที่มีเขม่าติด จากนั้นตั้งพักชุดทดสอบทิ้งไว้ระยะเวลา 2 นาที แล้วจึงนำเพรสบอร์ดขึ้นต่อไปมาติดตั้ง
8. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 5-7 ไปเรื่อยๆ จนกว่าจะทดสอบครบจำนวน 6 ครั้ง

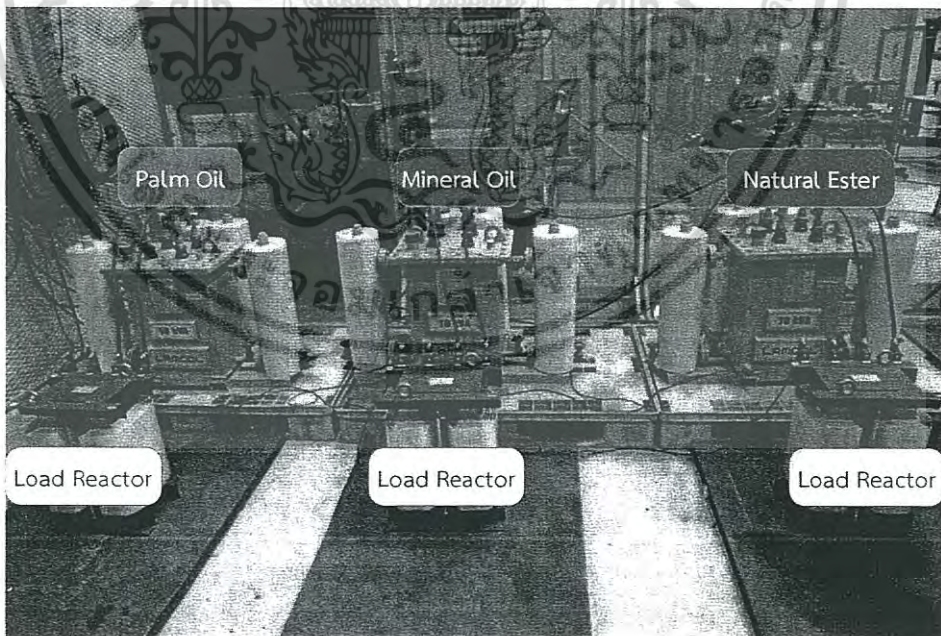
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.22 การทดสอบการหาค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนกระดาษที่อิมเพิร์กเนต ด้วยฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60243-1

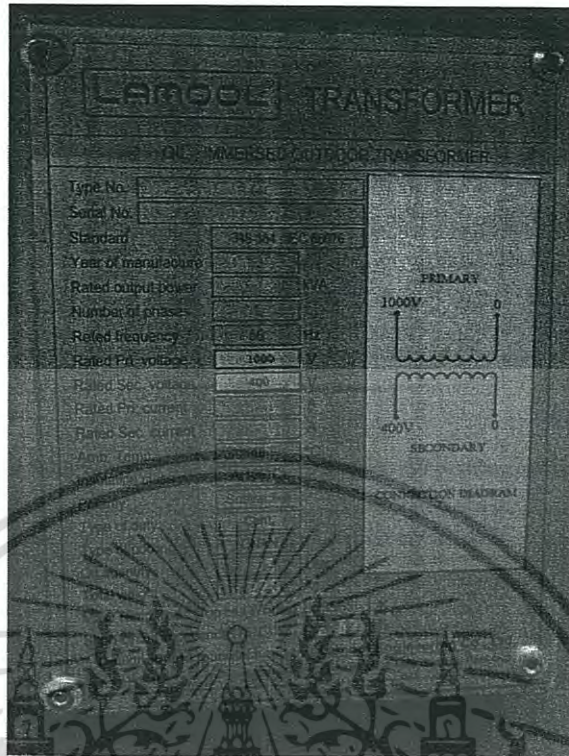
3.3 การติดตั้งหม้อแปลงพร้อมเครื่องมือวัด และการวัดค่าทางไฟฟ้า

ติดตั้งหม้อแปลงทั้งสามลูกที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงโดยต่อแบบ เดลต้า เพื่อจ่ายไฟสามเฟสเพื่อให้ได้พิกัด 400 V และรับภาระโหลด 100 เอมป์เซ็นต์

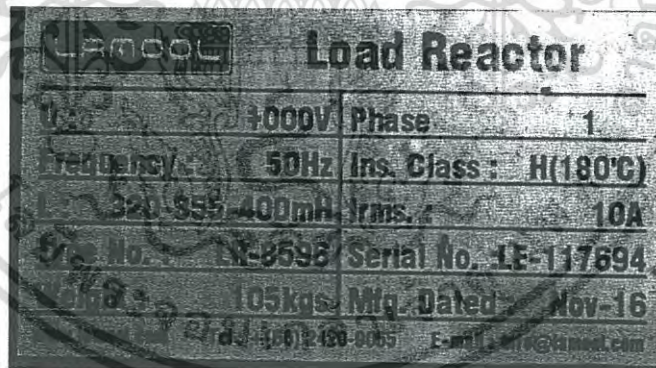


รูปที่ 3.23 การติดตั้งหม้อแปลง ที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

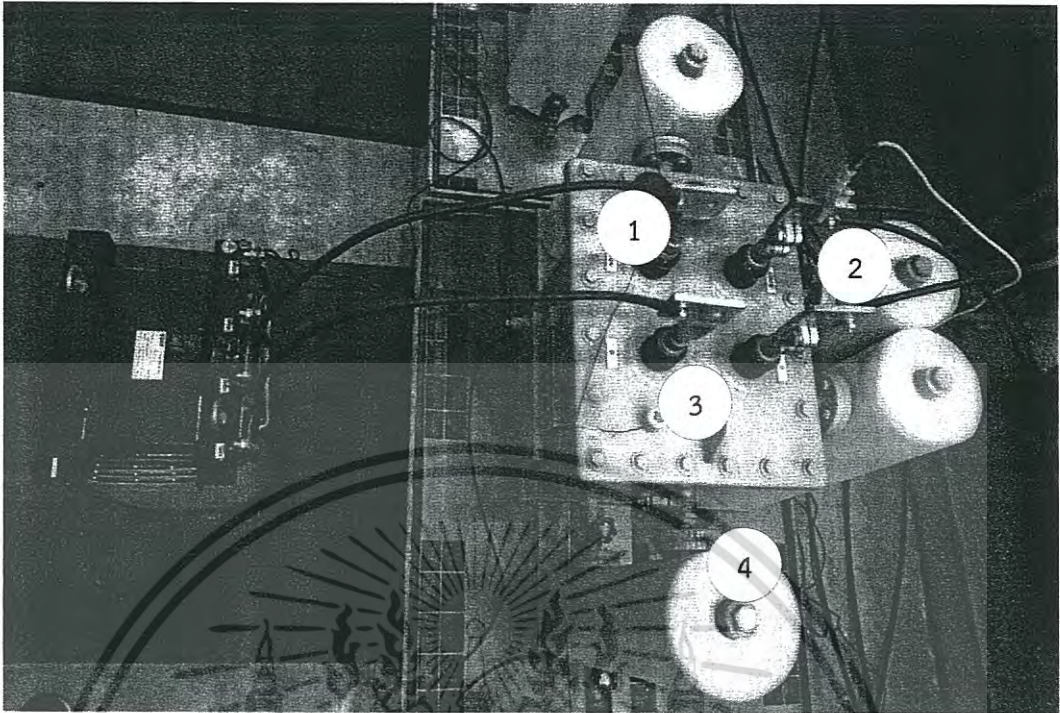


รูปที่ 3.24 แผ่นป้ายบอกรายละเอียดของหม้อแปลง

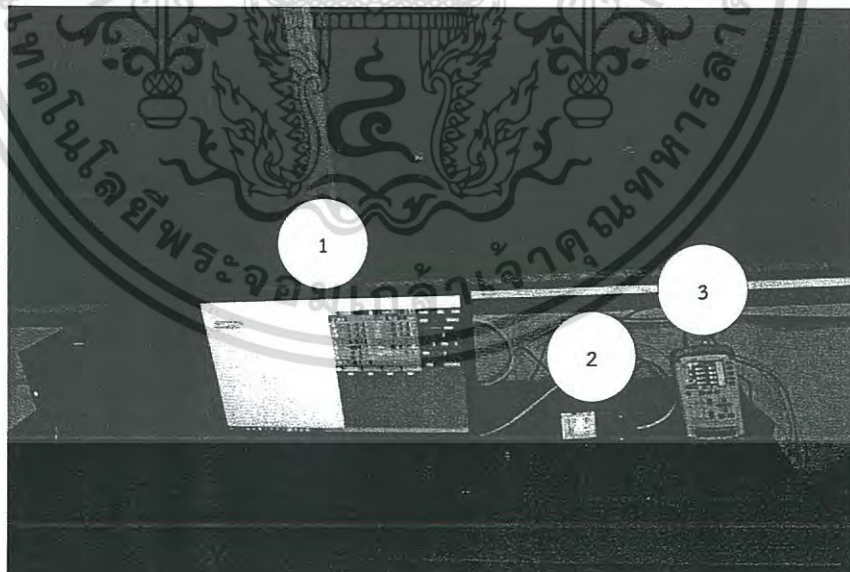


รูปที่ 3.25 แผ่นป้ายบอกรายละเอียดของโหลดเหนี่ยวนำที่นำมาใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.26 การเชื่อมต่ออุปกรณ์การวัดที่ตัวหม้อแปลง
 1 คือ ด้านแรงสูง (1000 V) 2 คือ ด้านแรงต่ำ (400 V)
 3 คือ เซนเซอร์วัดอุณหภูมิน้ำมัน 4 คือ ถังที่ใช้เก็บตัวอย่างน้ำมัน



รูปที่ 3.27 การต่อวัดอุปกรณ์เพื่อใช้บันทึกค่าทางไฟฟ้าและทางความร้อน
 1 คือ คอมพิวเตอร์ที่ใช้บันทึกค่า 2 คือ Power Meter 3 คือ Temperature Recorder

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การเก็บตัวอย่างน้ำมันเพื่อนำไปทดสอบ

การเก็บตัวอย่างน้ำมันโดยใช้ขวด

- 1) ท่อที่ทำจากพลาสติกหรือยาง ใช้ในการเชื่อมระหว่างจุดที่ทำการเก็บตัวอย่างของอุปกรณ์ไฟฟ้ากับขวดที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง ควรมีความยาวสั้นที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้
- 2) ขวดที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างทำจากแก้วหรือโลหะที่มีการป้องกันการรั่วไหลของก๊าซ โดยทั่วไปจะมีปริมาตร 0.5-2.5 ลิตร สำหรับขวดเก็บตัวอย่างที่เหมาะสม
- 3) อุปกรณ์ที่ใช้ในการขนส่งต้องมีการออกแบบให้ป้องกันขวดที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างระหว่างขนส่ง



รูปที่ 3.28 การเก็บตัวอย่างน้ำมันโดยใช้ขวด [14]

ขั้นตอนการทำการเก็บตัวอย่างน้ำมัน

- 1) เชื่อมต่อท่อที่ทำจากพลาสติกหรือยาง กับอุปกรณ์ไฟฟ้า
- 2) เปิดวาล์ว อย่างระมัดระวัง และปล่อยน้ำมันทิ้งในภาชนะรองรับ ประมาณ 0.5 ลิตร ผ่านท่อ เพื่อให้เป็นที่มั่นใจว่าไม่มีสิ่งเจือปนอยู่ในท่อนก่อนทำการเก็บตัวอย่าง
- 3) บริเวณปลายท่อ ตัวอย่างน้ำมันไหลอย่างช้าๆ ไปยังขวดที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง
- 4) ปล่อยให้ น้ำมันไหลเข้าสู่ขวดเต็มขวดจนล้นลงสู่ภาชนะรองรับ และนำท่อ ออกจากขวดอย่างช้าๆ ในขณะที่น้ำมันยังคงไหลอยู่
- 5) ปิดวาล์ว
- 6) เอียงขวดเพื่อเทน้ำมันออกปริมาตรเล็กน้อย เพื่อให้ระดับของตัวอย่างน้ำมันต่ำกว่าขอบปากขวดเล็กน้อยเพื่อป้องกันการขยายตัวของตัวอย่างน้ำมัน จากนั้นทำการปิดฝา และทำการติดฉลากตัวอย่างน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การทดสอบคุณสมบัติทางเคมี

การทดสอบในห้องปฏิบัติการมีทั้งหมด 3 การทดสอบ ดังนี้

3.5.1. การทดสอบหาค่าความชื้น(moisture content) ตามมาตรฐาน ASTM D1533-00

3.5.2. การทดสอบหาความเป็นกรด(acidity) ตามมาตรฐาน ASTM D974-02

3.5.3. การทดสอบหาค่าแรงตึงผิว (interfacial tension) ตามมาตรฐาน ASTM D0971-99

3.5.1 การทดสอบหาค่าความชื้น(moisture content) ตามมาตรฐาน ASTM D1533-0

การตรวจสอบหาค่าความชื้นเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการประเมินสภาพของฉนวนในหม้อแปลงได้ เนื่องจากหากมีความชื้นเกิดขึ้นในหม้อแปลงเป็นอันตรายอย่างยิ่งสำหรับฉนวนหม้อแปลงเพราะเป็นที่ทราบกันอยู่แล้วว่าหากมีปริมาณความชื้นเกิดขึ้นในน้ำมันหม้อแปลงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจะทำให้ค่าของแรงดันเบรกดาว์นลดลงอย่างมาก นอกจากนี้ยังส่งผลให้ค่าอัตราการเสื่อมของฉนวนเซลลูโลสมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกด้วย

ขั้นตอนการทดสอบ

1) ทำการเปิดเครื่องมือ 831 KF Coulometer Ω Metrohm เพื่อให้แทนคนสารด้วยแม่เหล็กคนสารละลายที่อยู่ในบีกเกอร์ให้มีความเข้มข้นของสารเท่ากัน

2) ทำการ flush หลอดไซริงค์ด้วยตัวอย่างน้ำมันที่จะใช้ในการทดสอบ หลังจากนั้นทำการดูดตัวอย่างน้ำมันให้มีค่ามากกว่า 3 g

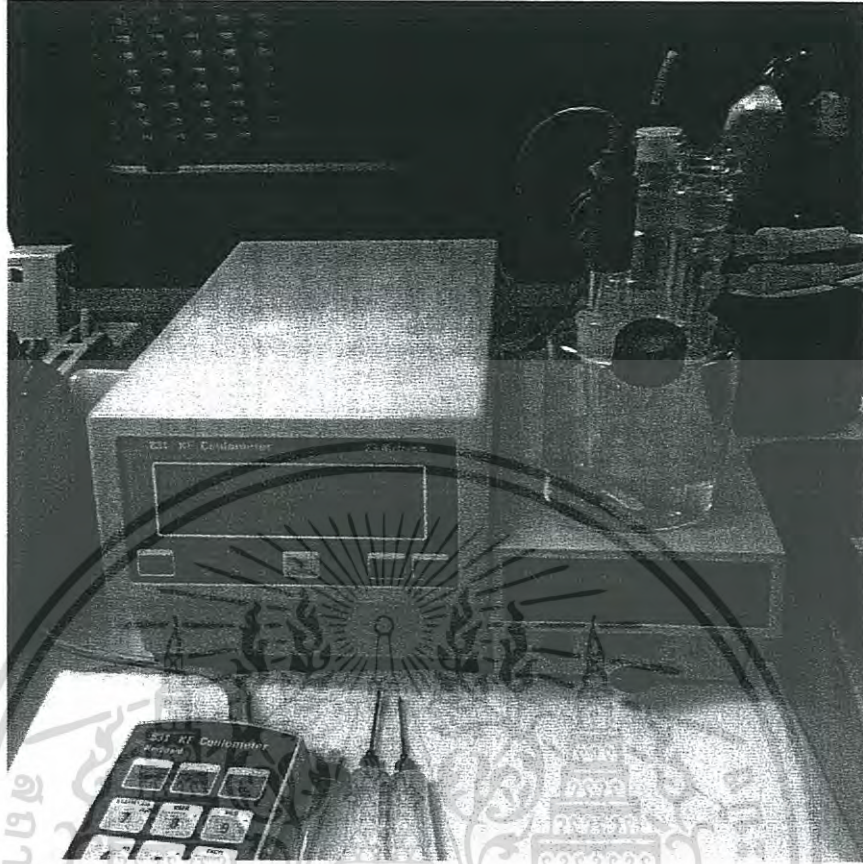
3) ทำการชั่งน้ำหนักของน้ำมันก่อนการทดสอบ

4) ตรวจสอบสถานะของเครื่องมือว่าอยู่ในสถานะใด หากเครื่องมือแสดงสถานะ ready แสดงว่าใช้งานได้ ให้ทำการกดปุ่ม start และทำการฉีดตัวอย่างน้ำมันในหลอดไซริงค์ผ่านผนังกั้นยางของเครื่องมือ 831 KF Coulometer Ω Metrohm ประมาณ 0.9-1.5 g

5) ทำการชั่งหลอดไซริงค์อีกครั้งเพื่อทำการหาค่าน้ำหนักของน้ำมันที่ฉีดไป แล้วทำการใส่ค่าน้ำหนักของน้ำมันที่ฉีดไป กด Enter หลังจากนั้นรอเครื่องมือทำงานประมาณ 1 นาที

6) ทำซ้ำจำนวน 3 ครั้ง จะได้ค่าความชื้นเฉลี่ยที่อยู่น้ำมันในหน่วย ppm โดยค่าความเบี่ยงเบนนั้นจะต้องมีค่าไม่เกิน 2 หากมีค่าเกิน 2 ให้ทำการทดสอบใหม่อีกครั้งหนึ่ง

