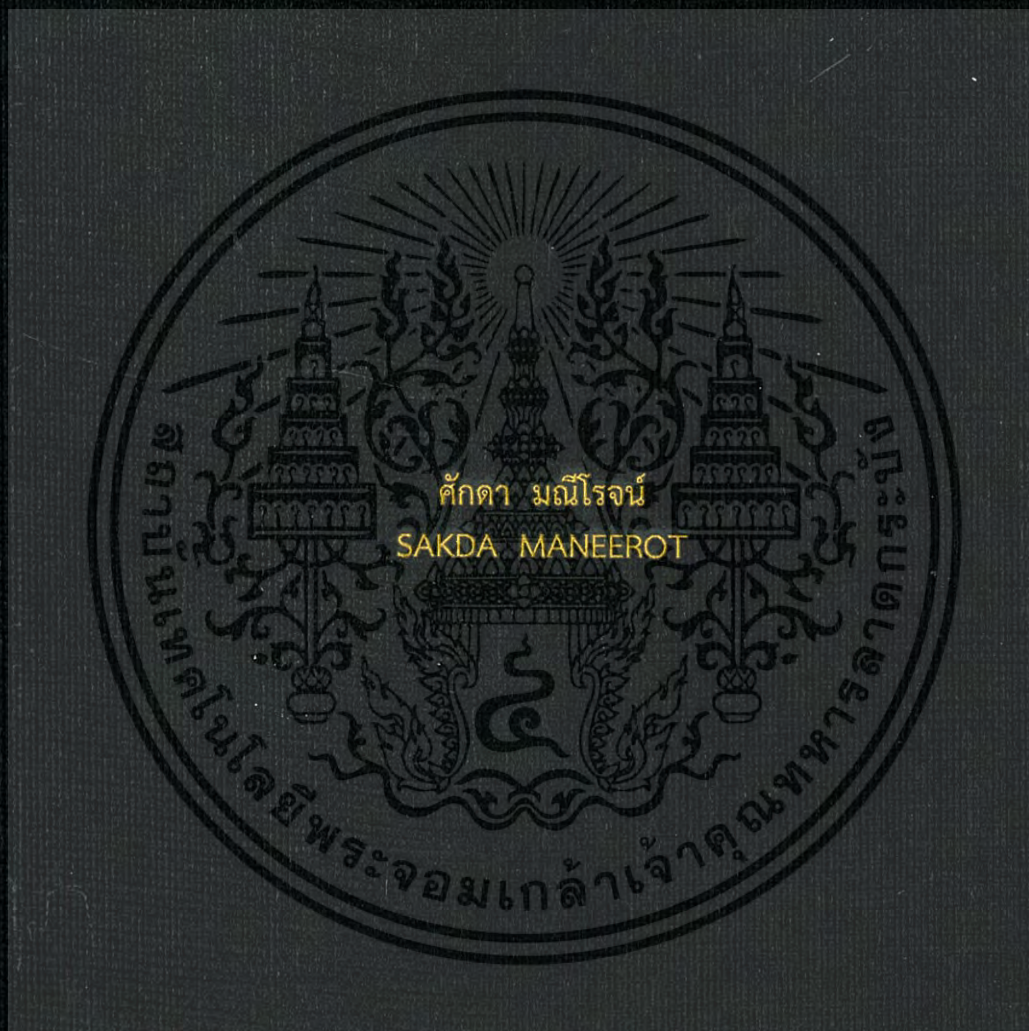


คุณสมบัติทางไฟฟ้าทางเพรสบอร์ดที่อิมเพ็ริกเนตด้วยน้ำมันหม้อแปลง
และเอสเตอรืธรรมชาติ

ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF MINERAL OIL AND NATURAL ESTER
IMPREGNATED PRESSBOARD



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-020-029

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

คุณสมบัติทางไฟฟ้าทางเพรสบอร์ดที่อิมเพร็กเนตด้วยน้ำมันหม้อแปลง
และเอสเตอรธรรมชาติ

ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF MINERAL OIL AND NATURAL ESTER
IMPREGNATED PRESSBOARD



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 148746
รับเดือนปี 23 พ.ย. 2560

b. 00267617
l.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-020-029

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF MINERAL OIL AND NATURAL ESTER
IMPREGNATED PRESSBOARD



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-020-029

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
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 คุณสมบัติทางไฟฟ้าทางเพรสบอร์ดที่อิมเพกต์ด้วยน้ำมันหม้อแปลงและเอสเทอร์ธรรมชาติ

Thesis Title Electrical Characteristics of Mineral Oil and Natural Ester Impregnated Pressboard

นักศึกษา นายศักดิ์ดา มณีโรจน์

รหัสประจำตัว 57601131

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.พีรฤติ ยูทรโกวิท


หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-020-029

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ศุภกิตต์	โชติโก	
รศ.ดร.อานันท์วัฒน์	คุณากร	
รศ.ดร.นรเศรษฐ	พัฒนเดช	
รศ.ดร.ศิริวัฒน์	โพธิเวชกุล	
ผศ.ดร.พีรฤติ	ยูทรโกวิท	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 25 พฤษภาคม พ.ศ. 2560 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว


(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา **ฉบับนี้ คณะวิศวกรรมศาสตร์** โยชน์ด้านการค้า
ไม่วางกรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้งแต่วันที่ 25 พฤษภาคม พ.ศ. 2560 นี้มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	คุณสมบัติทางไฟฟ้าทางเพรสบอร์ดที่อิมเพิร์กเน็ตด้วยน้ำมันหม้อแปลง และเอสเตอรฺ์ธรรมชาติ
นักศึกษา	นายศักดิ์ดา มณีโรจน์
รหัสนักศึกษา	57601131
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.พีรวัฒน์ ยุทธโกวิท

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอ การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าเบื้องต้นของฉนวนเหลว และเพรสบอร์ดที่ทำการอิมเพิร์กเน็ตด้วยฉนวนเหลวโดยเริ่มจากการออกแบบตู้อบสุญญากาศที่ปรับอุณหภูมิได้ เพื่อใช้ในการเตรียมฉนวนเหลวและฉนวนแข็ง ที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า ได้แก่ 1) การทดสอบคุณสมบัติความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลว ตามมาตรฐาน IEC 60156 2) ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวนเหลว ตามมาตรฐาน ASTM D924-99 3) การทดสอบคุณสมบัติความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของเพรสบอร์ดที่ทำการอิมเพิร์กเน็ตด้วยฉนวนเหลว ตามมาตรฐาน IEC 60243-1 4) การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60897 5) การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด โดยการทดสอบได้ทำการทดสอบฉนวนเหลวสองชนิด ได้แก่ 1) น้ำมันหม้อแปลง 2) เอสเตอรฺ์ธรรมชาติ เนื่องจากในภาคอุตสาหกรรมยังขาดองค์ความรู้เกี่ยวกับคุณลักษณะสมบัติของเอสเตอรฺ์ในหลายๆด้านซึ่งยังคงเป็นปัญหาที่สำคัญมาก วิทยานิพนธ์นี้จึงจัดทำเพื่อทำการศึกษาวิจัยคุณลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเอสเตอรฺ์ธรรมชาติ เปรียบเทียบกับน้ำมันหม้อแปลง โดยมีเงื่อนไขในกระบวนการเตรียมฉนวนที่เหมือนกันในทุกขั้นตอน จากผลการทดสอบ พบว่า เอสเตอรฺ์ธรรมชาติมีความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับได้ดีกว่าน้ำมันหม้อแปลง ถึงแม้ว่าเอสเตอรฺ์จะมีความชื้นเจือปนสูงถึง 178 ppm ในขณะที่น้ำมันหม้อแปลงมีความชื้นที่ 18 ppm นอกจากนี้แล้วพบว่า น้ำมันหม้อแปลงมีความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทั้งชั่วววกและชั่วลบสูงกว่าเอสเตอรฺ์ เมื่อนำเอาฉนวนเหลวทั้งสองชนิดมาทำการอิมเพิร์กเน็ตกับเพรสบอร์ดที่ใช้เป็นฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้า พบว่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดที่อิมเพิร์กเน็ตด้วยเอสเตอรฺ์จะสูงกว่าหรือเท่ากับอิมเพิร์กเน็ตด้วยน้ำมันหม้อแปลงโดยที่เพรสบอร์ดที่ไม่ผ่านการอิมเพิร์กเน็ตจะมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์ฟ้าฟ้าน้อยกว่าเพรสบอร์ดที่ผ่านการอิมเพิร์กเน็ตอย่างเห็นได้ชัด แต่อย่างไรก็ตาม เอสเตอรฺ์ธรรมชาติมีค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกสูงกว่าน้ำมันหม้อแปลงถึง 77 เท่าจากการวิจัยคุณสมบัติต่างๆ พบว่าฉนวนเหลวแต่ละชนิดล้วนมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับประเภทและสิ่งแวดล้อมในการติดตั้งหม้อแปลงว่าเหมาะกับฉนวนชนิดใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Electrical Characteristics of Mineral Oil and Natural Ester Impregnated Pressboard
Student	Mr. Sakda Maneerot
Student ID	57601131
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr.Peerawut Yutthagowith

Abstract

This thesis presents the study about the electrical characteristics of liquid insulation and impregnated pressboards, beginning with the design and construction of vacuum oven which can control the temperature for preparing liquid and solid insulation used in electrical characteristics test such as dielectric breakdown voltage test of liquid insulation following to IEC 60156, dielectric breakdown test of impregnated pressboard following to IEC 60243-1, dielectric dissipation factor and dielectric permittivity test according to ASTM D924-99, impulse breakdown test of liquid insulation according to IEC 60897, and impulse breakdown test of impregnated pressboard. The test experiments are used two types of liquid insulation such as mineral oil or transformer oil and natural ester. Because of the lacking of the knowledge about dielectric properties of natural ester being the specific problems. Therefore, this thesis studies about dielectric properties of both liquid and impregnated pressboard with different liquid insulations in control condition for comparing dielectric properties of both. The results indicate that natural ester has more dielectric breakdown voltage and impulse breakdown voltage, even though the water content of natural ester is around 178 ppm and the water content of mineral oil is around 18 ppm. In addition to, the pressboards impregnated with natural ester has higher dielectric breakdown voltage and impulse breakdown voltage. Moreover, dielectric breakdown voltage and impulse breakdown voltage of non-impregnated pressboard are clearly less than the others. However, dielectric dissipation factor of natural ester is higher than mineral oil about 77 times. It can concluded that each liquid insulation has advantages and disadvantage, so for choosing the liquid insulation will depend on the environment and the purpose of using

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ต้องขอขอบคุณ ผศ.ดร.พิรุณ ฤทธิ์โกวิท ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ ที่คอยให้คำปรึกษา แนะนำ และมอบความรู้ให้กับข้าพเจ้า ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง และขอขอบคุณ รศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช ที่ช่วยอบรมสั่งสอน ให้คำชี้แนะต่างๆกับข้าพเจ้าตลอดมา

ขอขอบคุณ น้องๆห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงโดยเฉพาะ นาย กิตติพิศ จรรย์นุรัตน์ และ นางสาว วิลาสินี วัฒนไพบูลย์ ที่ได้ให้ความรู้และแนะนำการใช้งานอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง รวมถึงช่วยเหลือในการทดสอบและแสดงความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมา ด้วยดีตลอดจนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

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

สุดท้ายนี้สำหรับคุณความดีที่เกิดจากการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าซึ่งข้าพเจ้ารักและเคารพยิ่ง ตลอดจนถึงครู อาจารย์ที่ข้าพเจ้าเคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้และการใช้ชีวิตให้กับข้าพเจ้า

ศักดา มณีโรจน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.7 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 สนามไฟฟ้า.....	6
2.1.1 สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ.....	7
2.1.2 สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ.....	9
2.2 ฉนวนภายในหม้อแปลง.....	11
2.2.1 ฉนวนแข็ง.....	11
2.2.2 ฉนวนเหลว.....	12
2.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของฉนวนเหลวหม้อแปลง.....	15
2.3.1 การเปรียบเทียบความหนืด.....	17
2.3.2 การเปรียบเทียบการทนความชื้น.....	18
2.3.3 ความสามารถในการละลายของน้ำในฉนวนน้ำมัน.....	18
2.3.4 ความปลอดภัยด้านสิ่งแวดล้อม.....	19
2.3.5 การย่อยสลายทางชีวภาพ.....	19
2.3.6 การเกิดออกซิเดชันของฉนวนเหลว.....	20
2.4 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนเหลว.....	21
2.4.1 เพอร์มิตติวิตี.....	21
2.4.2 แพคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก.....	23
2.4.3 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก.....	24
2.5 การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนเหลว.....	25
2.5.1 การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนเหลวบริสุทธิ์.....	25
2.5.2 การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนเหลวเชิงการค้า.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนแข็ง.....	27
2.6.1 การเบรกดาวน์แบบแทจริง.....	28
2.6.2 การเบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์.....	28
2.6.3 การเกิดเบรกดาวน์จากแรงทางกลที่เกิดจากไฟฟ้า.....	29
2.6.4 การเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากการดิสชาร์จภายใน.....	29
2.7 ทฤษฎีการสรางและการวัดแรงดันอิมพัลส์.....	30
2.7.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน.....	30
2.7.2 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....	32
2.7.3 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายขั้น.....	33
บทที่ 3 การออกแบบสร้างชุดทดสอบ และการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนเหลว และเพรสบอร์ดที่อิมเพิร์กเน็ตด้วยฉนวนเหลว.....	34
3.1 การออกแบบและการประกอบสร้างชุดทดสอบ (Test Vessel).....	34
3.2 ขั้นตอนการควบคุมปริมาณความชื้นในฉนวนเหลว.....	40
3.3 ขั้นตอนการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ฉนวนเหลว.....	41
3.4 ขั้นตอนการทดสอบค่าแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับของเพรสบอร์ดที่อิมเพิร์กเน็ตด้วยฉนวนเหลว.....	43
3.5 ขั้นตอนการวัดค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปลวไดอิเล็กตริกและคาเปอร์มิตติวิตีของฉนวนเหลว.....	46
3.6 ขั้นตอนการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว.....	48
3.7 ขั้นตอนการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด.....	49
บทที่ 4 การทดสอบและการประเมินผล.....	51
4.1 ผลการวัดปริมาณความชื้นในฉนวนเหลว.....	51
4.2 ผลการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ฉนวนเหลว.....	51
4.3 ผลการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์เพรสบอร์ดที่อิมเพิร์กเน็ตด้วยฉนวนเหลว.....	52
4.4 การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของฉนวนเหลว.....	54
4.5 การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว.....	57
4.6 การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด.....	59
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ.....	68
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	68
5.1.1 ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลว.....	68
5.1.2 ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับของเพรสบอร์ดที่อิมเพิร์กเน็ตด้วยน้ำมันหม้อแปลง และเอสเทอร์ธรรมชาติ.....	68
5.1.3 การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว.....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้เพื่อประโยชน์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตให้เผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1.4 ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลว.....	69
5.1.5 การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด.....	69
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	70
เอกสารอ้างอิง.....	71
ภาคผนวก.....	73
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	74
ภาคผนวก ข การออกแบบตู้อบสุญญากาศ และมาตรฐานที่ใช้ ในการออกแบบอุปกรณ์ทดสอบ.....	87
ประวัติผู้เขียน.....	99



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

			หน้า
ตารางที่	2.1	การใช้งานของฉนวนเหลวแต่ละชนิดที่ใช้ในหม้อแปลง.....	16
ตารางที่	2.2	แสดงภาพรวมคุณสมบัติของฉนวนเหลวชนิดน้ำมันแร่และเอสเทอร์ธรรมชาติ.....	19
ตารางที่	2.3	คุณสมบัติทางฟิสิกส์และไฟฟ้าของฉนวนเหลวชนิดน้ำมันแร่และเอสเทอร์.....	20
ตารางที่	2.4	การละลายของน้ำในฉนวนน้ำมัน.....	22
ตารางที่	4.1	ผลการวัดปริมาณความชื้นในฉนวนเหลว.....	51
ตารางที่	4.2	ผลการทดสอบแรงดันเบรกความของน้ำมันหม้อแปลง.....	51
ตารางที่	4.3	ผลการทดสอบแรงดันเบรกความของเอสเทอร์ธรรมชาติ.....	51
ตารางที่	4.4	ผลการทดสอบแรงดันเบรกความเพรสบอร์ด ที่อิมเพริกเนตด้วยน้ำมันหม้อแปลง.....	52
ตารางที่	4.5	ผลการทดสอบแรงดันเบรกความเพรสบอร์ด ที่อิมเพริกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ.....	53
ตารางที่	4.6	ผลการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของฉนวนเหลว.....	54
ตารางที่	4.7	ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว ของฉนวนเหลว.....	57
ตารางที่	4.8	การทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบของฉนวนเหลว.....	57
ตารางที่	4.9	ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว ของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่อิมเพริกเนตด้วยน้ำมันแร่.....	59
ตารางที่	4.10	ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว ของเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm ที่อิมเพริกเนตด้วยน้ำมันแร่.....	60
ตารางที่	4.11	ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว ของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่อิมเพริกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ.....	61
ตารางที่	4.12	ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว ของเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm ที่อิมเพริกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ.....	62
ตารางที่	4.13	ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบ ของเพรสบอร์ดที่มีความหนา 1.6 mm ที่อิมเพริกเนตด้วยน้ำมันแร่.....	64
ตารางที่	4.14	ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบ ของเพรสบอร์ดที่มีความหนา 3.2 mm ที่อิมเพริกเนตด้วยน้ำมันแร่.....	65
ตารางที่	4.15	ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบ ของเพรสบอร์ดที่มีความหนา 1.6 mm ที่อิมเพริกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ.....	66
ตารางที่	4.16	ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบของ เพรสบอร์ดที่มีความหนา 3.2 mm ที่อิมเพริกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ.....	67
ตารางที่	5.1	สรุปคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงเปรียบเทียบกับ เอสเทอร์ธรรมชาติ.....	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1	อิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆกัน.....11
รูปที่ 2.2	การเปรียบเทียบแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ในไดโวลีตริกตามลักษณะทางไฟฟ้า...12
รูปที่ 2.3	สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า.....13
รูปที่ 2.4	สนามไฟฟ้ากระจายเปรียบเทียบของอิเล็กทรอนิกส์ลักษณะต่างๆ.....14
รูปที่ 2.5	กระดาศอัดแรง.....16
รูปที่ 2.6	การเชื่อมโยงเอสเทอร์.....17
รูปที่ 2.7	โครงสร้างของเอสเทอร์ธรรมชาติ.....17
รูปที่ 2.8	กราฟล็อกการิทึม (ความหนืด) กับ อุณหภูมิ.....21
รูปที่ 2.9	การเปรียบเทียบความหนืด กับ อุณหภูมิที่แปรผัน.....21
รูปที่ 2.10	เปรียบเทียบการอิมพัลส์ความชื้นกับอุณหภูมิ.....23
รูปที่ 2.11	การเปรียบเทียบอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพ.....23
รูปที่ 2.12	วงจรมุมลของฉนวน.....25
รูปที่ 2.13	คุณลักษณะโพลาริเซชันของฉนวน.....27
รูปที่ 2.14	เปอร์มิตติวิตีเชิงซ้อนของไดโวลีตริก.....28
รูปที่ 2.15	การเรียงตัวของอนุภาคไฟเบอร์ระหว่างช่องว่าง (gap) ภายใต้อรงแรงดันสูง.....30
รูปที่ 2.16	ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์เมื่อป้อนแรงดันให้กับฉนวนแข็งที่ระยะเวลาต่างกัน...32
รูปที่ 2.17	รูปแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้ารูปคลื่นเต็ม.....35
รูปที่ 2.18	รูปแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผาดัดหลังคลื่น.....35
รูปที่ 2.19	แสดงถึงแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผาดัดหน้าคลื่น.....35
รูปที่ 2.20	วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ วงจร A.....36
รูปที่ 2.21	วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ วงจร B.....36
รูปที่ 2.22	วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบหลายขั้นตามวงจรมารกซ์.....37
รูปที่ 3.1	แบบจำลองที่บรรจุน้ำมันและใส่เพรสเซอร์ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดัน กระแสลับของเพรสเซอร์.....34
รูปที่ 3.2	ที่บรรจุน้ำมันและใส่เพรสเซอร์ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสลับของเพรส เซอร์ที่ออกแบบสร้างจริง.....34
รูปที่ 3.3	แบบจำลองอิเล็กทรอนิกส์ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสลับของเพรสเซอร์35
รูปที่ 3.4	อิเล็กทรอนิกส์ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสลับของเพรสเซอร์ ที่ออกแบบสร้างจริง.....35
รูปที่ 3.5	แบบจำลองชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสลับของเพรสเซอร์.....36
รูปที่ 3.6	ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสลับของเพรสเซอร์ที่ออกแบบสร้างจริง...36
รูปที่ 3.7	แบบจำลองที่บรรจุน้ำมันและใส่เพรสเซอร์ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว.....37
รูปที่ 3.8	ที่บรรจุน้ำมันและใส่เพรสเซอร์ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ของฉนวนเหลวที่ออกแบบสร้างจริง.....37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.9 แบบจำลองอิเล็กทรอนิกส์โทรดชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของ ฉนวนเหลว.....	38
รูปที่ 3.10 อิเล็กทรอนิกส์โทรดชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว ที่ออกแบบสร้างจริง.....	38
รูปที่ 3.11 แบบจำลองชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว.....	39
รูปที่ 3.12 ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลวที่ออกแบบสร้างจริง.....	39
รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการควบคุมปริมาณความชื้นในฉนวนเหลว.....	40
รูปที่ 3.14 การควบคุมปริมาณความชื้นในฉนวนเหลว.....	40
รูปที่ 3.15 การวัดปริมาณความชื้นในฉนวนเหลว.....	41
รูปที่ 3.16 ชุดทดสอบแรงดันเบรกดาวนฉนวนเหลว.....	41
รูปที่ 3.17 ขั้นตอนการวัดแรงดันเบรกดาวนของฉนวนเหลว.....	42
รูปที่ 3.18 การอบเพรสบอรรดก่อนทำการทดลอง.....	43
รูปที่ 3.19 การอิมเพิร์กเนตเพรสบอรรดด้วยฉนวนเหลว.....	43
รูปที่ 3.20 ชุด Test cell ทดสอบความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวนของเพรสบอรรด.....	44
รูปที่ 3.21 วงจรทดสอบความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวนกระแสสลับของเพรสบอรรด.....	44
รูปที่ 3.22 ขั้นตอนการวัดแรงดันเบรกดาวนกระแสสลับเพรสบอรรดที่อิมเพิร์กเนตฉนวนเหลว.....	45
รูปที่ 3.23 ชุด Test cell และ Heater สำหรับการวัดค่า $\tan\delta$ และ ϵ_r ของฉนวนเหลว.....	46
รูปที่ 3.24 วงจรการทดสอบวัดค่า $\tan\delta$ และ ϵ_r ของฉนวนเหลว.....	46
รูปที่ 3.25 ขั้นตอนการวัดค่า $\tan\delta$ และค่า ϵ_r	47
รูปที่ 3.26 วงจรทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว.....	48
รูปที่ 3.27 วงจรทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอรรด สำหรับแรงดันน้อยกว่า 150 kV.....	49
รูปที่ 3.28 วงจรทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอรรด สำหรับแรงดันมากกว่า 150 kV.....	50
รูปที่ 3.29 ชุดทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	50
รูปที่ 4.1 ค่าเปอร์มิตติวิตีจริงและค่าเปอร์มิตติวิตีจินตภาพของน้ำมันหม้อแปลง.....	55
รูปที่ 4.2 ค่าเปอร์มิตติวิตีจริงและค่าเปอร์มิตติวิตีจินตภาพของเอสเตอรธรรมชาติ.....	55
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียปลาไดอิเล็กตริกของน้ำมันหม้อแปลง และเอสเตอรธรรมชาติ.....	56
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบสภาพตานทานไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงและเอสเตอร.....	56
รูปที่ 4.5 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่ววอก 1.2/50 μ S ที่ใช้ในการทดสอบ.....	57
รูปที่ 4.6 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบ 1.2/50 μ S ที่ใช้ในการทดสอบ.....	58
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่ววอกและชั่วลบ ของฉนวนเหลวทั้งสองชนิด.....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.8 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์พลาสมาชั่ววอก 1.24/60 μs ที่ใช้ในการตรวจสอบ เวลาหนาคืบและหลังคืบโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60060-1.....	59
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์พลาสมาชั่ววอก ของเพรสบอรัลที่มีความหนา 1.6 mm ที่อิมเพิร์กเน็ตด้วยน้ำมันแร่ และจำนวนชั่วโมงในการอิมเพิร์กเน็ต.....	60
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์พลาสมาชั่ววอก ของเพรสบอรัลที่มีความหนา 3.2 mm อิมเพิร์กเน็ตด้วยน้ำมันแร่ และจำนวนชั่วโมงในการอิมเพิร์กเน็ต.....	61
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์พลาสมาชั่ววอก ของเพรสบอรัลที่มีความหนา 1.6 mm อิมเพิร์กเน็ตด้วยเอสเตอรธรรมชาติ และจำนวนชั่วโมงในการอิมเพิร์กเน็ต.....	62
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์พลาสมาชั่ววอก ของเพรสบอรัลที่มีความหนา 3.2 mm อิมเพิร์กเน็ตด้วยเอสเตอรธรรมชาติ และจำนวนชั่วโมงในการอิมเพิร์กเน็ต.....	63
รูปที่ 4.13 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์พลาสมาชั่ววอก 1.24/60 μs ที่ใช้ในการตรวจสอบ เวลาหนาคืบและหลังคืบโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60060-1.....	63
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์พลาสมาชั่ววอก ของเพรสบอรัลที่มีความหนา 1.6 mm อิมเพิร์กเน็ตด้วยน้ำมันแร่ และจำนวนชั่วโมงในการอิมเพิร์กเน็ต.....	64
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์พลาสมาชั่ววอก ของเพรสบอรัลที่มีความหนา 3.2 mm อิมเพิร์กเน็ตด้วยน้ำมันแร่ และจำนวนชั่วโมงในการอิมเพิร์กเน็ต.....	65
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์พลาสมาชั่ววอก ของเพรสบอรัลที่มีความหนา 1.6 mm อิมเพิร์กเน็ตด้วยเอสเตอรธรรมชาติ และจำนวนชั่วโมงในการอิมเพิร์กเน็ต.....	66
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์พลาสมาชั่ววอก ของเพรสบอรัลที่มีความหนา 3.2 mm อิมเพิร์กเน็ตด้วยเอสเตอรธรรมชาติ และจำนวนชั่วโมงในการอิมเพิร์กเน็ต.....	67

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หม้อแปลงไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญอย่างมากของระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลัง หม้อแปลงประกอบด้วย ตัวนำ แกนเหล็ก และ ฉนวน การฉนวนภายในหม้อแปลงประกอบด้วยฉนวนแข็งและฉนวนเหลว ฉนวนแข็งเช่น กระดาษ บอร์ด และเฟรสบอร์ด ทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าและรองรับแรงทางกล สำหรับฉนวนเหลวนั้นใช้เป็นฉนวนหลักทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าและทำหน้าที่ระบายความร้อนให้กับหม้อแปลง ประมาณกันว่าเริ่มมีการใช้น้ำมันหม้อแปลง(transformer oil)หรือน้ำมันแร่ (mineral oil) เป็นฉนวนหลักทางไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมตั้งแต่ปี ค.ศ. 1885 เป็นต้นมา คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงได้รับการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องแต่ยังมีขีดจำกัดอยู่บางประการเช่น ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าลดลงเป็นอย่างมากเมื่อมีปริมาณความชื้นเจือปนเพียง 10-25 ppm น้ำมันหม้อแปลงมีจุดติดไฟที่ไม่สูงนักคือประมาณ 150 องศาเซลเซียส และสามารถย่อยสลายตามธรรมชาติได้น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับฉนวนเหลวกลุ่มเอสเทอร์ ซึ่งได้รับการพัฒนาขึ้นมาทีหลัง แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากราคาที่แพงของเอสเทอร์และข้อจำกัดทางด้านความรู้และเทคนิคการใช้งานเอสเทอร์เพื่อเป็นฉนวนเหลวให้กับหม้อแปลงนั้นมีอยู่น้อยมาก ดังนั้นน้ำมันหม้อแปลงจึงถูกใช้งานเป็นฉนวนหลักของหม้อแปลงมาเป็นระยะเวลายาวนาน ความน่าเชื่อถือและองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานน้ำมันหม้อแปลงรวมทั้งการวินิจฉัยปัญหาที่เกิดขึ้นในขณะที่ใช้งานหรือภายหลังการใช้งานไประยะหนึ่ง มีการสะสม เรียนรู้ และพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง สำหรับกรณีของเอสเทอร์นั้น หลังจากได้มีการปรับปรุงคุณสมบัติของเอสเทอร์มาอย่างต่อเนื่อง รายงานวิจัยบางชิ้นได้กล่าวถึงคุณสมบัติเด่นของเอสเทอร์ว่า ความคงทนต่อการเกิดเบรคดาวนั้ยังมีค่าสูงถึงแม้ว่าจะมีปริมาณความชื้นเจือปนถึง 350 ppm และเอสเทอร์มีจุดติดไฟประมาณ 300 องศาเซลเซียส รวมทั้งเอสเทอร์สามารถย่อยสลายตามธรรมชาติได้ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ภายในระยะเวลา 28 วันในขณะที่ภายใต้เงื่อนไขเดียวกันน้ำมันหม้อแปลงสามารถย่อยสลายตามธรรมชาติได้ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น และจากการที่ฉนวนเหลวเอสเทอร์มีราคาถูกลงเป็นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับราคาในอดีต ทำให้ทางบริษัทผู้ผลิตหม้อแปลงเริ่มนำเอาเอสเทอร์มาใช้เป็นฉนวนของหม้อแปลงมากขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 2003 เป็นต้นมา อย่างไรก็ตามเอสเทอร์ยังมีจุดด้อยเกี่ยวกับความหนืดที่มีค่าสูงกว่าน้ำมันหม้อแปลงซึ่งอาจจะทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการระบายความร้อนของหม้อแปลงได้ อุตสาหกรรมการผลิตหม้อแปลงในประเทศไทยเริ่มนำเอาเอสเทอร์มาใช้เป็นฉนวนหลักสำหรับหม้อแปลงระบบจำหน่าย(Distribution transformers) บ้างแล้วในขณะนี้ แต่ทั้งผู้ผลิตและผู้ใช้งานยังขาดองค์ความรู้อย่างมากๆ ซึ่งจะส่งผลต่อความปลอดภัยในชีวิตและทรัพย์สินของผู้ปฏิบัติงาน ต่อชุมชนที่มีการติดตั้งหม้อแปลงฉนวนเหลวเอสเทอร์หากตัวหม้อแปลงทำงานผิดพลาดขึ้นมา รวมทั้งจะส่งผลเสียต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าและเศรษฐกิจของชุมชนและประเทศชาติตามมา ดังนั้นจึงควรจะมีการทำการศึกษาวิจัยถึงคุณสมบัติต่างๆของเอสเทอร์ ทั้งทางไฟฟ้า ความร้อน และทางเคมี เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปัจจุบันได้มีการให้ความสำคัญกับสิ่งมีชีวิต และสิ่งแวดล้อมมากขึ้นจึงได้มีการปรับปรุงฉนวน หลอดชนิดต่างๆขึ้นมาโดยมีวัตถุประสงค์คือมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เอสเตอร์ก็เป็นฉนวนหลอดชนิดหนึ่งที่ใช้หลักเกณฑ์เหล่านี้ แต่ด้วยเอสเตอร์ได้ถูกนำมาใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้ายังไม่มากนัก ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับเอสเตอร์ยังมีอยู่น้อยมากจึงได้จัดทำวิทยานิพนธ์นี้ขึ้นมาโดย ทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเอสเตอร์เปรียบเทียบกับน้ำมันหม้อแปลง คุณสมบัติที่สำคัญที่จะ ทำการศึกษา เช่น ความคงทนต่อการเกิดเบรกดาวน์กระแสสลับ รวมถึง ค่าความเปอร้มิตติวิต์และค่า แฟกเตอร์สูญเสียไดอิเล็กตริกเป็นต้น ผลการศึกษาที่ได้จะช่วยให้เกิดความรู้ความเข้าใจในการนำเอา เอสเตอร์มาใช้เป็นฉนวนหลอดทางไฟฟ้าของหม้อแปลงต่อไป

วิทยานิพนธ์นำเสนอ การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าเบื้องต้นของฉนวนหลอด และกระดาดฉนวนที่ ทำการอิมเพิร์กเนตด้วยฉนวนหลอด โดยเริ่มจากการออกแบบตู้อบสุญญากาศที่ปรับอุณหภูมิได้เพื่อใช้ในการ เตรียมฉนวนหลอด และฉนวนแข็งที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าเบื้องต้น การเตรียมฉนวน เพื่อทำการทดสอบอ้างอิงจากการเตรียมฉนวนภายในหม้อแปลงจากภาคอุตสาหกรรมเป็นหลักเพื่อให้ได้ เงื่อนไขที่แท้จริงสำหรับการเตรียมฉนวน และเพื่อศึกษาคุณสมบัติของฉนวนก่อนนำไปใช้งานจริง

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาการออกแบบตู้อบสุญญากาศที่ควบคุมอุณหภูมิได้เพื่อใช้สำหรับเตรียมฉนวนหลอด และฉนวนแข็งรวมทั้งฉนวนผสมเพื่อใช้ในการทดสอบ
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติความเป็นฉนวนทางไฟฟ้าของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าเบื้องต้น ของน้ำมันหม้อแปลง และเอสเตอร์ธรรมชาติ
3. เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาในการอิมเพิร์กเนตเพรสเซอร์ต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ เพรสเซอร์
4. เพื่อศึกษา และวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการใช้เอสเตอร์เป็นฉนวนหลอดให้กับหม้อแปลง ไฟฟ้าเปรียบเทียบกับน้ำมันหม้อแปลง

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

การทดสอบคุณสมบัติความเป็นฉนวนของ ฉนวนหลอด และฉนวนแข็งก่อนนำไปใช้งานจริงใน หม้อแปลงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก การเตรียมการทดสอบที่ถูกต้องสอดคล้องกับการเตรียมฉนวนเพื่อ ใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรมจึงมีความจำเป็น เพื่อที่จะได้ผลการทดสอบคุณสมบัติของฉนวนที่ถูกต้อง

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ เป็นการจำลองการเตรียมฉนวนที่ใช้ในภายในหม้อแปลงในโรงงาน หม้อแปลง หรือภาคอุตสาหกรรมจริงๆ เพื่อนำไปศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าเบื้องต้น ข้อมูลผลการวิจัยที่ได้ จะเป็นประโยชน์ต่อภาคอุตสาหกรรมอย่างแท้จริง

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ออกแบบตู้อบสุญญากาศควบคุมอุณหภูมิได้เพื่อใช้ในการเตรียมฉนวนเหลว ฉนวนแข็ง และฉนวนผสม เพื่อใช้ในการทดสอบโดยจะศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง และฉนวนเหลว เอสเตอร์ธรรมชาติ FR3 รวมทั้งเพรสบอร์ดที่อิมเพกต์ด้วยฉนวนเหลวทั้งสองชนิดดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. คุณสมบัติการเกิดเบรกดาวน์ภายใต้แรงดันกระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์ ของน้ำมันหม้อแปลง และเอสเตอร์ธรรมชาติ
2. คุณสมบัติความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์ของเพรสบอร์ดเมื่อได้รับการอิมเพกต์ด้วยน้ำมันหม้อแปลง และเอสเตอร์ธรรมชาติ
3. ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก และค่าเปอร์มิตติวิตีของน้ำมันหม้อแปลง และเอสเตอร์ธรรมชาติ