หมายเหตุ - ปริมาณสาร Hydranal ที่อยู่ในบีกเกอร์นั้นจะต้องมีค่ามากกว่า 80 ml และต้องมีค่าไม่เกิน 150 ml หากมีค่าต่ำกว่าให้ทำการเติมสาร Hydranal ลงไปในบีกเกอร์ แต่หากมีค่าเกิน 150 ml ให้ทำการปิดเครื่องคนสารด้วยแม่เหล็กรอให้สารละลายตกตะกอนแยกชั้นออกเป็นชั้นของ Hydranal และน้ำมันหลังจากนั้นให้ทำการดูดน้ำมันออก



รูปที่ 3.29 การทดสอบหาค่าความชื้น(moisture content) ตามมาตรฐาน ASTM D1533-00

3.5.2 การทดสอบหาความเป็นกรด(acidity) ตามมาตรฐาน ASTM D974-02

Acid number หรือ acidity คือมวลของ potassium hydroxide (KOH) ในหน่วยมิลลิกรัม ที่ต้องใช้ในการทำให้ 1 กรัมของสาร (น้ำมันหม้อแปลง) กลายเป็นกลางซึ่งแสดงเป็นหน่วย mg KOH /g โดยปกติแล้วสำหรับหม้อแปลงใหม่น้ำมันฉนวนจะมีคุณสมบัติเป็นกลาง การเกิดออกซิเดชันของฉนวนและน้ำมันหม้อแปลงเมื่อสัมผัสกับออกซิเจนส่งผลให้เกิดกรดขึ้น นอกจากนี้แล้วกรดที่เกิดขึ้นยังก่อให้เกิดการสร้างตะกอนขึ้นมาเคลือบบนขดลวดของหม้อแปลงขึ้นมาด้วย ซึ่งมีผลต่อการระบายความร้อนของหม้อแปลงทำให้หม้อแปลงระบายความร้อนได้น้อยลง ซึ่งหมายความว่าหากมีค่าตะกอนมากขึ้นจะส่งผลให้ขดลวดมีอุณหภูมิสูงขึ้นด้วย และจากสภาวะที่น้ำมันหม้อแปลงที่มีกรดในปริมาณมาก และอุณหภูมิที่สูงจะเร่งกระบวนการเสื่อมสภาพของน้ำมันหม้อแปลง นอกจากนี้แล้วกรดที่เกิดขึ้นจะทำลายตัวถังของหม้อแปลง และเร่งการเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษอีกด้วย การตรวจสอบกรดที่อยู่ในน้ำมันหม้อแปลงนั้นจึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของน้ำมันหม้อแปลงได้

ขั้นตอนการทดสอบ

- การผสม blank (BLK)

blank คือสารที่ใช้ในการเป็นสารละลายตั้งต้นเพื่อให้นำไปผสมกับน้ำมันในการทดสอบ โดยประกอบด้วยน้ำปริมาตร 5 ml, toluene 500 ml และ propan-2-ol 495 ml หลังจากที่มีผสมสารละลายเสร็จให้ทำการคนสารประมาณ 1 นาที โดยสารที่ผสมขึ้นมานั้นควรใช้ภายใน 7 วัน และเมื่อมีการผสม blank ใหม่ต้องมีการทดสอบ blank ทุกครั้งโดยมีวิธีการทดสอบคือ นำสารละลาย blank ปริมาตร 125 ml ใส่ลงในแก้วที่ใช้ในการทดสอบ แล้วทำการทดสอบโดยการกด method > BLK > OK > START การทำการทดสอบ blank นั้นจะเป็นการบันทึกถึงค่าของสารละลายตั้งต้นไว้เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าความเป็นกรดเมื่อใช้ในการทดสอบน้ำมันต่อไป

- การทดสอบหาค่าความเป็นกรดของตัวอย่างน้ำมัน

1) ทำการเปิดเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ แล้วทำการไล่ฟองอากาศในสายก่อนการทดสอบ ทุกครั้งโดยการกด menu control > Dosing

2) ทำการล้างหัวอิเล็กโทรด และแคปซูลคนสารที่ใช้ในการคนสารด้วยน้ำ RO หลังจากนั้นทำการเช็ดให้แห้ง

3) ทำการทดสอบ blank (หากมีการผสม blank ใหม่)

4) ทำการชั่งตัวอย่างน้ำมันขนาดประมาณ 20 กรัม และทำการจดบันทึกค่าของน้ำมันไว้

5) ทำการล้างหัวอิเล็กโทรด และแคปซูลคนสารที่ใช้ในการคน และทำการเช็ดให้แห้งก่อนการทดสอบตัวอย่างน้ำมัน

6) ทำการผสมตัวอย่างน้ำมันขนาดประมาณ 20 กรัม กับสารละลาย blank 125 ml ลงในแก้วที่ให้สำหรับทำการทดสอบ และทำการคนสารละลายเป็นเวลาประมาณ 1 นาที



รูปที่ 3.30 การทดสอบหาความเป็นกรด(acidity) ตามมาตรฐาน ASTM D974-02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

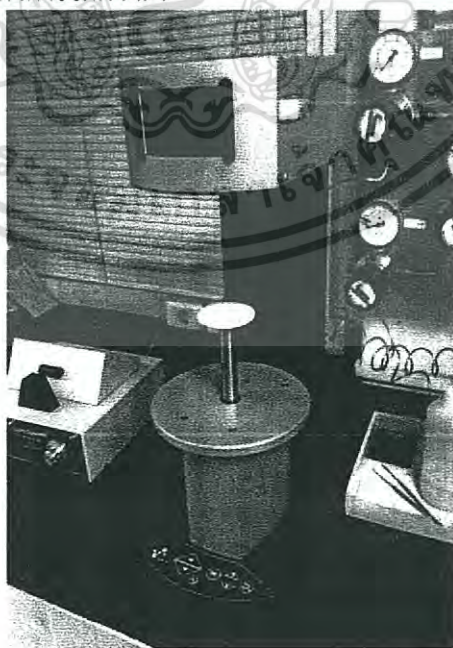
3.5.3 การทดสอบหาค่าแรงตึงผิว (interfacial tension) ตามมาตรฐาน ASTM D0971-99

IFT เป็นการทดสอบ ความตึงผิวที่เชื่อมต่อกันของเหลวสองชนิดที่ผสมกันไม่ได้ คือ น้ำมันและน้ำ ซึ่งมีหน่วยวัดเป็น dynes per centimeter (milliNewtons / meter หรือ mN/m.) การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาการเชื่อมสภาพของฉนวนแข็งอีกวิธีหนึ่ง เนื่องจากการทดสอบนี้มีความไวเป็นอย่างมากต่อสารปนเปื้อนมีขี้ผึ้งละลายน้ำได้ที่เกิดจากการเชื่อมสภาพของฉนวนแข็ง และผลิตภัณฑ์การสลายตัวของน้ำมัน ซึ่งส่งผลให้คุณสมบัติความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงลดลง

โดยความตึงผิวของน้ำมันหม้อแปลงนั้นจะแปรผกผันกับการละลายของสารประกอบประเภท hydrophilic (high polarity molecule) ในน้ำมัน ซึ่งโดยปกติแล้วน้ำมันเป็นของเหลวประเภท non-polarity liquid (hydrophobic liquid) ดังนั้นถ้าน้ำมันหม้อแปลงมีสารประกอบประเภท hydrophilic ละลายอยู่มากขึ้นค่า IFT จะลดลง นอกจากนั้นแล้วการที่น้ำมันหม้อแปลงมีการละลายของสารประกอบประเภท hydrophilic มากขึ้นจะส่งผลให้เกิดค่า dissipation factor สูงขึ้น และค่าแรงดันเบรกดาวนต่ำลง ดังนั้นค่า IFT สามารถบ่งชี้การเชื่อมสภาพของน้ำมันได้ในระดับหนึ่ง

ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ทำการปรับเทียบเครื่องมือที่ใช้ในการวัดการทำการทดสอบ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่วงน้ำหนักที่มากับเครื่องมือทดสอบ
- 2) ทำการใส่น้ำให้แก้วที่ใช้ในการทดสอบ และทำการทดสอบค่า IFT ของน้ำก่อน ซึ่งควรจะมีค่าอยู่ที่ 69-71 mN/m หากค่า IFT ของน้ำนั้นค่าไม่ได้ตามปกติจะต้องมีการตรวจสอบเครื่องมือว่ามีปัญหาอะไรหรือไม่
- 3) ทำการใส่น้ำมันในแก้วที่ใช้ในการทดสอบ และใส่ตัวอย่างน้ำมันที่จะทำการทดสอบลงไปให้มีปริมาตรพอๆ กับน้ำแล้วเริ่มทำการวัดค่า IFT



รูปที่ 3.31 การทดสอบหาค่าแรงตึงผิว (interfacial tension) ตามมาตรฐาน ASTM D0971-99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

หลังจากได้ทำการออกแบบสร้างหม้อแปลงทั้ง 3 ลูกแล้วต้องทำการทดสอบคุณสมบัติต่างๆของหม้อแปลงตามมาตรฐานสากลที่ใช้ในโรงงานหม้อแปลง (การทดสอบประจำ หรือ Routine test) หม้อแปลงทั้ง 3 ลูกจะต้องผ่านเกณฑ์การทดสอบ ก่อนจะนำไปทำการศึกษาวิจัยต่อไปซึ่งได้แก่

1. การทดสอบประจำ(Routine Test)
2. การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนแข็ง และฉนวนเหลว
3. การทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนของฉนวนเหลวภายในหม้อแปลง
4. การทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของฉนวนเหลวภายในหม้อแปลง

4.1 การทดสอบประจำ(Routine Test) และค่าทางไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้จะแบ่งการทดสอบออกเป็น 8 ประเภท ได้แก่

- 4.1.1 ทดสอบวัดค่าความต้านทานของขดลวด (Winding Resistance)
- 4.1.2 ทดสอบวัดค่าความเป็นฉนวนของขดลวด (Insulation Resistance)
- 4.1.3 ทดสอบวัดค่า Turns Ratio หรือ Voltage Ratio
- 4.1.4 ทดสอบวัดค่า load- Loss
- 4.1.5 ทดสอบวัดค่า No-Load Loss
- 4.1.6 ทดสอบวัดค่า Induce Overvoltage
- 4.1.7 ทดสอบวัดค่า Dielectric Strength (Hi-pot)
- 4.1.8 ทดสอบรอยการรั่วของถังหม้อแปลงฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบ Routine Test ของหม้อแปลงที่ใช้น้ำมันแร่เป็นฉนวน

ชนิดของการทดสอบ	มาตรฐาน	ผลการทดสอบ	ค่าตามมาตรฐาน	หน่วย
1. อัตราส่วนแรงดัน	มอก. 384	1000/400	1000/400	-
2. ความต้านทานของขดลวด				
- ปฐมภูมิ	มอก. 384	0.9701	1.0977±20%	Ω
- ทุติยภูมิ		0.1332	0.1344±20%	Ω
3. ความแข็งแรงของฉนวน				
การทดสอบความต้านทาน				
ปฐมภูมิ - กราวด์	มอก. 384	28.39	≥ 1	GΩ
ทุติยภูมิ - กราวด์	มอก. 384	16.10	≥ 1	GΩ
ปฐมภูมิ - ทุติยภูมิ	มอก. 384	75.40	≥ 1	GΩ
Apply Potential Test (60s)				
ปฐมภูมิ - กราวด์	มอก. 384	3	3	kV
ทุติยภูมิ - กราวด์	มอก. 384	3	3	kV
ปฐมภูมิ - ทุติยภูมิ	มอก. 384	3	3	kV
การทดสอบการเหนี่ยวนำ (60s)				
เฟส A	มอก. 384	0.92		
เฟส B	มอก. 384	0.92		
4. การทดสอบขณะไม่มีโหลด				
แรงดัน	มอก. 384	1000.80		
กระแส	มอก. 384	0.20		
การสูญเสียขณะไม่มีโหลด	มอก. 384	40.0	≤ 50	W
5. การทดสอบขณะมีโหลด				
แรงดัน	มอก. 384	24.31		
กระแส	มอก. 384	10.00		
การสูญเสียขณะมีโหลด	มอก. 384	186.5	≤ 250	W
6. การทดสอบการรั่ว	มอก. 384	1-5 psi >1 hr		
7. คุณสมบัติของหม้อแปลง				
กระแสขณะไม่มีโหลด (%)	มอก. 384	1.99	1.69±30%	%
การสูญเสียขณะไม่มีโหลด (W)	มอก. 384	40.00	≤ 50	W
การสูญเสียจากโหลดที่อุณหภูมิ 75 °C	มอก. 384	212.75	≤ 250	W
แรงดันอิมพีแดนซ์ ที่อุณหภูมิ 75 °C	มอก. 384	2.64	±20%	%
ประสิทธิภาพที่อุณหภูมิ 75 °C	มอก. 384	97.53	≥ 97.09	%
การควบคุมระดับแรงดันที่อุณหภูมิ 75 °C	มอก. 384	2.14	2.12±20%	%
ความสูญเสียรวม ที่อุณหภูมิ 75 °C	มอก. 384	252.75	≤ 300	W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบ Routine Test ของหม้อแปลงที่ใช้เอสเทอร์ธรรมชาติเป็นฉนวน

ชนิดของการทดสอบ	มาตรฐาน	ผลการทดสอบ	ค่าตามมาตรฐาน	หน่วย
1. อัตราส่วนแรงดัน	มอก. 384	1000/400	1000/400	-
2. ความต้านทานของขดลวด				
ปฐมภูมิ	มอก. 384	0.9711	$1.0977 \pm 20\%$	Ω
ทุติยภูมิ		0.1332	$0.1344 \pm 20\%$	Ω
3. ความแข็งแรงของฉนวน				
การทดสอบความต้านทาน				
ปฐมภูมิ – กราวด์	มอก. 384	10.90	≥ 1	$G\Omega$
ทุติยภูมิ – กราวด์	มอก. 384	23.70	≥ 1	$G\Omega$
ปฐมภูมิ – ทุติยภูมิ	มอก. 384	35.10	≥ 1	$G\Omega$
Apply Potential Test (60s)				
ปฐมภูมิ – กราวด์	มอก. 384	3	3	kV
ทุติยภูมิ – กราวด์	มอก. 384	3	3	kV
ปฐมภูมิ – ทุติยภูมิ	มอก. 384	3	3	kV
การทดสอบการเหนี่ยวนำ (60s)				
เฟส A	มอก. 384	0.94		
เฟส B	มอก. 384	0.94		
4. การทดสอบขณะไม่มีโหลด				
แรงดัน	มอก. 384	1000.60		
กระแส	มอก. 384	0.20		
การสูญเสียขณะไม่มีโหลด	มอก. 384	39	≤ 50	W
5. การทดสอบขณะมีโหลด				
แรงดัน	มอก. 384	24.52		
กระแส	มอก. 384	10.09		
การสูญเสียขณะมีโหลด	มอก. 384	189.5	≤ 250	W
6. การทดสอบการรั่ว	มอก. 384	1-5 psi >1 hr		
7. คุณสมบัติของหม้อแปลง				
กระแสขณะไม่มีโหลด (%)	มอก. 384	1.98	$1.69 \pm 30\%$	%
การสูญเสียขณะไม่มีโหลด (W)	มอก. 384	39.00	≤ 50	W
การสูญเสียจากโหลดที่อุณหภูมิ 75 °C	มอก. 384	215.30	≤ 250	W
แรงดันอิมพีแดนซ์ ที่อุณหภูมิ 75 °C	มอก. 384	2.66	$\pm 20\%$	%
ประสิทธิภาพที่อุณหภูมิ 75 °C	มอก. 384	97.52	≥ 97.09	%
การควบคุมระดับแรงดันที่อุณหภูมิ 75 °C	มอก. 384	2.17	$2.12 \pm 20\%$	%
ความสูญเสียรวม ที่อุณหภูมิ 75 °C	มอก. 384	254.30	≤ 300	W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบ Routine Test ของหม้อแปลงที่ใช้ น้ำมันปาล์มเป็นฉนวน

ชนิดของการทดสอบ	มาตรฐาน	ผลการทดสอบ	ค่าตามมาตรฐาน	หน่วย
1. อัตราส่วนแรงดัน	มอก. 384	1000/400	1000/400	-
2. ความต้านทานของขดลวด				
ปฐมภูมิ	มอก. 384	0.9743	$1.0977 \pm 20\%$	Ω
ทุติยภูมิ		0.1334	$0.1344 \pm 20\%$	Ω
3. ความแข็งแรงของฉนวน				
การทดสอบความต้านทาน				
ปฐมภูมิ – กราวด์	มอก. 384	8.23	≥ 1	$G\Omega$
ทุติยภูมิ – กราวด์	มอก. 384	4.29	≥ 1	$G\Omega$
ปฐมภูมิ – ทุติยภูมิ	มอก. 384	16.10	≥ 1	$G\Omega$
Apply Potential Test (60s)				
ปฐมภูมิ – กราวด์	มอก. 384	3	3	kV
ทุติยภูมิ – กราวด์	มอก. 384	3	3	kV
ปฐมภูมิ – ทุติยภูมิ	มอก. 384	3	3	kV
การทดสอบการเหนี่ยวนำ (60s)				
เฟส A	มอก. 384	0.99		
เฟส B	มอก. 384	0.99		
4. การทดสอบขณะไม่มีโหลด				
แรงดัน	มอก. 384	1000.90		
กระแส	มอก. 384	0.20		
การสูญเสียขณะไม่มีโหลด	มอก. 384	40.0	≤ 50	W
5. การทดสอบขณะมีโหลด				
แรงดัน	มอก. 384	24.68		
กระแส	มอก. 384	10.05		
การสูญเสียขณะมีโหลด	มอก. 384	189.30	≤ 250	W
6. การทดสอบการรั่ว	มอก. 384	1-5 psi >1 hr		
7. คุณสมบัติของหม้อแปลง				
กระแสขณะไม่มีโหลด (%)	มอก. 384	1.98	$1.69 \pm 30\%$	%
การสูญเสียขณะไม่มีโหลด (W)	มอก. 384	40.00	≤ 50	W
การสูญเสียจากโหลดที่อุณหภูมิ 75 °C	มอก. 384	215.33	≤ 250	W
แรงดันอิมพีแดนซ์ ที่อุณหภูมิ 75 °C	มอก. 384	2.67	$\pm 20\%$	%
ประสิทธิภาพที่อุณหภูมิ 75 °C	มอก. 384	97.51	≥ 97.09	%
การควบคุมระดับแรงดันที่อุณหภูมิ 75 °C	มอก. 384	2.17	$2.12 \pm 20\%$	%
ความสูญเสียรวม ที่อุณหภูมิ 75 °C	มอก. 384	255.33	≤ 300	W