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถแบ่งเป็นหัวข้อตามลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ค้นหางานวิจัยที่น่าสนใจ
- 2) ศึกษาทฤษฎีและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง
- 3) ออกแบบตู้อบสุญญากาศที่ควบคุมอุณหภูมิได้
- 4) ออกแบบการเตรียมฉนวนในเงื่อนไขต่างๆ
- 5) ทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าแบบต่างๆ ตามมาตรฐาน
- 6) สรุปผลการทดสอบ
- 7) จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐานแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการศึกษา และทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วย การออกแบบตู้อบสุญญากาศที่ควบคุมอุณหภูมิได้เพื่อใช้ในการเตรียมฉนวนเพื่อการทดสอบ สนามไฟฟ้า ฉนวนภายในหม้อแปลง การเปรียบเทียบคุณสมบัติของฉนวนเหลวหม้อแปลง คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนเหลว การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนเหลวและฉนวนแข็ง และทฤษฎีการสร้างและการวัดแรงดันอิมพัลส์

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบ และการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนเหลว

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนเหลว

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยที่ได้ทดสอบมาทั้งหมด

1.7 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ปี พ.ศ. 2539 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง “Electrical Strength of Pressboard Components for Transformer Insulations” [1] โดย Karlernst Gies ใน “IEEE Electrical Insulation Magazine Year: 1996, Volume: 12,” พบว่า เพรสบอร์ดมีส่วนประกอบทางโครงสร้างที่แข็งที่สามารถทนต่อการเบรกดาวน์ได้สูง และสามารถนำไปใช้เป็นฉนวนได้เป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตามก็ขึ้นกับประเภทของการใช้ด้วย

ปี พ.ศ. 2548 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง “Dielectric responses of new and aged transformer pressboard in dry and wet states” [2] โดย J. Gielniak, C. Ekanayake, K. Walczak, A. Graczkowski และ S. Gubanski ใน “Proceedings of 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials, 2005. (ISEIM 2005).” พบว่า ความชื้นเป็นปัจจัยหลักในการทำให้เพรสบอร์ดที่อิมเพร็กเนตมีคุณสมบัติเปลี่ยนไปโดยจะมีคุณสมบัติการเป็นฉนวนที่แยกลงโดยมีสภาพความเป็นตัวนำที่มากขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มมากขึ้น

ปี พ.ศ. 2557 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง “Diffusion Coefficient in Transformer Pressboard Insulation Part 1: Non Impregnated Pressboard” [3] โดย R. Villarroel และคณะ ใน “IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 21, No. 1; February 2014” พบว่า เพรสบอร์ดแห้งที่ไม่ผ่านการอิมเพร็กเนตด้วยน้ำมันพบว่าที่ความหนาเดียวกันการให้ความร้อนที่ 100 องศาเซลเซียสมีค่าสัมประสิทธิ์การอิมตัวของน้ำต่ำกว่าเพรสบอร์ดที่ให้ความร้อนที่ 80, 60 และ 40 องศาเซลเซียสอย่างเห็นได้ชัด และหากดูที่ความหนาของเพรสบอร์ดพบว่าที่อุณหภูมิเดียวกันเพรสบอร์ดที่มีความหนามากกว่ามีสัมประสิทธิ์การอิมตัวของน้ำมากกว่าเมื่อเวลาผ่านไปเท่ากัน

ปี พ.ศ. 2557 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง “Diffusion Coefficient in Transformer Pressboard Insulation Part 2: Mineral Oil impregnated ” [4] โดย R. Villarroel และคณะ ใน “IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 21, No. 1; February 2014” พบว่า อุณหภูมิเป็นปัจจัยหลักในการควบคุมความชื้นในเพรสบอร์ดที่อิมเพร็กเนตด้วยน้ำมันหม้อแปลงหรือน้ำมันแร่ และจากผลการทดสอบพบว่ายังมีอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อความชื้นของเพรสบอร์ดคือความหนาของตัวเพรสบอร์ดโดยเพรสบอร์ดที่มีความหนามากแต่ทำการอิมเพร็กเนตที่อุณหภูมิเดียวกันกับเพรสบอร์ดที่มีความหนาของเนื้อฉนวนน้อยกว่าพบว่าสัมประสิทธิ์การอิมตัวที่มากกว่าจึงทำให้ความชื้นเข้าไปได้ง่ายกว่า และหากพิจารณาด้านอุณหภูมิจะพบว่าเพรสบอร์ดที่ให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าจะมีสัมประสิทธิ์การอิมตัวที่ต่ำกว่าแสดงว่าปริมาณความชื้นที่เข้าไปในเนื้อฉนวนเข้าไปได้น้อยลงเมื่อใช้เวลาเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปี พ.ศ. 2558 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง “Moisture Diffusion Coefficients of Transformer Pressboard Insulation Impregnated with Natural Esters” [5] โดย R. Villarroel และ คณะ ใน “IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 22, No. 1; February 2015” พบว่า เพรสบอร์ดที่อิมเพกเรตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติที่มีความคงทนต่อความชื้นได้ดีกว่าเพรสบอร์ดที่อิมเพกเรตด้วยน้ำมันแร่หรือน้ำมันหม้อแปลงเนื่องจากเอสเทอร์ธรรมชาติมีองค์ประกอบที่เรียกว่า ไฮโดรฟิลิกที่มากกว่าน้ำมันแร่หรือน้ำมันหม้อแปลงจึงทำให้สรุปได้ว่าที่สภาพแวดล้อมเดียวกันเพรสบอร์ดที่อิมเพกเรตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติสามารถทนต่อความชื้นได้ดีกว่าน้ำมันหม้อแปลง

ปี พ.ศ. 2559 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง “The Effect of Thermal Aging on Surface Structure and Mechanical Strength of Oil-impregnated [6] โดย Cao Pei และคณะ ใน “2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis - Xi'an - China,” พบว่า อุณหภูมิมีผลต่อผิวของเพรสบอร์ดในทางด้านกายภาพคือมีสีเข้มเมื่ออุณหภูมิสูง โครงสร้างเซลลูโลสถูกทำลายให้มีเส้นใยที่สั้นลง และโครงสร้างทางด้านความแข็งแรงของกระดาษก็ลดลงเมื่อเพรสบอร์ดได้รับอุณหภูมิสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

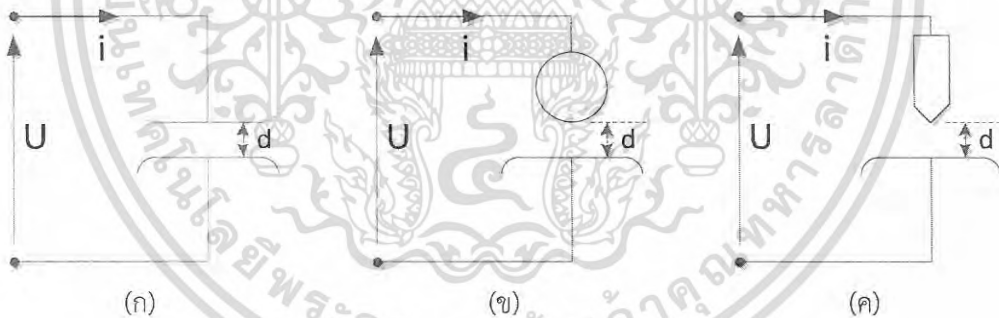
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สนามไฟฟ้า [7]

สนามไฟฟ้าเกิดจากประจุไฟฟ้าซึ่งปริมาณวัดจากแรงที่เกิดขึ้นตากลูกของคูลอมบ์ (Coulomb's law) เมื่อมีประจุ Q_1 และ Q' อยู่ห่างกันระยะ r จะเกิดแรงกระทำต่อกันในทิศทางต่อเชื่อมโยงระหว่างสองประจุนั้น สมมติแรงที่เกิดจาก Q_1 ซึ่งมีตำแหน่งทางเวกเตอร์เทียบกับ Q' เป็น \vec{r} แรงที่เกิดเป็นไปตามสมการ

$$\vec{F}_{Q_1 \rightarrow Q'} = \frac{Q_1 Q' \vec{r}}{4\pi\epsilon r^3} \quad (2.1)$$

เมื่อ \vec{r} คือ เวกเตอร์ตำแหน่งสัมพันธ์ของประจุ Q' เทียบกับ Q_1 ซึ่งมีเวกเตอร์หน่วย $\hat{r} = \vec{r}/r$ ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้าแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ และสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ โดยชนิดไม่สม่ำเสมอแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ แบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และแบบไม่สม่ำเสมอสูง สนามไฟฟ้าจะเป็นแบบใดขึ้นอยู่กับลักษณะของอิเล็กโตรดดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 อิเล็กโตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆกัน

- ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform field)
- ข) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly non-uniform field)
- ค) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly non-uniform field)

2.1.1 สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หมายถึงอิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้าทุกๆ จุดในช่วงระหว่างอิเล็กโตรดเท่ากัน ซึ่งคำนวณได้จากความสัมพันธ์

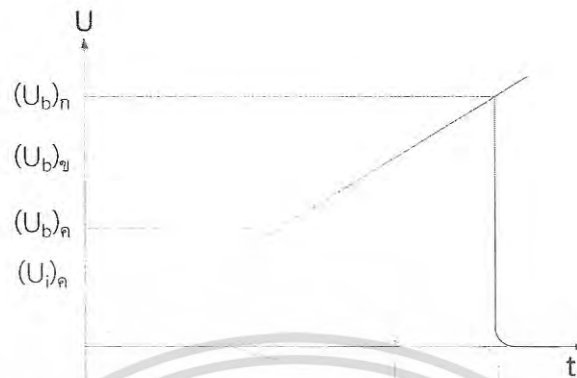
$$E_{\max} = \frac{U}{d} \quad (2.2)$$

- เมื่อ U คือ แรงดันที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโตรด
 d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด
 E คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า ณ จุดใดๆ ระหว่างอิเล็กโตรด
 E_{\max} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

หมายความว่าเมื่อป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ จะเกิดการเบรกดาวนหรือสปาร์กทันที ที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรด (ซึ่งเท่ากันทุกจุด) ถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณ และกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมากทันทีทันใด ค่ากระแสเบรกดาวนนี้นี้จะถูกจำกัดด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของตัวจ่าย และวงจรมายนอกเท่านั้น ซึ่งก่อนจะเบรกดาวนนี้นั้นค่ากระแสจะวัดไม่ได้ดังรูปที่ 2.2 (ก) และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันขณะจะเกิดเบรกดาวนนี้นี้ก็คือ ค่าความคงทนทางไฟฟ้า (dielectric strength) หรือความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของการฉนวน สามารถคำนวณได้จาก

$$E_b = \frac{U_b}{d} \quad (2.3)$$

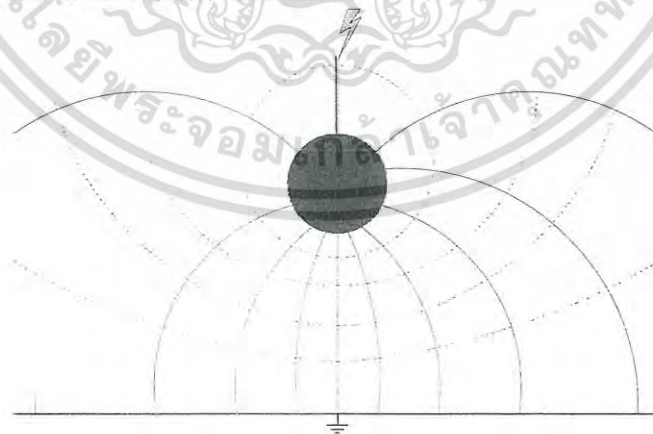
- เมื่อ U_b คือ แรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวนด้วยสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ
 E_b คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน ซึ่งเรียกว่าความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวน
 U_i คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มเกิดเบรกดาวน
 อย่างไรก็ตามค่า E_b นี้ ของไดอิเล็กตริกชนิดหนึ่งก็มีค่าไม่คงตัวเสมอไป เพราะขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ แม้แต่ความหนา หรือระยะห่าง d ที่ไม่เท่ากัน ค่า E_b ก็ไม่เท่ากัน ฉะนั้นในมาตรฐานที่กำหนดค่าความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวน มักจะกำหนดความหนาของไดอิเล็กตริกไว้ด้วยเสมอ



รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ในไดอิเล็กทริกตามลักษณะทางไฟฟ้า
 ในรูป : ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ
 ข) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย
 ค) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง

2.1.2 สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอคือ ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้น ความแตกต่าง ณ จุดต่างๆ จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะของเรขาคณิตของอิเล็กโทรด ที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย



รูปที่ 2.3 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า

————— เส้นสนามไฟฟ้า
 - - - - - เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_{\max} จะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโทรดทรงกลม ซึ่งอาจคำนวณได้จากสมการ

$$E_{\max} = \frac{U}{d \cdot \eta^*} \quad (2.4)$$

เมื่อ η^* คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (field utilization factor) มีนิยามว่า

$$\eta^* = \frac{E_{\text{avg}}}{E_{\max}} \quad 0 < \eta^* \leq 1 \quad (2.5)$$

โดยที่ E_{avg} คือ ค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ U/d

อาจกล่าวได้ว่า η^* คือ ดรรชนีแสดงให้ทราบว่าอิเล็กโทรดนั้น มีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากน้อยเพียงใด และโดยอาศัยแฟกเตอร์สนามไฟฟ้านี้เอง จึงคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ของฉนวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ได้คือ

$$E_b = \frac{U_b}{d \cdot \eta^*} \quad (2.6)$$

และค่าแรงดันเบรกดาวน์ $U_b = E_b \cdot d \cdot \eta^* \quad (2.7)$

แสดงว่า อิเล็กโทรดที่มีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าลดลง ค่าแรงดันเบรกดาวน์ก็จะลดลง สมการนี้ใช้ได้เฉพาะกรณีที่มีอิเล็กโทรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย หรือใช้กับกรณีที่ไม่มีโคโรนา คือ ไม่มีดิสชาร์จนำหน้า (pre-discharge) เกิดก่อนเบรกดาวน์ กล่าวคือ ก่อนเกิดเบรกดาวน์จะไม่ปรากฏว่ามีกระแสไหลระหว่างอิเล็กโทรดเลย และลักษณะสนามไฟฟ้าจะไม่มี การเปลี่ยนแปลง จะเกิดเบรกดาวน์ทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าความคงทน คือ $E_{\max} = E_b$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (highly non uniform field) ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะอยู่บริเวณใกล้กับผิวอิเล็กโทรด ที่มีพื้นที่ผิวน้อยที่สุด เมื่อระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโทรดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังเส้นกราฟความเครียดสนามไฟฟ้ากระจายเปรียบเทียบในรูปที่ 2.4 อิเล็กโทรดแบบ ค นี้ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่สุดจะมีค่าวิกฤตแล้วก็ตาม เบรกดาวน์จะยังไม่เกิดแต่จะเกิดโคโรนา



รูปที่ 2.4 สนามไฟฟ้ากระจายเปรียบเทียบของอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ

บริเวณที่ผิวอิเล็กโทรดเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่สุด ส่วนบริเวณอื่นๆ ที่ห่างออกไปจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าลดลงและโคโรนาไม่เกิด ฉะนั้นในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดจะเกิดดิสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ เรียกว่าดิสชาร์จบางส่วน (partial discharge = PD) ปรากฏการณ์อาจเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง หรือเป็นช่วงๆ จึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรด กระแสนี้จะขึ้นและวัดได้ก่อนเกิดเบรกดาวน์ เรียกว่ากระแสโคโรนา หรือกระแสพรีดิสชาร์จ

การเกิดโคโรนาจะทำให้สนามไฟฟ้าของเรขาคณิตเปลี่ยนไป เพราะมีประจุค้าง (space charge) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะคำนวณจากสมการที่ (2.8) ไม่ได้ อย่างไรก็ตามสมการนี้อาจใช้คำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดได้ เพราะสนามไฟฟ้าของเรขาคณิตยังไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือ

$$E_i = \frac{U_i}{d \cdot \eta^*} \quad (2.8)$$

เมื่อ E_i คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่โคโรนาเริ่มเกิด

U_i คือ แรงดันป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด

จากสมการใช้ได้เฉพาะกรณีที่ไม่มีประจุค้างระหว่างอิเล็กโตรด (free of space charge) คือใช้สำหรับคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้า หรือแรงดันเริ่มต้น (inception voltage, starting voltage, threshold voltage) ซึ่งหมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นในแก๊ป

2.2 ฉนวนภายในหม้อแปลง

ฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 2 ชนิดได้แก่

2.2.1 ฉนวนแข็ง [8]

ฉนวนแข็งนอกจากจะทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าแล้วบางส่วนยังจะต้องทำหน้าที่ยึด หรือรับแรงกลอันเกิดจากน้ำหนักของโครงสร้าง หรือแรงกลไดนามิกส์ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าอีกด้วย โดยฉนวนแข็งที่ใช้หลักๆ ในหม้อแปลงไฟฟ้าคือกระดาษอัดแรง

กระดาษอัดแรงเป็นวัสดุประเภทเซลลูโลสหลายชั้นที่มาจากกระดาษที่ถูกบีบอัดด้วยแรงดันและความร้อน โดยขึ้นรูปเป็นวัสดุแข็งที่มีความหนาแน่นสูง โดยเพอร์สโตร์ถือเป็นพอลิเมอร์อินทรีย์ที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางกลอย่างดี เนื่องจากเซลลูโลสเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีการซ้อนทับกันไปมาทำให้มีลักษณะเป็นรูพรุน จึงทำให้มีความไวต่อความชื้น และอุณหภูมิ โดยไฟเบอร์ (Fiber) แต่ละเส้นในเซลลูโลสประกอบด้วยพอลิเมอร์เรียงตัวขนานกันโดยพอลิเมอร์ แต่ละเส้นที่ขนานกันจะยึดติดกันด้วยไฮโดรเจน เมื่อโมเลกุลของน้ำสัมผัสกับผิวหน้าของ เซลลูโลสไฟเบอร์ จะทำให้เกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างอะตอมออกซิเจนกับไฮโดรเจนทำให้กระดาษฉนวนสามารถดูดซับความชื้นได้ดี



รูปที่ 2.5 กระดาษอัดแรง

2.2.2 ฉนวนเหลว [9]

ฉนวนเหลวที่อยู่ในหม้อแปลงจะมีหน้าที่หลักในการเป็นฉนวนของหม้อแปลงและถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงออกสู่สิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ น้ำมันที่ใช้ในหม้อแปลงยังช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาเคมีภายในหม้อแปลง ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังส่วนใหญ่ใช้น้ำมันแร่เป็นฉนวนเหลวภายในหม้อแปลง นอกจากนี้ยังมีฉนวนเหลวทางเลือกอื่นที่สามารถนำมาใช้ในหม้อแปลงดังแสดงตารางที่ 2.1

ตาราง 2.1 การใช้งานของฉนวนเหลวแต่ละชนิดที่ใช้ในหม้อแปลง

	Mineral oil	Silicone fluid	Synthetic ester	Vegetable oils (natural ester)
Power transformers	A	X	B	B
Traction transformers	A	A	A	X
Distribution transformers	A	A	A	A
Instrument transformers	A	X	X	X

(key : A=นิยมใช้ , B=ใช้แต่ไม่นิยม , C=ปัจจุบันไม่ใช่แล้ว)

ฉนวนเหลวที่ใช้ในหม้อแปลงมีหลายประเภท แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงน้ำมันแร่ และ เอสเตอร์ธรรมชาติดังนี้

1) น้ำมันแร่

น้ำมันแร่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกิดจากการกลั่นน้ำมันดิบ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่มีประโยชน์และต้นทุนต่ำ น้ำมันแร่เป็นฉนวนเหลวที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมหม้อแปลงและปัจจุบันฉนวนเหลวใช้มากที่สุดสำหรับหม้อแปลงขนาดกลางและหม้อแปลงขนาดใหญ่

น้ำมันแร่เป็นของเหลวโปร่งแสงและไม่มีสี ประเภทต่างๆของไฮโดรคาร์บอนของน้ำมันแร่ ได้แก่

- แอลเคนแบบโซ่ตรง
- แอลเคนแบบกิ่ง
- พาราฟิน
- อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

น้ำมันแร่ที่ใช้สำหรับหม้อแปลง มีอยู่ 2 ประเภทหลักๆ ซึ่งมาจากกระบวนการกลั่นน้ำมันที่แตกต่างกัน

น้ำมันพาราฟิน ที่ได้มาจากน้ำมันดิบที่มีปริมาณของ n-paraffins มากกว่าแนฟทาโนค โดยเกิดขึ้นตามธรรมชาติ น้ำมันพาราฟิน มีจุดไหลเทค่อนข้างสูงและอาจต้องเติมสารบางอย่างเพื่อลดจุดไหลเท

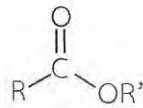
น้ำมันแนฟทา ที่ได้มาจากน้ำมันดิบที่มีปริมาณของ n-paraffins ต่ำมาก(หรือไม่มี) น้ำมันแนฟทามีจุดไหลเทต่ำโดยไม่ต้องเติมสารใดๆเพื่อลดจุดไหลเท และน้ำมันแนฟทามีลักษณะขี้มากกว่าน้ำมันพาราฟิน

น้ำมันแร่ใหม่ที่มีการผลิตเพื่อให้สอดคล้องกับ IEC 60296 [10]หรือ ASTM D3487[11] เพราะ น้ำมันแร่ถูกใช้เป็นระยะเวลาที่ยาวนาน ฐานข้อมูลขนาดใหญ่ของข้อมูลที่สามารถตีความหมายของการเปลี่ยนแปลงลักษณะของมันและทำให้คาดการณ์ความผิดปกติของหม้อแปลง IEC 60422[12] เป็นเครื่องมือที่ดีในการประเมินคุณภาพของฉนวนน้ำมันที่ใช้ในหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) เอสเตอร์

“เอสเตอร์” มาจากการเชื่อมโยงทางเคมีซึ่งเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของแอลกอฮอล์และ กรดไขมัน การเชื่อมโยงโมเลกุลระหว่างเอสเตอร์จะแสดงดังรูป 2.6

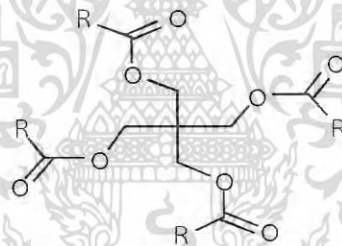


รูปที่ 2.6 การเชื่อมโยงเอสเตอร์

ในรูปที่ 2.6 O แทน ออกซิเจน, C แทน คาร์บอน, R และ R' แทนไฮโดรคาร์บอน ซึ่งอาจจะเหมือนกันหรือต่างกัน เส้นเดี่ยวแสดงให้เห็นถึงพันธะเดี่ยวและสองเส้นหมายถึงพันธะคู่

- เอสเตอร์ธรรมชาติ

เอสเตอร์ธรรมชาติผลิตจากน้ำมันที่ได้จากพืชโดยโครงสร้างของเอสเตอร์ธรรมชาติจะแสดงดังรูป 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของเอสเตอร์ธรรมชาติ

โครงสร้างของเอสเตอร์ธรรมชาติจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างพันธะของกลีเซอรอลซึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติและ 3 กลุ่มกรดไขมันซึ่งเป็นพันธะต่อกัน กรดไขมันเหล่านี้อาจจะเหมือนกันหรือต่างกัน ผลผลิตเหล่านี้ทำให้เอสเตอร์เป็นส่วนหนึ่งของวงจรการเจริญเติบโตโดยธรรมชาติ

เอสเตอร์ธรรมชาติมีข้อได้เปรียบคือจุดติดไฟสูงและการย่อยสลายที่ดี แต่เอสเตอร์ธรรมชาติทุกประเภทไม่เสถียรภาพต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันเหมือนฉนวนเหลวประเภทอื่นๆ

แม้ว่าเอสเตอร์ธรรมชาติสามารถผลิตได้จากน้ำมันพืชหลายชนิด แต่เอสเตอร์ธรรมชาติสำหรับการใช้งานเกี่ยวกับไฟฟ้ามีส่วนใหญ่มาจากน้ำมันถั่วเหลืองและน้ำมันดอกทานตะวัน

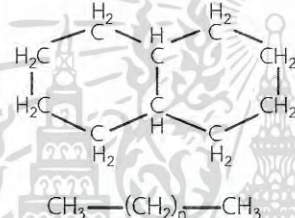

เนื่องจากปัจจัย เช่นความพร้อม, ต้นทุน, ที่มีคุณลักษณะที่ต้องการมากกว่าน้ำมันพืชอื่นๆ เช่น น้ำมันมะพร้าวได้ถูกนำมาใช้งาน แต่ไม่กว้างขวางนัก ในสหรัฐอเมริกา มีสองมาตรฐานที่ใช้กับเอสเตอร์ธรรมชาติคือ IEEE c57.147-2008 [13] และ ASTM D6871-O3 (2008) [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของฉนวนเหลวหม้อแปลง [9]

ภาพรวมของคุณสมบัติของประเภทที่แตกต่างกันของฉนวนเหลว ดังแสดงในตารางที่ 2.2 และคุณสมบัติทางฟิสิกส์และไฟฟ้าของฉนวนเหลวชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 แสดงภาพรวมคุณสมบัติของฉนวนเหลวชนิดน้ำมันแร่และเอสเทอร์ธรรมชาติ

Name	Mineral oil	Natural ester
Type	Refined crude oil based distillate	Refined vegetable oil
Principal component	Complex mixture of hydrocarbons	Plant based natural ester
Chemical structure		
Source	Purified from oil	Extracted from crops
Biodegradability	Slow to biodegrade	Readily biodegradable
Oxidation stability	Good stability	Generally oxidation susceptible
Water saturation at ambient (ppm)	55	1100
Flash point, °C	160 – 170	>300
Fire point, °C	170 – 180	>350
Fire Classification	O	K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

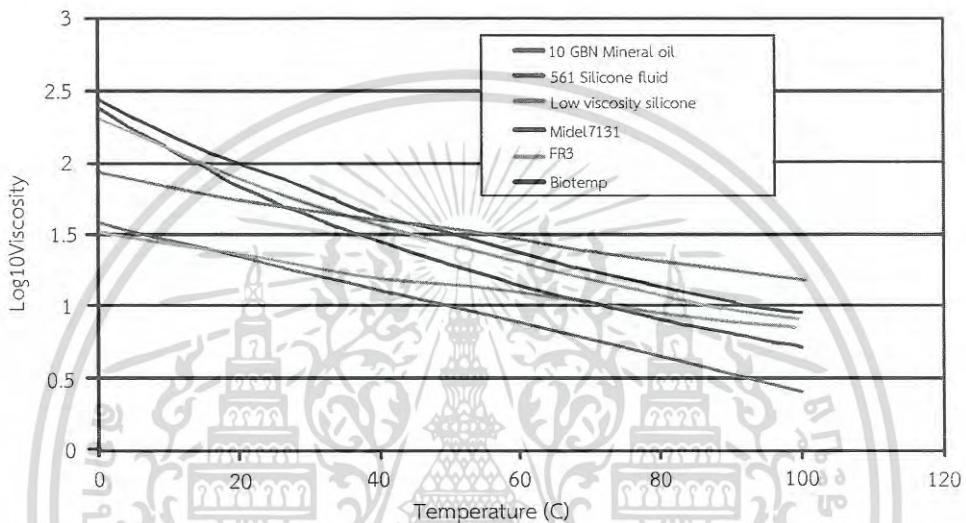
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และไฟฟ้าของฉนวนเหลวชนิดน้ำมันแร่และเอสเทอร์

		mineral oil	Natural ester	
		Nynas	Cooper Industries	ABB
General properties	Units	Mineral oil	FR3	BIOTEMP
Density at 20°C	g/ml	0.88	0.92	0.91
Specific heat at 20°C	J/kg K	1860	1883	1943
Thermal conductivity at 20°C	W/m K	0.126	0.167	0.16
Kinematic viscosity at 0°C	mm ² /s	37.5	207	276
Kinematic viscosity at 20°C	mm ² /s	22	78	97
Kinematic viscosity at 40°C	mm ² /s	9	36	42
Kinematic viscosity at 100°C	mm ² /s	2.6	8	9
Pour point	°C	-50	-21	-19 to -20
Expansion coefficient	°C	0.00075	0.00074	0.00068
Flash point	°C	148	330	330
Fire point	°C	170	360	360
Autoignition temperature	°C	280		
Fire hazard classification to IEC 61100		O	K2	K2
Biodegradability at 28 days				
- OECD 301F	%	N/A	>99	
- OECD 301D	%	<10		
- OECD 301B	%		95-100	readily biodegradable
Chemical Properties				
Neutralisation value	mgKOH/g	<0.01	0.022	<0.03
Net calorific value	MJ/kg	46		36.9
Electrical Properties				
Breakdown Strength IEC 60156 2.5mm	kV	>70	56 (ATSM 1816)	>75
Dielectric dissipation factor at 90°C		<0.02	0.005	0.014
Permittivity at 20°C		2.2	3.2	3.2

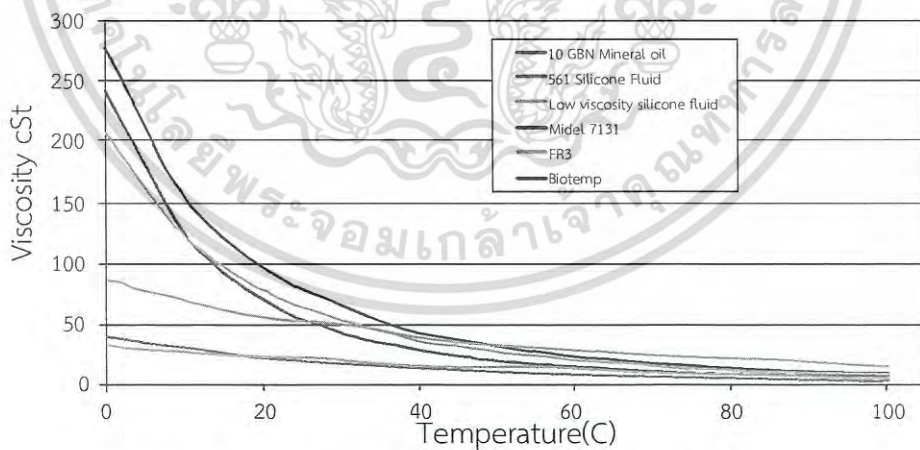
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 การเปรียบเทียบความหนืด

ความหนืดของฉนวนเหลวเป็นหนึ่งในตัวแปรสำคัญในการกำหนดความสามารถในการระบายความร้อนของฉนวนเหลวจากมุมมองของการออกแบบหม้อแปลง กราฟต่อไปนี้แสดงทั้งการพล็อตแบบล็อกการิทึมดังรูปที่ 2.8 และแบบเชิงเส้นของความหนืดดังรูปที่ 2.9 เมื่อเทียบกับอุณหภูมิของฉนวนเหลวหม้อแปลงที่ใช้กันโดยทั่วไป



รูปที่ 2.8 กราฟล็อกการิทึม (ความหนืด) กับ อุณหภูมิ



รูปที่ 2.9 การเปรียบเทียบความหนืด กับ อุณหภูมิที่แปรผัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.8 และ 2.9 ก็เห็นได้ว่ายกเว้นซิลิโคนเหลวความหนืดต่ำ ส่วนฉนวนเหลวทางเลือกที่เหลือทั้งหมดมีความหนืดมากกว่าน้ำมันแร่ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง แต่ความแตกต่างลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ความหนืดของของเหลวแสดงให้เห็นถึงความต้านทานต่อการไหลเพราะ ฉนวนเหลวยังทำหน้าที่ระบายความร้อน ความหนืดสูงอาจชะลอการไหลของฉนวนน้ำมันในร่องน้ำมันในตัวหม้อแปลงและการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการทำงานของหม้อแปลง ที่อุณหภูมิมากกว่า 80°C อัตราการไหลเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณา ซึ่งที่อุณหภูมิดังกล่าวทำให้การย่อยสลายของเซลลูโลสกลายเป็นปัญหา และยังทำให้เซลลูโลสมีความหนืดสูงขึ้น

2.3.2 การเปรียบเทียบการทนความชื้น

น้ำเป็นโมเลกุลที่มีขั้วมากและขั้วโมเลกุลมีแนวโน้มที่จะดึงดูดขั้วโมเลกุลอื่นๆ ในบริบทนี้คำว่า "ขั้ว" หมายถึงขอบเขตของสารที่มีความดึงดูดแตกต่างกันเช่นขั้วของแม่เหล็ก

น้ำมันแร่ไม่มีขั้วและน้ำมันซิลิโคนมีขั้วมากกว่าเล็กน้อย พันธะของเอสเทอร์ทั้งเอสเทอร์ธรรมชาติและเอสเทอร์สังเคราะห์ทำให้ฉนวนเหลวเหล่านี้มีขั้ว และเหมือนแม่เหล็กเล็กๆ พันธะของเอสเทอร์มีความสามารถที่จะดึงดูดโมเลกุลของน้ำ ในทางกลับกันน้ำมันแร่และน้ำมันซิลิโคนจะไม่ดึงดูดโมเลกุลของน้ำ เอสเทอร์ธรรมชาติมี 3 พันธะที่เชื่อมโยงต่อโมเลกุล ในขณะที่เอสเทอร์สังเคราะห์อาจมี 2-4 พันธะ เมื่อเราพิจารณาปริมาณน้ำที่สามารถละลายในฉนวนน้ำมันเหล่านี้ จะมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด

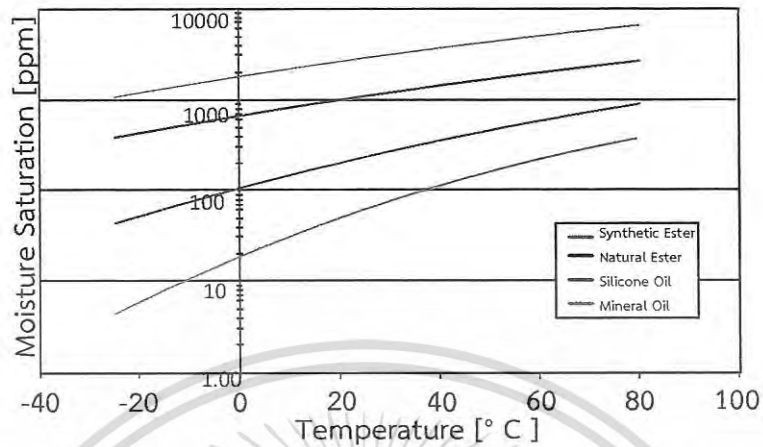
2.3.3 ความสามารถในการละลายของน้ำในฉนวนน้ำมัน

ในตารางที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงการละลายของน้ำในฉนวนน้ำมันที่ใช้ในหม้อแปลงที่อุณหภูมิห้อง นั่นคือปริมาณของความชื้นซึ่งฉนวนน้ำมันสามารถกักเก็บได้โดยที่ยังไม่เกิดน้ำขึ้น

ตารางที่ 2.4 การละลายของน้ำในฉนวนน้ำมัน

	Ester linkages	Approx. water saturation at 23° C (ppm)
Mineral oil	0	55
Silicone oil	0	220
Natural ester	3	1100
Synthetic ester	4	2600

การละลายของน้ำในฉนวนน้ำมันทั้งหมดเหล่านี้เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ รูปที่ 2.10 แสดงการพล็อตลอการิทึมของการละลายน้ำกับอุณหภูมิสำหรับฉนวนน้ำมันที่ใช้ในหม้อแปลงที่ศึกษาเห็นได้ชัดว่าเอสเทอร์ซึ่งมีขั้วมากขึ้นสามารถที่จะดูดซับน้ำมากขึ้นในช่วงอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.10 เปรียบเทียบการอิ่มตัวความชื้นกับอุณหภูมิ

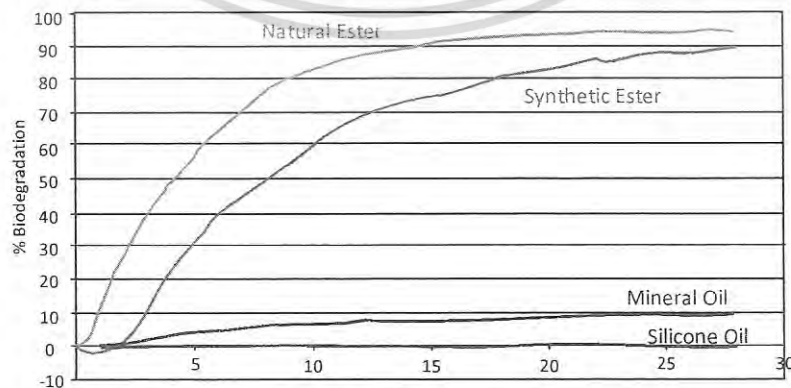
2.3.4 ความปลอดภัยด้านสิ่งแวดล้อม

ความปลอดภัยด้านสิ่งแวดล้อมจะถูกกำหนดด้วย 2 เกณฑ์ขั้นพื้นฐานคือการย่อยสลายทางชีวภาพและความเป็นพิษต่ำ ในฉนวนเหลวซึ่งมีอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพได้อย่างรวดเร็วและสามารถแสดงให้เห็นว่ามีพิษต่ำจะถูกจัดประเภทให้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ปัจจัยเหล่านี้มีความสำคัญเมื่อมีการพิจารณาการใช้งานของฉนวนเหลวในพื้นที่เสี่ยงต่อสิ่งแวดล้อมเช่น เส้นทางน้ำให้หลีกเลี่ยงการปนเปื้อนสารพิษ

2.3.5 การย่อยสลายทางชีวภาพ

การย่อยสลายทางชีวภาพสะท้อนให้เห็นถึงการที่ฉนวนเหลวจะถูกย่อยสลายตามธรรมชาติที่เกิดขึ้นโดยจุลินทรีย์ในดินหรือน้ำ เห็นได้ชัดว่าถ้าฉนวนเหลวที่รั่วไหลออกมาสามารถหายไปได้อย่างรวดเร็วตามธรรมชาติโดยไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการทำความสะอาด

ทั้งเอสเทอร์ธรรมชาติและเอสเทอร์สังเคราะห์จะถูกจัดประเภทการย่อยสลายทางชีวภาพได้ในขณะที่น้ำมันแร่และซิลิโคนเหลวมีความสามารถในการย่อยสลายต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การเปรียบเทียบอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทดสอบโดยวิธีการได้รับการยอมรับมาตรฐาน น้ำมันซิลิโคนแทบจะย่อยสลายไม่ได้ แต่ถ้านำน้ำมันซิลิโคนมาผสมกับสารเคมีจะทำให้กระบวนการย่อยสลายเกิดได้เร็วขึ้น

ซึ่งหมายความว่าน้ำมันซิลิโคนในสภาพแวดล้อมมีความซับซ้อนการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยตัวเองมากกว่า อย่างไรก็ตามปัจจัยที่แตกต่างกันซึ่งทำให้ซิลิโคนเสื่อมสภาพในธรรมชาติแสดงให้เห็นว่าควรได้รับการพิจารณามากกว่าฉนวนเหลวที่สามารถย่อยสลายเองได้ตามธรรมชาติ

2.3.6 การเกิดออกซิเดชันของฉนวนเหลว

ความกังวลของผู้ใช้ของเหลวทางเลือกคือการเกิดออกซิเดชันของฉนวนเหลวในหม้อแปลง ความสัมพันธ์ของความเสถียรภาพของการเกิดออกซิเดชันเรียงจากมากไปน้อยตามลำดับดังนี้ น้ำมันซิลิโคน, เอสเตอร์สังเคราะห์, น้ำมันแร่ และเอสเตอร์ธรรมชาติ

น้ำมันซิลิโคน ตามข้อมูลผลิตภัณฑ์ของผู้ผลิต ซิลิโคนเฉื่อยต่อปฏิกิริยาทางเคมีและมีความต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่ดี มีสองวิธีสำหรับการย่อยสลายฉนวนเหลวซิลิโคนคือการเบรกดาวนทางความร้อน และออกซิเดชัน ออกซิเดชันของฉนวนเหลวซิลิโคนจะเกิดขึ้นช้ามากที่อุณหภูมิสูงกว่า 175°C (342°F) เมื่อเกิดการรวมตัวกับออกซิเจนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของโพลิเมอร์ของฉนวนเหลวซิลิโคนค่อยๆ เพิ่มความหนืดจนกระทั่งเกิดขึ้นเป็นเจล กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นโดยปราศจากการก่อตัวของกรดหรือกากตะกอน นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติฉนวนของโมเลกุลซิลิโคนที่เป็นห่วงโซ่ยาวที่มีความคล้ายคลึงกับคุณสมบัติฉนวนของฉนวนเหลวซิลิโคนใหม่

การเบรกดาวนทางความร้อนของฉนวนเหลวซิลิโคนเริ่มต้นที่อุณหภูมิมากกว่า 230°C (450°F) ที่อุณหภูมิเหล่านี้โซ่โพลิเมอร์ยาวจะเริ่มลดลงโดยที่ระเหยเป็นไอได้รวดเร็วมากกว่าวัสดุซิลิโคน

ในกรณีของเอสเตอร์สังเคราะห์การเกิดออกซิเดชันจะขึ้นอยู่กับกรดอิมิดัวและ pentaerythritol รวมตัวกับออกซิเจนแต่จะเกิดช้ามากที่อุณหภูมิสูงกว่า 125°C การออกซิเดชันของเอสเตอร์สังเคราะห์จะไม่ทำให้เกิดกากตะกอนแต่จะเกิดกรดอินทรีย์

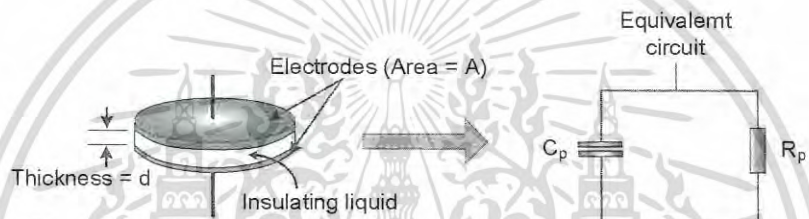
ในกรณีของน้ำมันแร่ น้ำมันแร่เริ่มมีการระเหยและรวมตัวกับออกซิเจนที่อุณหภูมิสูงกว่า 105°C ผลของการเกิดออกซิเดชันทำให้เกิดสารมากมายซึ่งรวมถึงกรดอินทรีย์และกากตะกอน ผลิตภัณฑ์เหล่านี้โดยอาจทำให้เกิดปัญหาในหม้อแปลงไฟฟ้าโดยทำให้คุณสมบัติเป็นฉนวนลดลง และเกิดการกัดกร่อนโลหะ

ในกรณีเอสเตอร์ธรรมชาติส่วนใหญ่มีความไวต่อการเกิดออกซิเดชันเพราะโครงสร้างทางเคมีเอสเตอร์ธรรมชาติมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นกลีเซอรอลที่ติดกับ 3 กลุ่มกรดไขมัน

2.4 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนเหลว

2.4.1 เพอร์มิตติวิตี

เพอร์มิตติวิตี (ϵ) เป็นคุณสมบัติของฉนวนเหลวที่บอกให้ทราบว่าฉนวนเหลวดังกล่าวจะมีค่าคาปาซิแตนซ์เป็นกี่เท่าของฉนวนสูญญากาศเป็นค่าที่มีความสำคัญเนื่องจากสามารถเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของสนามไฟฟ้าภายนอก อุณหภูมิของฉนวนเหลว ความดัน การเรียงตัวของโมเลกุล ส่วนผสมของฉนวนเหลว และโครงสร้างโมเลกุลของฉนวนเหลว วงจรสมมูลของฉนวนแสดงดังรูปที่ 2.12 โดยที่ C_p แทนคุณสมบัติของฉนวนที่สามารถเก็บประจุและพลังงานไว้ได้ในรูปสนามไฟฟ้า R_p แทนค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในฉนวน



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลของฉนวน

โดยที่

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R_p} + j\omega C_p \tag{2.9}$$

- เมื่อ Y คือ ค่าแอดมิแตนซ์ของวงจรสมมูลของฉนวน (S)
- Z คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรสมมูลของฉนวน (Ω)
- ω คือ ค่าความถี่เชิงมุม (rad/s)

เนื่องจาก

$$\epsilon_r' = \frac{C_p}{C_0} \tag{2.10}$$

- เมื่อ ϵ_r' คือ ค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของวัสดุ
- C_p คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ใช้วัสดุจำเพาะเป็นฉนวน
- C_0 คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ใช้สูญญากาศเป็นฉนวน

(2.11)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$Y = \left(\frac{1}{R_p} + j\omega C_p \right) \times \frac{j\omega C_0}{j\omega C_0} = j\omega C_0 \underbrace{\left(\frac{C_p}{C_0} - j \frac{1}{\omega R_p C_0} \right)}_{\varepsilon_r}$$

ค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของวัสดุสามารถเขียนอยู่ในรูปจำนวนเชิงซ้อน (Complex relative permittivity) ดังแสดงในสมการที่ (2.12)

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' = \left(\frac{C_p}{C_0} - j \frac{1}{\omega R_p C_0} \right) \quad (2.12)$$

เมื่อ ε_r' คือ ส่วนจริงของค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์เชิงซ้อน เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฉนวน มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถของฉนวนในการเก็บพลังงานในรูปของสนามไฟฟ้า

ε_r'' คือ ส่วนจินตรูปของค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์เชิงซ้อน เป็นค่าที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก

เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ใช้สูญญากาศเป็นฉนวน $C_0 = \frac{\varepsilon_0 A}{d}$

เมื่อ ε_0 คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสูญญากาศประมาณ $\frac{1}{36\pi} \times 10^{-9}$ F/m

A คือ พื้นที่หน้าตัดแผ่นตัวนำ

d คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ

ดังนั้น จะได้

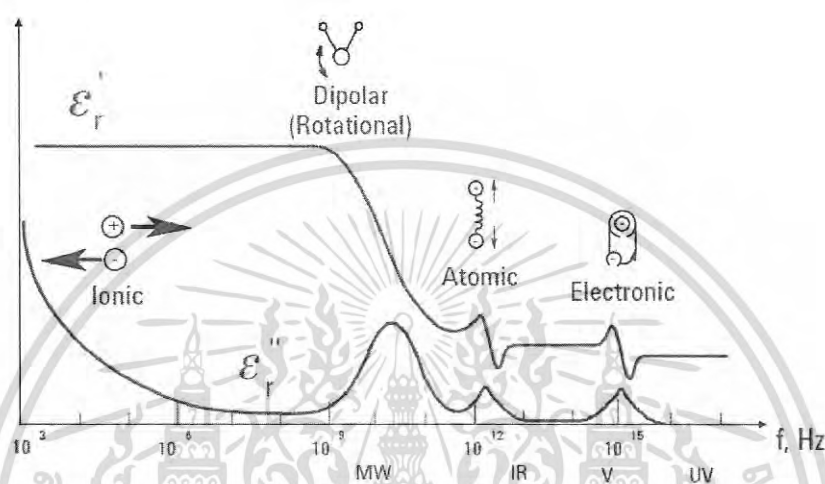
$$\varepsilon_r' = \frac{C_p d}{\varepsilon_0 A} \quad (2.13)$$

$$\varepsilon_r'' = \frac{d}{\omega R_p \varepsilon_0 A} \quad (2.14)$$

ค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของวัสดุ ε_r ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะโพลาไรเซชัน (Polarization characteristic) ของฉนวนเหลวหรือวัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric material) ที่ได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าภายนอก แสดงดังรูปที่ 2.13 กระบวนการโพลาไรเซชันมีหลายรูปแบบกระบวนการโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นและมีความเปลี่ยนแปลงทำให้ค่า ε_r' เปลี่ยนแปลง หรือความสามารถของฉนวนในการเก็บพลังงานในรูปของสนามไฟฟ้าจะลดลงหรือเพิ่มขึ้นตามค่า ε_r' ที่ลดลงหรือเพิ่มขึ้นเช่นกันในขณะที่แฟกเตอร์ความสูญเสีย (loss factor; ε_r'') จะเพิ่มขึ้นถึงค่ายอดที่ความถี่วิกฤต (critical frequency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และต่อมาจะลดลง ขนาดของค่าเปอร์มิตติวิตีของวัสดุและความถี่คutoffของฉนวนแต่ละชนิดจะมีคุณลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกัน[20]

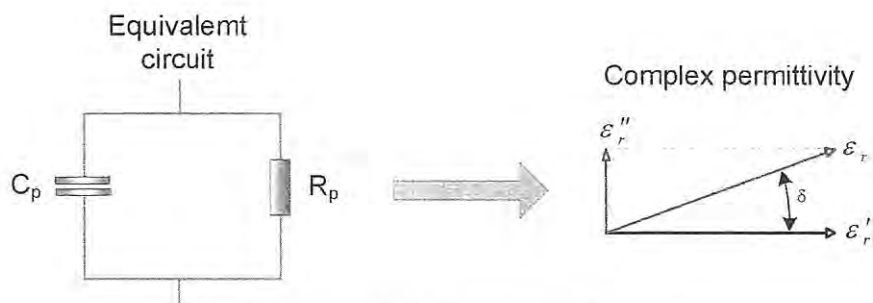


รูปที่ 2.13 คุณลักษณะโพลาริเซชันของฉนวน

การเกิดรีโซแนนซ์ของกระบวนการโพลาริเซชันโดยทั่วไปแล้วจะสัมพันธ์กับ electronic polarization และ atomic polarization ส่วนผลการคลายตัวของกระบวนการโพลาริเซชัน (relaxation effect) จะสัมพันธ์กับ orientation polarization

2.4.2 แฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก

การใช้งานฉนวนในระบบไฟฟ้ากำลังนั้น ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่จะต้องพิจารณา ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกจะเป็นดัชนีชี้วัดตัวหนึ่งของอายุการใช้งานฉนวนโดยพิจารณาจากค่าเปอร์มิตติวิตีเชิงซ้อนของไดอิเล็กตริก สามารถแสดงเป็นเวกเตอร์ไดอะแกรมอย่างง่ายดังรูปที่ 2.14 กล่าวคือแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกคือสัดส่วนของพลังงานสูญเสียในไดอิเล็กตริก (ϵ'') ต่อพลังงานที่ถูกเก็บในรูปของสนามไฟฟ้า (ϵ') ดังสมการที่ 2.15



รูปที่ 2.14 เปรอริมิตติวิตีเชิงซ้อนของไดอิเล็กตริก

$$\tan \delta = \text{Dissipation factor} = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} = \frac{1}{\omega C_p R_p} \quad (2.15)$$

2.4.3 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก

ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน (Dielectric strength) เป็นตัวชี้บอกให้ทราบว่าไดอิเล็กตริกสามารถทนต่อแรงดันได้มากหรือน้อยเพียงใด กำหนดด้วยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่จะทำให้ไดอิเล็กตริกเบรกดาวน์ โดยการป้อนแรงดันให้กับไดอิเล็กตริกจากค่าแรงดันต่ำเพิ่มขึ้นจนเกิดเบรกดาวน์ ค่าความคงทนต่อแรงดันของไดอิเล็กตริกขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมี และทางฟิสิกส์ สารประเภทที่มีโครงสร้างเป็นผลึกจะเกิดเบรกดาวน์ตามแนวที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมน้อยที่สุด ซึ่งจะสามารถสังเกตเห็นร่องรอยของการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนจะไม่เป็นเส้นตรง โดยปกติไดอิเล็กตริกที่เป็นฉนวนแข็งจะทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ได้สูงกว่าไดอิเล็กตริกฉนวนเหลว การเบรกดาวน์ในฉนวนเหลวคุณสมบัติการเป็นฉนวนจะกลับสู่รูปปกติได้หลังจากเบรกดาวน์ผ่านไปแล้ว แต่ในฉนวนแข็งที่เกิดเบรกดาวน์แล้วคุณสมบัติการเป็นฉนวนจะเสียไปใช้งานเพื่อการฉนวนไม่ได้อีก โดยที่ฉนวนเหลวหรือฉนวนแข็งจะมีค่าแรงดันเบรกดาวน์ต่ำถ้าหากมีสิ่งเจือปน

2.5 การเกิดเบรกดาวนในฉนวนเหลว [15]

กลไกในการเกิดเบรกดาวนในฉนวนเหลว แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.5.1 การเกิดเบรกดาวนในฉนวนเหลวบริสุทธิ์

กลไกการเกิดเบรกดาวนในฉนวนเหลวบริสุทธิ์มีหลักการเดียวกับกรณีของฉนวนแก๊สที่เกิดจากอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ โดยเกิดจากการชนกันของอิเล็กตรอนกับอนุภาคในสนามไฟฟ้าอิเล็กตรอนเริ่มต้นที่ออกจากแคโทดเนื่องจากผลของสนามไฟฟ้า(Field emission) หรือผลของความร้อน(Thermionic emission) มีรายงานผลการศึกษาการนำไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดเกิดจากการปล่อยอิเล็กตรอนจากแคโทดโดยสนามไฟฟ้ามากกว่าที่จะเป็นการปล่อยอิเล็กตรอนต่อแคโทดด้วยความร้อน การเกิดเบรกดาวนน่าจะเกิดจากการที่ไอออนบวกของอนุภาคเจือปนเคลื่อนที่เข้าสู่แคโทด ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในบริเวณใกล้ผิวแคโทดเพิ่มสูงขึ้นเพียงพอที่อิเล็กตรอนสามารถหลุดออกจากผิวแคโทดได้ อิเล็กตรอนอิสระที่หลุดออกมาเหล่านี้ จะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรด ทำให้เกิดการเคลื่อนที่โดยมีทิศทางเข้าสู่ขั้วแอโนดระหว่างทางจะชนกับโมเลกุลของฉนวนเหลว ทำให้พลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้าสูญเสียไปกับการชน ในกระบวนการนี้จะมีอิเล็กตรอนบางตัวที่สูญเสียพลังงานไปกับการชนต่ำกว่าพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้าถ้าอิเล็กตรอนเหล่านี้ถูกเร่งจนมีพลังงานสูงพอที่จะชนกับโมเลกุลแล้วทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนและก่อให้เกิดอะวาลานซ์ ฉนวนเหลวก็จะเกิดการเบรกดาวน

2.5.2 การเกิดเบรกดาวนในฉนวนเหลวเชิงการค้ำ

การเกิดเบรกดาวนในฉนวนเหลวเชิงการค้ำ อาจเกิดได้จากสาเหตุดังต่อไปนี้

1) การเกิดเบรกดาวนเนื่องจากอนุภาคเจือปนของแข็งสิ่งเจือปนของแข็งที่ปะปนอยู่ในฉนวนเหลวอาจเป็นอนุภาคตัวนำไฟเบอร์หรือฝุ่นละออง ภายใต้สนามไฟฟ้าอนุภาคเจือปนเหล่านี้จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วทางไฟฟ้าขึ้นมา ถ้ากำหนดให้อนุภาคฉนวนแข็งมีรูปร่างทรงกลมที่รัศมี r_p และมีค่าเปอร์มิตติวิตี ϵ_p ฉนวนเหลวมีค่าเปอร์มิตติวิตี ϵ_{liq} จะเกิดแรงทางไฟฟ้า F_e กระทำต่ออนุภาคโพลาริไซด์ ดังสมการต่อไปนี้

$$F_e = \epsilon_{liq} r_p^3 \frac{\epsilon_p - \epsilon_{liq}}{\epsilon_p + 2\epsilon_{liq}} E(\text{grad}E) \quad (2.16)$$

จากสมการจะพบว่าแรงที่กระทำบนอนุภาคจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าเปอร์มิตติวิตี ของอนุภาค

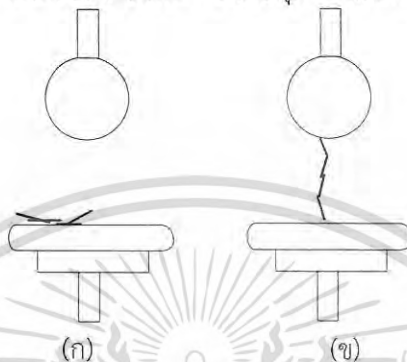
ถ้า $\epsilon_p > \epsilon_{liq}$ แรงที่เกิดขึ้นจะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

ถ้า $\epsilon_p < \epsilon_{liq}$ แรงที่เกิดขึ้นจะกระทำต่ออนุภาคในทิศทางตรงกันข้าม กล่าวคือจะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำ ในกรณีของอนุภาคตัวนำเจือปนอยู่ภายในฉนวนเหลวเนื่องจากค่าเปอร์มิตติวิตีเข้าใกล้อินฟินิตี แรงที่เกิดขึ้นบนอนุภาคตัวนำ จะมีค่าตามสมการดังต่อไปนี้

$$F_e = F_\infty = r_p^3 E(\text{grad}E) \quad (2.17)$$

ผลของแรงที่กระทำต่ออนุภาคฉนวน หรืออนุภาคตัวนำนั้น จะทำให้เกิดการเรียงตัวกันใหม่ของอนุภาคเจือปนเป็นสะพานเชื่อมต่อระหว่างอิเล็กโตรด ทำให้เกิดการเบรกดาวนขึ้นดังรูป

การจัดเรียงอนุภาคเจือปนจะง่ายหรือยากขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคภายในฉนวนเหลวก่อนที่จะได้รับสนามไฟฟ้า ชนิดอนุภาค และความหนืดของฉนวนเหลว เป็นต้น



รูปที่ 2.15 การเรียงตัวของอนุภาคไฟเบอร์ระหว่างช่องว่าง (gap) ภายใต้แรงดันสูง

- (ก) อนุภาคไฟเบอร์ก่อนทำจะมีการป้อนแรงดัน
 (ข) การจัดเรียงตัวเชื่อมต่อระหว่างอิเล็กโตรดของอนุภาคไฟเบอร์หลังจากป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรด 1 นาที

2) การเกิดเบรกดาวนเนื่องจากฟองแก๊ส

แก๊สสามารถละลายในฉนวนเหลวได้ในปริมาณมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับสภาวะความดันหรืออุณหภูมิของฟองแก๊สในฉนวนเหลว ฟองแก๊สอาจเกิดจากการที่ฉนวนเสื่อมหรือมีคุณภาพต่ำ หรือขณะเติมฉนวนเหลวในภาชนะบรรจุ อาจเกิดแก๊สเกาะที่ผิวของอิเล็กโตรดที่ขรุขระหรือผิวร่องอิเล็กโตรด หรืออาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีภายในฉนวนเหลว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความดันและการชนของไอออนและอิเล็กตรอน ทำให้ฉนวนเหลวสลายตัวเป็นแก๊สออกมา หรืออาจเกิดจากผลการเกิดดิสชาร์จบางส่วนบริเวณผิวอิเล็กโตรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นเมื่อได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าก็จะขยายตัวยึดตามแนวสนามไฟฟ้าเพื่อลดพลังงานศักย์ในสนามไฟฟ้า การเบรกดาวนจะเกิดเมื่อแรงดันตกคร่อม ความยาวของฟองแก๊สมีค่าเท่ากับค่าต่ำสุดของเส้นโค้งพาเซน เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าของฟองแก๊สมีค่าเท่ากับความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติของแก๊สก็จะเกิดการดิสชาร์จผ่านฟองแก๊สเป็นผลทำให้เกิดการแยกตัวของโมเลกุลของเหลว นำไปสู่การเบรกดาวนได้นอกจากสาเหตุที่กล่าวแล้วฟองแก๊สยังสามารถเกิดที่บริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเช่นปลายแหลมของอิเล็กโตรดเนื่องจากบริเวณนั้นจะมีความร้อนสูง ทำให้ฉนวนกลายเป็นไอ และเกิดการดิสชาร์จขึ้นและนำไปสู่การเบรกดาวนในที่สุด

3) การเกิดเบรกดาวน์จากหยดของเหลวเจือปน

ฉนวนเหลวที่มีหยดของเหลวต่างชนิดกันเจือปนอยู่สามารถทำให้เกิดการเบรกดาวน์ได้ เนื่องจากการเปลี่ยนรูปร่างของหยดของเหลวเจือปนโดยการมีการยึดออกตามสนามไฟฟ้า เมื่อของเหลวเกิดการยึดตัว ความเครียดสนามฟ้าในฉนวนเหลวที่ปลายทั้งสองของหยดของเหลวจะมีค่าสูงขึ้น ถ้ามีค่าสูงเกินค่าวิกฤติจะทำให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วน เกิดโพรงแก๊สและนำไปสู่การเบรกดาวน์ในที่สุด

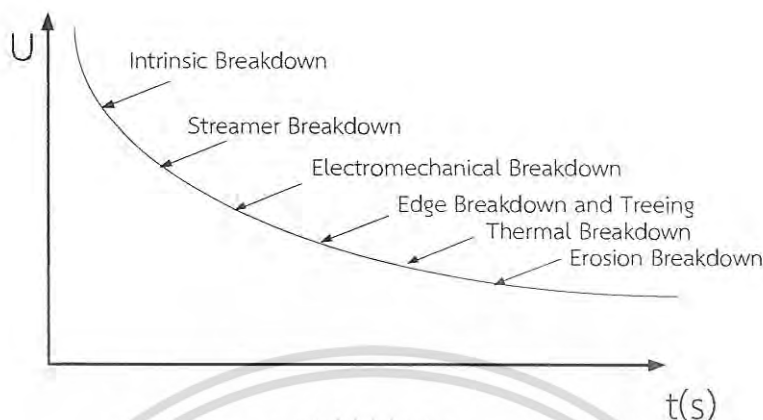
4) การเกิดเบรกดาวน์จากความร้อน

การเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากความร้อน เกิดขึ้นในกรณีที่มีการป้อนแรงดันชนิดพัลส์จากการทดลองวัดพัลส์กระแสในฉนวนเหลวจะพบว่ากระแสมีค่าสูงก่อนเกิดเบรกดาวน์ โดยมีค่าความหนาแน่นกระแสประมาณ 1 A/cm^2 ซึ่งเชื่อว่ามีส่วนกำเนิดจากปลายผิวอิเล็กโตรดขั้วลบหรือแคโทด ทำให้ ฉนวนเหลวบริเวณนั้นมีอุณหภูมิสูงและกลายเป็นไอหรือฟองแก๊ส เมื่อฟองแก๊สยึดตัวจนกระทั่งมีความยาวเกินความยาววิกฤติหรือเกิดโพรงตลอดแนวระยะแก๊ปของอิเล็กโตรดจะเกิดเบรกดาวน์ตามมา

2.6 การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนแข็ง [15]

เกิดการเบรกดาวน์ขึ้นในฉนวนแข็งจะทำให้ฉนวนเสียหายโดยถาวร ซึ่งต่างจากการเบรกดาวน์ในฉนวนเหลวและฉนวนแก๊สที่สามารถคืนสู่สภาพเดิมได้ คุณสมบัติของฉนวนแข็งขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอกหลายอย่าง เช่น อุณหภูมิ, ความชื้น, ระยะเวลาในการทดสอบ, ชนิดของแรงดันที่ป้อน กระแสตรง กระแสสลับ อิมพัลส์ การถ่ายเทประจุภายในช่องว่างเล็กๆที่เกิดขึ้นภายในฉนวนแข็งเนื่องจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วน และปัจจัยอื่นๆอีกหลายประการ กลไกการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนแข็งค่อนข้างซับซ้อนขึ้นอยู่กับเงื่อนไขและกระบวนการป้อนแรงดัน และที่สำคัญขึ้นอยู่กับช่วงเวลาคงอยู่ของแรงดันหรือสนามไฟฟ้าที่ป้อนการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนแข็งอาจแบ่งออกตามช่วงเวลาของแรงดันที่ป้อนและปรากฏการณ์การเบรกดาวน์ได้ คือ

- Intrinsic breakdown
- Streamer breakdown
- Electromechanical breakdown
- Edge breakdown and treeing
- Thermal breakdown
- Erosion breakdown



รูปที่ 2.16 ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์เมื่อป้อนแรงดันให้กับฉนวนแข็งที่ระยะเวลาต่างกัน

2.6.1 การเบรกดาวน์แบบแท้จริง (Intrinsic breakdown)

ในกรณีของฉนวนแข็งที่มีคุณสมบัติบริสุทธิ์และเป็นเนื้อเดียวกัน อุณหภูมิและสภาวะแวดล้อมภายนอกถูกควบคุม เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าให้กับวัสดุทดสอบนี้จะไม่เกิดการดีสชาร์จภายนอก ดังนั้นเมื่อป้อนสนามไฟฟ้าภายใต้ระยะเวลาสั้นๆ ความเครียดจากสนามไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจนขอบเขตบนสุด ซึ่งเรียกว่า “Intrinsic strength” ซึ่ง Intrinsic strength จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและอุณหภูมิเท่านั้น ทฤษฎีที่ใช้ในการเกิด Intrinsic strength นั้นยังไม่มีคำอธิบายที่สมบูรณ์ แต่มีบันทึกการทดลองมากมายสำหรับวัสดุหลายชนิดไว้

การเบรกดาวน์แบบแท้จริงจะเกิดขึ้นสมบูรณ์ภายในเวลา 10^{-8} วินาที ส่วนความเครียดสนามไฟฟ้าที่สามารถทำให้เกิดการเบรกดาวน์แบบแท้จริง ได้สมบูรณ์นั้นควรมากกว่า 10^6 MV/cm ได้มีข้อสันนิษฐานว่าการเกิดเบรกดาวน์แบบแท้จริงจะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนภายในฉนวนมีพลังงานเพียงพอที่จะข้ามช่องแถบพลังงานต้องห้าม (Forbidden energy band) จากแถบวาเลนซ์ (Valence band) สู่อิเล็กตรอนนำ (Conduction band) ได้

2.6.2 การเบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์ (Streamer breakdown)

การเบรกดาวน์นี้คล้ายกับการเบรกดาวน์ในแก๊ส อธิบายได้จากการเกิดไอออนไนเซชัน ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อมีอิเล็กตรอนจำนวนมากพอเรียงตัวทอดต่อเชื่อมระหว่างแคโทดกับแอโนดอิเล็กตรอนที่อยู่ในฉนวนของแข็งจะเคลื่อนที่โดยเริ่มจากขั้วอิเล็กโตรดที่เป็นแคโทดไปยังแอโนด และในระหว่างทางที่เคลื่อนที่ไปนั้น อิเล็กตรอนจะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า ในขณะที่เคลื่อนที่ไป เมื่ออิเล็กตรอนตัวนี้ได้ชนอะตอมอาจทำให้อิเล็กตรอนตัวใหม่หลุดจากวงโคจรของอะตอมตัวที่โดนชนได้ ถ้าพลังงานจากการชนมากกว่าค่าศักย์ไอออนไนซ์ภายในผลึกของแข็งของอะตอมที่ถูกชน กระบวนการนี้จะเกิดซ้ำๆ เป็นทวีคูณ (การเกิดอะวาลานซ์) ในระหว่างที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้นจนเกิดเบรกดาวน์ เมื่อปริมาณอิเล็กตรอนในอะวาลานซ์มีจำนวนถึงค่าวิกฤตในทางปฏิบัติจริง การเกิดอะวาลานซ์จะเกิดเพียงครั้งเดียว แต่การเกิดเบรกดาวน์จะเกิดขึ้นหลายครั้ง การทดลองที่กระทำโดยจ่ายแรงดันอิมพัลส์ให้กับฉนวนแข็งประเภท Plexiglass ที่มีความหนาพอสมควรโดยใช้อิเล็กโตรดแบบปลายแหลมและ

ระนาบ(Point- plane electrode) และจะจ่ายแรงดันทีละครั้ง พบว่าเส้นทางในการเบรกดาวนของฉนวนจะค่อยๆ แดงกึ่งกันไปในลักษณะของรากไม้

2.6.3 การเกิดเบรกดาวนจากแรงทางกลที่เกิดจากไฟฟ้า (Electromechanical breakdown)

เมื่อจ่ายสนามไฟฟ้าในระดับสูงๆ ให้แก่ฉนวนของแข็ง จะทำให้เกิดแรงกดดันกระทำต่อฉนวนแรงกดที่เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างประจุผิว (Surface charge) ซึ่งเมื่อแรงนี้มีค่ามากเกิดค่าความคงทนทางกลของฉนวนจะทำให้ฉนวนเกิดการแตกร้าวได้

2.6.4 การเกิดเบรกดาวนเนื่องจากการดิสชาร์จภายใน (Cavity breakdown)

วัสดุฉนวนที่ใช้งานอยู่โดยทั่วไปจะมีโพรงหรือช่องว่างอยู่ภายในเนื้อฉนวนหรือตรงบริเวณรอยต่อระหว่างฉนวนกับอิเล็กโตรด โดยส่วนมากโพรงนี้จะมีแก๊สหรือของเหลวบรรจุอยู่ ซึ่งมีความคงทนต่อค่าแรงดันเบรกดาวนได้น้อยกว่าของแข็ง นอกจากนี้ค่าความจุไฟฟ้าของสิ่งแปลกปลอมที่อยู่ภายในฉนวนแข็งส่วนมากแล้วจะมีค่าน้อยกว่าฉนวนแข็ง จึงเป็นผลให้ความเครียดสนามไฟฟ้าภายในโพรงมีค่าสูงกว่าเนื้อฉนวน ดังนั้นภายใต้การใช้งานที่ความเครียดสนามไฟฟ้าปกติของฉนวน แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโพรงนี้จะมีค่ามากกว่าแรงดันเบรกดาวนของโพรง ทำให้เกิดการเบรกดาวนภายในโพรงก่อนที่จะนำมาสู่การเบรกดาวนของเนื้อฉนวนต่อไป

การเกิดดิสชาร์จภายในหรือเรียกว่าอิชชาร์จบางส่วนจะทำให้เกิดปรากฏการณ์บางอย่างในลักษณะเดียวกับการเกิดการ treeing ในเนื้อฉนวน คือเมื่อเกิดการเบรกดาวนในโพรงอากาศที่อยู่ภายในเนื้อฉนวนจะมีอิเล็กตรอน และไอออนบวกเกิดขึ้น โดยอิเล็กตรอนและไอออนบวกเหล่านี้จะมีพลังงานอยู่ภายในตัว และเมื่ออิเล็กตรอนหรือไอออนบวกเคลื่อนที่ไปถึงผิวของโพรงช่องว่างก็อาจจะทำลายพันธะทางเคมีของฉนวนที่ผิว อีกทั้งการเกิดดิสชาร์จยังทำให้เกิดความร้อนในโพรงช่องว่าง และเกิดการคาร์บอนซ์ที่ผิวฉนวนในโพรง ทำให้ฉนวนมีการสึกกร่อนไปเนวร่องและหลุมที่เกิดที่ผิวฉนวนภายในโพรงจะทำให้มีการนำกระแสจ่ายขึ้น ดิสชาร์จที่เกิดขึ้นภายในโพรงช่องว่างอาจทำให้คุณสมบัติทางเคมีของฉนวนลดลง การดิสชาร์จภายในโพรงช่องว่างจะนำไปสู่การเบรกดาวนในที่สุด

2.7 ทฤษฎีการสร้างและการวัดแรงดันอิมพัลส์ [7]

แรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันที่มีรูปคลื่นเลียนแบบมาจากแรงดันเกินเสิร์จทรานเซียนต์ที่เกิดจากเหตุภายนอกที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ฟ้าผ่า เรียกว่า แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า และที่เกิดขึ้นจากสาเหตุภายในระบบส่งจ่ายเอง คือเกิดจากการทำงานของสวิตช์ หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ เมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้นในระบบ เรียกว่าแรงดันอิมพัลส์สวิตช์

2.7.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน

แรงดันอิมพัลส์อาจกำหนดด้วยข้อกำหนดต่อไปนี้

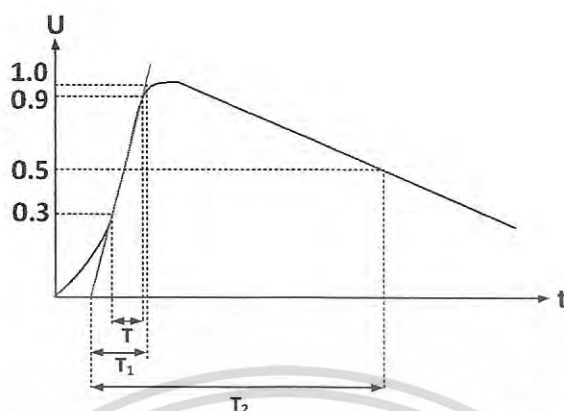
- 1) ขนาดของแรงดัน โดยปกติจะหมายถึงค่ายอดของรูปคลื่นแรงดัน ในกรณีที่มีระลอกซ้อน ที่เกิดจากออสซิลเลชันใกล้ๆ ยอดรูปคลื่น ให้ถือเอาค่าเฉลี่ยจากค่ายอดรูปคลื่นระลอก
- 2) ขั้วของแรงดันอาจเป็นขั้วบวกหรือลบก็ได้ เมื่อเทียบกับดิน
- 3) เวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 หมายถึงช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากค่าศูนย์จนถึงค่ายอด
- 4) เวลาช่วงหลังคลื่น T_2 หมายถึงช่วงเวลาที่ตั้งแต่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านค่ายอดจนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด

รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์อาจแบ่งเป็น

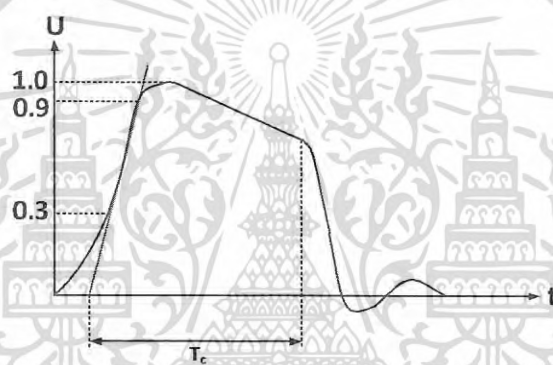
- 1) รูปคลื่นเต็ม (full wave) ซึ่งหมายถึงรูปคลื่นที่มีขนาดเพิ่มขึ้นถึงค่ายอด แล้วค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเป็นศูนย์
- 2) รูปคลื่นตัด (chopped wave) ซึ่งเกิดจากการป้อนแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มเข้าไปที่ วัสดุทดสอบ และการฉนวนของวัสดุทดสอบนั้นทนต่อแรงดันที่ป้อนเข้าไปไม่ได้ จึงเกิดการสปาร์กผ่านเกิดวาบไฟตามผิว หรือเกิดเบรกดาวนเฉาะทะลุ ทำให้เกิดการลัดวงจร ณ จุดนั้น การเกิดคลื่นตัดนี้ อาจจะเกิดขึ้นที่ส่วนหลังคลื่น หรือส่วนหน้าคลื่นก็ได้

ในรูปที่ 2.17 แสดงถึงแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม รูปที่ 2.18 แสดงถึงแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตัดหลังคลื่น และรูปที่ 2.19 แสดงถึงแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตัดหน้าคลื่นตามลำดับ

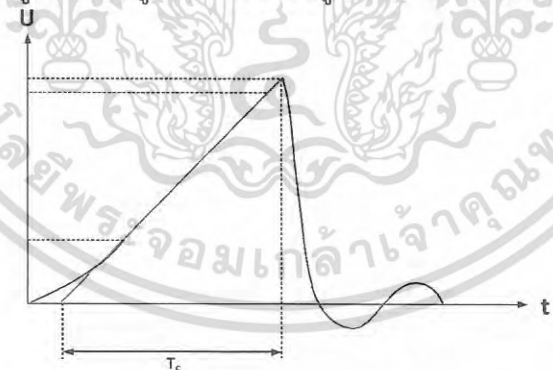
รูปคลื่นตัดมีส่วนกำหนดที่สำคัญ คือ เวลาช่วงคลื่นตัด (chopped time) T_c ถ้าเกิดตัดที่หลังคลื่น ขนาดของแรงดันคือ ค่ายอด (peak) ถ้าเกิดตัดที่หน้าคลื่นขนาดแรงดันก็คือ ค่าที่ได้ ณ จุดตัด ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของรูปคลื่นที่เหลือ



รูปที่ 2.17 รูปแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม



รูปที่ 2.18 รูปแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตัดหลังคลื่น



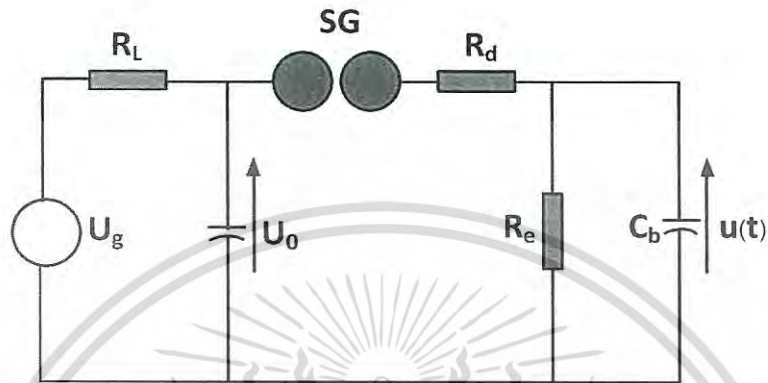
รูปที่ 2.19 แสดงถึงแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตัดหน้าคลื่น

ถ้าต้องการทราบว่าแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นมานั้นเป็นไปตามมาตรฐานกำหนดหรือไม่ ให้หาค่า T_1 , T_2 หรือ T_c โดยวิธีที่แสดงไว้ในรูป 2.17 ว่าอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดต่อไปนี้หรือไม่ คือ เวลาช่วงหน้าคลื่น $T_1 = 1.2 \mu\text{S} \pm 30\%$ คือ จะต้องอยู่ในช่วง $0.84 - 1.56 \mu\text{S}$ เวลาช่วงหลังคลื่น $T_2 = 50 \mu\text{S} \pm 20\%$ คือ จะต้องอยู่ในช่วง $40 - 60 \mu\text{S}$ ค่ายอดแรงดัน U_m ยอมให้ผิดพลาดได้ $\pm 3\%$ ของค่าที่ระบุรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

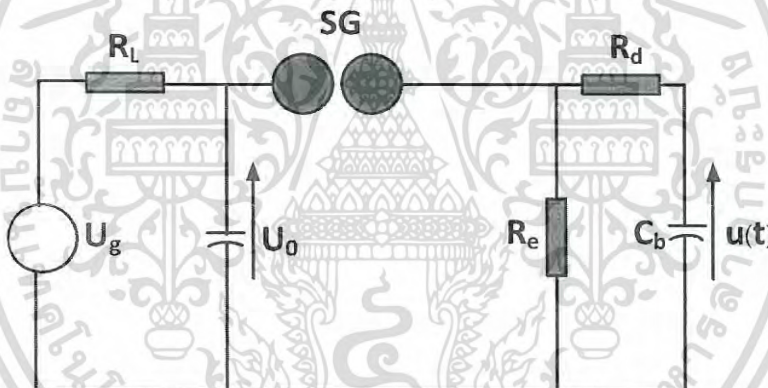
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

วงจรพื้นฐานที่ใช้สร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ามี 2 แบบ ดังในรูปที่ 2.20 และ รูปที่ 2.21



รูปที่ 2.20 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ วงจร A



รูปที่ 2.21 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ วงจร B

ความหมายในรูปวงจร 2.20 และ 2.21

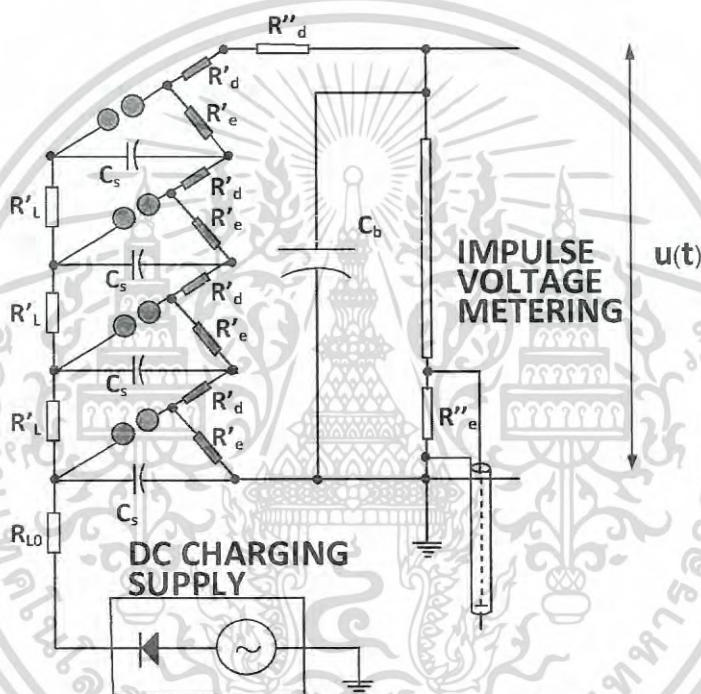
- U_g คือ แรงดันกระแสตรงของตัวจ่าย
- U_0 คือ แรงดันอัดประจุกระแสตรง
- C_s คือ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นตัวเก็บพลังงาน
- C_b คือ ตัวเก็บประจุโหลด (รวมทั้งความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์เครื่องวัดและอื่นๆ)
- R_L คือ ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ
- R_d คือ ความต้านทานหน่วง
- R_e คือ ความต้านทานปล่อยประจุ
- $U(t)$ คือ แรงดันอิมพัลส์ที่ได้แปรไปตามเวลา
- SG คือ สปาร์กแกป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายชั้น

จากวงจรพื้นฐานของการสร้างแรงดันอิมพัลส์ ปกติจะออกแบบให้สร้างแรงดันได้ถึง 200 kV ซึ่งไม่เพียงพอสำหรับการทดสอบ BIL ของอุปกรณ์ที่ใช้กับแรงดันระบบ 52 kV หรือสูงกว่า ค่าแรงดันอิมพัลส์สูงๆ อาจสร้างได้ด้วยเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบหลายชั้น โดยใช้วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ ตามหลักการของมาร์กซ์ (Marx's circuit) ดังในรูปที่ 2.22

ความหมายของสัญลักษณ์ในวงจร จะเหมือนกับวงจรขั้นพื้นฐาน (เครื่องหมาย ' แสดงถึงเป็นค่าต่อชั้น และเครื่องหมาย '' แสดงถึงองค์ประกอบภายนอกที่เพิ่มขึ้นเพื่อปรับปรุงคลื่น)



รูปที่ 2.22 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบหลายชั้นตามวงจรมาร์กซ์ [16]

ค่าในองค์ประกอบในวงจร

- U_g คือ แรงดันกระแสตรงของตัวจ่าย
- U_0 คือ แรงดันอัดประจุกระแสตรง
- C_s คือ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นตัวเก็บพลังงาน
- C_b คือ ตัวเก็บประจุโหลด (รวมทั้งความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์เครื่องวัดและอื่นๆ)
- R'_L คือ ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุแต่ละชั้น
- R'_d คือ ความต้านทานหน่วงแต่ละชั้น
- R'_e คือ ความต้านทานปล่อยประจุแต่ละชั้น
- $U(t)$ คือ แรงดันอิมพัลส์ที่ได้แปรไปตามเวลา
- SG คือ สปาร์กแกป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเกิดสปาร์กวงจรจะต่อกันแบบอนุกรมจะได้ค่ารวมเป็น

$$C_s = C'_s / n$$

$$R_d = nR'_d$$

$$R_e = nR'_e$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบสร้างชุดทดสอบ และการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนเหลว และเพรสบอร์ดที่อิมเพิร์กเน็ตด้วยฉนวนเหลว

ในบทนี้อธิบายขั้นตอนการออกแบบและประกอบสร้างชุดทดสอบ การควบคุมปริมาณความชื้นในฉนวนเหลว (น้ำมันหม้อแปลงและเอสเทอร์ธรรมชาติ) และขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนเหลวได้แก่ การทดสอบการหาค่าแรงดันเบรกดาวน์และอิมพัลส์เบรกดาวน์ของฉนวนเหลว การทดสอบการหาค่าแรงดันเบรกดาวน์และอิมพัลส์เบรกดาวน์เพรสบอร์ดเมื่ออิมเพิร์กเน็ตด้วยฉนวนเหลว การวัดพลังงานสูญเสียไอเล็กทรอนิกส์และการวัดค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์

3.1 การออกแบบและการประกอบสร้างชุดทดสอบ (Test Vessel)

3.1.1 ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพรสบอร์ด [17]

1. ออกแบบชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพรสบอร์ด 3 มิติด้วยโปรแกรม Solid Works ประกอบด้วย

- ที่บรรจุน้ำมันและใส่เพรสบอร์ด

ทำจากวัสดุอะคริลิกใส มีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 20 cm หนา 5 mm ด้านบนและล่างของกระบอกประกอบด้วยแผ่นอะคริลิกวงกลมขนาดเจาะรูสำหรับยึดตัวฉนวนของอิเล็กทรอนิกส์ และทำร่องสำหรับใส่ยาสงกันซึมในส่วนของรอยต่อ



รูปที่ 3.1 แบบจำลองที่บรรจุน้ำมันและใส่เพรสบอร์ดชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพรสบอร์ด

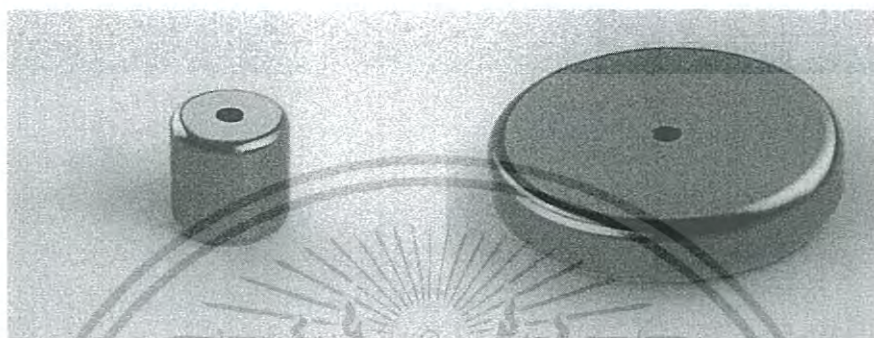


รูปที่ 3.2 ที่บรรจุน้ำมันและใส่เพรสบอร์ดชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพรสบอร์ดที่ออกแบบสร้างจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อิเล็กโตรด

หัวอิเล็กโตรดที่ใช้ในชุดทดสอบนั้นอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC 60243-1 ทำจากวัสดุทองเหลืองโดยจะประกอบไปด้วยสองอิเล็กโตรดทรงกระบอกทำจากทองเหลืองที่มีขอบโค้งมนรัศมี 3 mm อิเล็กโตรดที่หนึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 ± 1 mm และมีความสูง 25 mm ส่วนอิเล็กโตรดที่สองมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 ± 1 mm และมีความสูง 15 mm [17]



รูปที่ 3.3 แบบจำลองอิเล็กโตรดชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพอร์สบอร์ด

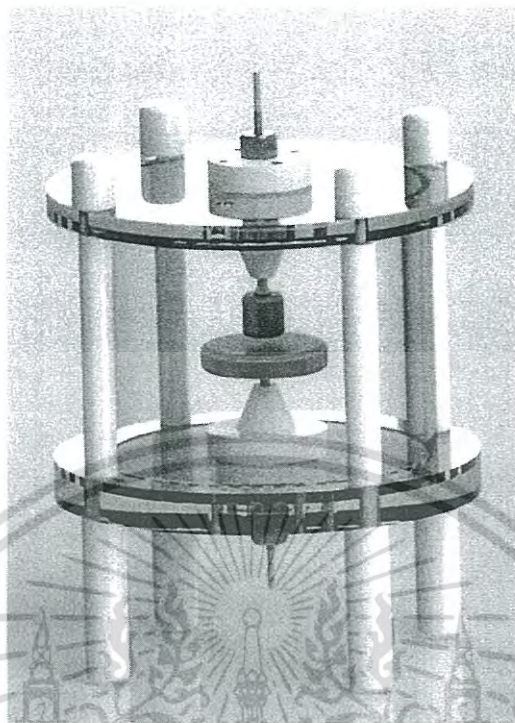


รูปที่ 3.4 อิเล็กโตรดชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพอร์สบอร์ดที่ออกแบบสร้างจริง

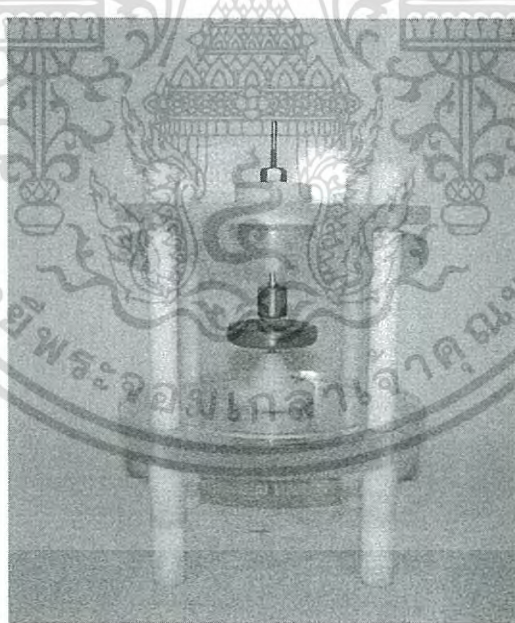
- แกนตัวนำ

ทำจากสแตนเลสเป็นก้านยาว สำหรับจับยึดอิเล็กโตรดและต่อสายจากด้านไฟฟ้าแรงสูงและกราวนด์

- ตัวฉนวนจับยึดแกนตัวนำทำจากวัสดุซูเปอร์ลินสำหรับจับยึดก้านตัวนำให้อยู่ตรงกลางทั้งอิเล็กโตรดบนและล่าง



รูปที่ 3.5 แบบจำลองชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสลับของเพรสบอร์ด



รูปที่ 3.6 ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสลับของเพรสบอร์ดที่ออกแบบสร้างจริง

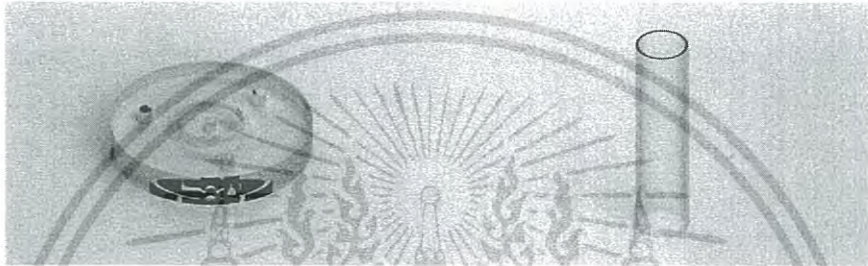
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว [18]

1. ออกแบบชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว 3 มิติด้วยโปรแกรม Solid Works ประกอบด้วย

- ที่บรรจุน้ำมันและใส่เพรสบอลต์

ชุดทดสอบออกแบบตามมาตรฐาน IEC 60897 โดยส่วนบรรจุน้ำมันมีปริมาตร 300 ml. ใช้วัสดุอะคริลิกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 50 mm หนา 3 mm สูง 195 mm ด้านบนและล่างของกระบอกประกอบด้วยแผ่นอะคริลิกวงกลมขนาดเจาะรูสำหรับยึดตัวฉนวนของอิเล็กทรอนิกส์ และทำร่องสำหรับใส่ยางกันซึมในส่วนขอรอยต่อ



รูปที่ 3.7 แบบจำลองที่บรรจุน้ำมันและใส่เพรสบอลต์ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว



รูปที่ 3.8 ที่บรรจุน้ำมันและใส่เพรสบอลต์ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลวที่ออกแบบสร้างจริง

- อิเล็กโตรด

หัวอิเล็กโตรดที่ใช้ในชุดทดสอบนั้นอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC 60243-1 โดยอิเล็กโตรดทรงกลมทำจากวัสดุทองเหลืองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 mm และเข็มทำจากทังสเตน โดยที่ปลายเข็มมีรัศมีความโค้ง 40 μm

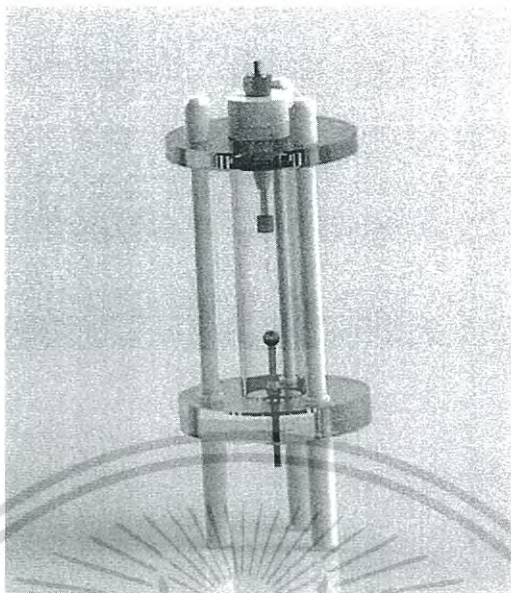


รูปที่ 3.9 แบบจำลองอิเล็กโตรดชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว



รูปที่ 3.10 อิเล็กโตรดชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลวที่ออกแบบสร้างจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 แบบจำลองชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว



รูปที่ 3.12 ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลวที่ออกแบบสร้างจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ขั้นตอนการควบคุมปริมาณความชื้นในฉนวนเหลว

ความชื้นและสิ่งปนเปื้อนในฉนวนเหลวมีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนเหลว การจับเก็บตัวอย่างฉนวนเหลวเพื่อทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าต้องทำอย่างระมัดระวัง เนื่องจากความชื้นและสิ่งปนเปื้อนอาจเข้าสู่ฉนวนเหลวระหว่างการเก็บและขนย้าย ดังนั้นเพื่อลดผลของความชื้นและสิ่งปนเปื้อนให้น้อยที่สุดก่อนทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า มีขั้นตอนการควบคุมปริมาณความชื้นและสิ่งปนเปื้อนดังรูปที่ 3.13 ตัวอย่างการควบคุมปริมาณความชื้นในฉนวนเหลวดังรูปที่ 3.14 และการวัดความชื้นในฉนวนเหลวดังรูปที่ 3.15

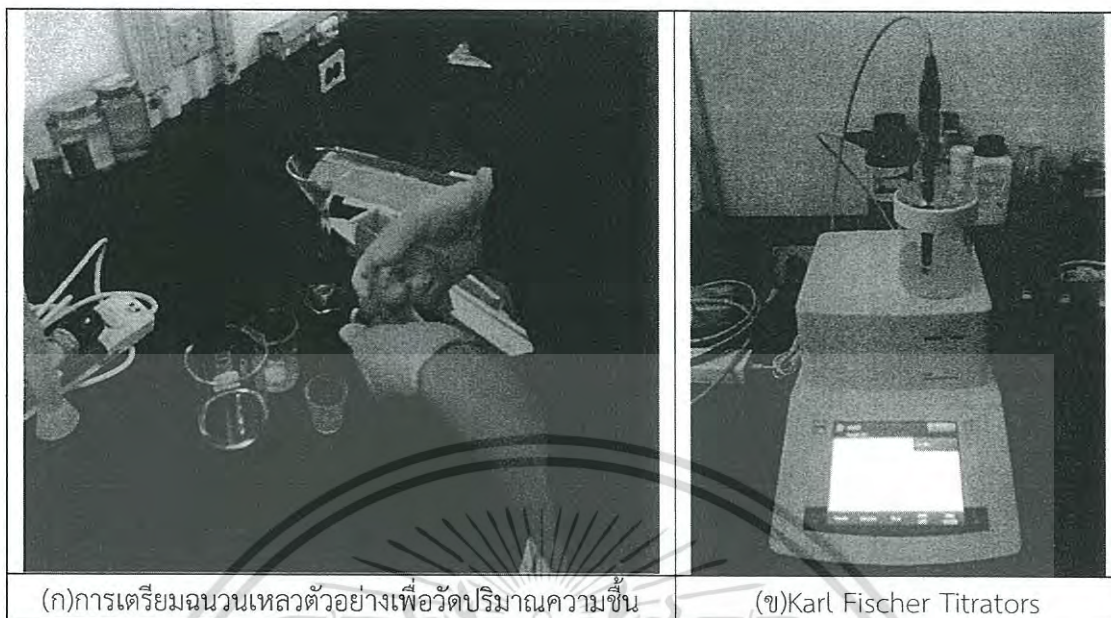


รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการควบคุมปริมาณความชื้นในฉนวนเหลว



รูปที่ 3.14 การควบคุมปริมาณความชื้นในฉนวนเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) การเตรียมฉนวนเหลวตัวอย่างเพื่อวัดปริมาณความชื้น

(ข) Karl Fischer Titrators

รูปที่ 3.15 การวัดปริมาณความชื้นในฉนวนเหลว

3.3 ขั้นตอนการทดสอบแรงดันเบรกดาว์นฉนวนเหลว

การทดสอบแรงดันเบรกดาว์นฉนวนเหลวเป็นการทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับ ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย รูปทรงอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ทดสอบเป็นอิเล็กทรอนิกส์ทรงกลม – ทรงกลมทดสอบด้วยเครื่อง ตามมาตรฐาน IEC 60156 [19] ในการทดสอบคงทนต่อแรงดันเบรกดาว์นของฉนวนเหลวต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ เนื่องจากค่าแรงดันเบรกดาว์นของฉนวนเหลวแสดงถึงความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้า การทดสอบฉนวนเหลวภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยนี้ค่าแรงดันเบรกดาว์นจะไวต่อสิ่งเจือปนในฉนวนเหลวมาก เช่น ความชื้น อนุภาคเจือปน และฟองอากาศหรือฟองก๊าซ ดังนั้นค่าแรงดันเบรกดาว์นของฉนวนเหลวโดยทั่วไปแสดงถึงคุณภาพของฉนวนเหลวมากกว่าคุณสมบัติของฉนวนเหลวชุดทดสอบแรงดันเบรกดาว์นของฉนวนเหลวแสดงดังรูปที่ 3.16 และขั้นตอนการทดสอบแรงดันเบรกดาว์นฉนวนเหลวแสดงดังรูปที่ 3.17



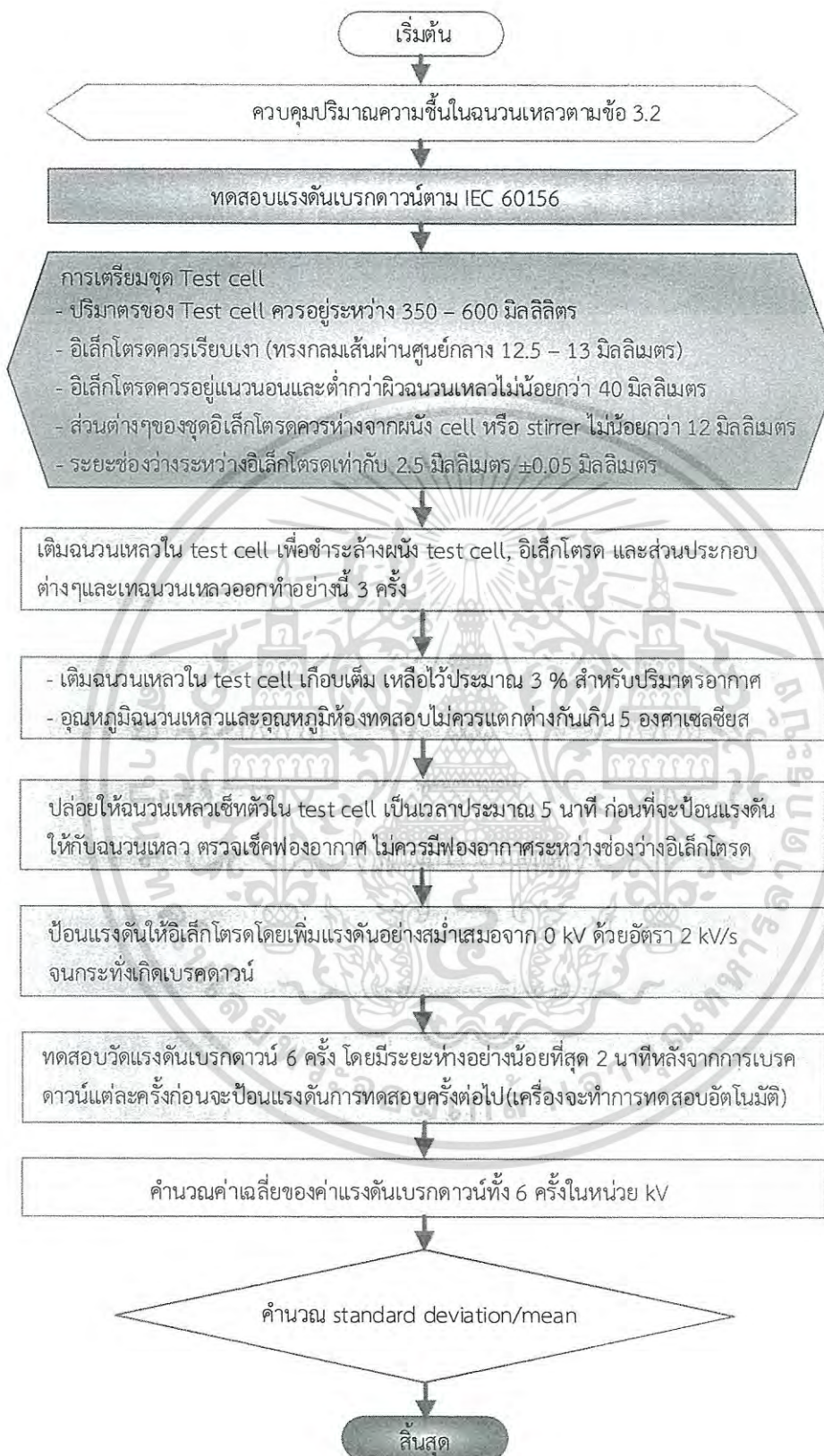
(ก) ชุดทดสอบแรงดันเบรกดาว์นของฉนวนเหลว

ยี่ห้อ Megger รุ่น OTS60AF

(ข) ชุดบรรจุฉนวนเหลวและชุดอิเล็กทรอนิกส์

รูปที่ 3.16 ชุดทดสอบแรงดันเบรกดาว์นฉนวนเหลว

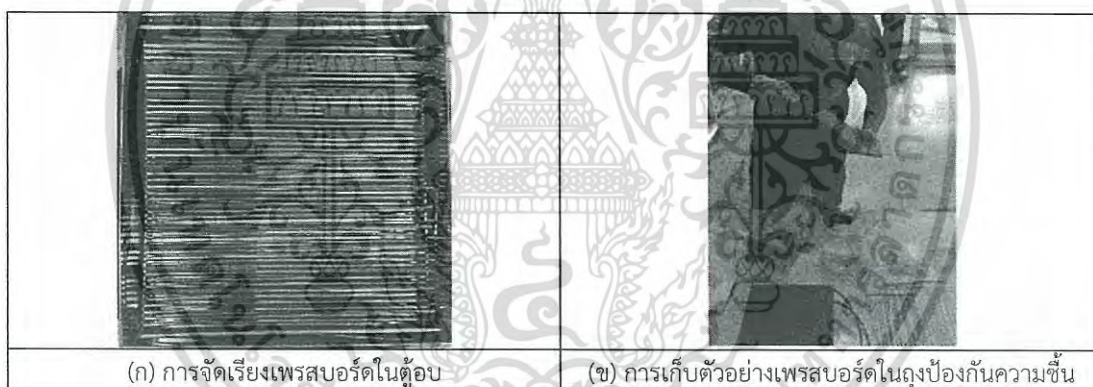
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 3.17 ขั้นตอนการวัดแรงดันเบรกดาวของฉนวนเหลวไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ขั้นตอนการทดสอบค่าแรงดันเบรกดาว์นกระแสสลับของเพรสบอร์ดที่อิมเพิร์กเน็ตด้วยฉนวนเหลว

การทดลองเพื่อหาค่าแรงดันเบรกดาว์นเพรสบอร์ดที่อิมเพิร์กเน็ตด้วยฉนวนเหลวเป็นการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย รูปทรงอิเล็กโทรดออกแบบตามมาตรฐาน IEC 60243-1[17] รูปทรงอิเล็กโทรดที่ใช้ทดสอบเป็นแบบ Unequal electrode เนื่องจากเพรสบอร์ดเป็นฉนวนผสมระหว่างเซลลูโลสและฉนวนเหลว โครงสร้างของเซลลูโลสมีความพรุน ฉนวนเหลวสามารถเข้าไปแทนที่อากาศในเซลลูโลสได้ด้วยวิธีการอิมเพิร์กเน็ต โดยทั่วไปเส้นใยเซลลูโลสมีความคงทนได้อิเล็กตริกสูงกว่าฉนวนเหลว ดังนั้นการเบรกดาว์นของเพรสบอร์ดที่อิมเพิร์กเน็ตด้วยฉนวนเหลวจะเริ่มจากการดิสชาร์จในฉนวนเหลวที่แทรกซึมในโพรงเซลลูโลสก่อนที่จะเกิดเบรกดาว์นอย่างสมบูรณ์โดยงานวิจัยนี้ศึกษาทดสอบความคงทนต่อแรงดันเบรกดาว์นของเพรสบอร์ดหนา 1.6 มม. และ 3.2 มม. ที่อิมเพิร์กเน็ตด้วยน้ำมันหม้อแปลงและเอสเตอรธรรมชาติ ก่อนอิมเพิร์กเน็ตเพรสบอร์ดด้วยฉนวนเหลวจะทำการอบเพรสบอร์ดเพื่อควบคุมปริมาณความชื้นในเพรสบอร์ดก่อนดังรูปที่ 3.18 จากนั้นทำการอิมเพิร์กเน็ตเพรสบอร์ดด้วยฉนวนเหลวดังรูปที่ 3.19 และทดสอบวัดค่าแรงดันเบรกดาว์นเพรสบอร์ดโดยใช้ Unequal electrode ตามมาตรฐาน IEC 60243-1ชุดอิเล็กโทรดที่ออกแบบสร้างดังรูปที่ 3.20 วงจรการทดสอบดังรูปที่ 3.21 และขั้นตอนการทดสอบวัดแรงดันเบรกดาว์นของเพรสบอร์ดแสดงดังรูปที่ 3.22

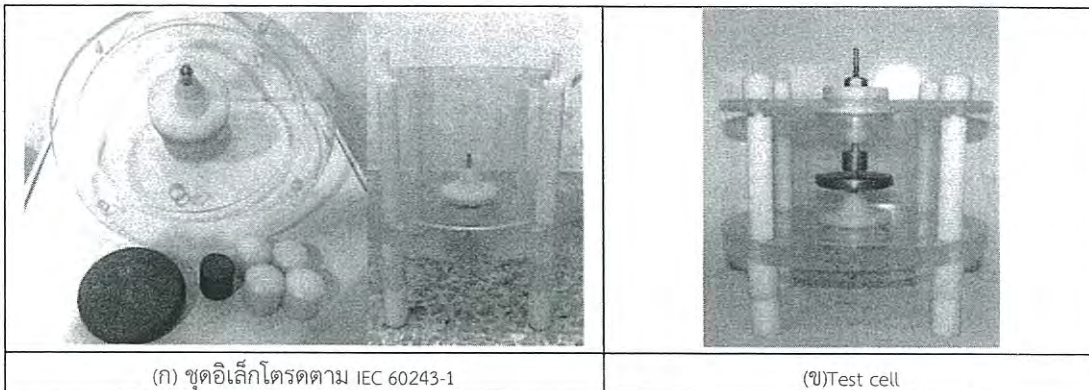


รูปที่ 3.18 การอบเพรสบอร์ดก่อนทำการทดลอง

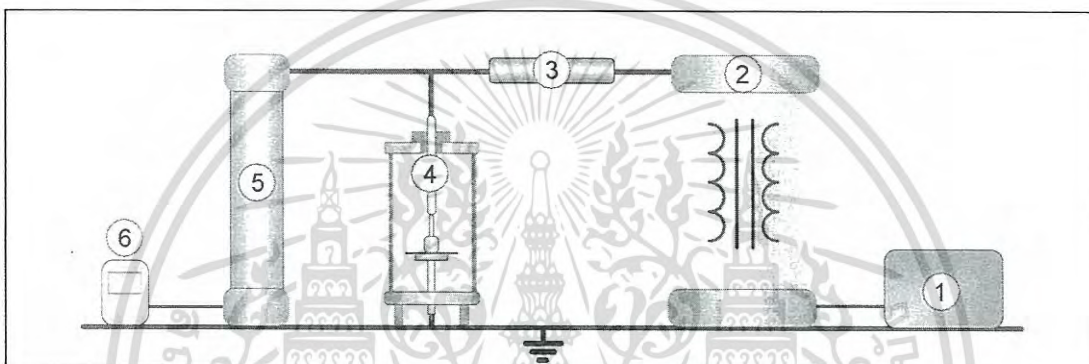


รูปที่ 3.19 การอิมเพิร์กเน็ตเพรสบอร์ดด้วยฉนวนเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 ชุด Test cell ทดสอบความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของเพรสบอร์ด