4.2 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า

การทดสอบในห้องปฏิบัติการมีทั้งหมด 4 การทดสอบ ดังนี้

4.2.1 การทดสอบหาค่าพิกัดทางไฟฟ้าของหม้อแปลง

4.2.2. การทดสอบการหาค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวนของฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60156

4.2.3. การทดสอบหาค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกและค่าเปอร์มิตติวิตี้ ตามมาตรฐาน ASTM D924-99

4.2.4. การทดสอบการหาค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวนของฉนวนที่อิมเพิร์กเนตด้วยเหลวตามมาตรฐาน IEC 60243-1

4.2.1 การทดสอบหาค่าพิกัดทางไฟฟ้าของหม้อแปลง

ผลการทดสอบหาค่าพิกัดทางไฟฟ้าของหม้อแปลงแสดงดังตารางที่ 4.4-4.5 และ

รูปที่ 4.1-4.2 ตามลำดับ

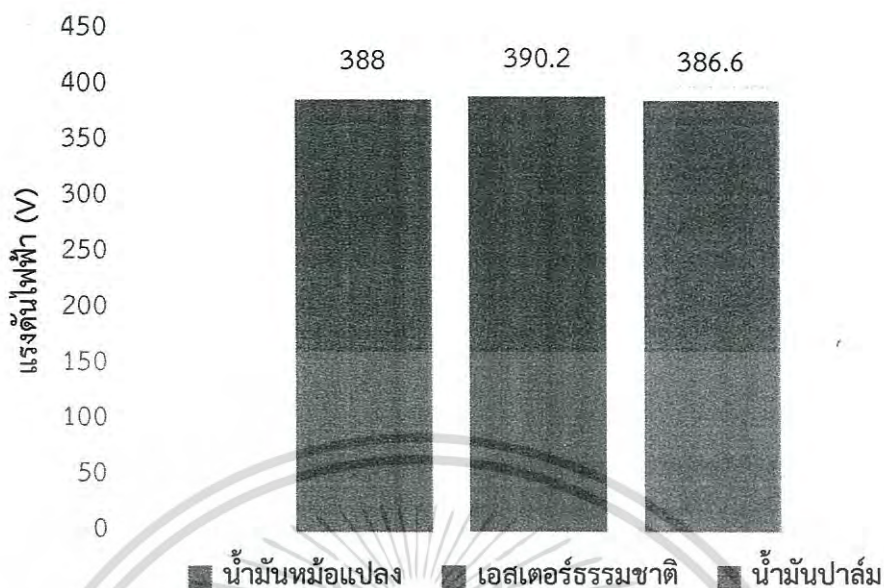
ตารางที่ 4.4 ผลการวัดค่าทางไฟฟ้า(แรงดัน)

เงื่อนไข	น้ำมันหม้อแปลง (V)	เอสเตอรีธรรมชาติ(V)	น้ำมันปาล์ม(V)
เริ่มใช้	388	390	387
ผ่านการใช้งาน 1 เดือน	389	391	388
ผ่านการใช้งาน 2 เดือน	386	388	384
ผ่านการใช้งาน 3 เดือน	389	391	387
ผ่านการใช้งาน 4 เดือน	388	391	387
เฉลี่ย	388	390.2	386.6

ตารางที่ 4.5 ผลการวัดค่าทางไฟฟ้า(กระแส)

เงื่อนไข	น้ำมันหม้อแปลง (A)	เอสเตอรีธรรมชาติ(A)	น้ำมันปาล์ม(A)
เริ่มใช้	42.30	42.90	42.60
ผ่านการใช้งาน 1 เดือน	42.50	43.00	42.70
ผ่านการใช้งาน 2 เดือน	42.10	42.60	42.20
ผ่านการใช้งาน 3 เดือน	42.40	43.00	42.50
ผ่านการใช้งาน 4 เดือน	42.30	42.90	42.60
เฉลี่ย	42.32	42.88	42.52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยแรงดันต้นไฟฟ้าของหม้อแปลงที่ใช้ฉนวนเหลวแตกต่างกัน 3 ชนิด



รูปที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงที่ใช้ฉนวนเหลวแตกต่างกัน 3 ชนิด

จากผลการทดสอบข้างต้นพบว่า ค่าทางไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็นแรงดันหรือกระแสไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกันทั้งสามลูกจึงสรุปได้ว่าฉนวนไม่มีผลต่อค่าทางไฟฟ้าแต่ปัจจัยที่มีผลต่อค่าทางไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับกรอกแบบแกนเหล็กและขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การทดสอบการหาค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาว์นของฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60156

ผลการทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาว์นของฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60156 ของฉนวนเหลว แสดงดังตารางที่ 4.6-4.8 และรูปที่ 4.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการหาค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาว์นของฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60156 ของฉนวนเหลวก่อนนำไปใช้ในหม้อแปลง

เงื่อนไข	น้ำมันหม้อแปลง (kV)	เอสเตอร์ธรรมชาติ(kV)	น้ำมันปาล์ม (kV)
ก่อนนำไปใช้	52.50	98	75.50
	54.20	73.50	72.80
	58.10	99.60	76.40
เฉลี่ย	54.93	90.37	74.90

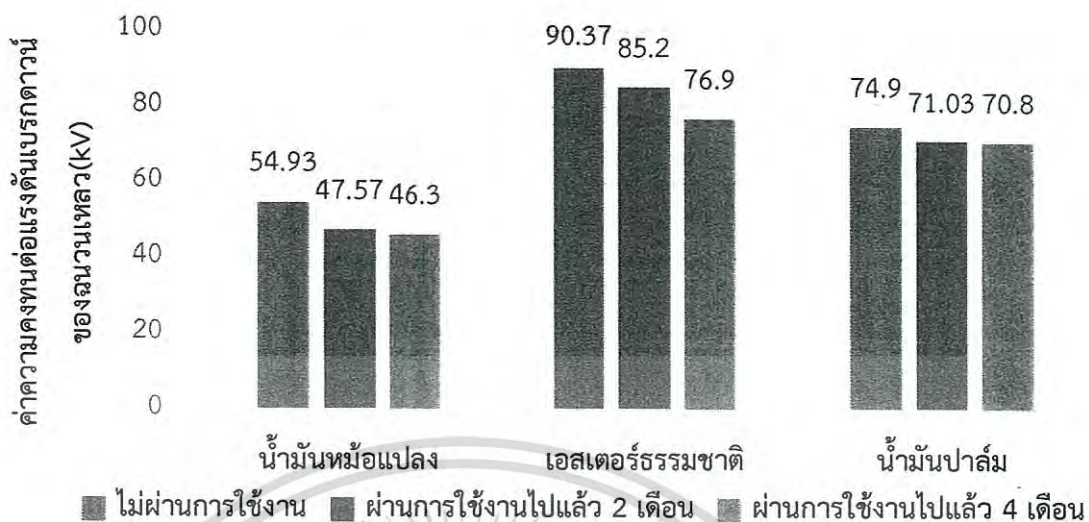
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบการหาค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาว์นของฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60156 ของฉนวนเหลวที่ผ่านการใช้งานไปแล้ว 2 เดือน

เงื่อนไข	น้ำมันหม้อแปลง (kV)	เอสเตอร์ธรรมชาติ(kV)	น้ำมันปาล์ม (kV)
ผ่านการใช้งาน 2 เดือน	39.80	85.60	61.40
	53.10	82.30	73.50
	49.80	87.70	78.20
เฉลี่ย	47.57	85.20	71.03

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบการหาค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาว์นของฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60156 ของฉนวนเหลวที่ผ่านการใช้งานไปแล้ว 4 เดือน

เงื่อนไข	น้ำมันหม้อแปลง (kV)	เอสเตอร์ธรรมชาติ(kV)	น้ำมันปาล์ม (kV)
ผ่านการใช้งาน 4 เดือน	46.30	73.50	72.50
	45.10	80.40	66.60
	47.60	76.80	73.30
เฉลี่ย	46.3	76.9	70.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกตาวานของฉนวนเหลวของหม้อแปลงที่ใช้ฉนวนเหลวแตกต่างกัน 3 ชนิดในระยะเวลาการใช้งานที่แตกต่างกัน

จากผลการทดสอบข้างต้นพบว่า น้ำมันหม้อแปลงมีค่าเฉลี่ยค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกตาวานของฉนวนเหลว ลดลง 13.40 เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไป 2 เดือน และลดลง 15.71 เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไป 4 เดือนในส่วนของเอสเตอร์ธรรมชาติพบว่า ค่าเฉลี่ยค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกตาวานของฉนวนเหลว ลดลง 5.72 เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไป 2 เดือน และลดลง 14.90 เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไป 4 เดือนและในส่วนของน้ำมันปาล์มพบว่า ค่าเฉลี่ยค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกตาวานของฉนวนเหลว ลดลง 5.17 เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไป 2 เดือน และลดลง 5.47 เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไป 4 เดือน

4.2.3 การทดสอบหาค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ASTM D924-99

ผลการทดสอบหาค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ตามมาตรฐาน ASTM D924-99 ของฉนวนเหลว แสดงดังตารางที่ 4.9-4.11 และรูปที่ 4.4-4.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.9 การทดสอบหาค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ตามมาตรฐาน ASTM D924-99 ของฉนวนเหลวก่อนนำไปใช้ในหม้อแปลง

เงื่อนไข	อุณหภูมิ (°C)	น้ำมันหม้อแปลง	เอสเตอร์ธรรมชาติ	น้ำมันปาล์ม
ก่อนนำไปใช้	25	0.023	0.105	0.266
	100	0.044	1.532	4.385
	25	0.024	0.106	0.275
	100	0.042	1.631	4.281
	25	0.022	0.112	0.288
	100	0.046	1.568	4.562
เฉลี่ย	25	0.023	0.108	0.276
	100	0.044	1.577	4.409

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

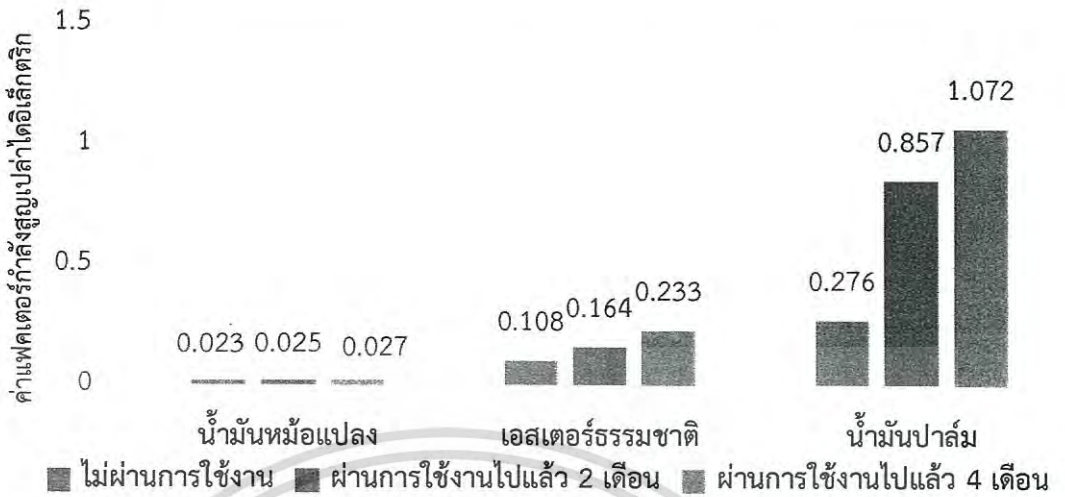
ตารางที่ 4.10 การทดสอบหาค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ตามมาตรฐาน ASTM D924-99 ของฉนวนเหลวที่ผ่านการใช้งานไปแล้ว 2 เดือน

เงื่อนไข	อุณหภูมิ (°C)	น้ำมันหม้อแปลง	เอสเตอร์ธรรมชาติ	น้ำมันปาล์ม
ผ่านการใช้งาน 2 เดือน	25	0.028	0.176	0.851
	100	0.047	2.141	8.733
	25	0.024	0.170	0.865
	100	0.044	2.744	8.631
	25	0.023	0.148	0.857
	100	0.069	1.954	6.488
เฉลี่ย	25	0.025	0.164	0.857
	100	0.053	2.279	7.951

ตารางที่ 4.11 การทดสอบหาค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ตามมาตรฐาน ASTM D924-99 ของฉนวนเหลวที่ผ่านการใช้งานไปแล้ว 4 เดือน

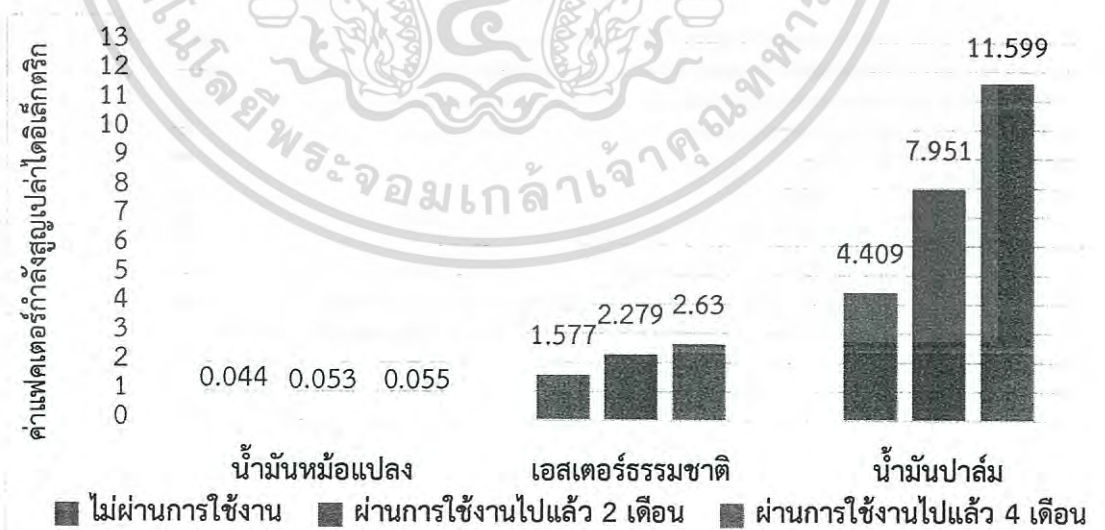
เงื่อนไข	อุณหภูมิ (°C)	น้ำมันหม้อแปลง	เอสเตอร์ธรรมชาติ	น้ำมันปาล์ม
ผ่านการใช้งาน 4 เดือน	25	0.026	0.276	1.207
	100	0.044	2.741	12.360
	25	0.027	0.17	1.019
	100	0.070	2.744	10.245
	25	0.028	0.255	0.991
	100	0.052	2.407	12.193
เฉลี่ย	25	0.027	0.233	1.072
	100	0.055	2.630	11.599

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยค่าแพกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าได้อิเล็กตริกของฉนวนเหลวของหม้อแปลงที่ใช้ฉนวนเหลวแตกต่างกัน 3 ชนิดในระยะเวลาการใช้งานที่แตกต่างกันที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

จากผลการทดสอบข้างต้นพบว่า ในส่วนของน้ำมันหม้อแปลงค่าแพกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าได้อิเล็กตริกของฉนวนเหลว เพิ่มขึ้น 8.70 เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไป 2 เดือน และเพิ่มขึ้น 17.39 เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไป 4 เดือนในส่วนของเอสเตอรฺธรรมชาติพบว่า ค่าแพกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าได้อิเล็กตริกของฉนวนเหลว เพิ่มขึ้น 51.85 เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไป 2 เดือน และเพิ่มขึ้น 115.74 เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไป 4 เดือนและในส่วนของน้ำมันปาล์มพบว่า ค่าแพกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าได้อิเล็กตริกของฉนวนเหลว เพิ่มขึ้น 210.51 เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไป 2 เดือน และเพิ่มขึ้น 288.41 เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไป 4 เดือน



รูปที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยค่าแพกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าได้อิเล็กตริกของฉนวนเหลวของหม้อแปลงที่ใช้ฉนวนเหลวแตกต่างกัน 3 ชนิดในระยะเวลาการใช้งานที่แตกต่างกันที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

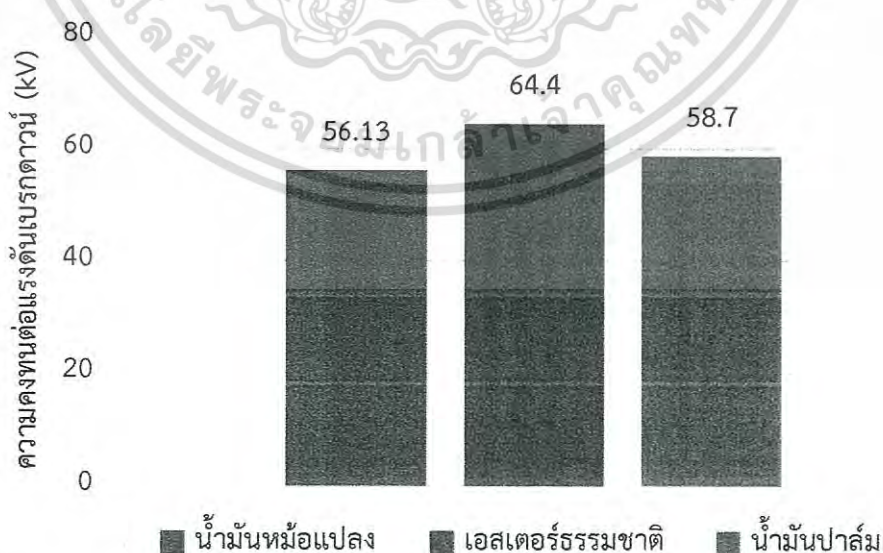
จากผลการทดสอบข้างต้นพบว่า ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของฉนวนเหลวเพิ่มขึ้น 20.45 เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไป 2 เดือน และเพิ่มขึ้น 25 เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไป 4 เดือน ในส่วนของเอสเทอร์ธรรมชาติพบว่า ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของฉนวนเหลวเพิ่มขึ้น 44.51 เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไป 2 เดือน และเพิ่มขึ้น 66.77 เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไป 4 เดือนและในส่วนของน้ำมันปาล์มพบว่า ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของฉนวนเหลวเพิ่มขึ้น 80.34 เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไป 2 เดือน และเพิ่มขึ้น 163.08 เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไป 4 เดือน

4.2.4 การทดสอบการหาค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนกระดาษอิมพีเร็กเน็ตด้วยฉนวนกระดาษอิมพีเร็กเน็ตด้วยฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60243-1

ผลการทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนกระดาษอิมพีเร็กเน็ตด้วยฉนวนกระดาษอิมพีเร็กเน็ตด้วยฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60243-1 แสดงดังตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบการหาค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนกระดาษอิมพีเร็กเน็ตด้วยฉนวนกระดาษอิมพีเร็กเน็ตด้วยฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60243-1 ก่อนนำไปใช้ในหม้อแปลง

เงื่อนไข	น้ำมันหม้อแปลง (kV)	เอสเทอร์ธรรมชาติ(kV)	น้ำมันปาล์ม(kV)
ก่อนนำไปใช้	56.50	65.2	60.4
	58.70	63.20	55.60
	53.20	64.80	58.20
เฉลี่ย	56.13	64.40	58.07



รูปที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนกระดาษอิมพีเร็กเน็ตด้วยฉนวนเหลวที่ใช้ฉนวนเหลวแตกต่างกัน 3 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบข้างต้นพบว่า ค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวนของฉนวนกระดาษขิมเพริกเน็ตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติมีค่าสูงกว่าฉนวนกระดาษขิมเพริกเน็ตด้วยน้ำมันหม้อแปลง 14.73 เปอร์เซ็นต์ และฉนวนกระดาษขิมเพริกเน็ตด้วยน้ำมันปาล์ม 4.58 เปอร์เซ็นต์

4.3 การทดสอบคุณสมบัติทางความร้อน

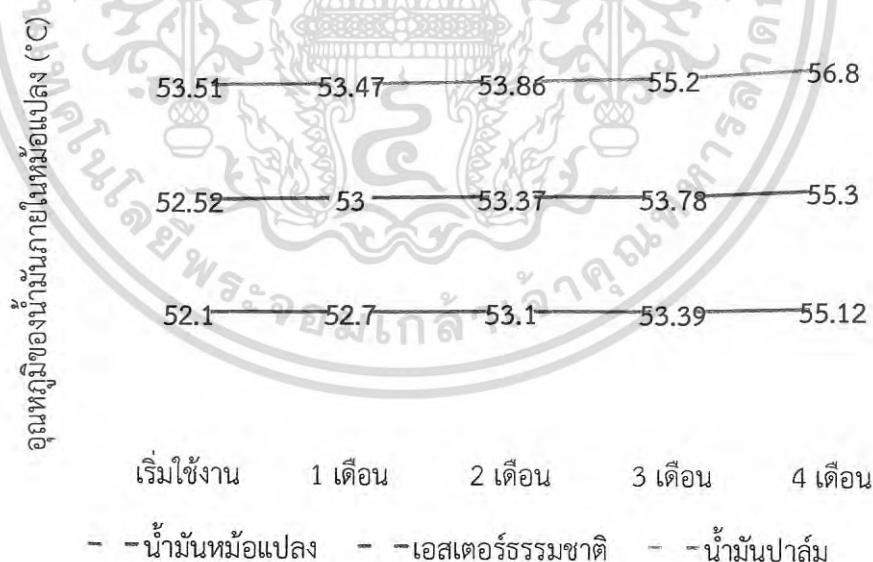
การทดสอบในห้องปฏิบัติการมีทั้งหมด 1 การทดสอบ ดังนี้

4.3.1 การทดสอบวัดค่าอุณหภูมิของน้ำมันภายในหม้อแปลงทั้งสามลูก

ผลการทดสอบหาวัดค่าอุณหภูมิของน้ำมันภายในหม้อแปลงทั้งสามลูกแสดงดังตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.7 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบวัดค่าอุณหภูมิของน้ำมันภายในหม้อแปลงทั้งสามลูก

เงื่อนไข	น้ำมันหม้อแปลง (°C)	เอสเตอร์ธรรมชาติ(°C)	น้ำมันปาล์ม(°C)
เริ่มใช้	52.10	52.52	53.51
ผ่านการใช้งาน 1 เดือน	52.70	53.00	53.47
ผ่านการใช้งาน 2 เดือน	53.10	53.37	53.86
ผ่านการใช้งาน 3 เดือน	53.39	53.78	55.20
ผ่านการใช้งาน 4 เดือน	55.12	55.30	56.80
เฉลี่ย	53.28	53.59	54.57



รูปที่ 4.7 แนวโน้มค่าเฉลี่ยค่าอุณหภูมิของน้ำมันของหม้อแปลงที่ใช้ฉนวนเหลวแตกต่างกัน 3 ชนิด ในระยะเวลา 4 เดือน

จากผลการทดสอบข้างต้นพบว่า ค่าเฉลี่ยค่าอุณหภูมิ เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาผ่านไปสี่เดือนแสดงดังเส้นแนวโน้มที่แสดงในรูปที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การทดสอบคุณสมบัติทางเคมี

การทดสอบในห้องปฏิบัติการมีทั้งหมด 3 การทดสอบ ดังนี้

4.4.1. การทดสอบหาค่าความชื้น(moisture content) ตามมาตรฐาน ASTM D1533-00

4.4.2. การทดสอบหาความเป็นกรด(acidity) ตามมาตรฐาน ASTM D974-02

4.4.3. การทดสอบหาค่าแรงตึงผิว (interfacial tension) ตามมาตรฐาน ASTM D0971-99

4.4.1 การทดสอบหาค่าความชื้น(moisture content) ตามมาตรฐาน ASTM D1533-00

ผลการทดสอบหาค่าความชื้น(moisture content) ตามมาตรฐาน ASTM D1533-00 ของฉนวนเหลวแสดงดังตารางที่ 4.14-4.16 และรูปที่ 4.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบหาค่าความชื้น(moisture content) ตามมาตรฐาน ASTM D1533-00 ของฉนวนเหลวก่อนนำไปใช้ในหม้อแปลง

เงื่อนไข	น้ำมันหม้อแปลง (ppm)	เอสเทอร์ ธรรมชาติ(ppm)	น้ำมันปาล์ม (ppm)
ก่อนนำไปใช้	17.60	178.20	420.40
	17.52	168.40	425.70
	16.34	171.20	430.26
เฉลี่ย	17.15	172.60	425.45

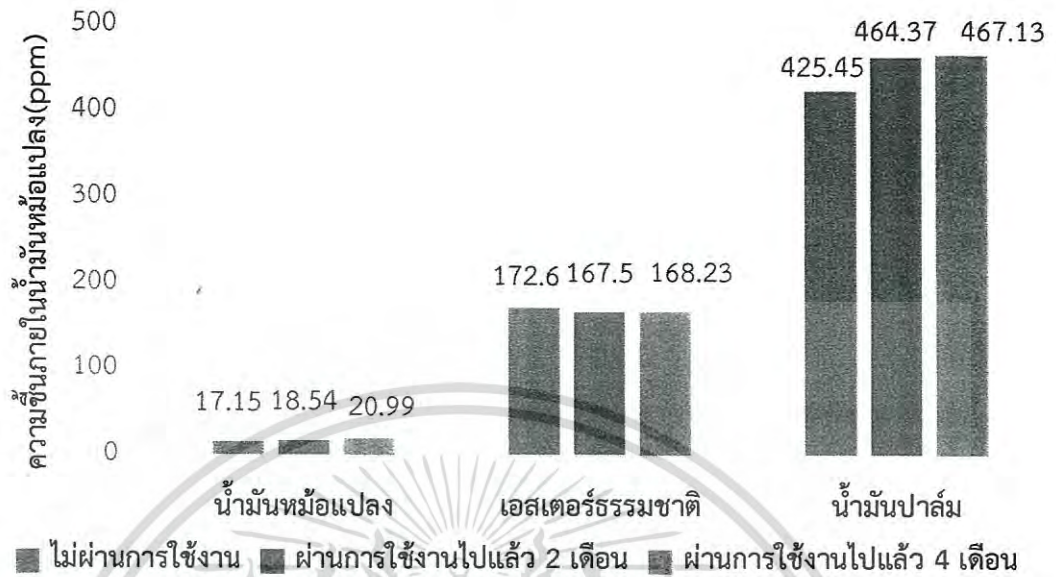
ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบหาค่าความชื้น(moisture content) ตามมาตรฐาน ASTM D1533-00 ของฉนวนเหลวที่ผ่านการใช้งาน 2 เดือน

เงื่อนไข	น้ำมันหม้อแปลง (ppm)	เอสเทอร์ ธรรมชาติ(ppm)	น้ำมันปาล์ม (ppm)
ผ่านการใช้งาน 2 เดือน	18.6	166.60	467.50
	18.35	169.40	459.50
	18.69	166.50	466.10
เฉลี่ย	18.54	167.50	464.37

ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบหาค่าความชื้น(moisture content) ตามมาตรฐาน ASTM D1533-00 ของฉนวนเหลวที่ผ่านการใช้งาน 4 เดือน

เงื่อนไข	น้ำมันหม้อแปลง (ppm)	เอสเทอร์ ธรรมชาติ(ppm)	น้ำมันปาล์ม (ppm)
ผ่านการใช้งาน 4 เดือน	20.40	169.40	472.70
	21.19	168.80	466.90
	21.38	166.50	461.80
เฉลี่ย	20.99	168.23	467.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยค่าความชื้น(moisture content) ของฉนวนเหลวของหม้อแปลงที่ใช้ฉนวนเหลวแตกต่างกัน 3 ชนิดในระยะเวลาการใช้งานที่แตกต่างกัน

จากผลการทดสอบข้างต้นพบว่า ในส่วนของน้ำมันหม้อแปลงค่าความชื้น เพิ่มขึ้น 8.10 เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไป 2 เดือน และเพิ่มขึ้น 22.39 เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไป 4 เดือนในส่วนของเอสเทอร์ธรรมชาติพบว่า ค่าความชื้น ลดลง 2.62 เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไป 2 เดือน และลดลง 2.19 เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไป 4 เดือนและในส่วนของน้ำมันปาล์มพบว่า ค่าความชื้น เพิ่มขึ้น 9.15 เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไป 2 เดือน และเพิ่มขึ้น 9.80 เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไป 4 เดือน

4.4.2 การทดสอบหาความเป็นกรด(acidity) ตามมาตรฐาน ASTM D974-02

ผลการทดสอบหาความเป็นกรด(acidity) ตามมาตรฐาน ASTM D974-02 ของฉนวนเหลวแสดงดังตารางที่ 4.17-4.19 และรูปที่ 4.9 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.17 การทดสอบหาความเป็นกรด(acidity) ตามมาตรฐาน ASTM D974-02 ของฉนวนเหลวก่อนนำไปใช้ในหม้อแปลง

เงื่อนไข	น้ำมันหม้อแปลง (mgKOH/kg)	เอสเทอร์ธรรมชาติ (mgKOH/kg)	น้ำมันปาล์ม (mgKOH/kg)
ก่อนนำไปใช้	0.0059	0.0659	0.6592
	0.0050	0.0532	0.7233
	0.0054	0.0514	0.6854
เฉลี่ย	0.0054	0.0568	0.6893

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.18 การทดสอบหาความเป็นกรด(acidity) ตามมาตรฐาน ASTM D974-02 ของฉนวนเหลวหลังผ่านการใช้งานไปแล้ว 2 เดือน

เงื่อนไข	น้ำมันหม้อแปลง (mgKOH/kg)	เอสเทอร์ธรรมชาติ (mgKOH/kg)	น้ำมันปาล์ม (mgKOH/kg)
ผ่านการใช้งาน 2 เดือน	0.0136	0.0585	1.234
	0.012	0.0584	1.236
	0.0123	0.0557	1.229
เฉลี่ย	0.0126	0.0575	1.233

ตารางที่ 4.19 การทดสอบหาความเป็นกรด(acidity) ตามมาตรฐาน ASTM D974-02 ของฉนวนเหลวหลังผ่านการใช้งานไปแล้ว 4 เดือน

เงื่อนไข	น้ำมันหม้อแปลง (mgKOH/kg)	เอสเทอร์ธรรมชาติ (mgKOH/kg)	น้ำมันปาล์ม (mgKOH/kg)
ผ่านการใช้งาน 4 เดือน	0.0309	0.0720	1.575
	0.0202	0.0584	1.533
	0.0177	0.0772	1.567
เฉลี่ย	0.0229	0.0692	1.558



รูปที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยค่าความเป็นกรด(acidity) ของฉนวนเหลวของหม้อแปลงที่ใช้ฉนวนเหลวแตกต่างกัน 3 ชนิดในระยะเวลาการใช้งานที่ต่างต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบข้างต้นพบว่าในส่วนของน้ำมันหม้อแปลง ค่าความเป็นกรด(acidity) เพิ่มขึ้น 133.33 เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไป 2 เดือนและเพิ่มขึ้น 324.07 เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไป 4 เดือนในส่วนของเอสเทอร์ธรรมชาติพบว่า ค่าความเป็นกรด(acidity) เพิ่มขึ้น 1.23 เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไป 2 เดือน และเพิ่มขึ้น 20.07 เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไป 4 เดือนและในส่วนของน้ำมันปาล์มพบว่า ค่าความเป็นกรด(acidity) เพิ่มขึ้น 78.87 เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไป 2 เดือน และเพิ่มขึ้น 126.03 เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไป 4 เดือน แต่การทดสอบนี้เป็นเพียงการบอกถึงปริมาณกรดที่มีอยู่ในน้ำมันแต่ไม่ได้บอกถึงความรุนแรงของกรดจึงไม่สามารถที่จะสรุปได้ว่าน้ำมันหม้อแปลงมีคุณสมบัติที่ดีกว่าเนื่องจากน้ำมันที่ได้จากธรรมชาติทั้งสองประเภทมีโครงสร้างของกรดที่สร้างออกมาเป็นโซ่ที่ยาวกว่าแสดงถึงค่าความกักกร่อนที่น้อยกว่าเนื่องจากกรดที่มีความยาวของโครงสร้างมากจะทำให้ค่าการกัดกร่อนหรือ (Acid strength) มีค่าน้อยลงไปด้วย

4.4.3 การทดสอบหาค่าแรงตึงผิว (interfacial tension) ตามมาตรฐาน ASTM D0971-99

ผลการทดสอบหาค่าแรงตึงผิว(interfacial tension) ตามมาตรฐาน ASTM D0971-99 แสดงดังตารางที่ 4.20-4.22 และรูปที่ 4.10 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.20 ผลการทดสอบหาค่าแรงตึงผิว(interfacial tension) ตามมาตรฐาน ASTM D0971-99 ของฉนวนเหลวก่อนไปใช้ในหม้อแปลง

เงื่อนไข	น้ำมันหม้อแปลง (mN/m ²)	เอสเทอร์ธรรมชาติ (mN/m ²)	น้ำมันปาล์ม (mN/m ²)
ก่อนนำไปใช้	30	15	12
	30	15	12
	30	15	12
เฉลี่ย	30	15	12

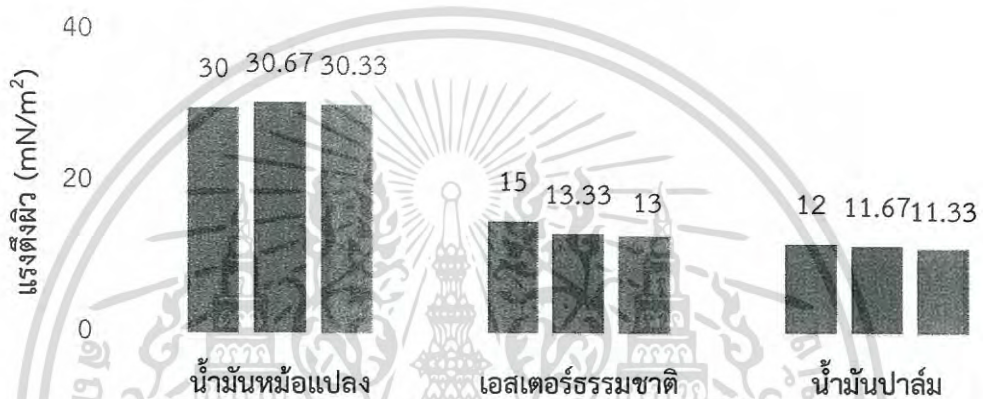
ตารางที่ 4.21 ผลการทดสอบหาค่าแรงตึงผิว(interfacial tension) ตามมาตรฐาน ASTM D0971-99 ของฉนวนเหลวที่ผ่านการใช้งานไปแล้ว 2 เดือน