(ก) ไดอะแกรมวงจรทดสอบความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของเพรสบอร์ด



รูปที่ 3.21 วงจรทดสอบความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับของเพรสบอร์ด

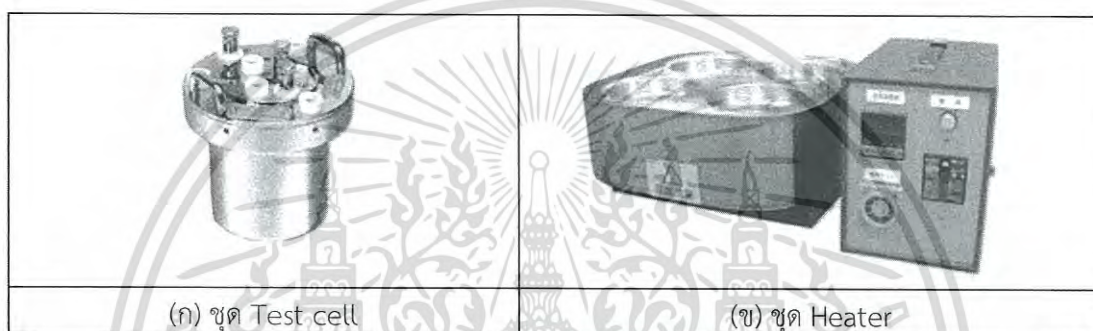
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



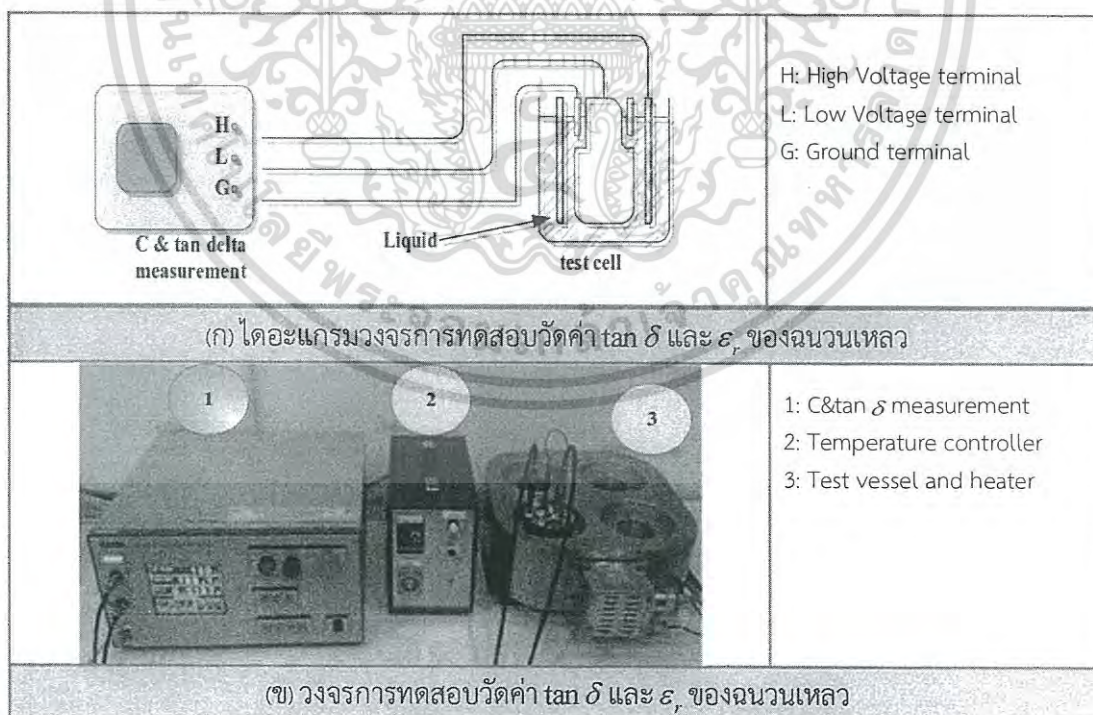
รูปที่ 3.22 ขั้นตอนการวัดแรงดันเบรกดาวนกระแสสลับเพรสบอร์ดที่อิมพรีกเนตฉนวนเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 ขั้นตอนการวัดค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกและค่าเปอร์มิตติวิตี้ของฉนวนเหลว ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$) และค่าเปอร์มิตติวิตี้ (ϵ_r) ของฉนวนเหลวเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญ ใช้บ่งบอกคุณภาพและระดับสิ่งปนเปื้อนในฉนวนเหลว เพื่อประเมินคุณสมบัติทางไดอิเล็กตริกและสมรรถนะของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงงานวิจัยนี้ศึกษาวัดค่า $\tan \delta$ และค่า ϵ_r ของน้ำมันหม้อแปลงเปรียบเทียบกับเอสเตอร์ธรรมชาติซึ่งฉนวนเหลวที่ทดสอบเป็นฉนวนเหลวใหม่ยังไม่ผ่านการใช้งานทดสอบด้วย SOKEN C & $\tan \delta$ Meter for Insulation Materials DAC-IM-D6 โดยทดสอบตาม ASTM D924.99[20] ชุด Test cell และ Heater ดังรูปที่ 3.23 วงจรการทดสอบการวัดค่า $\tan \delta$ และ ϵ_r ของฉนวนเหลวดังรูปที่ 3.24 และขั้นตอนการวัดค่า $\tan \delta$ และ ϵ_r ของฉนวนเหลวดังรูปที่ 3.25

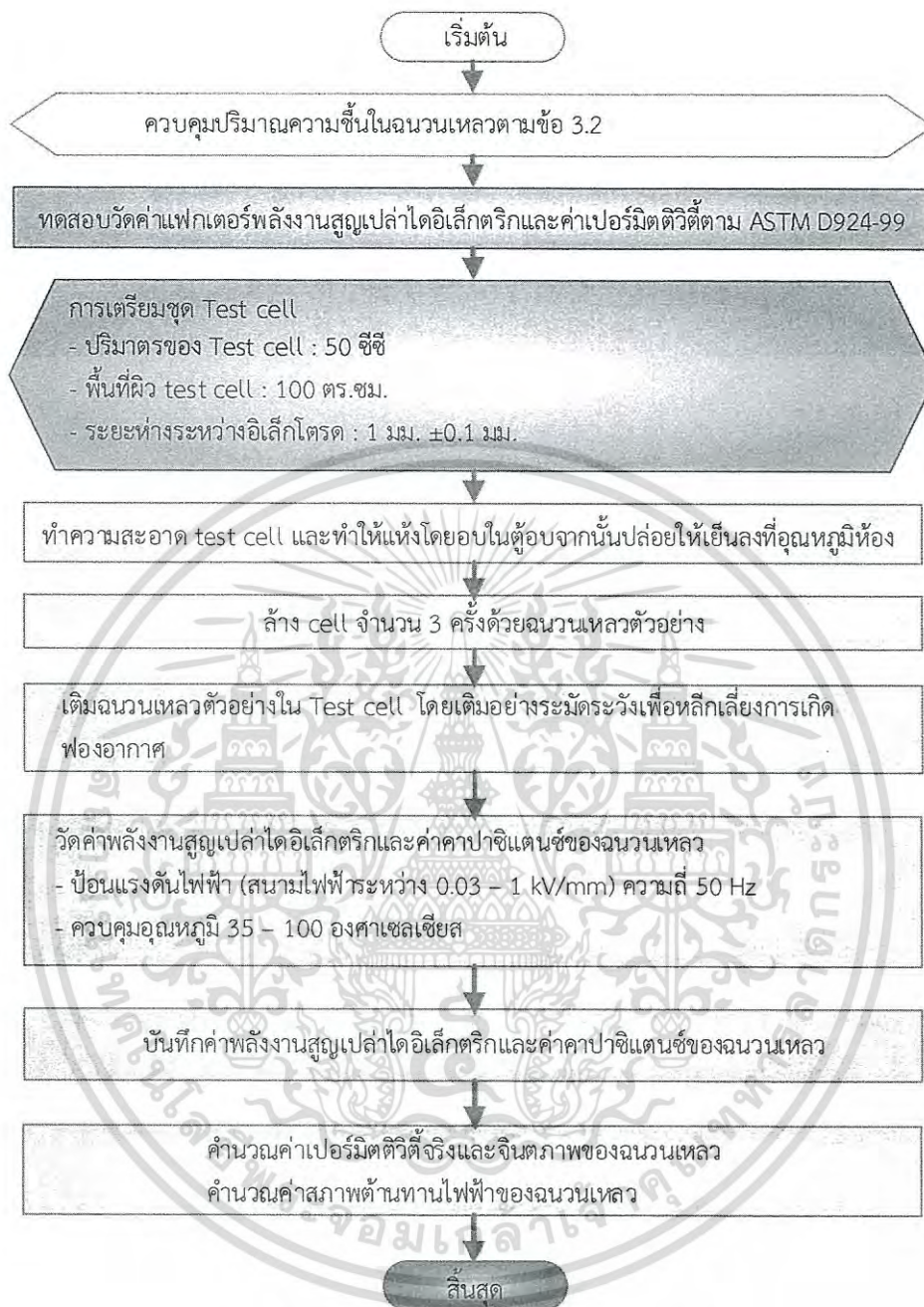


รูปที่ 3.23 ชุด Test cell และ Heater สำหรับการวัดค่า $\tan \delta$ และ ϵ_r ของฉนวนเหลว



รูปที่ 3.24 วงจรการทดสอบวัดค่า $\tan \delta$ และ ϵ_r ของฉนวนเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

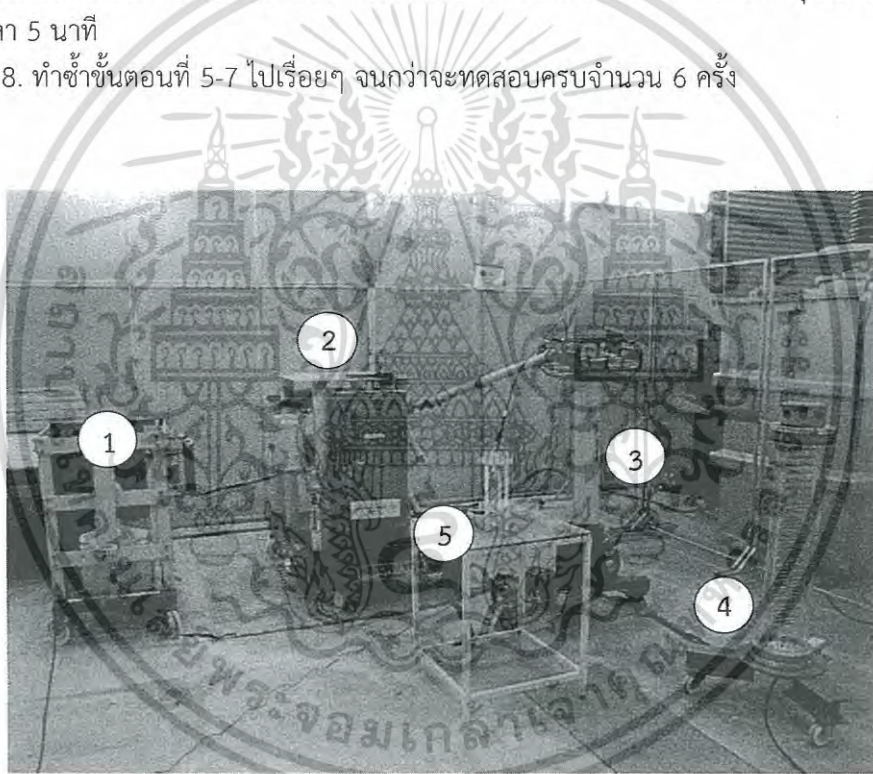


รูปที่ 3.25 ขั้นตอนการวัดค่า $\tan \delta$ และค่า ϵ_r

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 ขั้นตอนการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว

1. ทำการต่อวงจรทดสอบตามรูปที่ 3.26
2. นำฉนวนเหลวที่ต้องการทดสอบทดลองในชุดทดสอบ โดยให้ฉนวนเหลวอยู่ในระดับที่ห่างจากขอบบนของชุดทดสอบ 1-2 cm.
3. ตรวจสอบฉนวนเหลวที่ถูกทดลองในชุดทดสอบว่ามีฟองอากาศอยู่หรือไม่ ถ้ามีฟองอากาศใช้แท่งแก้วคนเบาๆ จนกว่าฟองอากาศที่มีจะหายไปจนหมด
4. จดบันทึกค่าอุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันบรรยากาศ
5. ทำการขึ้นแรงดัน โดยให้อัตราการเพิ่มแรงดันคงที่อย่างช้าๆ จนกระทั่งเกิดการเบรกดาวน์
6. บันทึกกราฟค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่อ่านได้จากออสซิลโลสโคป
7. เมื่อฉนวนเหลวที่ใช้ทดสอบเกิดการเบรกดาวน์แล้วให้ทำการเทเปลี่ยนใหม่ทั้งหมดทำความสะอาดอิเล็กทรอนิกส์ที่มีเขม่าติด และเปลี่ยนเข็มที่ใช้ในการทดสอบ จากนั้นตั้งพักชุดทดสอบทิ้งไว้ระยะเวลา 5 นาที
8. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 5-7 ไปเรื่อยๆ จนกว่าจะทดสอบครบจำนวน 6 ครั้ง



รูปที่ 3.26 วงจรทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว

- 1.ชุดอัดประจุ 2.เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 3.โวลเตจดีไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุ
- 4.โวลเตจดีไวเดอร์ 5.ชุดทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฉนวนเหลว[18]

โดยที่	ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ C_s	มีค่า	0.5	μF /ชิ้น
	ตัวเก็บประจุโหลด C_b	มีค่า	4,200	pF
	ตัวต้านทานหน้าคลื่น	มีค่า	12	Ω
	ตัวต้านทานทางคลื่น	มีค่า	150	Ω

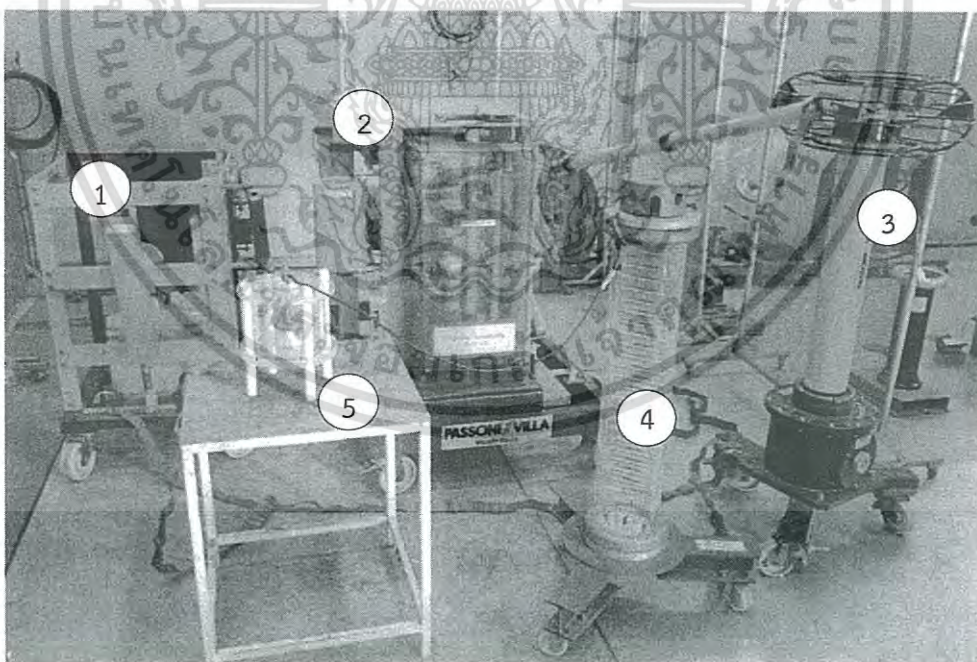
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 ขั้นตอนการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพอร์สบอร์ด

การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพอร์สบอร์ดมีขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้

- 1) ทำการต่อวงจรทดสอบดังรูปที่ 3.27 และ 3.28
- 2) นำฉนวนเหลวที่ต้องการทดสอบลงในชุดทดสอบ โดยให้ฉนวนเหลวอยู่ในระดับที่ห่างจากขอบบนของชุดทดสอบ 1-2 cm
- 3) ตรวจสอบฉนวนเหลวที่ถูกทดสอบว่ามีฟองอากาศอยู่หรือไม่ ถ้ามีฟองอากาศใช้แท่งแก้วคนเบาๆ จนกว่าฟองอากาศที่มีจะหายไปจนหมด
- 4) จัดบันทึกค่าอุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันบรรยากาศ
- 5) ทำการขึ้นแรงดัน โดยให้อัตราการเพิ่มแรงดันคงที่อย่างช้าๆ จนกระทั่งเกิดการเบรกดาวน์
- 6) บันทึกกราฟค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่อ่านได้จากออสซิลโลสโคป
- 7) เมื่อฉนวนเหลวที่ใช้ทดสอบเกิดการเบรกดาวน์แล้วให้ทำการเทเปลี่ยนใหม่ทั้งหมดทำความสะอาดอิเล็กโตรดที่มีเขม่าติด และเปลี่ยนอิเล็กโตรดที่ใช้ในการทดสอบ จากนั้นตั้งพักชุดทดสอบทิ้งไว้ระยะเวลา 5 นาที
- 8) ทำซ้ำขั้นตอนที่ 5-7 ไปเรื่อยๆ จนกว่าจะทดสอบครบจำนวน 6 ครั้ง

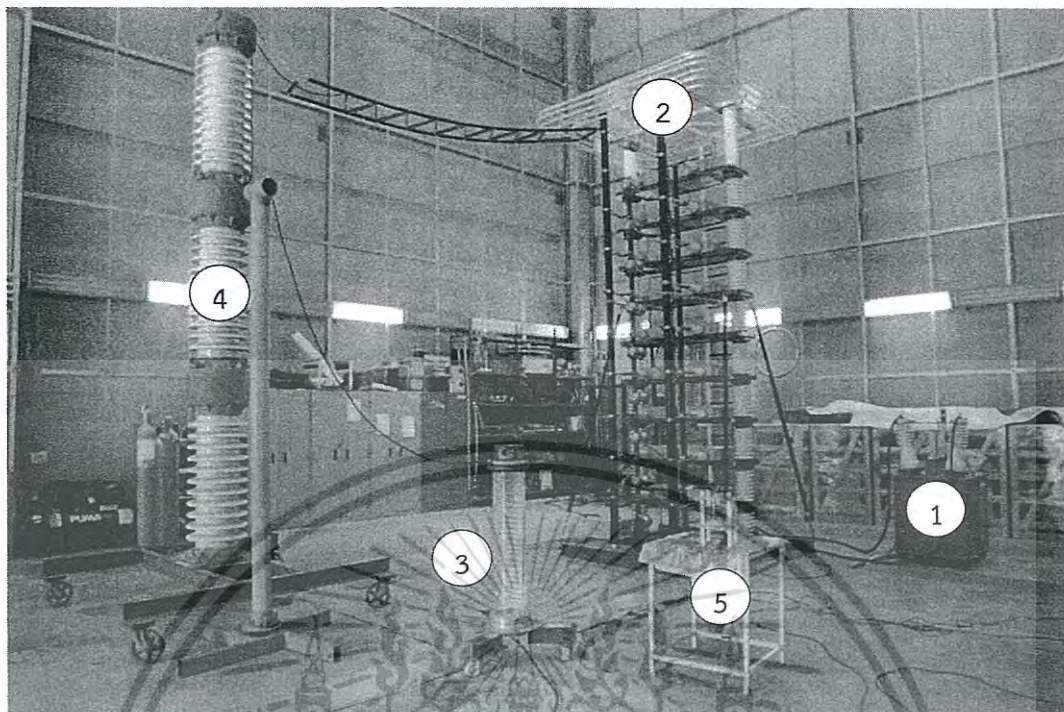
การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพอร์สบอร์ดสำหรับแรงดันที่น้อยกว่า 150 kV และ มากกว่า 150kV แสดงดังรูปที่ 3.27 และ รูปที่ 3.28 ตามลำดับ



รูปที่ 3.27 วงจรทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพอร์สบอร์ดสำหรับแรงดันน้อยกว่า 150 kV

- 1.ชุดอัดประจุ 2.เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 200 kV 3.โวลต์เจดิวเดออร์ชนิดตัวเก็บประจุ
- 4.โวลต์เจดิวเดออร์ 5.ชุดทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

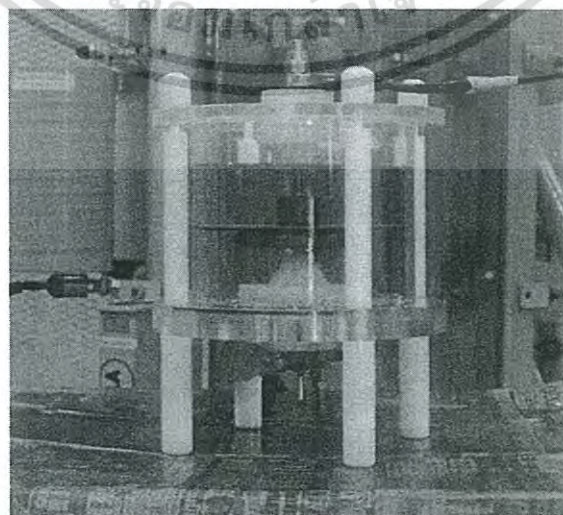
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.28 วงจรทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดสำหรับแรงดันมากกว่า 150 kV

1. หม้อแปลงอัดประจุเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
2. เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 1200 kV
3. โวลต์เกจดีไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุ
4. ตัวเก็บประจุไหลด 2000 pF
5. ชุดทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด

โดยที่	ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ C_r	มีค่า	0.25	$\mu\text{F}/\text{ชั้น}$
	ตัวเก็บประจุไหลด C_b	มีค่า	2	nF
	ตัวต้านทานหน้าคลื่น	มีค่า	256	Ω
	ตัวต้านทานหางคลื่น	มีค่า	2185	Ω



รูปที่ 3.29 ชุดทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ถือว่าผิดกฎหมาย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบและประเมินผล

4.1 ผลการวัดปริมาณความชื้นในฉนวนเหลว

ผลการวัดปริมาณความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงและเอสเตอรฺ์ธรรมชาติ ก่อนและหลังผ่านกระบวนการเตรียมเพื่อรับการทดสอบดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดปริมาณความชื้นในฉนวนเหลว

	ปริมาณความชื้น (ppm)	
	ก่อนผ่านกระบวนการเพื่อการทดสอบ	หลังผ่านกระบวนการเพื่อการทดสอบ
น้ำมันหม้อแปลง	35.3	17.7
เอสเตอรฺ์ธรรมชาติ	282	178

4.2 ผลการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ฉนวนเหลว

ผลการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ตามมาตรฐาน IEC 60156 ของน้ำมันหม้อแปลงและเอสเตอรฺ์ธรรมชาติ แสดงดังตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลง

น้ำมันหม้อ แปลง	จำนวนครั้งการทดสอบ						ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	1	2	3	4	5	6		
ตัวอย่างที่ 1	43.2	40	39.3	35.6	40.5	38.3	39.48	2.52
ตัวอย่างที่ 2	41.2	38	42.3	39.6	41.2	38.5	40.13	1.70
ตัวอย่างที่ 3	39.4	36.3	41	43	38.6	40.7	39.83	2.29

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของเอสเตอรฺ์ธรรมชาติ

เอสเตอรฺ์ ธรรมชาติ	จำนวนครั้งการทดสอบ						ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	1	2	3	4	5	6		
ตัวอย่างที่ 1	48.5	49.2	50	47.8	52.5	51.2	49.86	1.75
ตัวอย่างที่ 2	49.5	53.1	51.6	52.3	49.3	53.2	51.50	1.72
ตัวอย่างที่ 3	48.5	51.7	49.6	52.3	52.7	51.3	51.02	1.63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดันเบรกดาว์นฉนวนเหลว

ผลการทดสอบแรงดันเบรกดาว์นของน้ำมันหม้อแปลงและเอสเตอร์ธรรมชาติเปรียบเทียบดังรูปที่ 4.1 พบว่าเอสเตอร์ธรรมชาติมีความคงทนต่อแรงดันเบรกดาว์นสูงกว่าน้ำมันหม้อแปลงประมาณ 1.3 เท่าเมื่อทดสอบภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยภายใต้เงื่อนไขวิธีการทดสอบเดียวกัน และพบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันเบรกดาว์นเอสเตอร์ธรรมชาติน้อยกว่าน้ำมันหม้อแปลง หมายถึงขนาดแรงดันเบรกดาว์นของเอสเตอร์ธรรมชาติตัวอย่างค่อนข้างคงที่กว่าน้ำมันหม้อแปลงตัวอย่าง

4.3 ผลการทดสอบแรงดันเบรกดาว์นเพรสบอร์ดที่อิมเพริกเน็ตด้วยฉนวนเหลว

ผลการทดสอบแรงดันเบรกดาว์นของเพรสบอร์ดที่อิมเพริกเน็ตด้วยน้ำมันหม้อแปลงและเอสเตอร์ธรรมชาติตามมาตรฐาน IEC 60243-1แสดงดังตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแรงดันเบรกดาว์นเพรสบอร์ดที่อิมเพริกเน็ตด้วยน้ำมันหม้อแปลง

เวลาที่ใช้อิมเพริกเน็ต เพรสบอร์ดด้วย น้ำมันหม้อแปลง (ชั่วโมง)	จำนวนครั้งการทดสอบ						ค่าเฉลี่ย	
	1	2	3	4	5	6		
หนา 1.6 mm	0	11.97	12.32	11.77	12.52	13.23	12.81	12.44
	3	39.21	38.7	40.32	39.32	41.71	40.86	40.02
	6	43.68	45.09	43.74	43.72	44.81	43.92	44.16
	9	46.68	49.09	48.84	48.63	48.72	48.93	48.48
	12	49.17	49.33	50.57	49.65	49.71	49.094	49.59
หนา 3.2 mm	0	15.84	16.52	16.71	16.34	17.13	15.93	16.41
	3	57.21	58.43	57.72	57.92	58.18	59.76	58.20
	6	65.45	64.39	65.17	66.15	67.29	64.71	65.53
	9	71.18	73.97	72.96	73.56	72.56	73.17	72.90
	12	73.17	74.21	73.97	73.59	73.76	74.17	73.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบแรงดันเบรกดาวนั้ของเพรสบอร์ดที่อิมเพิร์กเน็ตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ

เวลาที่ใช้อิมเพิร์กเน็ต เพรสบอร์ดด้วย น้ำมันหม้อแปลง (ชั่วโมง)		จำนวนครั้งการทดสอบ						ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	6	
หนา 1.6 mm	0	14.77	14.67	15.22	15.27	15.67	15.91	15.25
	3	42.21	41.72	44.23	43.12	43.72	42.83	42.97
	6	46.18	45.19	47.14	47.53	46.81	46.11	46.49
	9	49.58	50.29	51.73	50.75	52.19	51.93	51.08
	12	51.17	52.71	51.97	51.82	52.63	51.19	51.92
หนา 3.2 mm	0	18.81	19.12	19.43	19.62	19.78	19.45	19.37
	3	60.87	61.19	60.94	60.73	61.24	59.876	60.81
	6	68.68	68.32	69.14	67.92	68.13	69.03	68.54
	9	75.21	76.42	75.98	76.45	76.13	74.87	75.84
	12	76.17	77.71	76.87	76.86	75.87	76.09	76.60

วิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดันเบรกดาวนั้ของเพรสบอร์ดที่อิมเพิร์กเน็ตด้วยฉนวนเหลว

จากผลการทดสอบทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวนั้ของเพรสบอร์ดที่อิมเพิร์กเน็ตด้วยน้ำมันหม้อแปลงและเอสเตอร์ธรรมชาติที่ใช้ระยะเวลาอิมเพิร์กเน็ตแตกต่างกัน พบว่าเพรสบอร์ดที่อิมเพิร์กเน็ตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติมีความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวนั้สูงกว่าเพรสบอร์ดที่อิมเพิร์กเน็ตด้วยน้ำมันหม้อแปลงเล็กน้อยเมื่อทดสอบด้วยชุด Unequal electrode ตามมาตรฐาน IEC 60243-1 และขนาดแรงดันเบรกดาวนั้ขึ้นอยู่กับความหนาของเพรสบอร์ด และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงแรงดันเบรกดาวนั้ต่อเวลาที่ใช้ในการอิมเพิร์กเน็ตพบว่าแรงดันเบรกดาวนั้ของเพรสบอร์ดที่อิมเพิร์กเน็ตด้วยน้ำมันหม้อแปลงและเอสเตอร์ธรรมชาติเริ่มคงที่เมื่ออิมเพิร์กเน็ตนาน 9 ชั่วโมง โดยควบคุมอุณหภูมิคงที่ 60 องศาเซลเซียส และความดันบรรยากาศ 200 มิลลิบาร์

4.4 การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของฉนวนเหลว

ผลการวัดค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$) และค่าคาปาซิแตนซ์(C)ของน้ำมันหม้อแปลงและเอสเตอร์ธรรมชาติตามมาตรฐาน ASTM D924.99แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของฉนวนเหลว

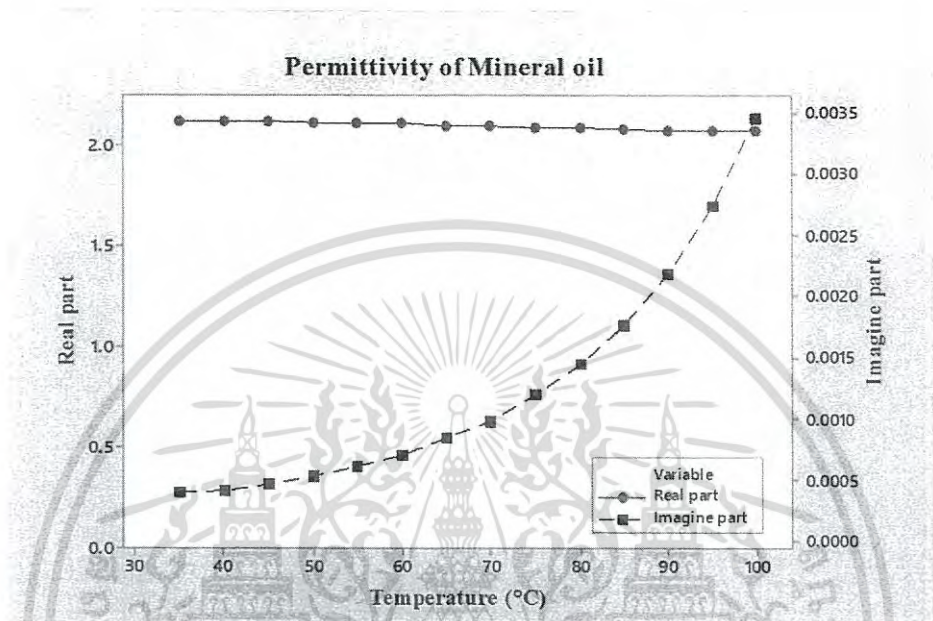
อุณหภูมิ (°C)	น้ำมันหม้อแปลง		เอสเตอร์ธรรมชาติ	
	$\tan \delta$ (%)	C(pF)	$\tan \delta$ (%)	C(pF)
35	0.019	187.2	0.95	273
40	0.02	187	1	272
45	0.022	186.6	1.06	271
50	0.025	186.1	1.12	269
55	0.029	186	1.19	268
60	0.033	185.5	1.29	266
65	0.04	185	1.61	265
70	0.046	184.6	1.82	264
75	0.057	184.4	2.07	262
80	0.069	183.8	2.36	261
85	0.084	183.3	2.76	260
90	0.105	182.8	3.17	259
95	0.132	182.5	3.7	258
100	0.167	182.1	4.23	257

วิเคราะห์การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำมันหม้อแปลงและเอสเตอร์ธรรมชาติ

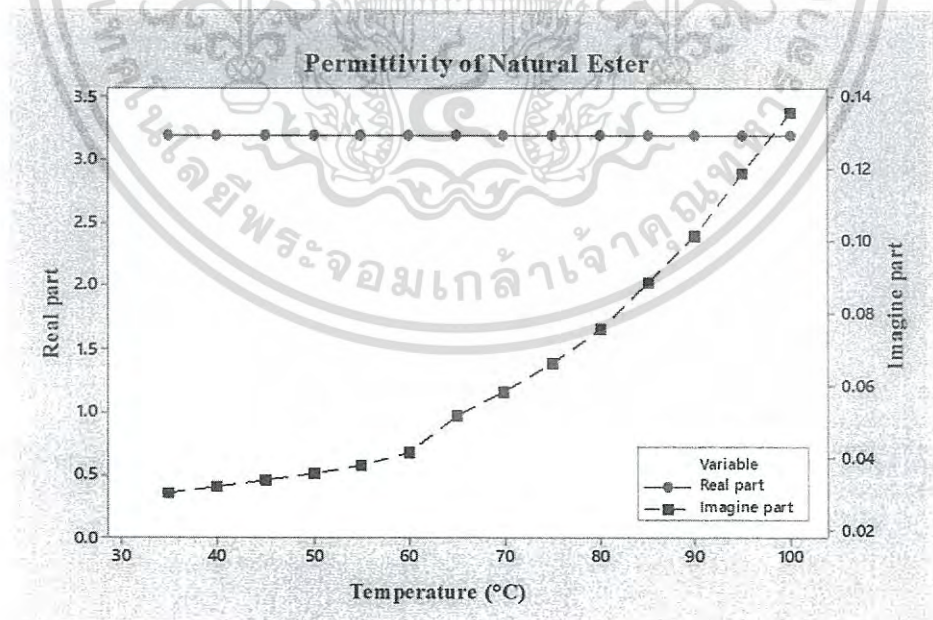
จากผลการทดสอบในตารางที่ 4.6 ทำการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาด (ϵ_r') และค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดจินตภาพ (ϵ_r'') ของน้ำมันหม้อแปลงและเอสเตอร์ธรรมชาติได้จากสมการที่ 2.13 และ 2.14 วงจรสมมูลฉนวนเหลวดังรูปที่ 2.19 ผลการคำนวณกรณีน้ำมันหม้อแปลงแสดงดังรูปที่ 4.1 และกรณีเอสเตอร์ธรรมชาติดังรูปที่ 4.2 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดจริงของเอสเตอร์ธรรมชาติสูงกว่าน้ำมันหม้อแปลงประมาณ 1.45 เท่าและมีค่าลงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในส่วนค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดจินตภาพของเอสเตอร์ธรรมชาติสูงกว่าน้ำมันหม้อแปลงประมาณ 77 เท่าที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่ากำลังสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกแสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าค่ากำลังสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของเอสเตอร์ธรรมชาติมีค่าสูงกว่าน้ำมันหม้อแปลงประมาณ 77 เท่าที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสและมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสอดคล้องกับค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดจริงจินตภาพค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงและเอสเตอร์ธรรมชาติได้จากการคำนวณตามสมการที่ 4.1 แสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงสูงกว่าเอสเตอร์ธรรมชาติประมาณ 70 เท่า และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงและเอสเตอร์ธรรมชาติลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะเห็นได้ว่าน้ำมันหม้อแปลงและเอสเตอร์ธรรมชาติมีคุณสมบัติไดอิเล็กตริกคล้ายกันแต่ขนาดต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า = $\frac{\text{ค่าความต้านทานฉนวนแห้ง} \times \text{พื้นที่ผิวอิเล็กโทรด}}{\text{ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด}}$ (4-1)

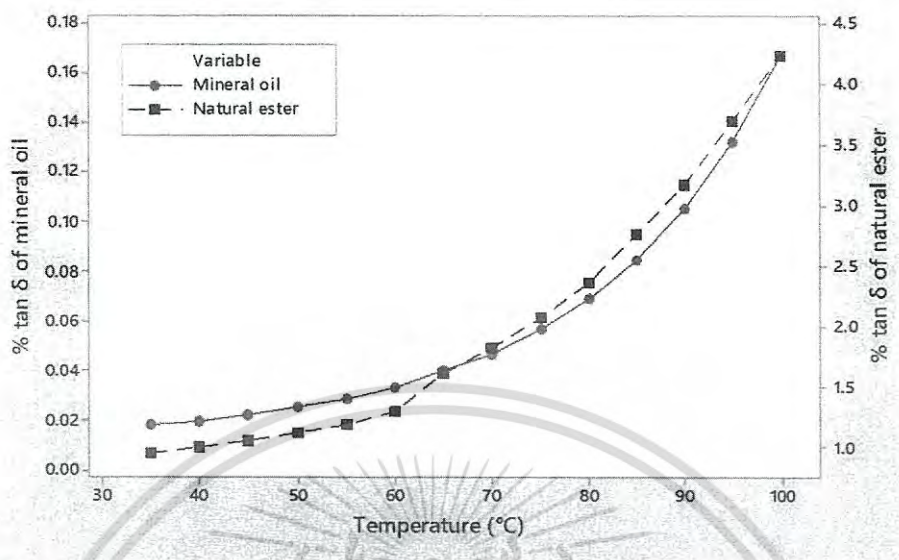


รูปที่ 4.1 ค่าเปอร์มิตติวิตีจริงและค่าเปอร์มิตติวิตีจินตภาพของน้ำมันหม้อแปลง

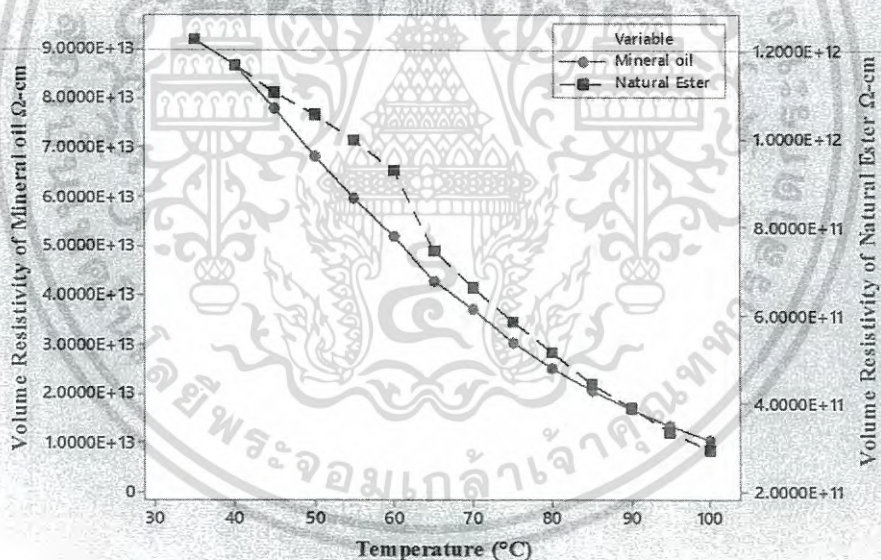


รูปที่ 4.2 ค่าเปอร์มิตติวิตีจริงและค่าเปอร์มิตติวิตีจินตภาพของเอสเทอร์ธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของน้ำมันหม้อแปลงและเอสเตอรธรรมชาติ

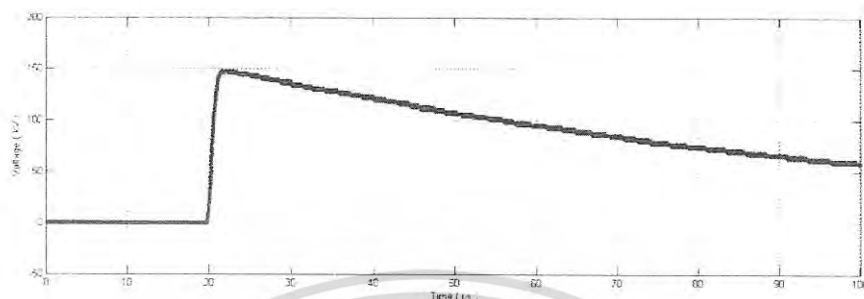


รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงและเอสเตอร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว

1. แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วบวก

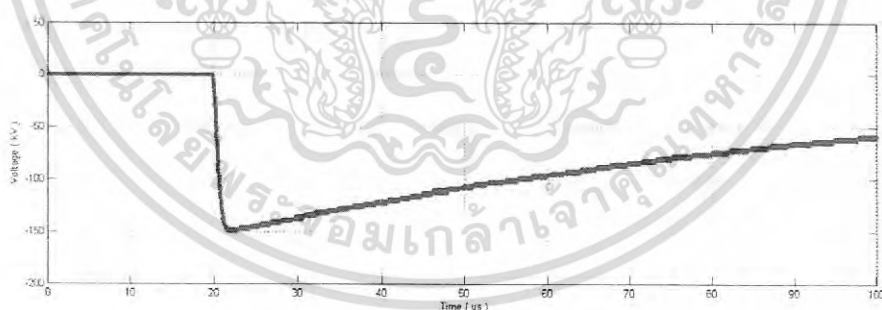


รูปที่ 4.5 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วบวก 1.2/50 μ s ที่ใช้ในการทดสอบ [21]

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วบวกของฉนวนเหลว

ฉนวนเหลว	ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วบวกของฉนวนเหลว (kV)						ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	
Mineral oil	89.17	85.00	85.83	84.17	84.17	84.17	85.42
Ester	79.17	80.00	81.67	79.17	77.50	71.67	78.20

2. แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบ

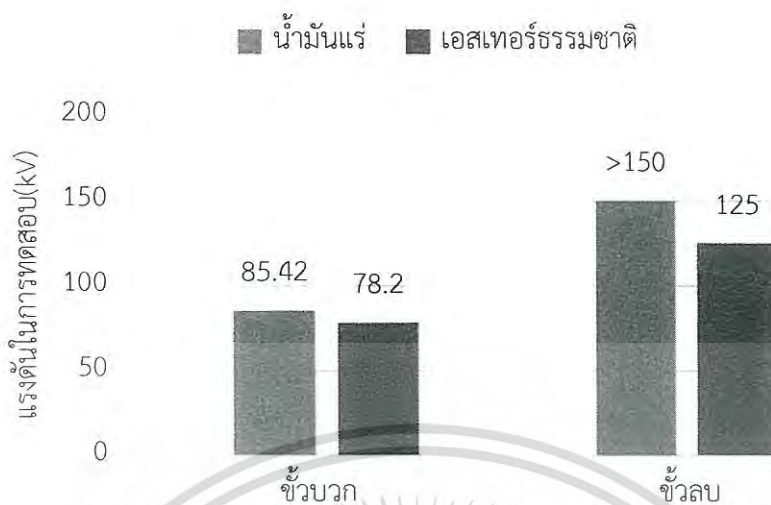


รูปที่ 4.6 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบ 1.2/50 μ s ที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 4.8 การทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบของฉนวนเหลว

ฉนวนเหลว	ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วบวกของฉนวนเหลว (kV)						ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	
Mineral oil	<-150	<-150	<-150	<-150	<-150	<-150	<-150
Ester	-120.83	-127.08	-122.92	-127.08	-127.08	-125.00	-125.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าขั้วบวกและขั้วลบของฉนวนทั้งสองชนิด

วิเคราะห์ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว

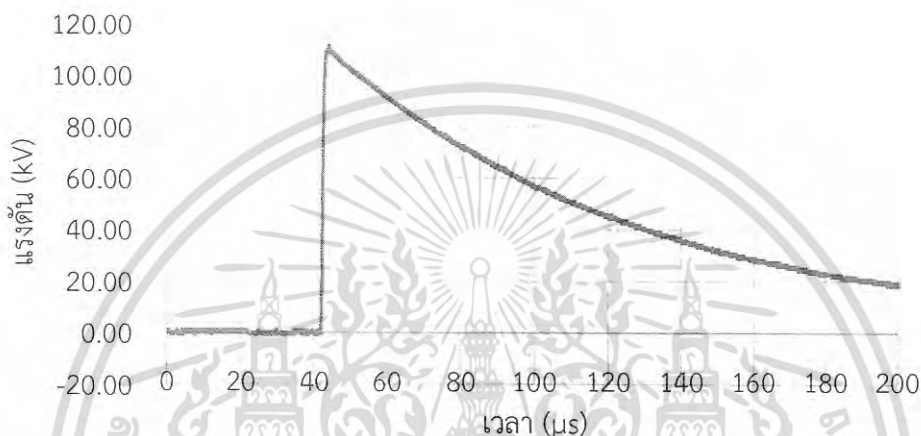
ผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลวเปรียบเทียบดังรูปที่ 4.8 พบว่า น้ำมันหม้อแปลงมีความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวสูงกว่าเอสเทอร์ธรรมชาติประมาณ 1.1 เท่าเมื่อทดสอบภายใต้แรงดันอิมพัลส์ขั้วบวก และสูงกว่า 1.2 เท่า เมื่อทดสอบภายใต้แรงดันอิมพัลส์ขั้วลบ

4.6 การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด

ผลการทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวและชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่มีดังต่อไปนี้

1. แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว

การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่อิมเพริกเน็ตด้วยน้ำมันหม้อแปลงและเอสเทอร์ธรรมชาติ มีรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวที่ใช้ในการอ้างอิงแสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว 1.2/50 μs ที่ใช้ในการตรวจสอบเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60060-1

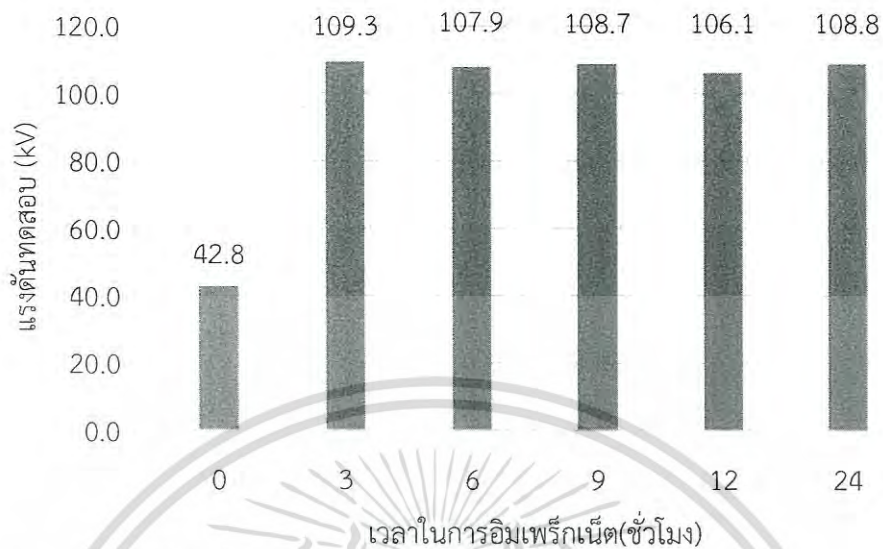
1.1) น้ำมันหม้อแปลง

การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่อิมเพริกเน็ตด้วยน้ำมันหม้อแปลงโดยการเปลี่ยนแปลงเวลาในการอิมเพริกเน็ตและความหนาของเพรสบอร์ด ซึ่งแสดง ตามตารางที่ 4.9 และ 4.10

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่อิมเพริกเน็ตด้วยน้ำมันหม้อแปลง

เวลาในการอิมเพริกเน็ต (ชม.)	ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของน้ำมันหม้อแปลง (kV)						ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	
0	44.6	44.6	43.3	40.8	42.1	41.7	42.8
3	105.8	114.2	109.2	110.8	112.5	103.3	109.3
6	108.3	111.7	101.7	110.8	105.8	109.2	107.9
9	103.3	113.3	112.5	114.2	101.7	107.5	108.7
12	100.8	112.5	101.7	111.7	108.3	101.7	106.1
24	104.2	108.3	108.3	107.5	112.5	111.7	108.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

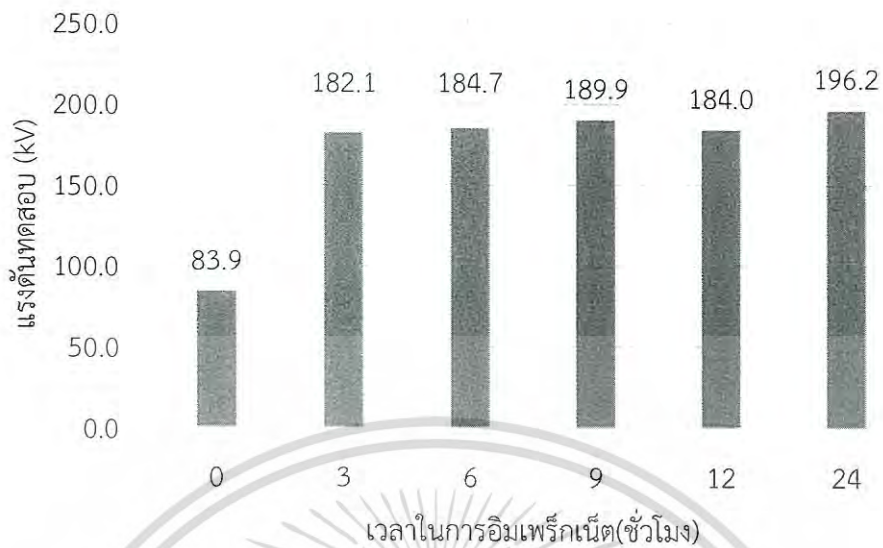


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่มีความหนา 1.6 mm ที่อิมเมจด้วยน้ำมันหม้อแปลง และ จำนวนชั่วโมงในการอิมเมจ

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm ที่อิมเมจด้วยน้ำมันหม้อแปลง

เวลาในการอิมเมจ (ชม.)	ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของน้ำมันหม้อแปลง (kV)						ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	
0	80.0	85.0	78.3	86.7	86.7	86.7	83.9
3	176.0	179.2	183.0	190.0	177.1	187.5	182.1
6	189.6	183.3	185.4	177.1	183.3	189.6	184.7
9	183.3	195.8	193.8	187.5	200.0	179.2	189.9
12	189.6	187.5	177.1	177.1	185.4	187.5	184.0
24	200.0	193.8	193.8	197.9	200.0	191.7	196.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



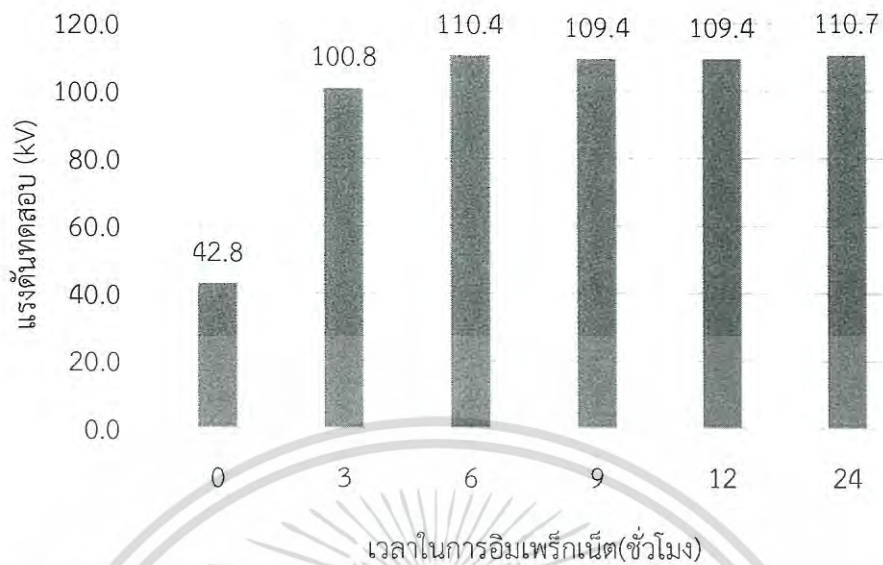
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่มีความหนา 3.2 mm อิมเพิร์กเนตด้วยน้ำมันหม้อแปลง และ จำนวนชั่วโมงในการอิมเพิร์กเนต

1.2) เอสเทอร์ธรรมชาติ

การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่อิมเพิร์กเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติโดยการเปลี่ยนแปลงเวลาในการอิมเพิร์กเนตและความหนาของเพรสบอร์ดซึ่งแสดงตามตารางที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่อิมเพิร์กเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ

เวลาในการอิมเพิร์กเนต (ชม.)	ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเอสเทอร์ธรรมชาติ (kV)						
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ค่าเฉลี่ย
0	41.7	46.3	42.1	42.1	42.5	42.5	42.8
3	100.8	101.7	103.3	98.3	101.7	99.2	100.8
6	123.3	108.3	107.5	111.7	99.2	112.5	110.4
9	109.2	110.8	110.8	108.3	105.0	112.5	109.4
12	108.3	105.0	111.7	110.8	108.3	112.5	109.4
24	110.8	112.5	108.3	109.2	114.2	109.2	110.7

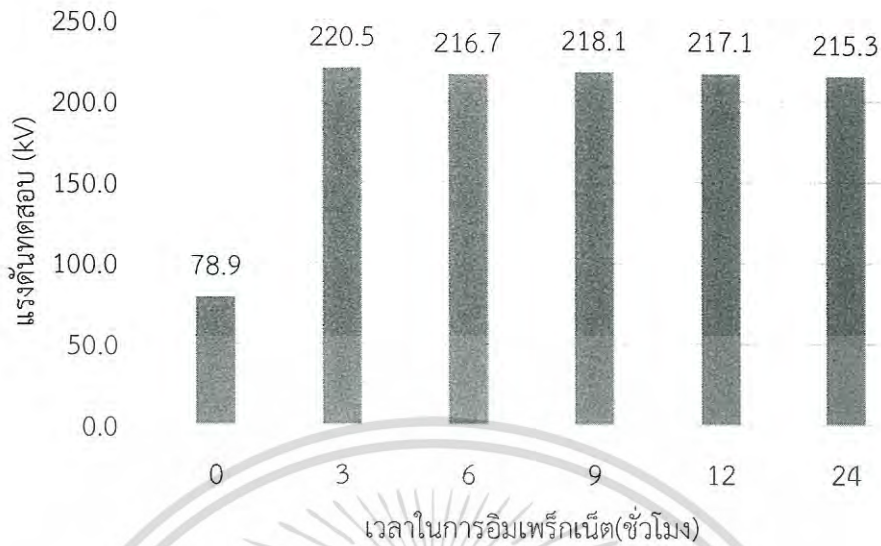


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่มีความหนา 1.6 mm อิมเพริกเน็ตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ และ จำนวนชั่วโมงในการอิมเพริกเน็ต

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm ที่อิมเพริกเน็ตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ

เวลาในการอิมเพริกเน็ต (ชม.)	ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเอสเทอร์ธรรมชาติ (kV)						
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ค่าเฉลี่ย
0	82.5	78.3	83.3	74.2	75.0	80.0	78.9
3	216.7	227.1	220.8	220.8	225.0	212.5	220.5
6	214.6	216.7	208.3	220.8	227.1	212.5	216.7
9	208.3	220.8	227.1	214.6	220.8	216.7	218.1
12	216.7	208.3	225.0	216.7	208.8	227.1	217.1
24	216.7	212.5	214.6	208.3	227.1	212.5	215.3

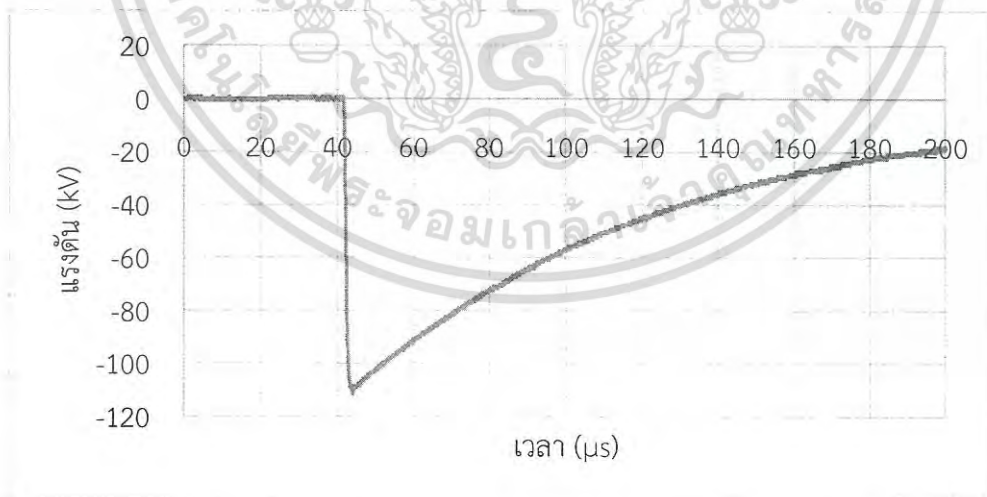
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่มีความหนา 3.2 mm อิมเพิร์กเน็ตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ และ จำนวนชั่วโมงในการอิมเพิร์กเน็ต

2. แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว

การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่อิมเพิร์กเน็ตด้วยน้ำมันหม้อแปลงและเอสเทอร์ธรรมชาติ มีรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวที่ใช้ในการอ้างอิงแสดงดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว 1.2/50 μs ที่ใช้ในการตรวจสอบเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60060-1

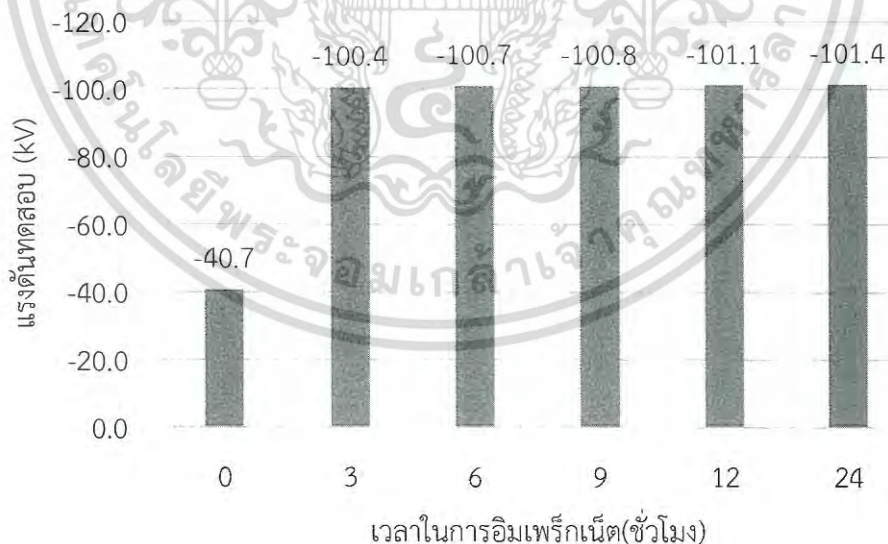
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1) น้ำมันหม้อแปลง

การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วพลบของเพรสบอร์ดที่อิมเพิร์กเน็ตด้วยน้ำมันหม้อแปลงโดยการเปลี่ยนแปลงเวลาในการอิมเพิร์กเน็ตและความหนาของเพรสบอร์ด ซึ่งแสดงตามตารางที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วพลบของเพรสบอร์ดที่มี ความหนา 1.6 mm ที่อิมเพิร์กเน็ตด้วยน้ำมันหม้อแปลง

เวลาในการอิมเพิร์กเน็ต (ชม.)	ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วพลบของน้ำมันหม้อแปลง (kV)						ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	
0	-37.5	-40.8	-41.3	-40.4	-42.9	-41.3	-40.7
3	-100.0	-102.5	-99.2	-98.7	-100.5	-101.5	-100.4
6	-101.5	-100.7	-100.9	-100.5	-100.2	-100.7	-100.7
9	-102.5	-99.2	-99.7	-101.5	-100.0	-101.7	-100.8
12	-100.7	-101.0	-101.2	-101.5	-101.8	-100.4	-101.1
24	-101.7	-96.7	-104.2	-94.2	-104.2	-107.5	-101.4

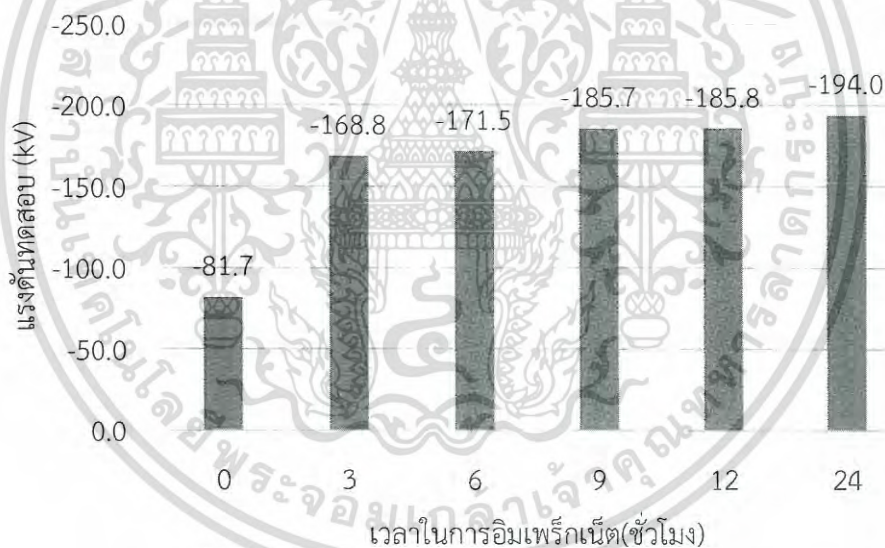


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วพลบของเพรสบอร์ดที่มีความหนา 1.6 mm อิมเพิร์กเน็ตด้วยน้ำมันหม้อแปลง และ จำนวนชั่วโมงในการอิมเพิร์กเน็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วพลบของเพรสบอร์ดที่มี ความหนา 3.2 mm ที่อิมเพิร์กเน็ตด้วยน้ำมันหม้อแปลง

เวลาในการ อิมเพิร์กเน็ต (ชม.)	ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วพลบของน้ำมันหม้อแปลง (kV)						ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	
0	-79.2	-84.2	-82.5	-75.8	-84.2	-84.2	-81.7
3	-166.7	-168.8	-168.8	-166.7	-170.8	-170.8	-168.8
6	-172.9	-170.8	-172.9	-168.8	-168.8	-175.0	-171.5
9	-175.0	-181.3	-197.4	-197.9	-187.5	-175.0	-185.7
12	-175.0	-189.6	-195.8	-181.3	-191.7	-181.3	-185.8
24	-187.5	-197.9	-185.4	-197.9	-200.0	-195.0	-194.0



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วพลบของเพรสบอร์ดที่มีความหนา 3.2 mm อิมเพิร์กเน็ตด้วยน้ำมันหม้อแปลง และ จำนวนชั่วโมงในการอิมเพิร์กเน็ต

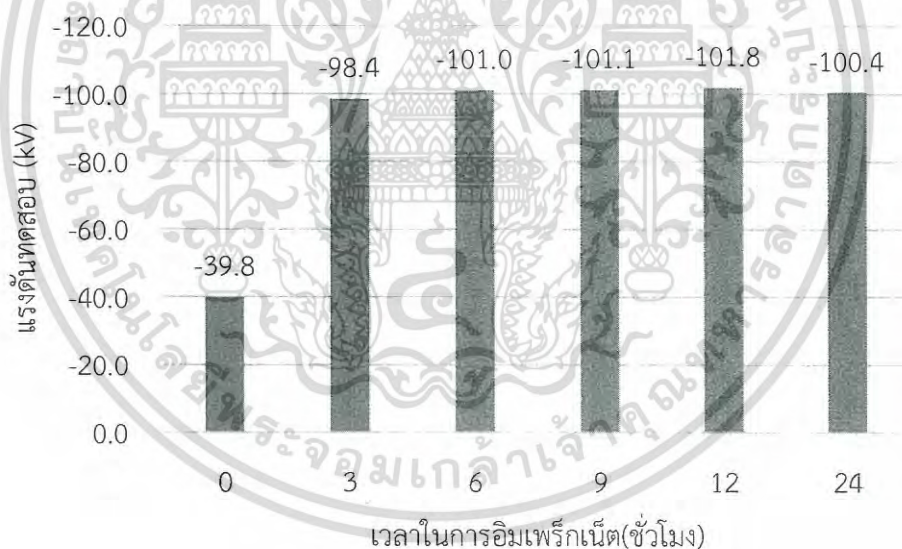
2.2) เอสเทอร์ธรรมชาติ

การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วพลบของเพรสบอร์ดที่อิมเพิร์กเน็ตด้วย เอสเทอร์ธรรมชาติโดยการเปลี่ยนแปลงเวลาในการอิมเพิร์กเน็ตและความหนาของเพรสบอร์ดซึ่งแสดง ตามตารางที่ 4.15 - 4.16 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบของเพรสบอร์ดที่มี ความหนา 1.6 mm ที่อิมเพิร์กเน็ตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ

เวลาในการ อิมเพิร์กเน็ต (ชม.)	ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบของเอสเทอร์ธรรมชาติ (kV)						
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ค่าเฉลี่ย
0	-35.0	-40.2	-40.0	-39.6	-42.1	-41.7	-39.8
3	-100.0	-99.2	-91.7	-101.7	-101.8	-95.8	-98.4
6	-101.8	-101.8	-101.5	-99.2	-101.8	-99.7	-101.0
9	-98.3	-101.7	-103.3	-101.7	-100.8	-100.8	-101.1
12	-101.7	-103.3	-102.8	-100.0	-101.5	-101.7	-101.8
24	-100.0	-101.7	-93.3	-102.5	-103.3	-101.7	-100.4

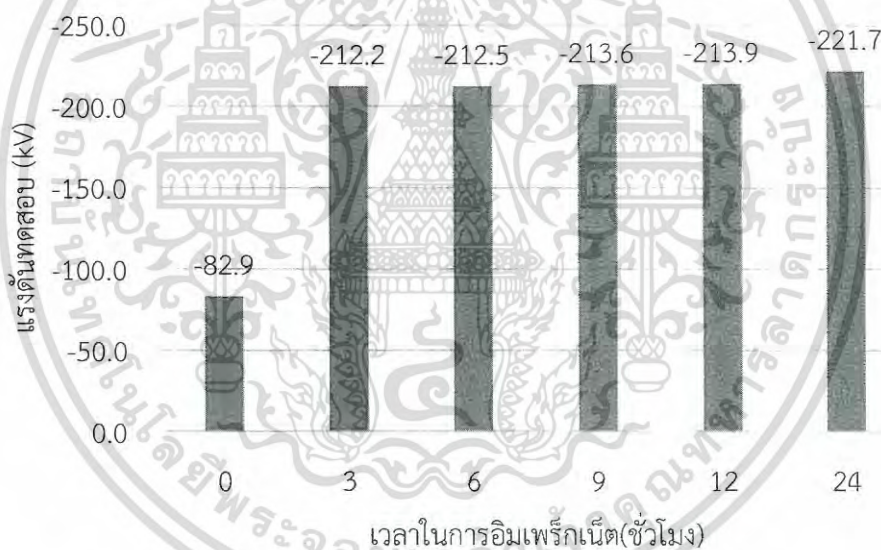


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบของเพรสบอร์ดที่มีความหนา 1.6 mm อิมเพิร์กเน็ตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ และ จำนวนชั่วโมงในการอิมเพิร์กเน็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบของเพรสบอร์ดที่มี ความหนา 3.2 mm ที่อิมเพิร์กเน็ตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ

เวลาในการ อิมเพิร์กเน็ต (ชม.)	ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบของเอสเทอร์ธรรมชาติ (kV)						
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ค่าเฉลี่ย
0	-82.5	-82.5	-87.5	-75.0	-89.2	-80.8	-82.9
3	-214.6	-213.7	-210.5	-211.8	-210.3	-212.5	-212.2
6	-218.8	-211.7	-210.5	-211.8	-212.2	-210.0	-212.5
9	-214.6	-214.7	-212.5	-214.8	-212.5	-212.7	-213.6
12	-200.0	-214.6	-225.0	-218.7	-208.3	-216.7	-213.9
24	-225.0	-218.8	-220.8	-227.1	-217.5	-220.8	-221.7



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบของเพรสบอร์ดที่มีความหนา 3.2 mm อิมเพิร์กเน็ตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ และ จำนวนชั่วโมงในการอิมเพิร์กเน็ต

วิเคราะห์ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด

ผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของบอร์ด ที่ความหนา 1.6 มิลลิเมตร เพรสบอร์ด ที่อิมเพิร์กเน็ตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติมีค่าใกล้เคียงกับเพรสบอร์ดที่อิมเพิร์กเน็ตด้วยน้ำมันหม้อแปลง ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ ที่ความหนา 3.2 มิลลิเมตร เพรสบอร์ดที่อิมเพิร์กเน็ตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติมีค่า สูงกว่าเพรสบอร์ดที่อิมเพิร์กเน็ตด้วยน้ำมันหม้อแปลงทั้งขั้วบวกและขั้วลบ ประมาณ 1.2 เท่าเมื่อ ทดสอบภายใต้แรงดันอิมพัลส์ขั้วบวก และสูงกว่า 1.2 เท่า เมื่อทดสอบภายใต้แรงดันอิมพัลส์ขั้วลบ

เช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เริ่มจากการศึกษาออกแบบตู้ควบคุมอุณหภูมิได้เพื่อใช้ในการเตรียมฉนวนเพื่อทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเอสเตอร์ธรรมชาติเปรียบเทียบกับน้ำมันหม้อแปลง โดยศึกษาเปรียบเทียบ 1) แรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ และอิมพัลส์ชั๊วบวกและลบของฉนวนเหลว 2) แรงดันเบรกดาวน์เพรสบอร์ดเมื่ออิมเพิร์กเน็ตด้วยฉนวนเหลว 3) พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเหลว 4) การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว และการทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1. ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลว

เอสเตอร์ธรรมชาติมีความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์สูงกว่าน้ำมันหม้อแปลงประมาณ 1.3 เท่าเมื่อทดสอบภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยตามมาตรฐาน IEC60156 และขนาดแรงดันเบรกดาวน์ของเอสเตอร์ธรรมชาติค่อนข้างคงที่กว่าน้ำมันหม้อแปลง

5.1.2. ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับของเพรสบอร์ดที่อิมเพิร์กเน็ตด้วยน้ำมันหม้อแปลง และเอสเตอร์ธรรมชาติ

เพรสบอร์ดที่อิมเพิร์กเน็ตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติมีความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับสูงกว่าเพรสบอร์ดที่อิมเพิร์กเน็ตด้วยน้ำมันหม้อแปลงเล็กน้อยเมื่อทดสอบด้วยชุด Unequal electrode ตามมาตรฐาน IEC 60243-1 และการเปลี่ยนแปลงแรงดันเบรกดาวน์เพรสบอร์ดต่อเวลาที่ใช้อิมเพิร์กเน็ตทั้งกรณีน้ำมันหม้อแปลงและเอสเตอร์ธรรมชาติแรงดันเบรกดาวน์เพรสบอร์ดเริ่มคงที่เมื่ออิมเพิร์กเน็ตนาน 9 ชั่วโมง โดยควบคุมอุณหภูมิคงที่ 60 องศาเซลเซียส และความดันบรรยากาศ 200 มิลลิบาร์

5.1.3. พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกและการวัดค่าเปอร์มิตติวิตี้

น้ำมันหม้อแปลงและเอสเตอร์ธรรมชาติมีคุณสมบัติไดอิเล็กตริกคล้ายกันแต่ขนาดต่างกันค่าเปอร์มิตติวิตี้จริงของเอสเตอร์ธรรมชาติสูงกว่าน้ำมันหม้อแปลงประมาณ 1.45 เท่าและมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ค่าเปอร์มิตติวิตี้จินตภาพและค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของเอสเตอร์ธรรมชาติสูงกว่าน้ำมันหม้อแปลงประมาณ 77 เท่าและมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงสูงกว่าเอสเตอร์ธรรมชาติประมาณ 70 เท่า และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.4 การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว

จากการทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว โดยทำการทดสอบทั้งชั่วบวกและลบ พบว่า ฉนวนเหลวชนิดน้ำมันหม้อแปลง มีค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสูงที่สุดทั้งชั่วบวกและลบ โดยชั่วบวกมีค่า 85.42 kV และชั่วลบมีค่าต่ำกว่า -150 kV และในกรณีของเอสเตอร์พบว่า แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสูงที่สุดทั้งชั่วบวกและลบ โดยชั่วบวกมีค่า 78.2 kV และชั่วลบมีค่า -125 kV