เงื่อนไข	น้ำมันหม้อแปลง (mN/m ²)	เอสเทอร์ธรรมชาติ (mN/m ²)	น้ำมันปาล์ม (mN/m ²)
ผ่านการใช้งาน 2 เดือน	31	13	12
	27	13	12
	34	14	11
เฉลี่ย	30.67	13.33	11.67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.22 ผลการทดสอบหาค่าแรงตึงผิว(interfacial tension) ตามมาตรฐานASTM D0971-99 ของฉนวนเหลวที่ผ่านการใช้งานไปแล้ว 4 เดือน

เงื่อนไข	น้ำมันหม้อแปลง (mN/m ²)	เอสเทอร์ธรรมชาติ (mN/m ²)	น้ำมันปาล์ม (mN/m ²)
ผ่านการใช้งาน 4 เดือน	31	12	12
	30	13	11
	30	14	11
เฉลี่ย	30.33	13	11.33



รูปที่ 4.10 ค่าเฉลี่ยค่าแรงตึงผิว(interfacial tension) ของฉนวนเหลวของหม้อแปลงที่ใช้ฉนวนเหลวแตกต่างกัน 3 ชนิดในระยะเวลาการใช้งานที่แตกต่างกัน

จากผลการทดสอบข้างต้นพบว่า ในส่วนของน้ำมันหม้อแปลงค่าแรงตึงผิว(interfacial tension) มีค่าใกล้เคียงกับค่าเริ่มต้นถึงแม้เวลาผ่านไป 2 เดือน และ 4 เดือนในส่วนของเอสเทอร์ธรรมชาติพบว่า ค่าแรงตึงผิว(interfacial tension) ลดลง 11.13% เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไป 2 เดือน และลดลง 13.33 เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไป 4 เดือนและในส่วนของน้ำมันปาล์มพบว่า ค่าแรงตึงผิว(interfacial tension) ลดลง 2.75 เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไป 2 เดือน และลดลง 5.58 เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไป 4 เดือน

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

5.1.1 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนเหลว

จากการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าพบว่า เอสเตอร์ธรรมชาติ และน้ำมันปาล์มมีค่าเฉลี่ยของค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ที่สูงกว่าน้ำมันหม้อแปลงมาก แต่ยังมีข้อเสียอยู่ในส่วนของค่าค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียต่อไอเล็กตริกที่ยังมีค่ามากกว่าน้ำมันหม้อแปลงอยู่มากจึงเป็นสาเหตุที่จะต้องพิจารณาตามความเหมาะสมก่อนที่จะเลือกใช้

5.1.2 การทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนของฉนวนเหลว

จากการทดสอบคุณสมบัติทางความร้อน พบว่า เมื่อทำการวัดอุณหภูมิภายในหม้อแปลงทั้งสามลูกที่ประกอบด้วยฉนวนเหลวต่างชนิดกันพบกว่าหม้อแปลงที่ใช้ น้ำมันหม้อแปลงหรือน้ำมันแร่ และเอสเตอร์ธรรมชาติมีคุณสมบัติการระบายความร้อนที่ดีกว่าน้ำมันปาล์มเล็กน้อย เมื่อถูกใช้งานในเงื่อนไขเดียวกันเป็นระยะเวลา 4 เดือนพบว่าความหนืดของเอสเตอร์ และน้ำมันปาล์มมีผลต่อการระบายความร้อนของหม้อแปลงน้อยมาก

5.1.3 การทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของฉนวนเหลว

จากการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีพบว่า หม้อแปลงที่ใช้น้ำมันแร่มีคุณสมบัติทางเคมีที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ หม้อแปลงที่ใช้เอสเตอร์ และน้ำมันปาล์ม ไม่ว่าจะป็นค่าความชื้นในเนื้อฉนวน ค่าความเป็นกรด และค่าแรงดึงผิว ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ยังไม่ส่งผลต่อระบบฉนวนของหม้อแปลงในระยะสั้น แต่เป็นสิ่งที่ควรคำนึงถึงมากขึ้นเมื่อหม้อแปลงมีอายุมากขึ้น

5.1.4 การทดสอบการวัดค่าทางไฟฟ้าของฉนวนเหลว

จากการทดสอบการวัดค่าทางไฟฟ้าพบว่า หม้อแปลงที่ใช้น้ำมันแร่ เอสเตอร์ธรรมชาติ และน้ำมันปาล์ม ภายใต้สภาพแวดล้อมและการทำงานเดียวกันพบกว่าค่ากำลังทางไฟฟ้านั้นไม่มีความแตกต่างกันหรือบอกเป็นนัยว่าฉนวนเหลวไม่มีผลต่อค่าทางไฟฟ้า แต่ปัจจัยที่มีผลต่อค่าทางไฟฟ้านั้นคือการออกแบบแกนเหล็ก และขดลวดของหม้อแปลง

จากผลการทดลองพบว่าฉนวนเหลวทั้งสามชนิดมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันหรือพูดอีกนัยหนึ่งว่ามีจุดเด่นที่ต่างกัน โดยภายใต้เงื่อนไขการทดสอบที่กำหนดในวิทยานิพนธ์เล่มนี้เอสเตอร์ธรรมชาติ และน้ำมันปาล์มมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้เป็นฉนวนเหลวเพื่อทดแทนน้ำมันหม้อแปลงได้ สำหรับกรณีของน้ำมันปาล์มนั้น มีความจำเป็นที่จะต้องเติมสารเคมีบางตัวลงไป เพื่อให้คุณสมบัติทางไฟฟ้า และทางเคมีรวมทั้งความร้อนดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ของฉนวนที่ได้ทำการทดสอบ

คุณสมบัติทางไฟฟ้า	น้ำมันหม้อแปลง	เอสเตอร์ธรรมชาติ	น้ำมันปาล์ม
1.การทดสอบการหาค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60156	แย่ที่สุด	ดีที่สุด	ปานกลาง
2.การทดสอบหาค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกและค่าเปอร์มิตติวิตี ตามมาตรฐาน ASTM D924-99	ดีที่สุด	ปานกลาง	แย่ที่สุด
3.การทดสอบการหาค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนที่อิมเพริกเนตด้วยเหลวตามมาตรฐาน IEC 60243-1	แย่ที่สุด	ดีที่สุด	ปานกลาง
4.การทดสอบวัดค่าอุณหภูมิของน้ำมันภายในหม้อแปลงทั้งสามลูก	ใกล้เคียงกัน		
5.การทดสอบหาค่าความชื้น(moisture content) ตามมาตรฐาน ASTM D1533-00	ดีที่สุด	ปานกลาง	แย่ที่สุด
6.การทดสอบหาความเป็นกรด(acidity) ตามมาตรฐาน ASTM D974-02	ดีที่สุด	ปานกลาง	แย่ที่สุด
7.การทดสอบหาค่าแรงตึงผิว(interfacial tension) ตามมาตรฐาน ASTM D0971-99	ดีที่สุด	ปานกลาง	แย่ที่สุด
8.การทดสอบการวัดค่าทางไฟฟ้า	ใกล้เคียงกัน		

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยชิ้นนี้ทำการศึกษาคูณสมบัติของฉนวนเหลวทั้ง 3 ประเภท เมื่อนำมาใช้เป็นฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กโดยทำการออกแบบสร้างและติดตั้งหม้อแปลงเป็นระยะเวลา 4 เดือน เพื่อที่จะศึกษาคูณสมบัติทั้งทางไฟฟ้า ความร้อน และทางเคมีของฉนวนเหลวทั้งก่อนติดตั้ง และขณะใช้งานจริง ผลการวิจัยสามารถนำไปเป็นข้อมูลอ้างอิงพื้นฐานสำหรับการประกอบสร้างหม้อแปลงที่ใช้เอสเตอร์ และน้ำมันปาล์มเป็นฉนวนต่อไป เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับหม้อแปลงขนาดอื่นๆ อาจจะต้องมีเงื่อนไขที่มากขึ้น โดยจะสามารถนำงานวิจัยนี้ไปอ้างอิงได้ แต่ควรศึกษาเงื่อนไขที่เพิ่มเติมตามขนาดของพิกัดของหม้อแปลงอีกด้วย

สำหรับงานวิจัยต่อไปในอนาคต ควรที่จะพัฒนาโดยการสร้างหม้อแปลงที่ใช้ในการจำลองให้มีระดับพิกัดแรงดัน และพิกัดกำลังที่สูงขึ้นเพื่อให้สอดคล้องกับที่มีใช้งานจริงในระบบไฟฟ้าในประเทศไทย เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อภาคอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] E. Gockenbach and H. Borsi, "Performance and New Application of Ester Liquids", 2002 IEEE 14th International Conference on Dielectric Liquids, 2002.
- [2] M. Duval, "The Duval Triangle for Load Tap Chargers, Non-Mineral Oils and Low Temperature Faults in Transformers", IEEE Electrical Insulation Magazine November/December 2008---Vol. 24 No. 6, pp. 22-29.
- [3] CIGRE Working Group A2.35, "Experiences in Service with New Insulating Liquids", CIGRE 436, October 2010.
- [4] E.Pagger, "Alternative Insulating Fluids in Comparison to Traditional Mineral Oil", May 2013, Dissertation, Graz University of Technology.
- [5] F. Pratomosiwi, "Dielectric Properties of Transformer Boards and Papers Impregnated with Alternative Insulating Fluids", April 2014, Dissertation, Graz University of Technology April 2014.
- [6] Belén García, Tamara García, Victor Primo, and Juan Carlos Burgos, "Dielectric Properties of Transformer Boards and Papers Impregnated with Alternative Insulating Fluids", IEEE Electrical Insulation Magazine Year: 2017, Volume: 33.
- [7] จักรกฤษณ์ อธิธิยาภรณ์ และคณะ, การออกแบบสร้างหม้อแปลงทดสอบพิกัด 100 kV 10 kVA, ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548.
- [8] MIDEL, [ออนไลน์]. Available: <http://www.midel.com/products/midel>. [ที่เข้าถึง 15 June 2014].
- [9] IEEE C57.147 - 2008, Guide for Acceptance and Maintenance of Natural Ester Fluids in Transformers.
- [10] ปุณยวีร์ ฉายศิริ, การศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันพืชเพื่อนำไปใช้เป็นฉนวนเหลวในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555.
- [11] รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช, "วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า(เล่ม 1) ฉนวนและวัสดุฉนวนไฟฟ้า Electrical Engineering Materials", พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพมหานคร: ห้างหุ้นส่วนจำกัด มินเซอร์วิส ซัพพลาย, 2557.
- [12] IEC 60076-1, Edition 2.1 - 2004, Transformers - Part 1: General.
- [13] มอก. 384-2543, หลักเกณฑ์เฉพาะในการรับรองผลิตภัณฑ์ หม้อแปลงไฟฟ้า.
- [14] IEC 60475, Edition 2 - 2011, Method of sampling insulating liquids.


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



1. กิตติพศ จรรย์านูรัตน์ และ นรเศรษฐ พัฒนเดช, “การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำน้ำมันปาล์มมาใช้เป็นฉนวนเคลวแทนน้ำมันหม้อแปลง,” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ ๘, วันที่ ๒๕ - ๒๗ พฤษภาคม ๒๕๕๙, โรงแรมดวงจิตต์ รีสอร์ท แอนด์ สปา, จังหวัดภูเก็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



EENET2016

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า

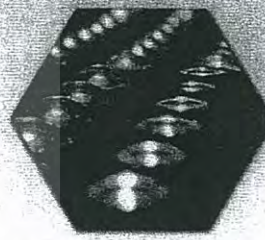
25-27 มิถุนายน 2559 ณ โรงแรมรอยัล เซ็นทรัล อีแอนด์ บี 2

Pattaya Beach, Pattaya



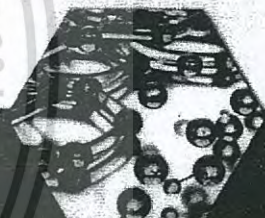
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

The 8th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology



Conference Topics

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- ระบบควบคุมและการวัด (CT)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน (ES)
- นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ (IN)
- งานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)



การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำน้ำมันปาล์มมาใช้เป็นฉนวนเหลวแทนน้ำมันหม้อแปลง

Study on The Feasibility of Palm Oil Using for Liquid Insulation Instead of Transformer Oil

PW05

กิตติพิศ จริญญารัตน์¹ และ นรเศรษฐ พัฒนเดช²¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 3 หมู่ 2 ถนนลาดกองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-723-4900 E-mail: cantonass7@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับความเป็นไปได้ในการนำน้ำมันปาล์มมาใช้เป็นฉนวนเหลวในหม้อแปลงไฟฟ้าโดยได้ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันปาล์มเปรียบเทียบกับน้ำมันหม้อแปลงซึ่งเดิมใช้เป็นฉนวนเหลวในหม้อแปลง โดยได้ทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าสองหัวข้อ ได้แก่ การทดสอบการหาความจุไฟฟ้า และแฟกเตอร์สูญเสียไดอิเล็กตริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60247 และ การทดสอบความทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนทั้งสองชนิดโดยทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60156 ซึ่งการทดสอบฉนวนทางไฟฟ้าทั้งสองหัวข้อนี้สามารถบอกถึงคุณสมบัติความเป็นฉนวนทางไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี จากผลการทดสอบพบว่าน้ำมันปาล์มมีคุณสมบัติความเป็นฉนวนทางไฟฟ้าที่ดี จึงมีความเป็นไปได้ นำไปใช้เป็นฉนวนเหลวในหม้อแปลงไฟฟ้าได้เช่นเดียวกัน

คำสำคัญ: ฉนวนเหลว น้ำมันปาล์ม น้ำมันหม้อแปลง

Abstract

This paper represents the feasibility study of palm oil to be utilized as liquid insulation in transformers. Two types of electrical testing such as capacitance and dielectric dissipation factor testing when temperature was changed and breakdown voltage testing were performed in high voltage laboratory. The experiment was done according to IEC 60247 and IEC 60156 respectively. These experiments would explain the integrity of palm oil as liquid insulation. From the test result, it was found that palm oil has a good dielectric properties. Therefore, it is a good candidate to be used in transformer.

Keywords: Liquid insulation, Palm oil, Mineral oil

1. บทนำ

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีความสำคัญใช้สำหรับการเปลี่ยนระดับแรงดัน ไม่ว่าจะเป็นการเพิ่ม หรือลดแรงดัน[1] ภายในหม้อแปลงจะประกอบด้วยฉนวน 2 ประเภท ทั้งฉนวนเหลว และฉนวนแข็ง ฉนวนเหลวโดยทั่วไปแล้วจะใช้น้ำมันหม้อแปลงซึ่งได้จากกระบวนการกลั่นปิโตรเลียมมาใช้เป็นฉนวนเหลวในหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงเนื่องจากมีราคามีคุณสมบัติการเป็นฉนวนที่ดี และมีภาวะระบายความร้อนที่ดีด้วย แต่ด้วยข้อจำกัดของแหล่งน้ำมันที่ได้จากกระบวนการปิโตรเลียมที่มีความต้องการสูงขึ้นแต่แหล่งพลังงานมีน้อยลง จึงทำให้มีการหาแหล่งน้ำมันจากธรรมชาติแหล่งอื่นที่จะสามารถนำมาใช้ทดแทนน้ำมันหม้อแปลงได้ ก่อนที่น้ำมันหม้อแปลงจะหมดลง [2] ในปัจจุบันน้ำมันที่ใช้ในหม้อแปลงส่วนใหญ่แล้วเป็นน้ำมันที่ย่อยสลายได้ยาก ซึ่งเป็นอันตรายต่อผู้คน และสิ่งแวดล้อมหากมีการรั่วไหลหรือเกิดการระเบิดของหม้อแปลง ด้วยสาเหตุนี้จึงได้มีการคิดค้นน้ำมันที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติเพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต สิ่งแวดล้อม และยังช่วยในการรีไซเคิลของฉนวนซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงอายุของหม้อแปลงอีกด้วย[3] น้ำมันที่ย่อยสลายได้ส่วนใหญ่ นั้นสังเคราะห์มาจากธรรมชาติเช่น เมล็ดพืช เป็นต้น

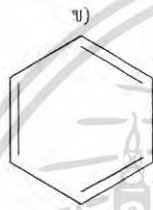
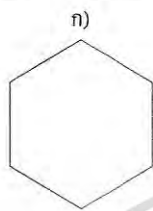
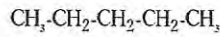
เนื่องด้วยประเทศไทยเป็นประเทศที่มีผลผลิตจากปาล์มน้ำมันเป็นจำนวนมาก เพื่อเป็นการสนับสนุนงานภาคอุตสาหกรรม และเพิ่มทางเลือกในการจัดจำหน่ายของเกษตรกรไทย งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำน้ำมันปาล์มมาใช้เป็นฉนวนเหลวภายในหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อทดแทนน้ำมันหม้อแปลงที่มีอยู่ซึ่งย่อยสลายยาก และมีอยู่อย่างจำกัด

2. ฉนวนเหลว และการทดสอบทางไฟฟ้า

2.1 น้ำมันหม้อแปลง

น้ำมันหม้อแปลงหรือน้ำมันแร่เป็นน้ำมันที่ได้มีการใช้เป็นส่วนประกอบในหม้อแปลงไฟฟ้ามาเป็นระยะเวลานาน ซึ่งมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นคาร์บอน และไฮโดรเจน โครงสร้างพื้นฐานหลักประกอบด้วยสาร 3 ประเภท ได้แก่ พาราฟิน แนฟทีน และอะโรมาติก[3] (รูป 1ก) 1ข) และ 1ค) ตามลำดับน้ำมันชนิดนี้มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี

แต่ย่อยสลายตามธรรมชาติได้ยากจึงทำให้มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม



ค)

รูปที่ 1 โครงสร้างทางเคมีของน้ำมันหม้อแปลง

2.2 น้ำมันปาล์ม

น้ำมันปาล์มคือน้ำมันที่ได้จากการสกัดจากต้นปาล์มน้ำมันซึ่งเป็นพืชที่ให้ปริมาณน้ำมันสูง และมีมากในประเทศไทยโดยน้ำมันปาล์มแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ น้ำมันที่มาจากเนื้อปาล์ม และน้ำมันจากเมล็ดปาล์ม ซึ่งน้ำมันชนิดนี้เป็นน้ำมันที่มีจุดติดไฟที่สูงมากประมาณ 300 องศาเซลเซียส น้ำมันชนิดนี้สามารถย่อยสลายตามธรรมชาติได้ หรือหากเสื่อมสภาพสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อได้

2.3 การทดสอบหาค่าความจุไฟฟ้า และค่าแฟกเตอร์สูญเสียไดอิเล็กตริก(tanδ)

การใช้งานฉนวนในระบบไฟฟ้ากำลังนั้น ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกเป็นดัชนีชี้วัดตัวหนึ่งของอายุการใช้งาน ฉนวน เนื่องจากเป็นค่าที่บ่งบอกถึงกำลังสูญเสียในรูปแบบความร้อนในเนื้อฉนวนขณะรับแรงดันไฟฟ้าซึ่งมีผลทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นจึงอาจทำให้เกิดจุดที่มีความร้อนสูงสุดในเนื้อฉนวนทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพได้อย่างรวดเร็ว ตามมาตรฐาน IEC 60247 ระบุไว้ว่าที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จะต้องมีค่าไม่เกิน 0.05

2.4 การทดสอบความทนต่อแรงดันเบรกดาวน์

เป็นการทดสอบการทนต่อความเครียดสูงสุดที่ฉนวนนั้นสามารถทนอยู่ได้โดยไม่เกิดความเสียหาย เกิดการเบรกดาวน์ หรือทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพได้ ความทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ลักษณะของสนามไฟฟ้า คุณสมบัติของไดอิเล็กตริก คุณสมบัติของแรงดันที่ฉนวนนั้นได้รับ เป็นต้น[4] โดยมาตรฐาน IEC 60156 ระบุไว้ว่าจะต้องมีค่าแรงดันเบรกดาวน์สูงกว่า 30 กิโลโวลต์

3. ขั้นตอนการทดลอง

ก่อนการทำการทดลองทั้งสองประเภทนั้น จะต้องทำการเตรียมน้ำมัน โดยการให้ความร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 200 มิลลิบาร์ เป็นเวลา 12 ชั่วโมงดังรูปที่ 2

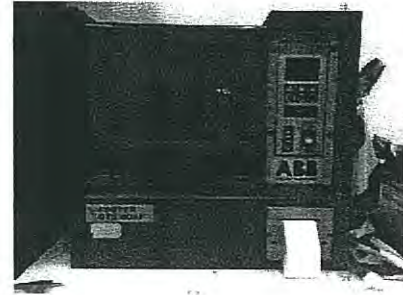
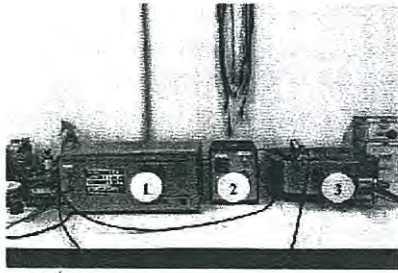


รูปที่ 2 ขั้นตอนการเตรียมน้ำมันก่อนทำการทดสอบ

3.1 การทดสอบหาค่าความจุไฟฟ้า และค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนเหลว

ขั้นตอนการทดสอบการหาค่าความจุไฟฟ้า และค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนเหลว มีดังนี้

- 1) เตรียมวงจรทดสอบตามรูปที่ 3 และรูปที่ 4
- 2) ตั้งค่าอุปกรณ์ที่จะใช้ในการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60247
- 3) ทำการเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 5 องศาเซลเซียส ตั้งแต่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส จนถึง 90 องศาเซลเซียส
- 4) บันทึกค่าความจุไฟฟ้า และค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ตั้งแต่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส จนถึง 90 องศาเซลเซียส
- 5) ทำตามขั้นตอนที่ 1 ถึง 4 กับการทดสอบฉนวนเหลวทั้งสองชนิด



รูปที่ 3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการหาค่าความจุทางไฟฟ้า และค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก

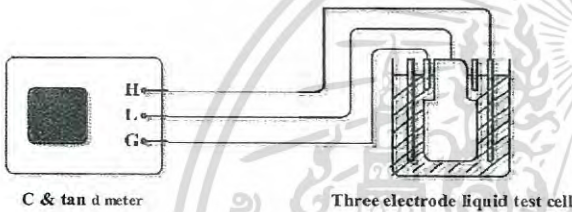
รูปที่ 6 เครื่องมือวัดความทนต่อแรงดันเบรกควาน์ของฉนวนเหลว

เมื่อ 1: เครื่องมือวัดค่าความจุทางไฟฟ้า 2: เครื่องควบคุมอุณหภูมิ
3: แท่นนำความร้อน

4. ผลการทดลอง

ผลการทดสอบการหาค่าความจุไฟฟ้า และค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนเหลวแสดงในตารางที่ 1 และรูปที่ 7-9 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ค่าความจุทางไฟฟ้า และค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ



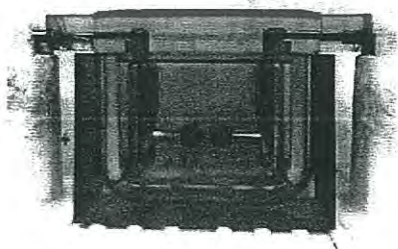
รูปที่ 4 วงจรเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการหาค่าความจุทางไฟฟ้า และค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก

3.2 การทดสอบการหาค่าความทนต่อแรงดันเบรกควาน์

ขั้นตอนการทดสอบการหาค่าความทนต่อแรงดันเบรกควาน์ของฉนวนเหลว มีดังนี้

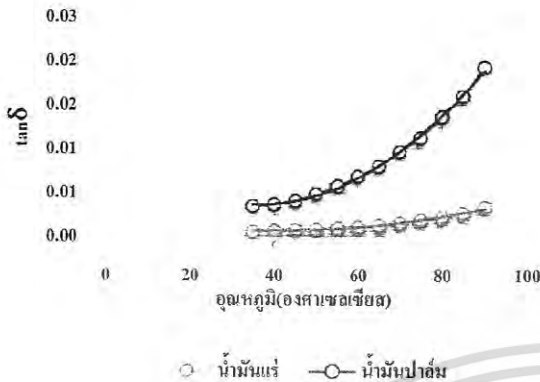
- 1) เตรียมฉนวนเหลวในภาชนะตามรูปที่ 5
- 2) ตั้งค่าอุปกรณ์ที่จะใช้ในการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60156
- 3) ทำการเพิ่มแรงดันเพื่อทำการทดสอบจากเครื่องมือวัดดังรูปที่ 6
- 4) บันทึกแรงดันเบรกควาน์ของฉนวนเหลวทั้งหมด 6 ครั้ง
- 5) ทำตามขั้นตอนที่ 1 ถึง 4 กับการทดสอบฉนวนเหลวทั้งสองชนิด

ชนิด (°C)	น้ำมันหม้อแปลง			น้ำมันปาล์ม		
	C (pF)	tanδ	ε _r	C (pF)	tanδ	ε _r
35	187.4	0.0005	2.127	285	0.0034	3.23
40	187.2	0.0006	2.125	284	0.0036	3.22
45	186.8	0.0007	2.120	283	0.0040	3.21
50	186.5	0.0008	2.117	280	0.0048	3.20
55	186.1	0.0009	2.112	279	0.0057	3.18
60	185.7	0.0010	2.108	277	0.0068	3.17
65	185.1	0.0012	2.101	276	0.0080	3.14
70	184.8	0.0015	2.098	274	0.0096	3.13
75	184.4	0.0018	2.093	273	0.0112	3.11
80	184.0	0.0021	2.089	272	0.0136	3.10
85	183.5	0.0026	2.083	270	0.0160	3.09
90	183.1	0.0033	2.078	268	0.0193	3.06

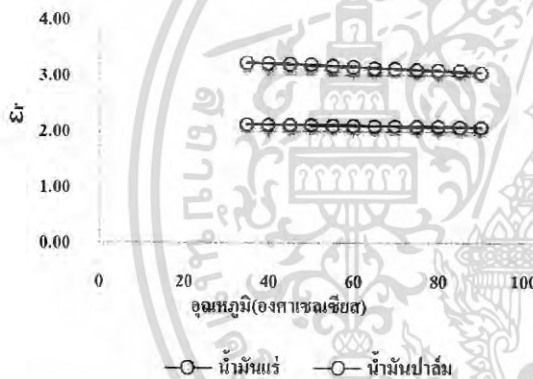


รูปที่ 5 เตรียมฉนวนเหลวก่อนทำการทดสอบความทนต่อแรงดันเบรกควาน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า 25-27 พฤษภาคม พ.ศ. 2559 โรงแรมวงจรกิจต์ รีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดภูเก็ต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียโคอีเล็กทริกของน้ำมันหม้อแปลงเปรียบเทียบกับน้ำมันปาล์มเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์มิตทิวิตี้กับอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลงเปรียบเทียบกับน้ำมันปาล์ม

ผลการทดสอบหาความทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงเปรียบเทียบกับน้ำมันปาล์มแสดงข้อมูลดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวอย่างค่าความทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลว ตัวอย่างที่ 1(น้ำมันหม้อแปลง) และฉนวนเหลวตัวอย่างที่ 2(น้ำมันปาล์ม)

ชนิด	แรงดันเบรกดาวน์(kV)						Average
	1	2	3	4	5	6	
น้ำมันหม้อแปลง	47	39	31	34	57	34	40
น้ำมันปาล์ม	54	50	40	48	41	45	47

5. สรุป

จากผลการทดลองการหาค่าความจุไฟฟ้าและค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียโคอีเล็กทริกพบว่าค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนทั้ง 2 ชนิดก่อนข้างคงที่ในขณะที่ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียโคอีเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่ออุณหภูมิของฉนวนเหลวเพิ่มขึ้น โดยที่ค่าแฟกเตอร์สูญเสียโคอีเล็กทริกของน้ำมันปาล์มสูงกว่าน้ำมันหม้อแปลงประมาณ 6-7 เท่า

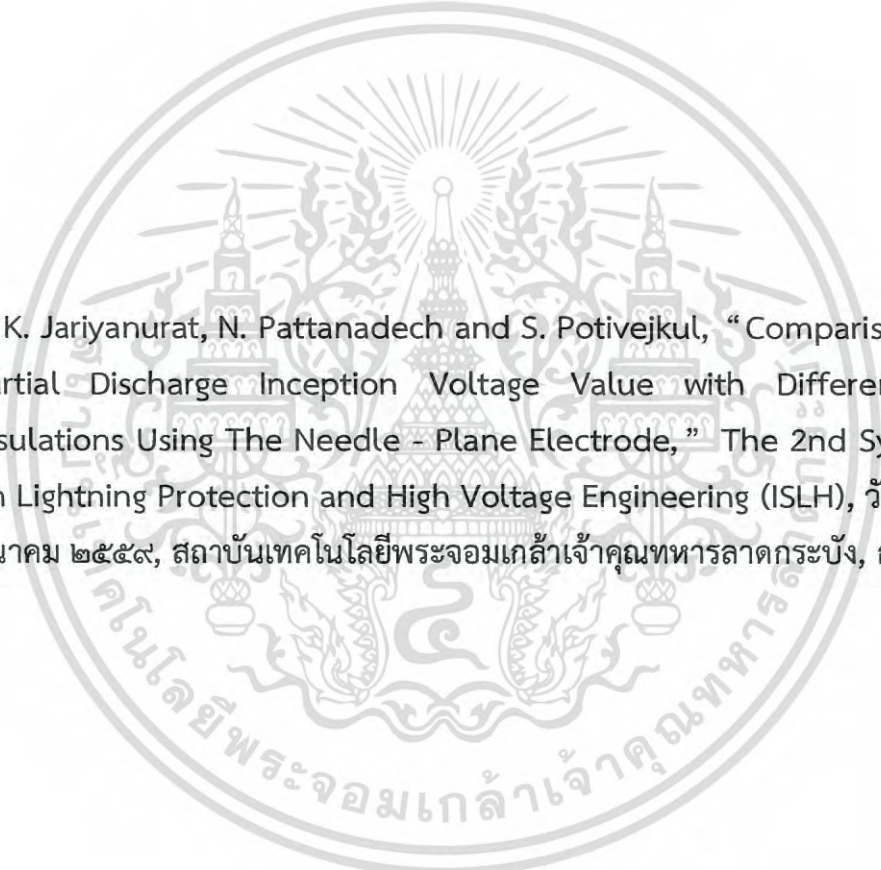
และเมื่อพิจารณาความทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวทั้งสองพบว่าน้ำมันปาล์มมีค่าความทนต่อแรงดันเบรกดาวน์สูงกว่าน้ำมันหม้อแปลงประมาณ 18 % โดยฉนวนเหลวทั้งสองที่ได้ทำการทดสอบผ่านมาตรฐาน IEC 60156 ผลการทดลองจึงสนับสนุนความเป็นไปได้ในการนำน้ำมันปาล์มมาใช้ทดแทนน้ำมันหม้อแปลงได้

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนภายใต้โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม-พวอ. ระดับปริญญาโท ประจำปี 2558 ในหัวข้อเรื่อง “การศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าและทางความร้อนของหม้อแปลงที่ใช้โอสเตอร์ธรรมชาติเป็นฉนวนเปรียบเทียบกับหม้อแปลงที่ใช้ น้ำมันหม้อแปลงและใช้น้ำมันปาล์มเป็นฉนวน” รหัส MSD 5810132 และบริษัท ละมุลวิศวกรรม จำกัด

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kiasatina Azmi, Mohamad Kamarol Mohd Jamil and Mohd Azmier Ahmad, “Breakdown Voltage Characteristics of RBD Palm Olein and Envirotemp PR3 Mixture Under Quasi-Uniform Electric Field,” Science and Engineering (CHUSER), 2011, pp. 421-424.
- [2] N. S. Murad; Nor Asiah Muhammad; A. A. Suleiman; N. A. M. Jamail, “A Study on Palm Oil-Based Oil Moisture Absorption Level and Voltage Breakdown,” Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2013, pp. 925-928.
- [3] N. Pattanadach, F. Pratomoisiwi, B. Wieser, M. Baur, and M. Muhr, “The Study of Partial Discharge Inception Voltage of Mineral Oil Using Needle - Plane Electrode Configuration,” 2012 International Conference on High Voltage Engineering and Application, Shanghai, China, September 17-20, 2012, pp. 174-177.
- [4] N. Pattanadach, “Insulation,” in Electrical Engineering Materials ,3rd ed., vol 1, Bangkok, Thailand: Mean Service Supply , 2014, pp.48-105.



2. K. Jariyanurat, N. Pattanadech and S. Potivejkul, “Comparison of The Partial Discharge Inception Voltage Value with Different Liquid Insulations Using The Needle - Plane Electrode,” The 2nd Symposium on Lightning Protection and High Voltage Engineering (ISLH), วันที่ ๙ - ๑๐ มีนาคม ๒๕๕๙, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISLH 2016

The 2nd International Symposium on Lightning Protection and High Voltage Engineering



March 9-10, 2016
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand

ISLH KMITL

**PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON
LIGHTNING PROTECTION AND HIGH VOLTAGE ENGINEERING 2016**



Lucy Electric

APE

PTS

PTS
Combination

LAMOOL

Kumwell

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
การอื่นใด ๆ

Comparison of The Partial Discharge Inception Voltage Value with Different Liquid Insulations Using The Needle - Plane Electrode

K. Jariyanurat, N. Pattanadech and S. Potivejkul

Faculty of Engineering, King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang
1 Soi Chalangkung 1 Ladkrabang Bangkok 10520 Thailand
e-mail cantonasss7@gmail.com

Abstract

This paper represents the experimental exploration of partial discharge inception voltage (PDIV) of mineral oil, natural ester and palm oil. The PDIV test was experimented by using tungsten needle electrodes with tip radius of 10 μm , 20 μm and 40 μm correspondingly as the high voltage electrode and the grounded electrode was used the brass plane electrode with 75 mm diameter. The gap distance was fixed as 40 mm. The test experiment was set up in accordance with IEC 60270. The test procedure were tested by increasing voltage until the first PD pulse was detected at this voltage level, the test voltage was recorded as the PDIV.

It was founded that PDIV value depended on types of liquid insulation and the needle tip. The PDIV value of natural ester was higher than mineral oil and palm oil about 7-13%, 14-20%, respectively. Charge amplitudes at PDIV level relied on tip radius as well. It can be concluded that types of liquid insulation and the tip radius influence on the PDIV of the insulation.

Keywords: partial discharge inception voltage, mineral oil, natural ester, palm oil

1. Introduction

Mineral oil is one of the most important dielectric liquids used for high voltage equipment. Mineral oil has been used since the first commercial liquid-insulated transformer was produced [1]. Transformer oil has evolved over the years to support the numerous changes in the transformer industry. The increase of energy output requirement of the transformer needs better transformer oil quality [1]. However, strict environmental protection, health and safety regulations are encouraging engineers and researchers to use low-toxicity and bio-degradable insulating liquid. Also, there is the high demand for compact high voltage systems which means that insulation materials in such devices will need to withstand increasing levels of electrical field. Natural ester and organic oils are therefore considered as potential alternatives to the minerals oil. The dielectric properties of these liquids should be studied and compared with the properties of traditional liquid insulators [2].