5.1.5 การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด

ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดที่ไม่อิมเพริกเน็ตและอิมเพริกเน็ตด้วยน้ำมันหม้อแปลงและเอสเตอร์ธรรมชาติโดยใช้เวลาในการอิมเพริกเน็ต 3, 6, 9, 12 และ 24 ชั่วโมง จากการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทั้งชั่วบวกและชั่วลบ พบว่า

1) จากการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทั้งชั่วบวกและชั่วลบ พบว่า ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทั้งชั่วบวกและชั่วลบมีค่าใกล้เคียงกัน

2) ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดที่มีความหนา 1.6 mm โดยอิมเพริกเน็ตด้วยน้ำมันหม้อแปลงมีค่าอยู่ในช่วง 100-110 kV และเพรสบอร์ดที่อิมเพริกเน็ตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติมีค่าอยู่ในช่วง 98-111 kV ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเพรสบอร์ดที่อิมเพริกเน็ตด้วยน้ำมันหม้อแปลงทั้งชั่วบวกและชั่วลบ ส่วนเพรสบอร์ดที่ไม่อิมเพริกเน็ตมีค่าอยู่ในช่วง 39 – 43 kV ทั้งชั่วบวกและชั่วลบ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเพรสบอร์ดที่อิมเพริกเน็ตด้วยน้ำมันหม้อแปลงและเอสเตอร์ธรรมชาติประมาณ 2.5 เท่า

3) ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดที่มีความหนา 3.2 mm โดยอิมเพริกเน็ตด้วยน้ำมันหม้อแปลงมีค่าอยู่ในช่วง 168 - 197 kV และเพรสบอร์ดที่อิมเพริกเน็ตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติมีค่าอยู่ในช่วง 212 – 222 kV ซึ่งมีค่าสูงกว่าเพรสบอร์ดที่อิมเพริกเน็ตด้วยน้ำมันหม้อแปลงประมาณ 16 เปอร์เซ็นต์ทั้งชั่วบวกและชั่วลบ สำหรับเพรสบอร์ดที่ไม่อิมเพริกเน็ตมีค่าอยู่ในช่วง 78 - 84 kV ทั้งชั่วบวกและชั่วลบ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเพรสบอร์ดที่อิมเพริกเน็ตด้วยน้ำมันหม้อแปลงและเอสเตอร์ธรรมชาติประมาณ 2 - 3 เท่า

4) จากการทดสอบด้วยเพรสบอร์ดที่มีความหนา 1.6 mm และ 3.2 mm พบว่า ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดที่มีความหนา 3.2 mm มีค่าสูงกว่าเพรสบอร์ดที่มีความหนา 1.6 mm ประมาณ 2 เท่า ทั้งชั่วบวกและชั่วลบ

ตารางที่ 5.1 สรุปคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงเปรียบเทียบกับเอสเทอร์ธรรมชาติ

คุณสมบัติทางไฟฟ้า	น้ำมันหม้อแปลง	เอสเทอร์ธรรมชาติ
1. ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาว์นกระแสสลับฉนวนเหลว	แย่กว่า	ดีกว่า
2. ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาว์นกระแสสลับของเพรสบอร์ดที่อิมเพริกเน็ต	แย่กว่า	ดีกว่า
3. พลังงานสูญเสียต่อไอเล็กตริกและการวัดค่าเปอร์มิตติวิตี	ดีกว่า	แย่กว่า
4. การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว	ใกล้เคียงกัน	
5. การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดที่อิมเพริกเน็ต	ใกล้เคียงกัน	

จากการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าพบว่าเอสเทอร์ธรรมชาติมีจุดเด่นและจุดด้อยในบางประการเมื่อเปรียบเทียบกับ น้ำมันหม้อแปลง ทำนองเดียวกันกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพรสบอร์ดที่อิมเพริกเน็ตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ เมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพรสบอร์ดที่อิมเพริกเน็ตด้วยน้ำมันหม้อแปลง เมื่อทำการทดสอบภายใต้เงื่อนไขการทดสอบเดียวกันด้วยเหตุผลนี้จึงเป็นข้อสรุปเบื้องต้นได้ว่าเอสเทอร์ธรรมชาติมีแนวโน้มที่จะสามารถนำมาใช้ทดแทนน้ำมันหม้อแปลงได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อสร้างองค์ความรู้และความน่าเชื่อถือที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานฉนวนเหลวทางเลือกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะเอสเทอร์ธรรมชาติ ควรมีการพัฒนาศึกษาวิจัยเพิ่มเติม เช่น การศึกษาคุณสมบัติทางความร้อน ทางเคมี และอื่นๆ เพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจในการนำเอาเอสเทอร์ธรรมชาติมาใช้เป็นฉนวนเหลวของหม้อแปลงต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Giese, “Electrical strength of pressboard components for transformer insulations”, IEEE Electrical Insulation Magazine Year: 1996, Volume: 12.
- [2] J. Gielnia, C. Ekanayake, K. Walczak, A. Graczkowski, S. Gubanski, “Dielectric responses of new and aged transformer pressboard in dry and wet states”, Proceedings of 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials, 2005. (ISEIM 2005), P.386, 2005.
- [3] R. Villarroel, D. F. García, B. García and J. C. Burgos, “Diffusion Coefficient in Transformer Pressboard Insulation Part 1: Non Impregnated Pressboard”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 21, No. 1; February 2014.
- [4] R. Villarroel, D. F. García, B. García and J. C. Burgos, “Diffusion Coefficient in Transformer Pressboard Insulation Part 2: Mineral Oil impregnated ”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 21, No. 1; February 2014.
- [5] R. Villarroel, D. F. García, B. García and J. C. Burgos, “Moisture Diffusion Coefficients of Transformer Pressboard Insulation Impregnated with Natural Esters”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 22, No. 1; February 2015.
- [6] Cao Pèi, Ji Shengchang, Zhu Lingyu, Cui Yanjie, “The Effect of Thermal Aging on Surface Structure and Mechanical Strength of Oil-impregnated Pressboard”, 2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD) P.1000 - 1003 2016.
- [7] สำรวัย สังข์สะอาด, “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง”, พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์, 2549.
- [8] นายภัทริน กิจเจริญ และคณะ, “การวินิจฉัยฉนวนเหลวสำหรับหม้อแปลง”, ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2558.
- [9] CIGRE, “Experiences in Service with New Insulating Liquids”, CIGRE WORKING Group A2.35, UK, 2010.
- [10] IEC 60296, Edition 4.0 -2012, Fluids for electrotechnical applications - Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear.
- [11] ASTM D3487 -09, Standard Specification for Mineral Insulating Oil Used in Electrical Apparatus.
- [12] IEC 60422, Edition 4.0 -2013, Mineral insulating oils in electrical equipment Supervision and maintenance guidance.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] IEEE C57.147 -2008, Guide for Acceptance and Maintenance of Natural Ester Fluids in Transformers.
- [14] ASTM D6871 -03, Standard Specification for Natural (Vegetable Oil) Ester Fluids Used in Electrical Apparatus.
- [15] รศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช, “วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า(เล่ม 1) ฉนวนและวัสดุฉนวนไฟฟ้า Electrical Engineering Materials”, พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพมหานคร: ห้างหุ้นส่วนจำกัด มินเซอรัวิส ซีพพลาย, 2557.
- [16] Jame H. Harlow, “ Electric power transformer engineering” , The Electric Power Engineering Series 9, CRC Press LLC, 2004, p. 321.
- [17] IEC 60243-1, Edition 3.0 – 2013, Electric strength of insulating materials – Test methods – Part 1: Tests at power frequencies.
- [18] IEC 60897, First Edition 1987 – 03, Methods for the determination of the lightning impulse breakdown voltage of insulating.
- [19] IEC 60156, Insulating Liquids – Determination of the breakdown voltage at power frequencies – Test method.
- [20] ASTM D924 –Standard, Test Method for Dissipation Factor (or Power Factor) and Relative Permittivity (Dielectric Constant) of Electrical Insulating Liquids.
- [21] IEC 60060-1:2010, High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements.




ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

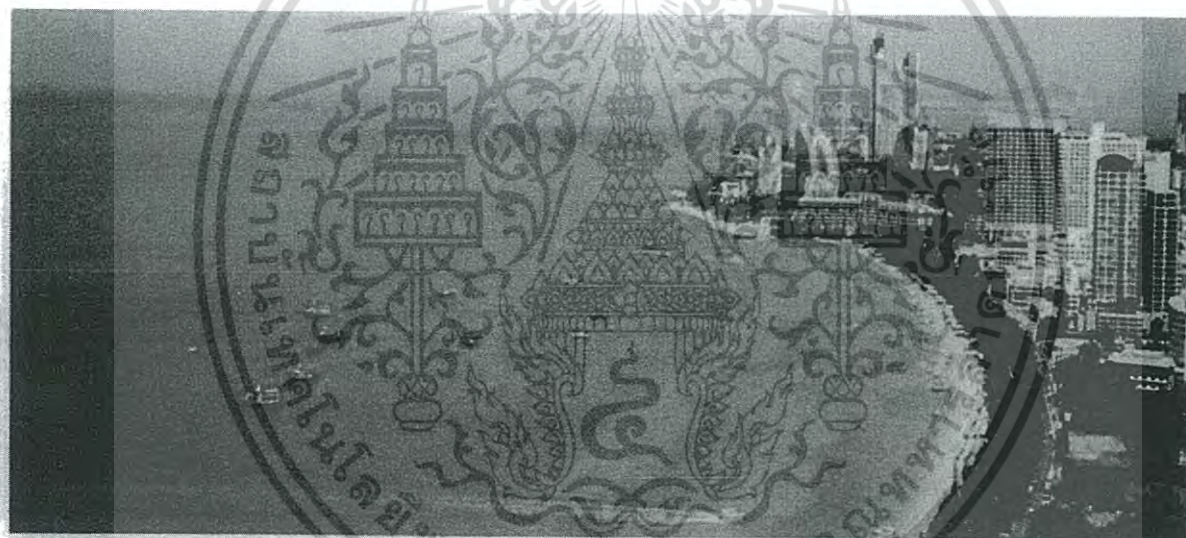
- 
1. S. Maneerot, P. Yutthagowith, and N. Pattanadech, “The Study of Electrical Characteristics of Impregnated Pressboards with Different Insulating Liquids,” 9th International Symposium on EMC and Transients in infrastructures and International Student Session, วันที่ ๒๖ - ๒๗ พฤศจิกายน ๒๕๕๘, โรงแรมแอมบาสเตอร์ ซิตี้ จอมเทียน, จังหวัดชลบุรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISET / ISS 2015 – PATTAYA
The 9th International Symposium on
EMC and Transients in Infrastructures

The 11th International Student Session

26 - 27 November 2015
 Ambassador City Jomtien, Chonburi, Thailand



Organized by

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

In Cooperation with

Doshisha University, Kyoto, Japan

Chubu University, Kasugai, Japan

Tsuruoka National College of Technology, Tsuruoka, Japan

University of Bologna, Bologna, Italy

Seoul National University, Seoul, Korea

Federal Institute of Technology Lausanne, Switzerland

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของหน่วยงานผู้จัดพิมพ์และใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Study of Electrical Characteristics of Impregnated Pressboards with Different Insulating Liquids

S. Maneerot , P. Yutthagowith, and N. Pattanadech

Abstract—This paper represents electrical characteristics of pressboards impregnated with mineral oil and with natural ester also. The Breakdown voltage of different impregnated pressboards were investigated. Besides, capacitance and dielectric dissipation factor of the mineral oil compared with the natural ester were also examined. According to the test results, the pressboard impregnated with ester provided better insulation characteristics such as higher breakdown voltage than pressboards impregnated with mineral oil.

Keywords—breakdown voltage, pressboard, impregnation, mineral oil, ester

I. INTRODUCTION

THE insulation system is an important part of transformers. Two main types of transformer insulation are required which composed of mineral oil and insulation paper. Mineral oil flows between coil and chasis for cooling purpose and infiltrates into the holes of the paper for preventing partial discharges[1]. Thus, the paper is needed to be impregnated with oil[2]. The degradation of mineral oil is one of the vital problems of the transformers[3]. Mineral oil with high water content and contaminant is easy to breakdown. Water can also cause of decreasing in mechanical strength and electrical strength of the pressboard. Generally, the mechanical properties of the paper called degree of polymerization is used to determine the life time of transformers. Currently, ester is an interesting liquid insulation which have been used in distribution transformers. Ester provides higher fire point, higher water tolerance and easier biodegradation compared with mineral oil. However, easier oxidation existing and high viscosity are the weak points of ester.

One of the important properties of insulation is dielectric dissipation factor which directly associates with the age of pressboard[4]. Therefore, this work concentrated on dielectric dissipation factor testing in pressboard impregnated with mineral oil and natural ester

This work was supported in part by Research and Researcher for Industry Research Funding No. MDS5810069.

W. Wattakapaiboon, N. Pattanadech and P. Yutthagowith are with the Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 10520 (norasage@yahoo.com).

II. DESIGN OF EXPERIMENT

A. Test Specimen preparation

The test sample pressboards were impregnated with the insulation liquid before the breakdown characteristics of the pressboard investigated. The procedure for pressboard impregnation was the following:

1) Baking the pressboard with 80 °C for 8 hours. Then, they were kept on the sealed bag or were continuously performed impregnation process.



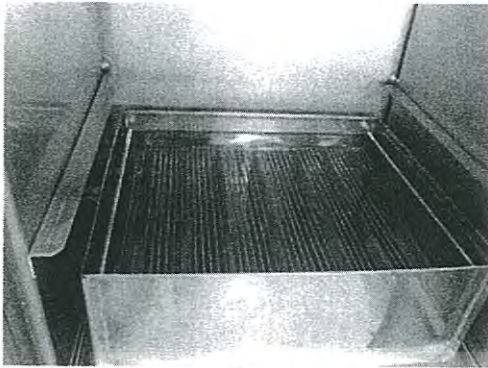
Fig. 1. Baking the pressboards

2) Immersing the pressboards in the prepared liquid insulation in the aluminium box



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)

Fig. 2. Process for filling the pressboards in mineral oil and natural ester



Fig. 5. C & tan δ measurement

3) The pressboards with the liquid insulation were vacuumed and heated at 60 °C for 3, 6, 12 hours inspectively.

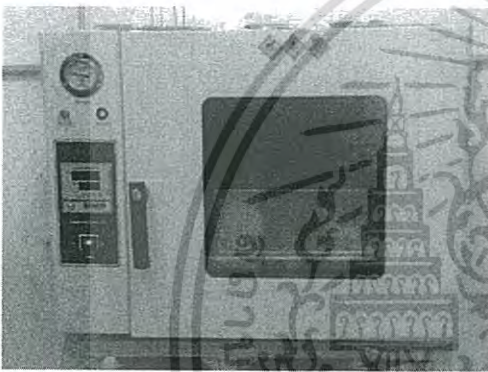


Fig. 3. Vacuum and heat the pressboards with the insulation liquid

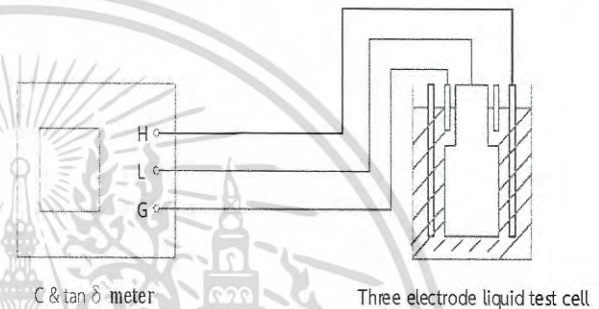


Fig. 6. tan δ and permittivity measurement

2) Breakdown experiment

To investigate breakdown characteristics of pressboards impregnated with mineral oil and natural ester, the test circuit was set up as shown in Fig. 7 and the test circuit diagram is illustrated in Fig 8.

4) The impregnated pressboards were ready to experiment.



Fig. 4. Impregnated pressboards for investigation

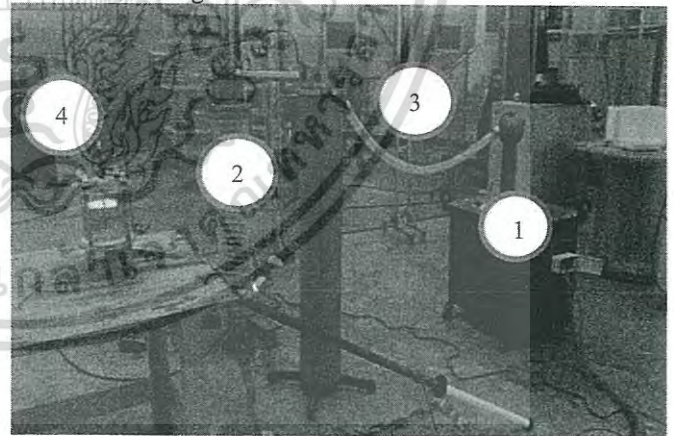


Fig. 7. Breakdown characteristics test circuit set up

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

B. Testing experiment

1) C & tan δ measurement of the insulating liquid

Prior to breakdown experiment the mineral oil and natural ester were tested with different temperature for investigating tan δ and permittivity by employing the testing equipment as shown in Fig. 5. The test circuit diagram is shown in Fig 6.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

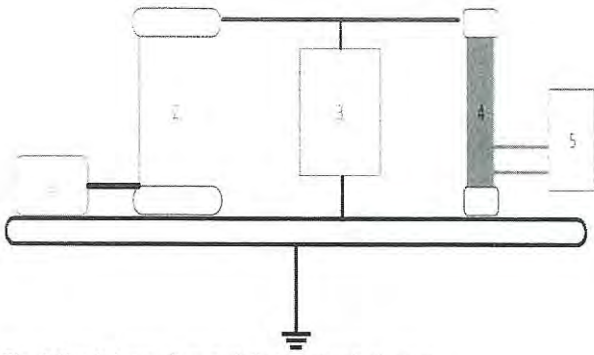


Fig. 8. Breakdown characteristic test circuit diagram

- where
- 1: Variac
 - 2: AC high voltage source 100kV 50mA
 - 3: Test object
 - 4: AC voltage divider
 - 5: Multimeter

C. Testing materials

- 1) 30 Pressboards impregnated with mineral oil
- 2) 30 Pressboards impregnated with natural ester
- 3) 30 liters Mineral Oil
- 4) 30 liters Natural Ester

III. TEST PROCEDURE

A. $\tan\delta$ and permittivity experiment

- 1) Preparing the test circuit as shown in Fig. 6
- 2) Setting the testing device
- 3) Increasing temperature in step each step of 5 °C From 35 °C to 100 °C
- 4) Recording $\tan\delta$ and permittivity

B. Breakdown experiment

- 1) Preparing the test circuit as shown in Fig. 7-8
- 2) Applying the test voltage to the test object (impregnated pressboard) the test voltage from 0 to breakdown voltage
- 3) Recording the breakdown voltage

IV. TEST RESULT

A. Mineral oil and natural ester characteristics

Fig.9 –Fig. 11 and table I represent the $\tan\delta$ and permittivity of the mineral oil and natural ester which were heated with 60 °C for 12 hours

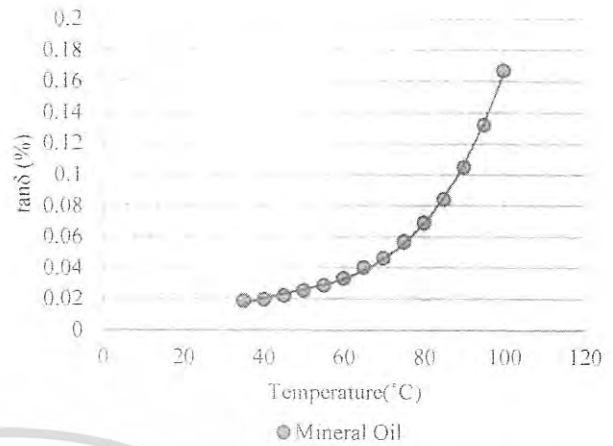


Fig. 9. Relationship between dielectric dissipation factor and temperature of mineral oil

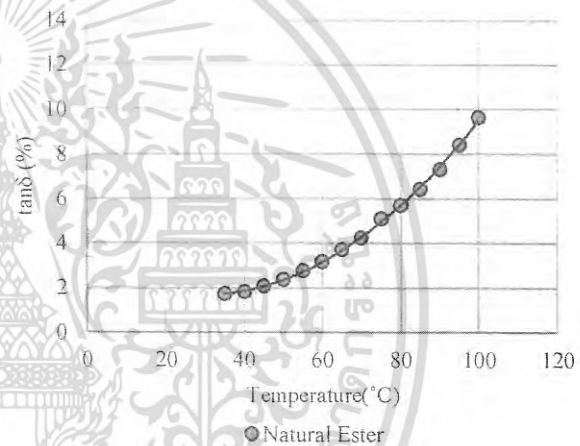


Fig. 10. Relationship between dielectric dissipation factor and temperature of natural ester

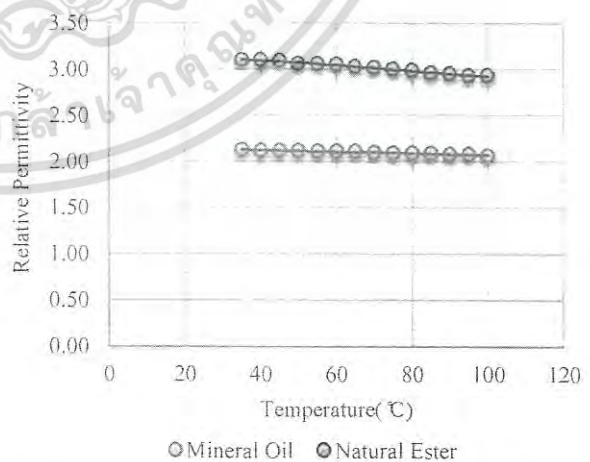


Fig. 11. Relationship between relative permittivity and temperature of the tested liquid

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE I
ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF BY USING MINERAL OIL

Temp (°C)	C (pf)	tanδ (%)	ϵ_r
35	187.2	0.0185	2.12
40	187.0	0.0196	2.12
45	186.6	0.0219	2.12
50	186.1	0.0251	2.11
55	185.8	0.0287	2.11
60	185.5	0.0331	2.11
65	185.0	0.0403	2.10
70	184.6	0.0464	2.10
75	184.4	0.0570	2.09
80	183.8	0.0692	2.09
85	183.3	0.0844	2.08
90	182.8	0.1050	2.07
95	182.5	0.1320	2.07
100	182.1	0.1670	2.07

TABLE II
ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF BY USING NATURAL ESTER

Temp (°C)	C (pf)	tanδ (%)	ϵ_r
35	273	1.72	3.10
40	272	1.82	3.09
45	271	2.07	3.06
50	269	2.36	3.05
55	268	2.76	3.04
60	266	3.17	3.02
65	265	3.70	3.01
70	264	4.23	3.00
75	262	5.09	2.97
80	261	5.69	2.96
85	260	6.42	2.95
90	259	7.29	2.94
95	258	8.41	2.93
100	257	9.62	2.92

B. Breakdown characteristics of pressboard impregnated with mineral oil and natural ester

The breakdown characteristics of pressboard impregnated with mineral oil and natural ester are represented in table. III – table. IV and in Fig. 12 respectively.

TABLE III
BREAKDOWN VOLTAGE FROM TESTING BY USING MINERAL OIL

Round Time(Hrs.)	1	2	3	4	5	Average
3	40.12	37.70	37.32	38.52	40.72	38.876
6	42.68	44.09	41.94	43.65	42.79	42.910
9	50.17	50.21	48.87	48.86	47.36	49.094

TABLE IV
BREAKDOWN VOLTAGE FROM TESTING BY USING NATURAL ESTER

Round Time(Hrs.)	1	2	3	4	5	Average
3	38.73	38.69	42.29	43.22	43.27	41.240
6	47.14	45.15	45.12	48.07	48.04	46.720
9	50.12	49.18	53.00	52.45	54.76	51.902

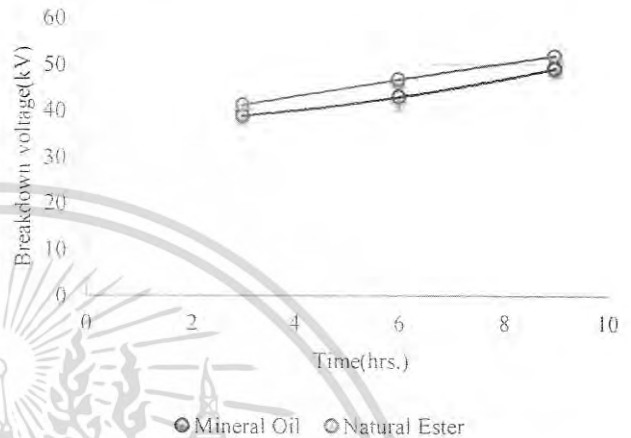


Fig. 12. Relationship between breakdown voltage and impregnated time

V. CONCLUSIONS

The experiment of the electrical properties of liquid insulation and pressboard impregnated with mineral oil and natural ester has been carried out. Results indicated that the electrical properties of liquid insulation such as capacitance, dielectric dissipation factor and permittivity were affected by the temperature. Mineral oil provided lower C, tanδ and permittivity than ester.

From breakdown voltage test, it was found that the electrical insulation properties of pressboard impregnated with natural ester were higher than pressboard impregnated with mineral oil.

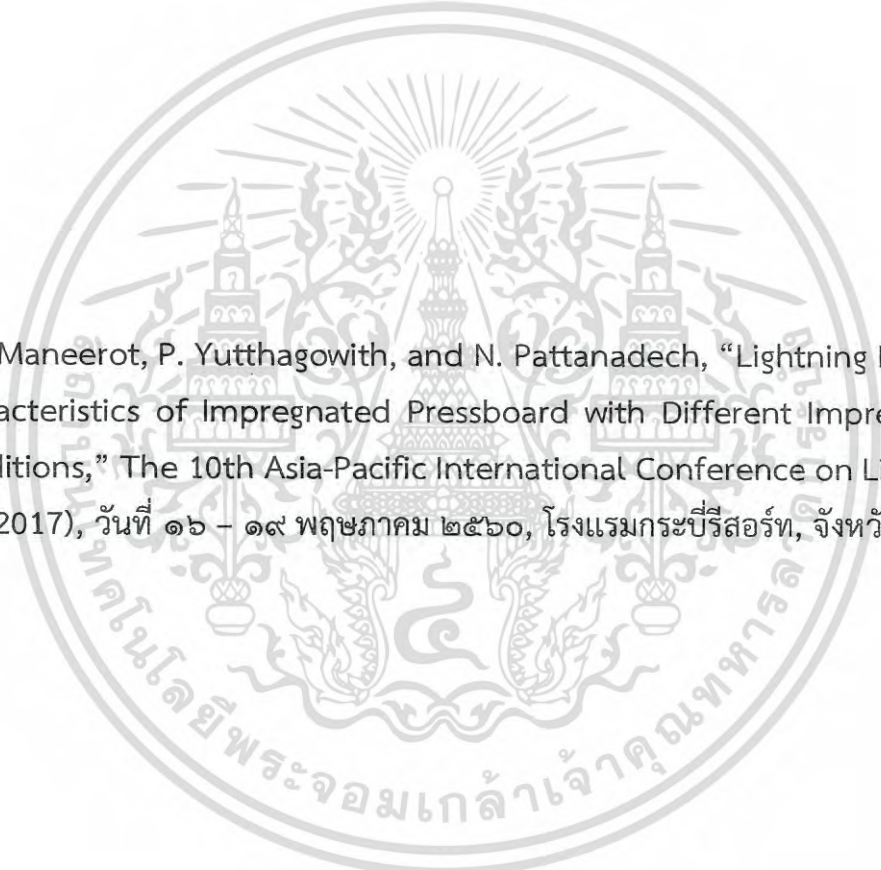
ACKNOWLEDGMENT

The authors gratefully acknowledged the support of all staff at high voltage laboratory, King Mongkut's Institute of technology Ladkrabang.

REFERENCES

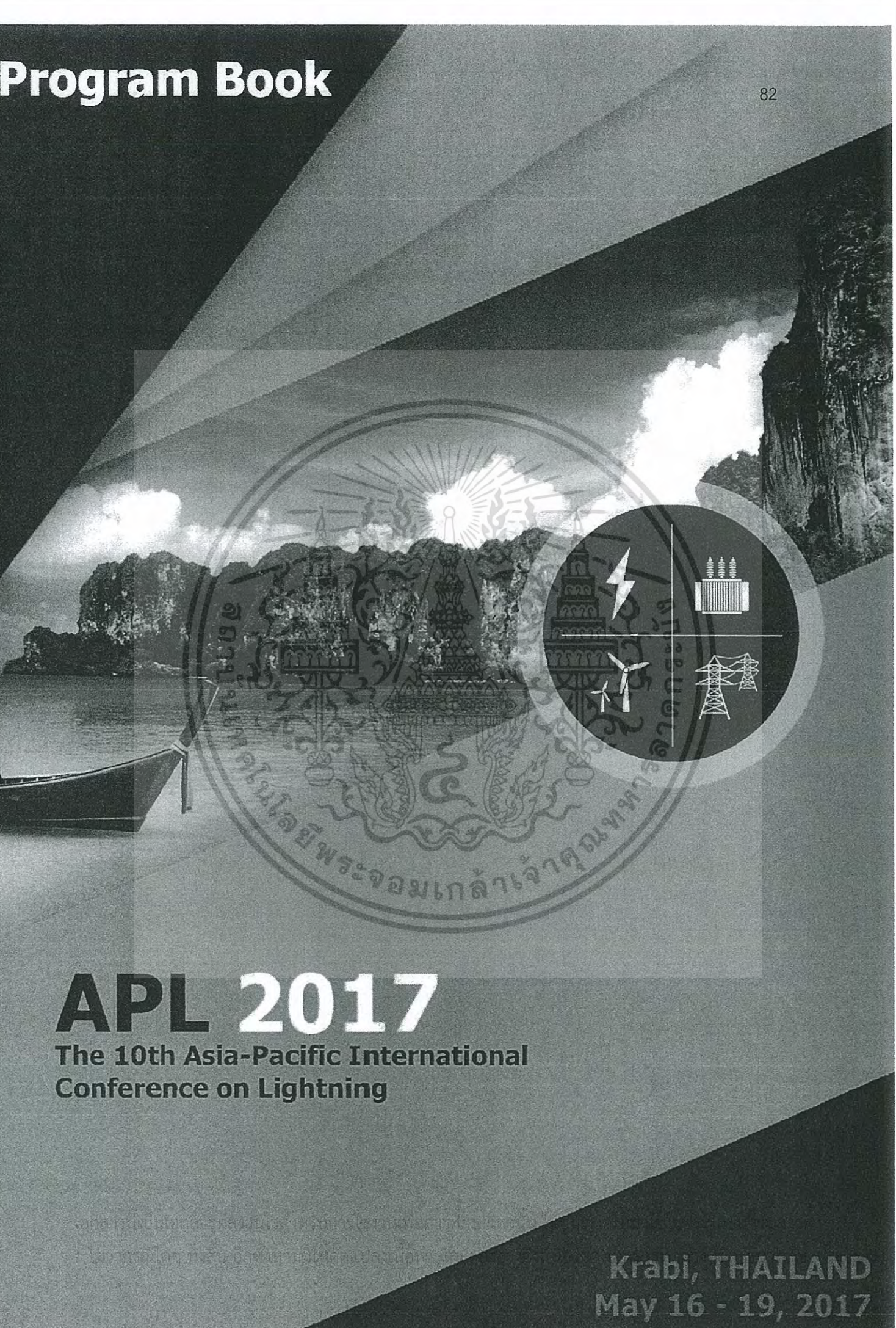
- [1] N. Pattanadech, "Insulation," in *Electrical Engineering Materials*, 3rd ed., vol 1, Bangkok, Thailand: Mean Service Supply, 2014, pp.48-105.
- [2] Amanpreet Singh Gill, "The Design of Transformer oil," *IEEE Conf. Elect. Ins.*, pp. 250-247, 5April.2000.
- [3] *Cigre Brochure 436*, "Experiences in service with new Insulating liquids," October .2010.
- [4] *Cigre Brochure 323*, "Ageing of cellulose in mineral-oil insulation transformers," October 2007.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2. S. Maneerot, P. Yutthagowith, and N. Pattanadech, "Lightning Impulse Characteristics of Impregnated Pressboard with Different Impregnated Conditions," The 10th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL2017), วันที่ ๑๖ - ๑๙ พฤษภาคม ๒๕๖๐, โรงแรมกระบี่ รีสอร์ท, จังหวัดกระบี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



APL 2017

The 10th Asia-Pacific International
Conference on Lightning

Krabi, THAILAND
May 16 - 19, 2017

Lightning Impulse Characteristics of Impregnated Pressboard with Different Impregnated Conditions

S. Maneerot, P. Yutthagowith, and N. Pattanadech

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
1 Soi Chalongsung 1 Ladkrabang Bangkok 10520 Thailand
sakda@lamool.com

Abstract

This paper represents lightning impulse characteristics of mineral oil impregnated pressboards under different impregnation periods. 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 80 °C for 8 hours. Next, these pressboards were divided into six groups according to the impregnation periods. The first group was impregnated with mineral oil for 3 hours with temperature at 60 °C and 200 mbar pressure controlled condition. The second to fifth groups were impregnated for 6, 9, 12, 24 hours respectively with the same temperature and pressure condition. The last group was the unimpregnated pressboard. Then, the impulse breakdown voltage testing of the impregnated pressboards were investigated according to IEC 60243-1. Besides, the lightning impulse breakdown voltages of the mineral oil were examined in accordance with IEC 60897. According to the test results, the impregnated pressboard provided remarkably higher impulse breakdown voltage than that of the unimpregnated pressboard. Moreover, there were no different of impulse breakdown voltages of impregnated pressboards impregnated for 3-24 hours and also there was no effect of the impulse polarities. Besides, it was clearly that the negative impulse breakdown voltage of the mineral oil was higher than the positive impulse breakdown voltage.

Keywords: lightning impulse withstand voltage, impregnation, pressboard, mineral oil

1. 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]. Generally, impulse dielectric strength testing of the insulating material is an importance topic to prove that the insulating material can withstand the transient high voltage surges generated by lightning or not. Therefore, transformers have to be tested with impulse voltage with the magnitude depending on the voltage class of the

transformer. This research work investigated the lightning impulse characteristics of impregnated pressboards with different impregnated time. The results from the experiment can be applied for the transformer manufacturing.



Fig.1. Pressboard application for transformer

2. Test Specimen

The test sample pressboards were impregnated with the insulation liquid before the breakdown characteristics of the pressboard investigated. The procedure for pressboard impregnation was the following:

1) Baking the pressboard with 80 °C for 8 hours. Then, they were kept on the sealed bag or were continuously performed impregnation process.

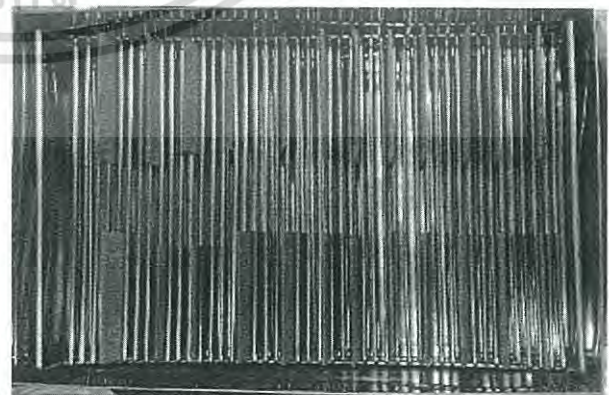


Fig. 2. Pressboard after baking

2) Immersing the pressboards in the prepared mineral oil in the aluminium box.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Fig. 3. Mineral oil with pressboards for impregnation.

3) The pressboards with the liquid insulation were vacuumed and heated at 60 °C for 3, 6, 9, 12, and 24 hours respectively.