2. Partial Discharge

One of the crucial dielectric properties of insulation is partial discharge (PD). PD is a localized electrical discharge that only partially bridges the insulation between conductors and which may not occur next to the conductor. Generally, PD is a consequence of local stress concentrations in the insulation or on the insulation surface. PD pulses, in general, occur quite irregularly which have a duration of less than 1 μs [3]. PD can be classified as an external discharge and an internal discharge. The external discharge is referred to PD which occurs in ambient air while the internal discharge is due to the imperfections in insulating liquids, in compressed gas and in solid dielectrics. In liquid insulations, PD may take place in gas-bubbles due to thermal and electrical phenomena and in water – vapour which may be created in high field regions [4]. PD initiates the deterioration of the liquid insulation and may develop to the failure of high voltage apparatus. Up to now, the simple PD model comprising a capacitive network is accepted even though this model is not realistic in describing a physical point of view of PD [5, 6-7]. This equivalent circuit is also not covered the space charge phenomena [7]. Other PD models such as the dipole model have been proposed by A. Pedersen et al [8]. More details for such dipole model was analyzed by E. Lemke [9]. In addition, IEC 60270 introduces the test set up and test procedure for PD measurement of high voltage equipment. Partial Discharge Inception Voltage (PDIV) is an alternatively important indicator that some researchers use for representing the integrity of the liquid insulation. The PDIV measurement can be performed according to IEC 61294 [10] and this technique is widely used to diagnosis insulation system. The aim of this research is to compare PDIV value of different types of liquid insulation with different tip radius sizes of needle-plane electrode system.

3. Testing Experiment

In the experiment. Each liquid type was tested with three different tip radius sizes. The first testing was tested with mineral oil, then was tested with natural ester, and finally tested with palm oil

3.1 Electrode Configuration

The PDIV investigation was performed on the test vessel with the needle – plane electrode preparation as shown in Fig. 1. The tungsten needle electrodes with the tip radius of 10 μm , 20 μm and 40 μm consecutively as shown in Fig. 2 were used to be the high voltage electrode and the brass plane electrode with 75 mm diameter was used as the grounded electrode. The gap distance of the electrode system was set up at 40 mm. Partial discharge, corona in oil, was produced because the high electric field stress around the tip of the needle

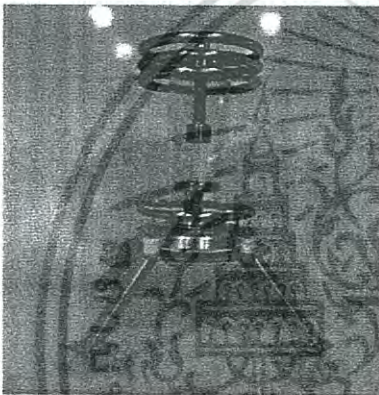


Fig. 1. Test vessel

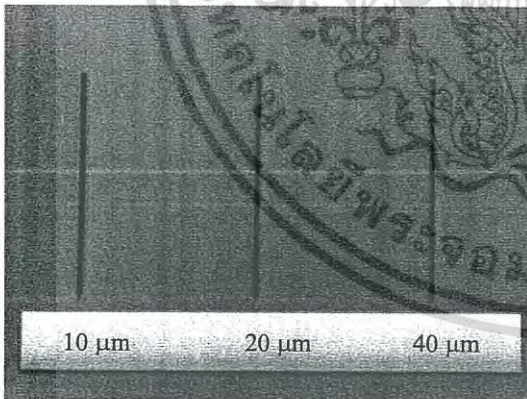


Fig. 2. Tungsten needle electrodes

3.2 Testing Material

These kinds of liquid insulations as follows:
 1) Mineral oil,
 2) Natural ester,
 3) Palm oil
 was investigated.

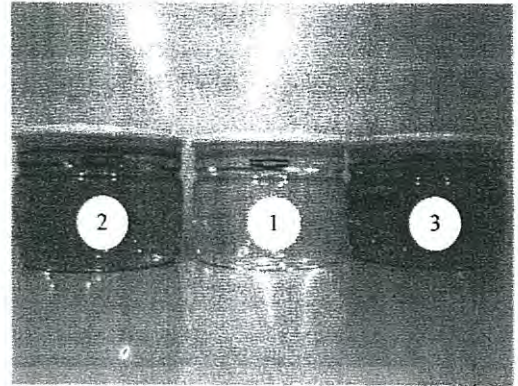


Fig. 3. Three types of liquid insulations: mineral oil, natural ester, and palm oil

3.3 Test Set-up

The schematic diagram of PD measurement system for PDIV investigation was set up according to IEC 60270 as shown in Fig. 4 and the testing circuit was illustrated in Fig. 5.

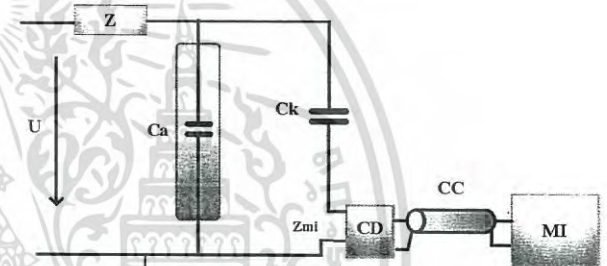


Fig. 4. Basic PD test diagram

Where: U : high-voltage supply, Z : filter, Ca : test object, Ck : coupling capacitor, Zmi : input impedance of measuring system, CC : connecting cable, CD : coupling device, and MI : measuring instrument

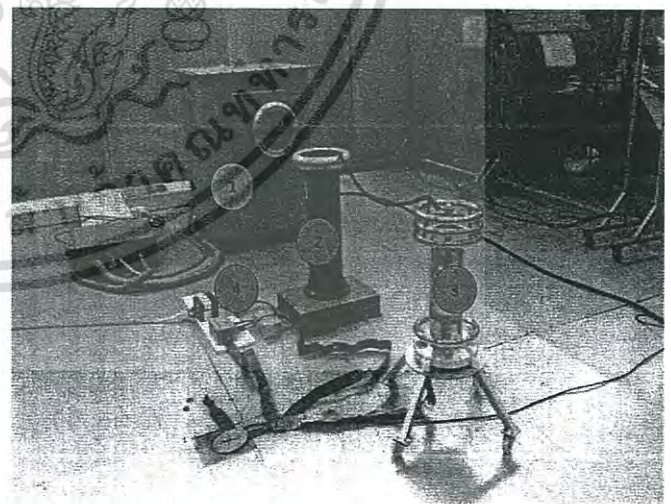


Fig. 5. PD test circuit arrangement

Where: 1 : testing transformer 75kV 40 kVA, 2 : coupling capacitor, 3 : test object, and 4 : Omicron PD measuring devices

3.4 Test Procedure

3.4.1 PDIV testing

- 1) Preparing the test circuit as shown in Fig. 5
- 2) Calibrating the PD test circuit
- 3) AC test Voltage was applied to the electrode system with a rate of rise 1 kV/s from zero until the first voltage that PD 100 pC was found.
- 4) The mean value PDIV of each electrode arrangement was computed using Weibull distribution calculation. After that, PD activities were investigated at the PDIV level and recorded for 1 minute.
- 5) The PDIV was carried out seven times for each needle and three needles of each identical needle length were tested.
- 6) Following step 1-5 for testing with three types of liquid insulations

3.4.2 Analyzing the value with Weibull fitting

The values from the results of this test were the information which was non-normal distribution, thus using the Weibull distribution was applied for calculating and analyzing the information of this results. Weibull distribution is widely used in reliability engineering and elsewhere due to its versatility and relative simplicity. Weibull fitting with 2-parameter was used to analyze PDIV values and PDIV amplitudes of mineral oil, natural ester, and palm oil. All the results are calculated as:

$$F(x) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta\right\} \quad (1)$$

Where $F(x)$ is the cumulative probability of breakdown voltage; x is AC breakdown voltage; β is the shape parameter; η is the scale parameter. In the Weibull plot the correlation coefficient ρ is a measure of how well the linear regression model fits the data [11]. However this paper used only the values from 63.2% of Weibull fitting curves to be average values of the results.

4 Test results

4.1 PD activity

The PD activities at PDIV level of mineral oil, natural ester, and palm oil under electrode systems are showed in table 1- table 3 respectively.

TABLE I
THE VALUE OF PDIV ACTIVITY IN MINERAL OIL

Testing Number	Tip radius 10 μ m		Tip radius 20 μ m		Tip radius 40 μ m	
	Q _{PDIV} (pC)	Q _{max} (pC)	Q _{PDIV} (pC)	Q _{max} (pC)	Q _{PDIV} (pC)	Q _{max} (pC)
1	117	424	191	617	328	897
2	114	360	220	631	285	918
3	174	488	187	588	272	840
4	150	523	192	661	270	915
5	166	424	220	664	278	790
6	123	444	215	651	368	962
7	162	499	231	744	343	876
Average	153.7	474.4	215.5	673.2	323.1	909.2

TABLE II
THE VALUE OF PDIV ACTIVITY IN NATURAL ESTER

Testing Number	Tip radius 10 μ m		Tip radius 20 μ m		Tip radius 40 μ m	
	Q _{PDIV} (pC)	Q _{max} (pC)	Q _{PDIV} (pC)	Q _{max} (pC)	Q _{PDIV} (pC)	Q _{max} (pC)
1	123	455	215	661	455	1400
2	205	477	205	549	352	1200
3	125	455	247	546	588	1400
4	117	499	231	941	285	1000
5	183	549	272	798	480	1100
6	225	588	328	646	455	1400
7	215	693	265	856	352	1200
Average	170.42	530.85	251.85	713.85	423.85	1242

TABLE III
THE VALUE OF PDIV ACTIVITY IN PALM OIL

Testing Number	Tip radius 10 μ m		Tip radius 20 μ m		Tip radius 40 μ m	
	Q _{PDIV} (pC)	Q _{max} (pC)	Q _{PDIV} (pC)	Q _{max} (pC)	Q _{PDIV} (pC)	Q _{max} (pC)
1	67	84	170	328	225	836
2	104	159	167	444	242	523
3	70	151	187	414	265	646
4	84	132	166	477	231	588
5	99	187	148	395	242	661
6	97	196	138	466	253	631
7	72	104	186	331	265	617
Average	90.82	159.2	173.4	431.9	253	683.9

4.2 PDIV value

The PDIV value of mineral oil, natural ester, and palm oil under electrode systems are depicted in table 4 and fig. 6 respectively. Where;

T1 obtained from tip radius 10 μm – plane electrode,

T2 obtained from tip radius 20 μm – plane electrode,

T3 obtained from tip radius 40 μm – plane electrode.

TABLE IV
AVERAGE OF PDIV VALUES IN THREE LIQUID INSULATIONS
Average of PDIV values

Liquid Insulation	Average of PDIV values		
	Tip radius 10 μm	Tip radius 20 μm	Tip radius 40 μm
Mineral Oil	21.50	24.13	26.66
Natural Ester	23.21	26.34	30.55
Palm Oil	19.33	21.30	26.18

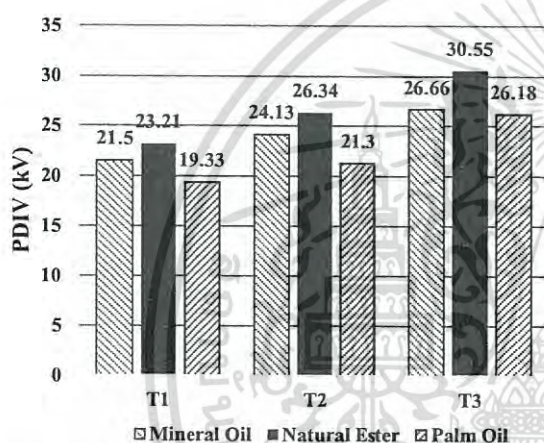


Fig. 6. Mean PDIV values of mineral oil, natural ester, and palm oil with different tip radius sizes.

5. Conclusion

According the test results, the PDIV value depended directly on types of liquid insulation and the needle tip radius. PDIV obtained from testing with natural ester gave the highest PDIV by which it was higher than from testing with mineral oil about 7-13% and was higher than from testing with palm oil about 14-20%. However, To compare the effect of the needle tip radius, the same liquid insulation was tested with different sizes of the needle tip radius. It was revealed that the PDIV value obtained from the higher tip radius was higher than lower tip radius about 10-24% tested by the ramp AC voltage.

ACKNOWLEDGMENT

Authors would like to express our sincere to Mr. Sakda Maneerot and Assoc. Prof. Prakob Kitcahiya for their invaluable help and support many things that used for testing in this paper of this research. This paper would not have been completed without all the support that we have always received from them.

References

- [1] N. Pattanadech, F. Pratomosiwi, B. Wieser, M. Baur, and M. Muhr, "The Study of Partial Discharge Inception Voltage of Mineral Oil Using Needle - Plane Electrode Configuration," *2012 International Conference on High Voltage Engineering and Application*, Shanghai, China, September 17-20, 2012, pp. 174-177.
- [2] I. V. Timoshkin, M. J. Given, M. P. Wilson, and S. J. MacGrego, "Review of Dielectric Behavior of Insulating Liquids," *Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2009, pp. 1-4.
- [3] *IEC 60270*, High-voltage test techniques-partial discharge measurements, 2000.
- [4] *CIGRÉ brochure 366*, Guide for partial discharge measurements in compliance to IEC 60270, December 2008.
- [5] E. Kuffel, W.S. Zaengl and J. Kuffel, *High Voltage Engineering, -fundamentals*, second edition, 2000, Newnes Press, pp. 385-392 and 423-447.
- [6] D. König and Y. N. Rao, *Partial Discharges in Electrical Power Apparatus*, VDEVerlag, 1993, pp. 17 -23.
- [7] Rainer Patsch and Farhad Berton, "Pulse sequence analysis -a diagnostic tool based on the physics behind partial discharge", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 35, 2002, pp 25-32.
- [8] A. Pedersen, G. C. Crichton and I. W. McAllister, "The theory and measurement of partial discharge transients", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 26, No.3, June 1991, pp. 487 -497
- [9] E. Lemke, "A critical review of partial - discharge models", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol.28, No.6, Nov/Dec 2012, pp. 11-16.
- [10] *IEC 61294*, Insulating Liquids – Determination of the Partial Discharge Inception Voltage (PDIV) – Test Procedure.
- [11] H. Jin, T. Andritsch, P.H.F. Morshuis, J.J. Smit, "AC Breakdown Voltage and Viscosity of Mineral Oil based SiO₂ Nanofluids", *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, 2012, pp. 902 -905.



3. K. Jariyanurat, S. Maneerot, N. Pattanadech, S. Potivejkul, "Electrical Characteristics of Natural Ester Impregnated Pressboards under Different Periods of Impregnation, Condition Monitoring and Diagnosis 2016 (CMD 2016), วันที่ 25 – 28 กรกฎาคม 2559, Xi'an, China

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



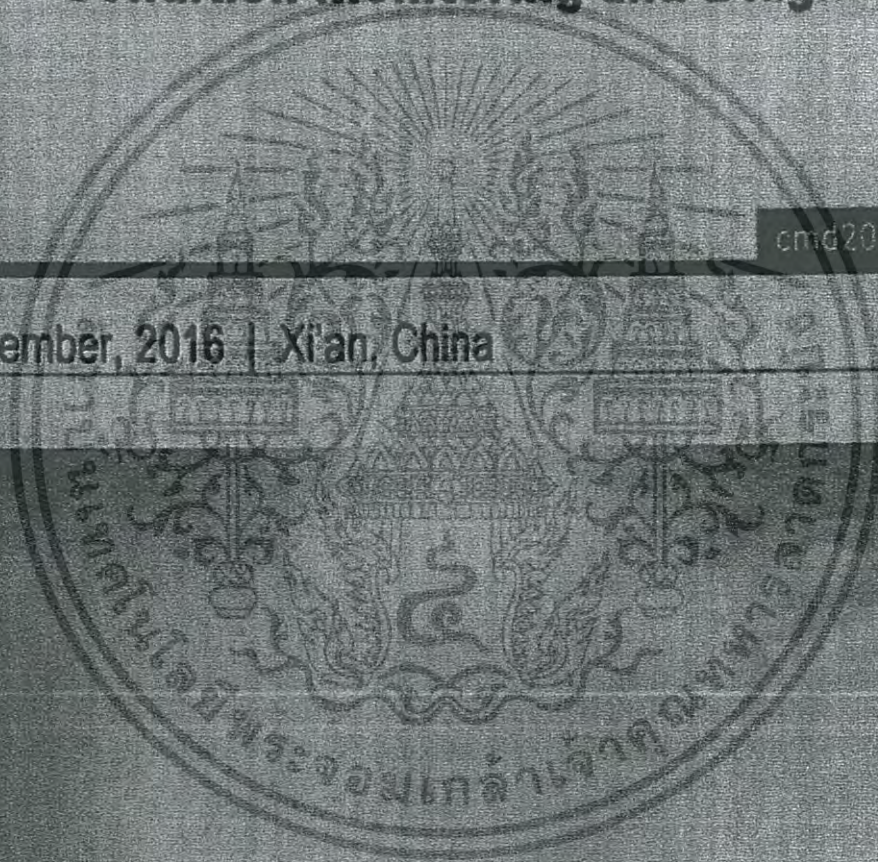
CMD2016

International Conference on

Condition Monitoring and Diagnosis 2016

cmd2016.xjtu.edu.cn

25-28 September, 2016 | Xi'an, China



Electrical Characteristics of Natural Ester Impregnated Pressboards under Different Periods of Impregnation

K. Jariyanurat^{1*}, S. Maneerot², N. Pattanadech³, S. Potivejkul⁴
 High Voltage laboratory, Department of Electrical Engineering
 Faculty of Engineering, King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang
 Bangkok 10520 Thailand
 e-mail kittipod_boss@hotmail.com

Abstract— This paper represents electrical characteristics of natural ester impregnated pressboards under different impregnation period. Each pressboard specimen was prepared as a rectangular shape having the width of 100 mm and the length of 100 mm as well. Two thickness dimensions of the pressboard for the experiment were 1.6 mm and 3.2 mm respectively. All pressboards were dry up in the oven with temperature at 60°C for 1 hour. Next, these pressboards were divided into three groups according to the impregnation periods. The first group was impregnated with natural ester (FR3) for 3 hours with temperature at 60°C and 200 mbar pressure controlled condition. The second and third group were impregnated for 6 and 9 hours respectively with the same temperature and pressure condition. Then, the breakdown voltage characteristic of the impregnated pressboards were investigated according to IEC 60243-1. Besides, the capacitance and dielectric dissipation factor of the natural ester with various conditions were examined in accordance with IEC 60247. According to the test results, the pressboard impregnated for longer period provided higher breakdown voltage than the pressboards impregnated for shorter period by which the breakdown voltage of the pressboard impregnated for 9 hours was higher than the pressboard impregnated for 6 hours about 8-24% and the breakdown voltage of the pressboard impregnated for 6 hours was higher than the pressboard impregnated for 3 hours about 5-19%. Whereas the dielectric dissipation factor of the natural ester utilized for pressboard impregnation process for 3 hours was higher than the natural ester utilized for such process for 6 and 9 hours about 5% and 12% respectively. Moreover, the electrical characteristics of pressboard impregnated with natural ester was compared with that of the pressboard impregnated with mineral oil. The breakdown voltage of natural ester impregnated pressboard was higher than the mineral oil impregnated pressboard about 5-11% but the dielectric dissipation factor of natural ester was 30 times higher than mineral oil. It is clear that the time for impregnation significantly affects the breakdown characteristic of the natural ester impregnated pressboard. Furthermore, impregnation of the pressboard with natural ester provides better breakdown strength than the pressboard impregnated with mineral oil.

Keywords— natural ester ,impregnation ,pressboard ,breakdown voltage

I. INTRODUCTION

Oil and pressboard are the main insulations of transformers which have been widely used for a long time because they provide good dielectric properties at economically reasonable prices [1]. Generally oil filled transformers use mineral oil for cooling function and pressboard for supporting mechanical force [2]. However, in the present the awareness of environmental protections are encouraging engineers and researchers to use low-toxicity and bio-degradable insulating liquids [3, 4]. Furthermore, mineral oil with high water contents and contaminant is easy to breakdown. Water can also cause of decreasing in mechanical strength and electrical strength of the pressboards [5, 6]. Therefore, this research work investigated the dielectric properties of natural ester as one of highly promising insulating liquid material which is from nature product and environmentally friendly as well [7]. The main object was to study the breakdown characteristics of the pressboards impregnated with natural ester comparing with impregnated with mineral oil in different conditions of impregnation. Besides, the capacitance and dielectric dissipation factor of both natural ester and mineral oil were examined. These dielectric properties are important to be considered for applying the new liquid insulation for transformers in the future.

II. TEST SETUP

A. Breakdown Testing

To investigate the breakdown characteristics of pressboards impregnated with mineral oil and natural ester, the electrode system was designed and constructed according to IEC [8] as shown in Fig. 1. The testing circuit diagram and test circuit setup are illustrated in Fig 2 and Fig 3 respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

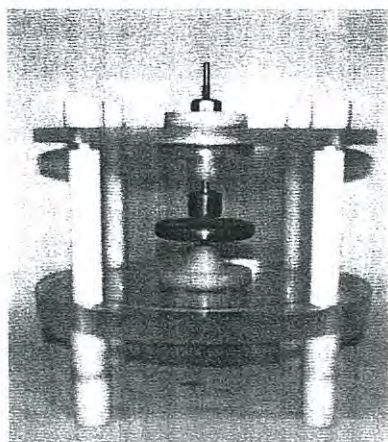


Fig. 1. Test vessel for breakdown testing of impregnated pressboards

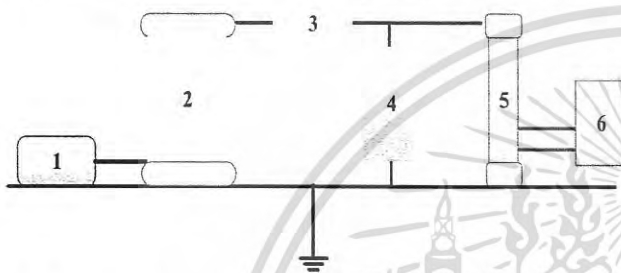


Fig. 2. Test circuit diagram for breakdown characteristic of the impregnated pressboards

- where
- 1: Variac
 - 2: AC high voltage source 100kV 50mA
 - 3: Current limiting resistor
 - 4: Test vessel
 - 5: AC voltage divider 200 kV
 - 6: Multimeter

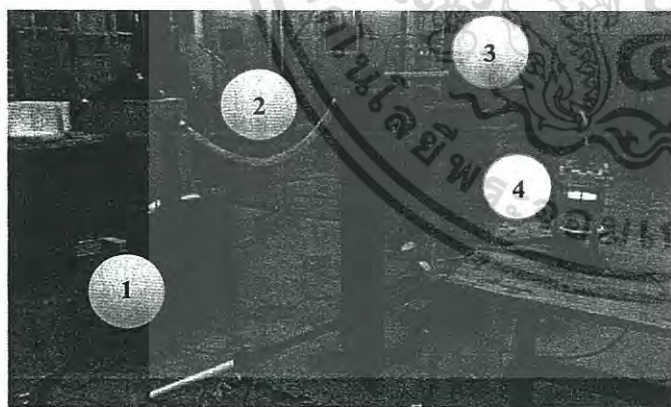


Fig. 3. Test circuit setup for breakdown characteristic of the impregnated pressboards

- where
- 1: AC high voltage source 100kV 50mA
 - 2: Current limiting resistor
 - 3: AC voltage divider
 - 4: Test vessel

B. C&tanδ measurement

Testing circuit diagram for capacitive and dielectric dissipation factor measurement of the dielectric liquid test sample is represented in Fig.4 and the testing circuit setup is depicted in Fig.5.

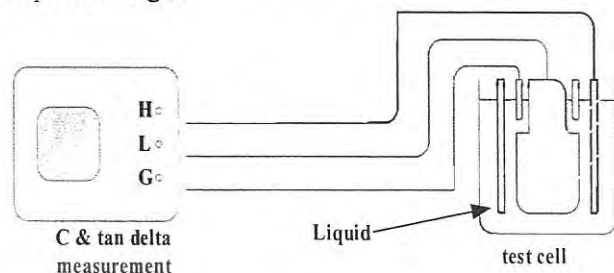


Fig. 4. C&tanδ testing circuit diagram

- where
- H: High Voltage terminal
 - L: Low Voltage terminal
 - G: Ground terminal

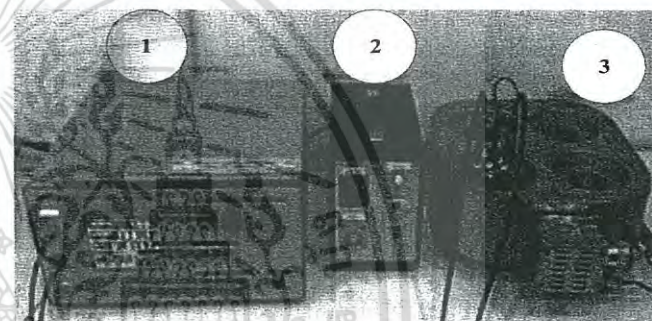


Fig. 5. C&tanδ testing circuit

- where
- 1: C&tanδ measurement
 - 2: Temperature controller
 - 3: Test vessel and heater

III. TEST PROCEDURE

A. Breakdown strength

Breakdown characteristic of the insulating liquid was tested as the following procedures:

- 1) Preparing the test circuit as shown in Fig. 2-3,
- 2) Applying the test voltage to the test object (impregnated pressboard) from 0 to breakdown voltage,
- 3) Recording the breakdown voltage,
- 4) Following step 2-3 for breakdown testing of other five identical pressboards,
- 5) Calculating the mean value of breakdown voltage of each pressboard type.

B. C&tanδ measurement

The testing procedure for capacitive and dielectric dissipation factor of the insulating liquid was performed according to [9] as follows:

- 1) Preparing the test circuit as shown in Fig. 4-5,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) Setting the testing device,
- 3) Increasing the temperature in step each step of 5 °C from 35 °C to 90 °C,
- 4) Measuring capacitance and tanδ of the testing liquid for the given temperatures,
- 5) Following step 1-4 for testing of other types of liquid insulations.

IV TEST RESULT

A. Breakdown Testing

The breakdown characteristics of the natural ester and mineral oil impregnated pressboards are presented in table 1.

TABLE I. BREAKDOWN VOLTAGE OF LIQUID IMPREGNATED PRESSBOARD

Pressboard thickness (mm.)	Impregnated time (Hrs.)	Breakdown voltage (kV)	
		Natural Ester	Mineral Oil
1.6	3	43.9	41.2
	6	49.2	46.7
	9	57.2	51.7
3.2	3	65.7	62.3
	6	75.2	70.6
	9	85.6	77.5

Table 2 represents the examples of breakdown liquid impregnated pressboards from the experiment

TABLE II. BREAKDOWN LIQUID IMPREGNATED PRESSBOARD

Liquid	Thickness (mm)	Impregnated Time		
		3 hours	6 hours	9 hours
Natural Ester	1.6			
	3.2			
Mineral Oil	1.6			
	3.2			

B. C & tanδ measurement

Dielectric dissipation factor, capacitive value, and dielectric permittivity of the liquid test sample are illustrated in Fig. 6 – Fig.9 and table 3 respectively.

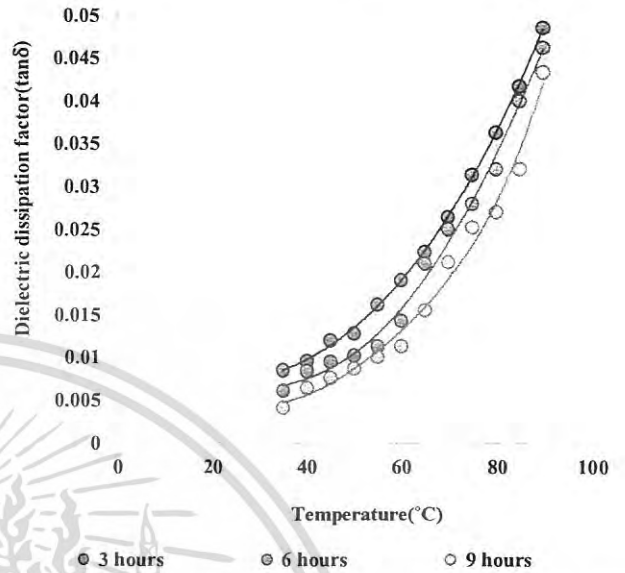


Fig. 6. Relationship between dielectric dissipation factor and temperature of natural ester after using for pressboard impregnation for a specific time.

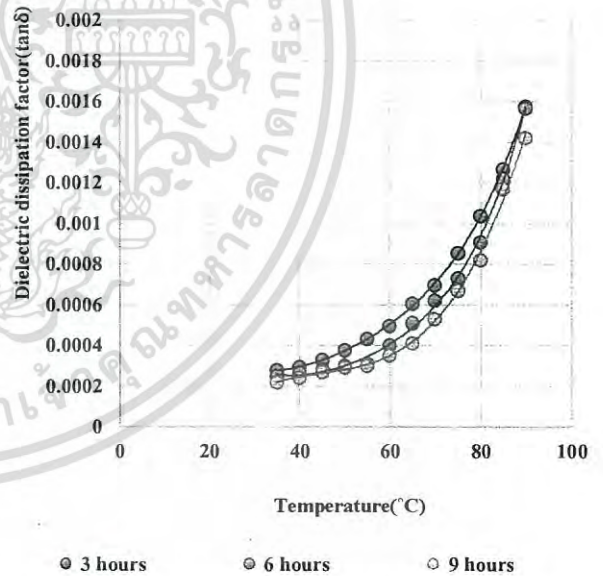


Fig. 7. Relationship between dielectric dissipation factor and temperature of mineral oil after using for pressboard impregnation for a specific time.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

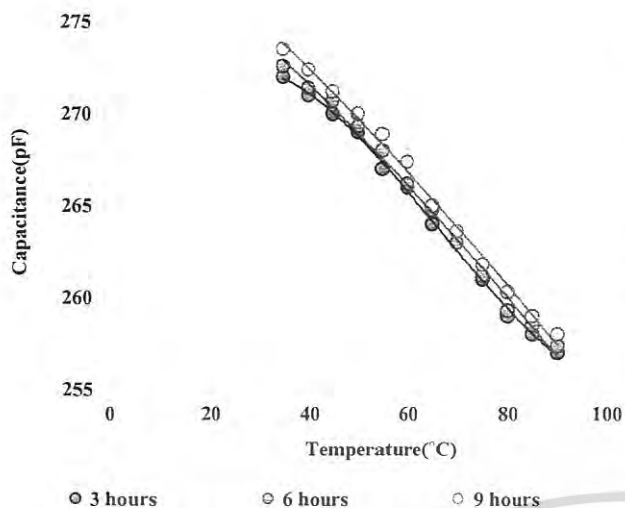


Fig. 8. Relationship between capacitance and temperature of natural ester after using for pressboard impregnation for a specific time.

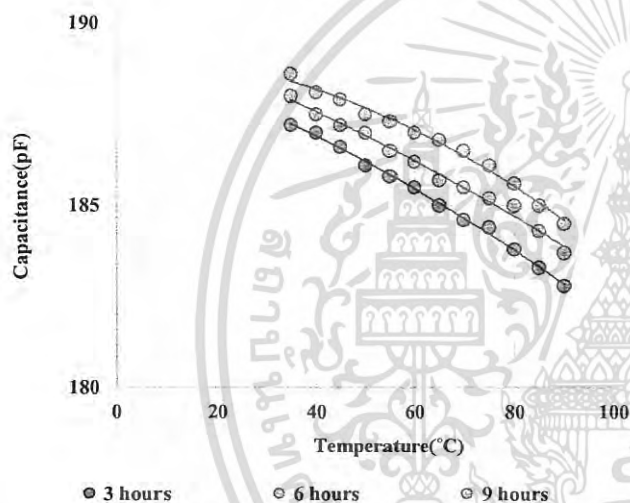


Fig. 9. Relationship between capacitance and temperature of mineral oil after using for pressboard impregnation for a specific time.

Note : there is no different value of liquid permittivity after using for impregnation for 3 ,6 ,and 9 hours.

IV CONCLUSION

The breakdown voltage of the pressboards impregnated for long periods is higher than that of the pressboard impregnated for short periods. Besides, the breakdown voltage of the pressboard impregnated with natural ester is higher than impregnation with mineral oil. However, the dielectric dissipation factor of natural ester which is impregnated for long periods is less than impregnation for short periods. Furthermore, the dielectric dissipation factor of natural ester is 30 times higher than that of mineral oil.

It is clear that the time duration for impregnation significantly affects the breakdown characteristic of the natural ester impregnated pressboard including the capacitance and dielectric dissipation factor of the natural ester.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by The Thailand Research Fund under the Researchers and Research for Industry Grants: Master Sci. & Tech Grants 2015 Research Funding No.MSD58I0132 and Lamool Engineering CO., LTD.

REFERENCES

- [1] N. Pattanadech, "Insulation," in *Electrical Engineering Materials*, 3rd ed., vol 1, Bangkok, Thailand: Mean Service Supply , 2014, pp.48-105. (in Thailand)
- [2] I. V. Timoshkin, M. J. Given, M. P. Wilson, and S. J. MacGrego, "Review of Dielectric Behavior of Insulating Liquids," *Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2009, pp. 1-4.
- [3] Amanpreet Singh Gill, "The Design of Transformer oil," *IEEE Conf. Elect. Ins.*, pp. 250-247, 5April.2000.
- [4] Cigre Brochure 436, "Experiences in service with new Insulating liquids," October.2010.
- [5] Cigre Brochure 323, "Ageing of cellulose in mineral-oil insulation transformers," October 2007.
- [6] Caesar Y. Perkasa, Nick Lelekakis, Tadeusz Czaszejko, Jaury Wijaya and Daniel Martin, "A Comparison of the Formation of Bubbles and Water Droplets in Vegetable and Mineral Oil Impregnated Transformer Paper," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 21, pp. 2111-2118, October 2014
- [7] S. Itahashi, "Analysis of Water in Oil-impregnated Kraft Paper and its Effect on Conductivity," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 2, December 1995, pp. 1111-1116, December 1995.
- [8] IEC 60243-1, *Electric strength of insulating materials – Test methods – Part 1: Tests at power frequencies*, 2013.
- [9] IEC 60247, *Insulating liquids –Measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor (tan δ), and d.c. resistivity*, 2004.

TABLE III. DIELECTRIC PERMITTIVITY OF NATURAL ESTER AND MINERAL OIL AT DIFFERENT TEMPERATURES AFTER USING FOR 3 HOURS IMPREGNATION OF PRESSBORD

Temperature (°C)	Natural Ester	Mineral Oil
35	3.08	2.12
40	3.07	2.12
45	3.06	2.12
50	3.05	2.11
55	3.03	2.11
60	3.01	2.11
65	2.99	2.1
70	2.98	2.1
75	2.96	2.09
80	2.94	2.09
85	2.92	2.08
90	2.91	2.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายกิตติพิศ จรรย์านูรัตน์
วัน เดือน ปีเกิด	19 มิถุนายน 2535
ที่อยู่	33 ซอย 14 ถนน มหิตล ตำบล ท่าศาลา อำเภอ เมือง จังหวัด เชียงใหม่ 50000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2550 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนมงฟอร์ตวิทยาลัย พ.ศ. 2553 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนมงฟอร์ตวิทยาลัย พ.ศ. 2557 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2560 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความชำนาญเฉพาะด้าน 1) การทดสอบไฟฟ้าแรงสูง
2) ระบบฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้