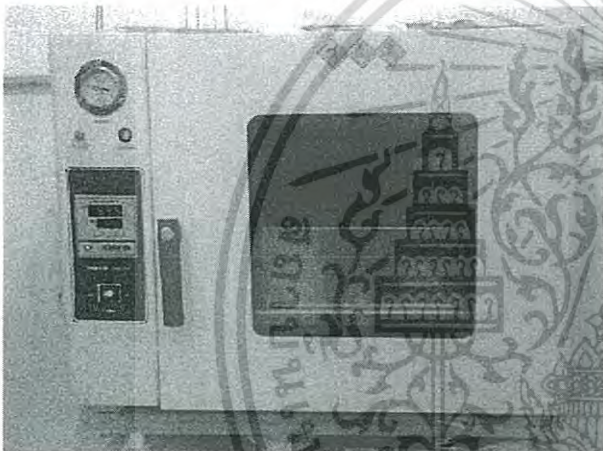


Fig. 4. Vacuum and heat the pressboards with the insulation liquid pressboards.

4) The impregnated pressboards were ready to experiment.



Fig. 5. Impregnated pressboards for investigation

3. Test experiment

3.1 Lightning impulse breakdown characteristics of mineral oil

Lightning impulse breakdown test was performed with a needle-sphere electrode system

according to IEC 60897 [3]. The test circuit diagram and experiment test set up are depicted in Fig. 6 and Fig. 7 respectively. In the experiment, the needle-sphere electrode configuration was set with the gap spacing of 15 mm, and the tungsten needle with the tip radius of 40 μm was utilized as the high voltage electrode whereas the brass sphere with the diameter of 13 mm was used as the grounded electrode. The testing method following IEC 60897 was performed for the lightning impulse breakdown tests.

3.2 Lightning impulse breakdown characteristics of mineral oil impregnated pressboards

To perform lightning impulse breakdown testing of the mineral oil impregnated pressboards, the test circuit diagram and experiment test setup as shown in Fig.8-Fig.9 were utilized. The prepared pressboard was inserted between the tested electrodes designed and constructed as recommended in [4]. The impulse breakdown voltage test was done for six identical impregnated pressboards and the mean value of impulse breakdown voltages was calculated and reported.

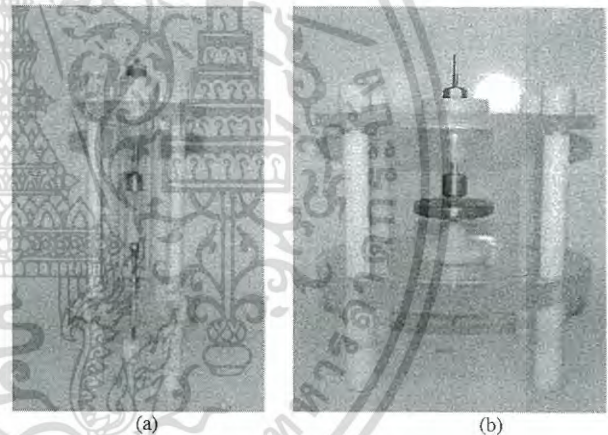


Fig. 7. Test vessel for lightning impulse voltage test for (a) mineral oil (b) mineral oil impregnated pressboards

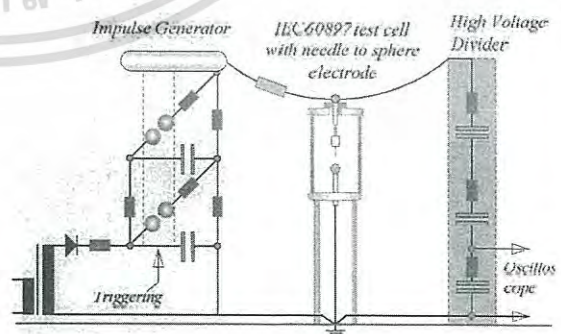


Fig. 8. Test circuit diagram.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

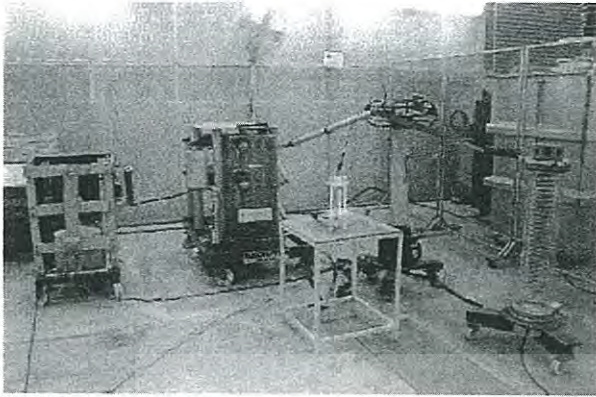
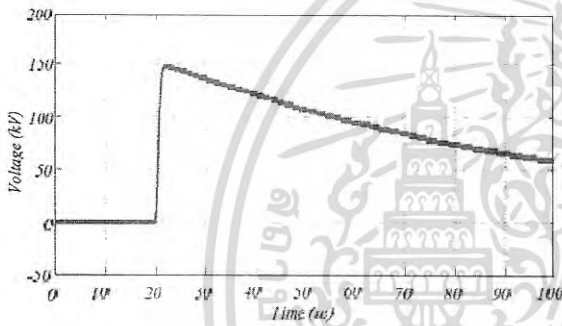
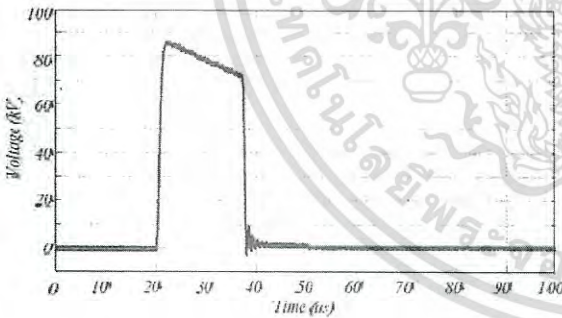


Fig. 9. Test circuit set up.

Fig.10-Fig.11 represent the standard impulse waveforms and the impulse breakdown voltage waveforms both positive and negative polarities.

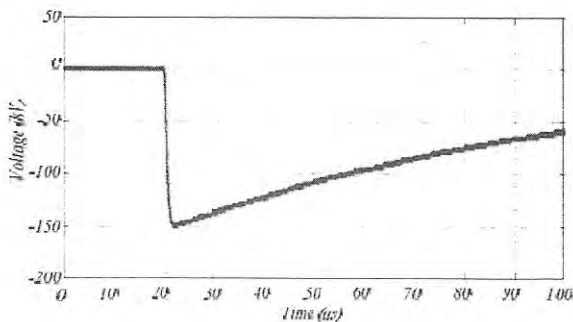


(a)

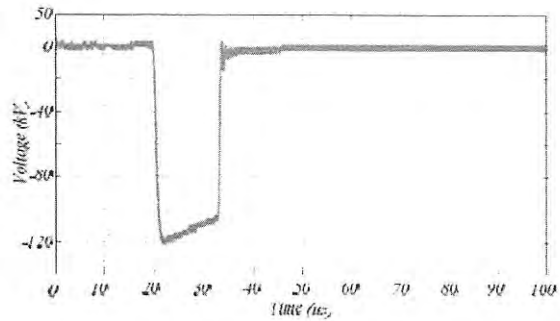


(b)

Fig. 10. (a) Positive impulse voltage standard waveform
(b) Positive impulse breakdown voltage waveform



(a)



(b)

Fig. 11. (a) Negative impulse voltage standard waveform
(b) Negative impulse breakdown voltage waveform

4. Test Results

The impulse breakdown strength was investigated to evaluate the impulse breakdown characteristics of the mineral oil and the mineral oil impregnated pressboard usually the mean breakdown values are determined to estimate the quality of the test insulation

4.1 Impulse breakdown voltages of the mineral oil

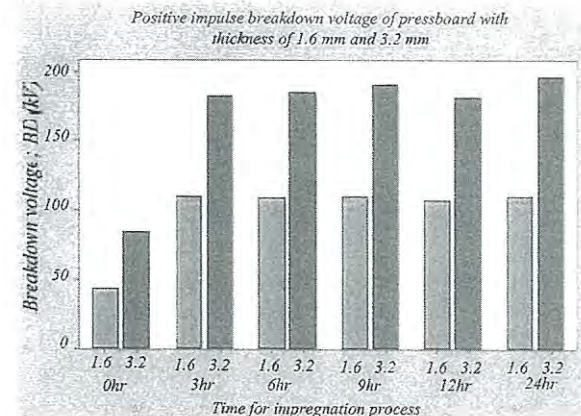
The average impulse breakdown voltages both positive and negative polarities of mineral oil are shown in Table 1.

TABLE II
The impulse breakdown voltages of mineral oil.

Liquid insulation	Positive Impulse Voltage(kV)	Negative Impulse Voltage(kV)
Mineral oil	53.3	<-150

4.2 Impulse breakdown voltages of the mineral oil impregnated pressboard.

The average impulse breakdown voltages both positive and negative polarities of mineral oil impregnated pressboards with different impregnation times are illustrated in Fig.12.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้เอาไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

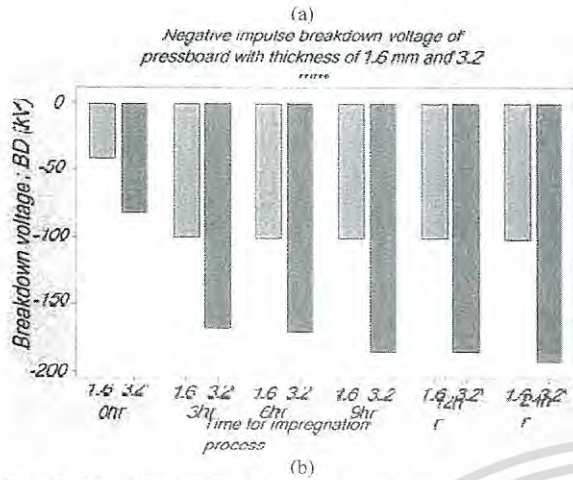


Fig. 12. The impulse breakdown voltage of pressboards impregnated with mineral oil.

5. Conclusion

The experiment of the impulse voltage characteristics of the mineral oil and of the mineral oil impregnated pressboards with different impregnated times have been carried out. Results indicated that the negative impulse breakdown voltage of the mineral oil was clearly higher than the positive impulse breakdown voltage. Furthermore, the impulse breakdown voltages of the mineral oil impregnated papers were significantly higher than the impulse breakdown voltage of the unimpregnated paper. However, the impregnation times of 3-24 hours seem no effect on both positive and negative impulse breakdown voltages of the mineral oil impregnated pressboards.

References

- [1] N. Pattanadech, "Insulation," in *Electrical Engineering Materials*, 3rd ed., vol 1, Bangkok, Thailand: Mean Service Supply, 2014, pp.48-105.
- [2] Amanpreet Singh Gill, "The Design of Transformer oil," *IEEE Conf. Elect. Ins.*, pp. 250-247, 5 April, 2000.
- [3] IEC 60897, "Method for the determination of the lightning impulse breakdown voltage of insulating liquids", Int'l. Electrotechnical Commission, 1987.
- [4] IEC 60243-1, Electric strength of insulating materials-Test Methods-, Part 1: Tests at power frequencies, edition 3.0, 2013-03.

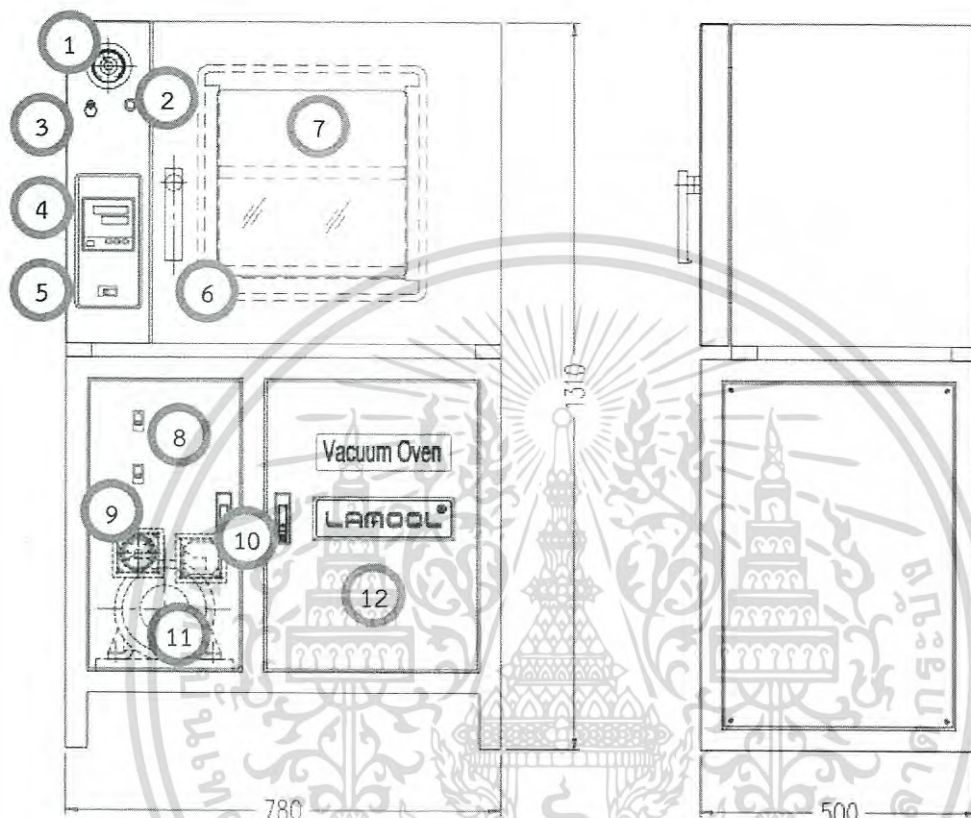
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบสร้างตู้อบสุญญากาศที่ควบคุมอุณหภูมิได้เพื่อใช้ในการเตรียมฉนวน การออกแบบระบบทดสอบฉนวนเหลวเพื่อให้สอดคล้องกับการเตรียมฉนวนของหม้อแปลงมีส่วนประกอบ และมีคุณสมบัติดังนี้

โครงสร้างและส่วนประกอบต่างๆ



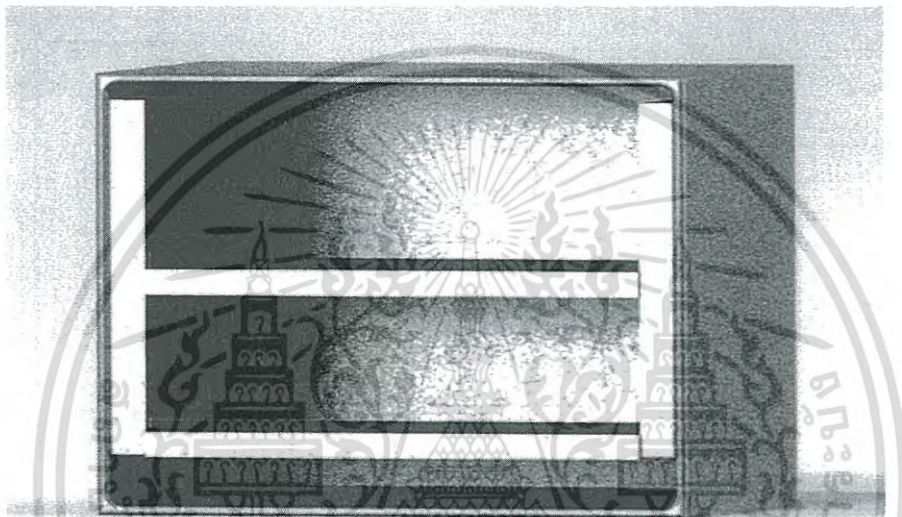
รูปที่ 1 โครงสร้างของตู้อบสุญญากาศ

- เมื่อ
- 1 คือ เกจแวกคัมความดันภายในเครื่อง
 - 2 คือ สวิตซ์โซลีนอยด์
 - 3 คือ วาล์วปล่อยอากาศเข้า
 - 4 คือ PID คอนโทรลเลอร์
 - 5 คือ สวิตซ์ควบคุม PID
 - 6 คือ ที่เปิดตู้
 - 7 คือ กระจกกันความดัน
 - 8 คือ สวิตซ์แวกคัม
 - 9 คือ เกจแวกคัมของปั๊ม
 - 10 คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์
 - 11 คือ ปั๊มแวกคัม
 - 12 คือ ตู้เก็บอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของระบบ

- 1) สามารถใช้ได้ถึง 200 องศาเซลเซียส
- 2) สามารถสร้างความดันสุญญากาศได้ถึง 200 มิลลิบาร์
- 3) จุดวัดอุณหภูมิสามารถวัดได้ละเอียด 0.1 องศาเซลเซียส
- 4) ความผิดพลาดของตัวกำหนดอุณหภูมิเมื่อเทียบกับอุณหภูมิจริงไม่เกิน 1 องศาเซลเซียส
- 5) ใช้กับระบบไฟฟ้า 220 โวลต์ ที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์
- 6) สามารถตั้งเวลาได้ตามที่ต้องการและมีความแม่นยำ

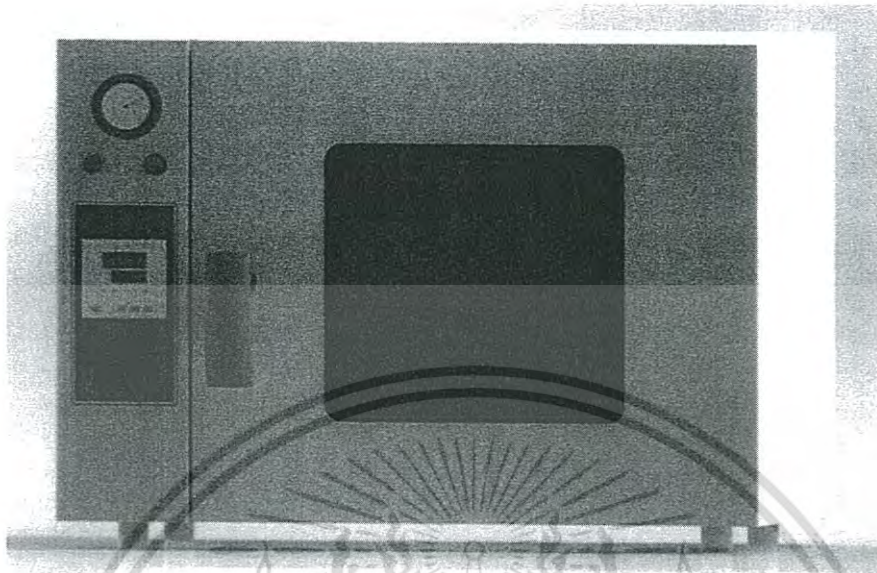


รูปที่ 2 ภาพหน้าตัดภายในตู้อบส่วนบนจำลองด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS



รูปที่ 3 ภาพหน้าตัดภายนอกตู้อบส่วนบนจำลองด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 ตู้อบส่วนบนพร้อมฝาปิดจำลองด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS

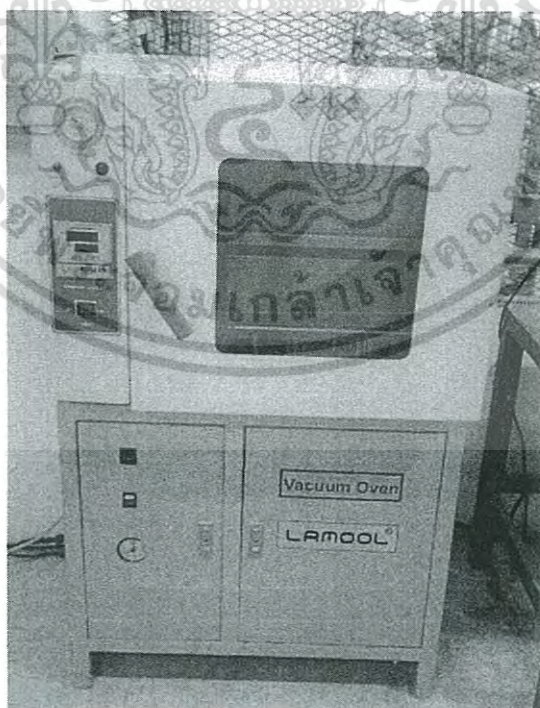


รูปที่ 5 ตู้อบส่วนล่างจำลองด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6 ตู้อบจำลองด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS



รูปที่ 7 ตู้อบสุญญากาศที่ประกอบสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



IEC 60243-1

Edition 3.0 2013-03

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

**Electric strength of insulating materials – Test methods –
Part 1: Tests at power frequencies**

**Rigidité diélectrique des matériaux isolants – Méthodes d'essai –
Partie 1: Essais aux fréquences industrielles**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Dimensions in millimetres

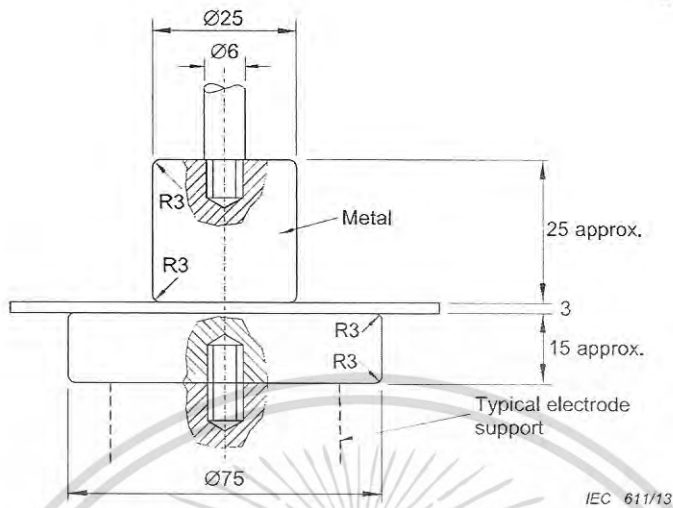


Figure 1a – Unequal electrodes

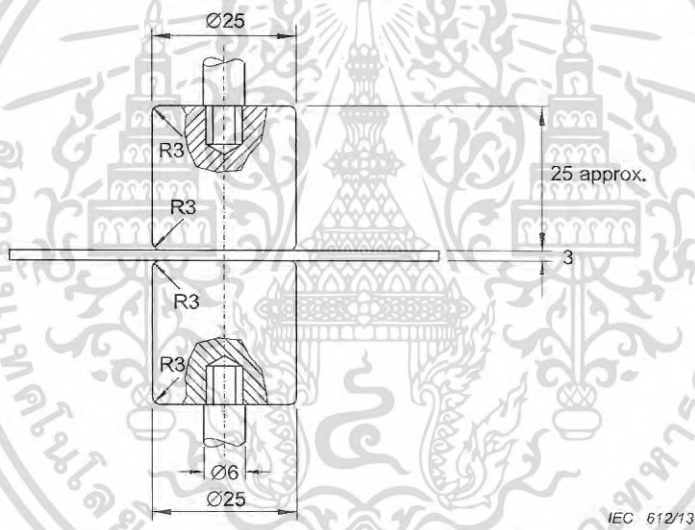


Figure 1b – Equal diameter electrodes

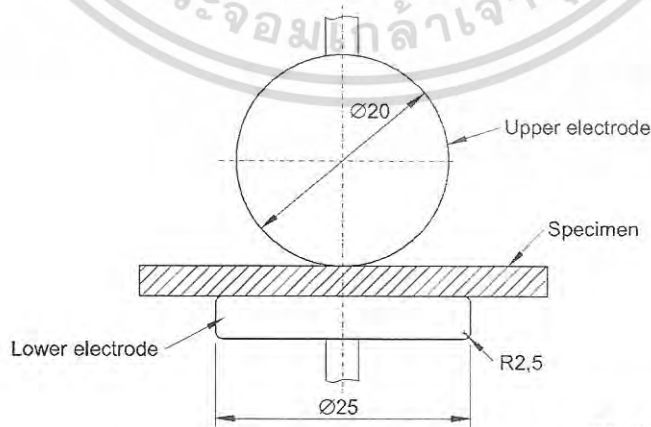


Figure 1c – Sphere and plate electrodes

All tolerances for linear measures ± 1 mm for radius ± 2 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสาร **Figure 1 – Electrode arrangements for tests on boards and sheets perpendicular to the surface** ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดเบี่ยงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

94
**CEI
IEC**

60897

Première édition
First edition
1987-03

**Méthodes de détermination de la tension de
claquage au choc de foudre des liquides isolants**

**Methods for the determination of the lightning
impulse breakdown voltage of insulating liquids**



Numéro de référer
Reference numl
CEI/IEC 60897: 19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 *Impulse voltage measurement*

The impulse voltage measurement should be carried out as laid down by IEC Publications 60-3 and 60-4. An accurately calibrated resistive voltage divider and a crest voltmeter are recommended in preference to an oscilloscope. However, calibration of the measuring system by sphere-gap in accordance with IEC Publication 52 is acceptable. The error in measurement of the crest value of the impulse voltage should be known and should not exceed 3%.

4.4 *Test-cell design*

4.4.1 The cell consists of a vessel containing a vertical gap as shown for example in Figure 1, page 26. The volume of liquid in this cell is of the order of 300 ml.

Metal parts shall be restricted to electrodes and their supports.

4.4.2 The test-cell should be designed for ease of dismantling and thorough cleaning. Dimensions should ensure a flashover voltage of at least 250 kV.

4.4.3 Insulating materials used in the cell shall be of high dielectric strength, thermally stable for temperatures up to 80 °C, compatible with insulating liquids to be tested, and resistant to solvents and cleaning agents commonly used for these liquids.

4.4.4 The gap shall be composed of two electrodes forming an adjustable point-to-sphere configuration. The spherical electrode shall be of polished steel and may consist of a bearing ball 12.5 mm to 13 mm in diameter. This ball is held in place by a magnet. The point electrode shall be a gramophone needle, with a conical tip having a radius of curvature in the range 40 µm to 70 µm. The shape of the needle and the radius of curvature should be checked using a microscope; Appendix B gives a method for measuring the radius of curvature.

5. *Sampling of the liquid*

Samples of the insulating liquid to be tested shall be taken in accordance with IEC Publication 475.

6. *Preparation and maintenance of the cell*

6.1 *Cell cleaning*

All parts of the cell, including the spherical electrode and gramophone needle, shall be de-greased with reagent-grade heptane, washed with detergent, rinsed thoroughly with hot tap-water and then with distilled water.

The parts should then be dried with oil-free dehydrated compressed air, and kept in a desiccator until required.

6.2 *Daily use*

The cell prepared as described in Sub-clause 6.1 is ready for the tests. Before testing a new sample, repeat the prescribed cleaning using an appropriate solvent.

As long as the tests are applied to the same sample, rinsing out with the liquid between each filling is adequate.

7. *Preparation of test*

7.1 Rinse the cell and electrodes thoroughly with the sample liquid. Fill the test-cell, slowly, making sure that there are no gas bubbles. Allow the liquid to settle for at least 5 min before testing.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2 Electrode spacing

Gently set the electrodes in contact, checking contact with an ohmmeter; then displace one of the electrodes to the desired spacing value using a dial micrometer, a helical device or a thickness gauge. The gap spacing shall be adjusted to the values defined in Sub-clause 8.1.2, with a tolerance of 0.1 mm.

- 7.3 Earth the spherical electrode; the connection shall be as short as possible. The impulse generator output shall be applied to the point electrode and care must be taken to avoid too large a connection loop.
- 7.4 The temperature of the sample when tested should be the same as the temperature of the test-room; a room temperature between 15 °C and 30 °C is appropriate. Record the test temperature.

8. Test procedures

8.1 Method A—Step test

8.1.1 Principle

1.2/50 standard lightning impulse voltages of increasing crest value are applied to the liquid specimen using a point-to-sphere electrode system until breakdown occurs. Five measurements are carried out and their average is taken as the lightning impulse breakdown voltage of the liquid tested.

The initial value of the test voltage, the voltage step and the electrode spacing depend on the breakdown voltage value of the liquid tested.

8.1.2 Procedure

- a) Prepare the test-cell as described in Clause 7.
- b) From Table I, select the appropriate initial value of the test voltage (U_i) voltage step and gap spacing, based on the expected breakdown (U_e) at 15 mm gap spacing.
- c) Apply one impulse (of the selected polarity) at the initial selected voltage and then increase the voltage in steps until breakdown occurs. One impulse shall be applied at each voltage level, allowing a minimum of 1 min. between two successive impulses.
- d) The procedure as described in Items a), b), c) shall be repeated until five breakdown values have been obtained for the liquid tested. After each breakdown the point electrode is changed and the sphere electrode rotated, then follow Sub-clause 7.1 and 7.2. The sphere electrode shall be changed every five breakdowns.
- e) For the test to be valid, the test sample shall withstand a minimum of three levels before breakdown occurs. If breakdown occurs before, repeat the test with a lower initial voltage, 5 kV or 10 kV according to the case.
- f) Note the prospective crest value of the impulse during which the breakdown occur as the nominal breakdown voltage.
- g) When the breakdown voltage of a liquid under test cannot be anticipated determine U_e following Items a) and c), using a gap of 15 mm, a starting voltage of 50 kV and a voltage step of 10 kV. Then continue as in Item a) to f).

If breakdown at 15 mm cannot be obtained below the flashover voltage of the cell (about 250 kV) decrease the gap spacing to 10 mm or, if necessary, 5 mm.

The method consists in applying a sequence of impulses of constant crest value until breakdown occurs, and plotting the results on a ruling graph (see Appendix A and Figure 2, page 27).

The sequential test is carried on until a decision can be made; if no decision is possible the test will be terminated when a predetermined number of impulses is exceeded.

8.2.2 Procedure

- a) Draw the ruling graph for the appropriate values of P_0 and the parameters defined in Appendix A.
- b) Select a crest value U_0 for the impulse voltage and set the impulse generator (see Note 1).
- c) Prepare the test-cell as described in Clause 7, and set the electrode spacing to the desired value.
- d) Apply the first impulse of selected polarity and crest value. If there is no breakdown, wait 1 min. before applying another impulse, and then continue with further impulses until breakdown occurs.
- e) Whenever a breakdown occurs, change the point electrode, rotate the sphere electrode, refill the cell, and continue the procedure. Change the sphere electrode every five breakdowns.
- f) Plot each impulse and corresponding breakdown on the ruling graph (Figure 2).
- g) As long as the plot is within the area limited by the D_1 and D_2 lines (see Appendix A), no decision can be taken and the test must be continued (see Note 2).
If the plot intersects line D_1 , the null hypothesis H_0 is accepted: $P \leq P_0$.
If the plot intersects line D_2 , the null hypothesis H_0 is rejected: $P > P_0$.

Notes 1. — The test voltage U_0 may be chosen two voltage steps below the mean breakdown value found by method A.

2. — If after 85 impulses no decision can be made the test should be repeated at a level 5 kV or 10 kV lower.

9. Report

The report shall include the following items:

- 9.1 The number of this publication and the method applied.
- 9.2 Sample identification and preparation.
- 9.3 Gap spacing.

9.4 Method A

- Starting voltage crest level, polarity and voltage step.
- Impulse voltage for each breakdown.
- Mean breakdown voltage.
- Standard mean deviation.

9.5 Method B

- Voltage crest level and polarity.
- Selected statistical parameters.
- Ruling graph and plot of results.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

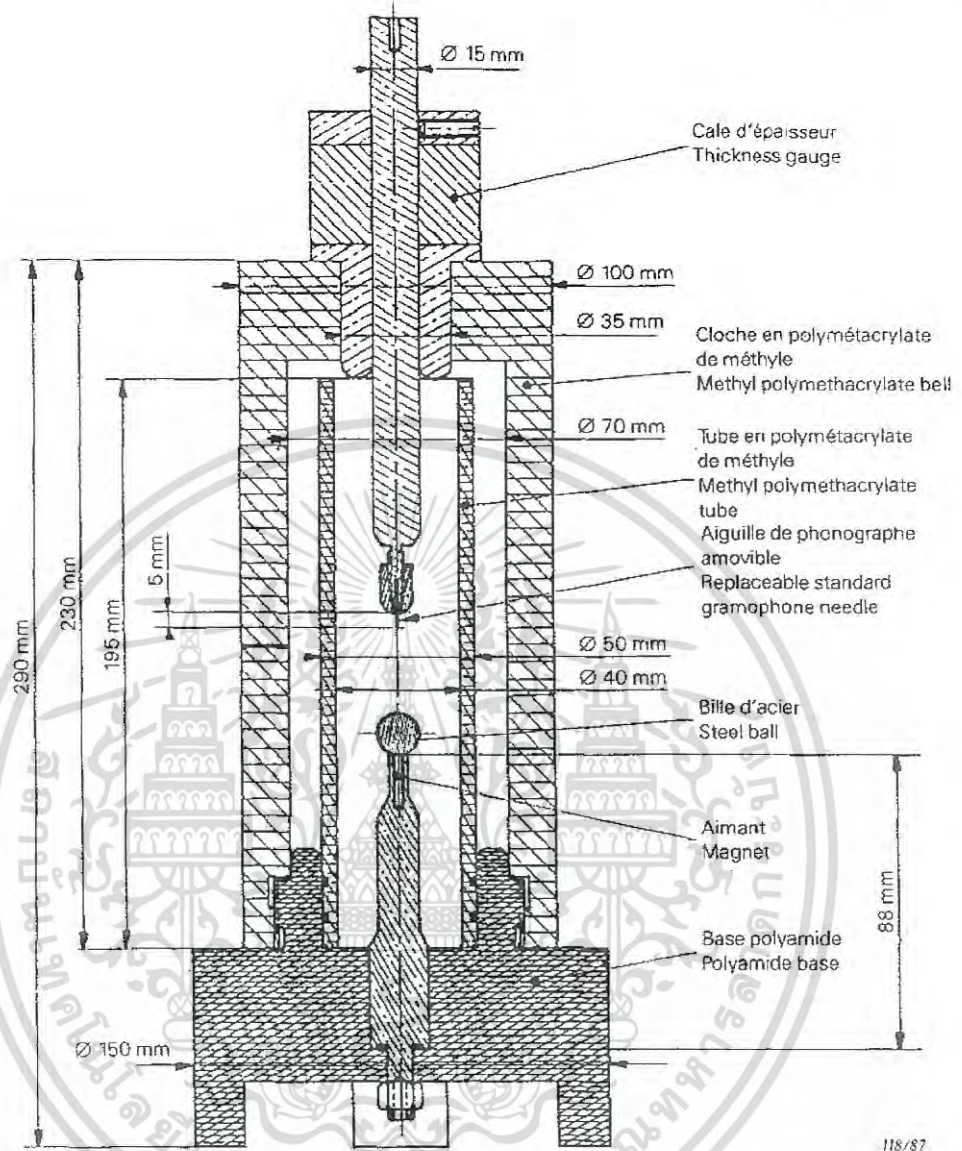


FIG. 1. — Système d'électrodes pointe-sphère pour essais de choc de liquides isolants.
Point-to-sphere electrode system for impulse strength of insulating liquids.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายศักดิ์ดา มณีโรจน์
 วัน เดือน ปีเกิด 19 สิงหาคม 2512
 ที่อยู่ 42/89 หมู่ 5 ถนน พุทธมณฑลสาย 5
 ตำบล อ้อมน้อย อำเภอ กระทุ่มแบน
 จังหวัด สมุทรสาคร 74130



ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2528 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมตอนต้น โรงเรียนจันทร์
 ประดิษฐารามวิทยาคม
 พ.ศ. 2535 ปวช. ช่างอิเล็กทรอนิกส์ โรงเรียนเทคโนโลยีหมู่บ้านครู
 พ.ศ. 2537 ปวส. ช่างอิเล็กทรอนิกส์ โรงเรียนเทคโนโลยีหมู่บ้านครู
 พ.ศ. 2541 อดสาหกรรมศาสตรบัณฑิต (อศ.บ.) สาขาวิศวกรรม
 อิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยสยาม
 พ.ศ. 2553 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.)
 สาขา การจัดการงานวิศวกรรม
 มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
 พ.ศ. 2560 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.)
 สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความชำนาญเฉพาะด้าน 1) การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแรงดันสูงสุด 36 kV
 (Designing of Distribution Transformer – Maximum Voltage Up to 36 kV)
 2) การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้งระดับแรงดันสูงสุด 6.6 kV
 (Designing of Dry-type Transformer – Maximum Voltage Up to 6.6 kV)
 3) การออกแบบตัวเหนี่ยวนำทุกชนิดทั้งแบบแห้ง และแบบน้ำมันระดับ
 แรงดันสูงสุด 36 kV (Designing of all kind in Reactors (Chokes) with Dry-type and Oil
 Type – Maximum Voltage Up to 36 kV)
 4) การออกแบบปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า (Designing of Power Quality in
 Electrical System)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้