

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวินิจฉัยฉนวนเหลวสำหรับหม้อแปลง DIAGNOSIS OF LIQUID INSULATION FOR TRANSFORMERS



T144606

โดย

นายภัทริน

กิจเจริญ

นายภาวิชัย

โหมตสุวรรณ

นายภูธเรศ

เหลียมโสภณ

นายเมธากร

สมบุญ

เลขหมู่ 2668
เลขทะเบียน 144606
วัน,เดือน,ปี 2.9.1119.2559

b. 12821986
i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DIAGNOSIS OF LIQUID INSULATION FOR TRANSFORMERS



PHATTARIN

PAWICH

PHUTARED

MEATHAKORN

KITCHAROEN

MODSUWAN

LIAMSOPHON

SOMBOON

A PAPER SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ELECTRICAL ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2558

การวินิจฉัยฉนวนเหลวสำหรับหม้อแปลง
DIAGNOSIS OF LIQUID INSULATION FOR TRANSFORMERS



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2558

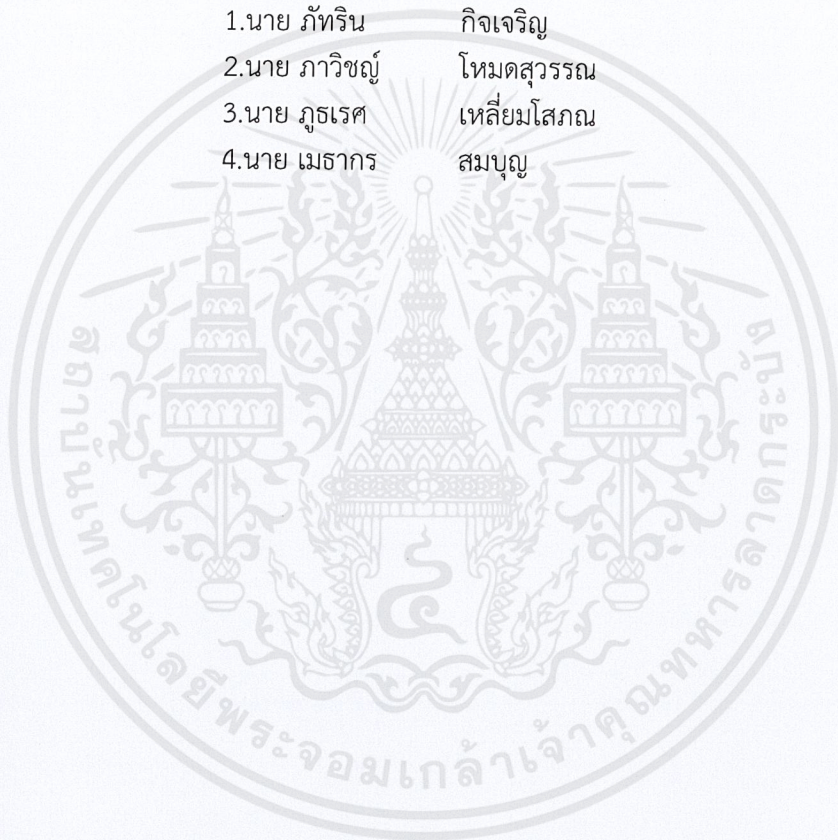
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การวินิจฉัยฉนวนเหลวสำหรับหม้อแปลง

ผู้จัดทำ

- 1.นาย ภัทริน กิจเจริญ
- 2.นาย ภาวิษฐ์ โหมตสุวรรณ
- 3.นาย ภูธเรศ เหลี่ยมโสภณ
- 4.นาย เมธากร สมบุญ



..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวินิจฉัยฉนวนเหลวสำหรับหม้อแปลง

นาย ภัทริน	กิจเจริญ	
นาย ภาวิชัย	โหมตสุวรรณ	
นาย ภูเรศ	เหลียมโสภณ	
นาย เมธากร	สมบัติ	
รศ.ดร. นรเศรษฐ	พัฒนเดช	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2558		

บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ และแรงดันอิมพัลส์ของเพรสบอร์ดที่อิมเพกต์ด้วยฉนวนเหลวชนิดต่างๆ ได้แก่ น้ำมันหม้อแปลง เอสเทอร์ธรรมชาติ และน้ำมันปาล์ม โดยได้สร้างชุดทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ตามมาตรฐาน IEC 60243-1 และชุดทดสอบแรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 60897 ในการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 6 กรณี เพื่อหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ และแรงดันอิมพัลส์ของเพรสบอร์ดที่อยู่ภายในฉนวนเหลวชนิดต่างๆ ฉนวนเหลวผสมระหว่างน้ำมันหม้อแปลงกับเอสเทอร์ธรรมชาติในอัตราส่วนที่ต่างกัน แล้วเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวน์และแรงดันอิมพัลส์ที่เกิดขึ้น รวมทั้งใช้โปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์ (FEM) จำลองหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้า เพื่อเปรียบเทียบกับกรทดสอบจริง ช่วยให้สามารถคาดเดาจุดที่เกิดความเสียหายจากการทดสอบความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์และแรงดันอิมพัลส์ จากการทดสอบพบว่า ค่าแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวผสม (น้ำมันหม้อแปลง 25% กับเอสเทอร์ธรรมชาติ 75%) มีค่าสูงสุด และแรงดันอิมพัลส์ของเพรสบอร์ดในเอสเทอร์ธรรมชาติ และน้ำมันปาล์ม มีค่าสูงสุด

DIAGNOSIS OF LIQUID INSULATION FOR TRANSFORMERS

Phattarin Kitcharoen

Pawich Modsuwan

Phutared Liamsophon

Meathakorn Somboon

Assoc.Prof.Dr.Norasage Pattanadech Advisor

Year 2015

ABSTRACT

This paper is a study breakdown voltage and impulse voltage of the pressboard impregnated with various types of liquid insulation, i.e., mineral oil, natural ester, palm oil and mineral oil mixed with different volume of natural ester. Breakdown's test vessel was designed following IEC standard 60243-1 and impulse's test vessel was designed following IEC standard 60897 respectively. Experimentation was performed into 6 cases to find the breakdown voltage and the impulse voltage of pressboard impregnated with such liquid insulation and mixtures between mineral oil and natural ester in various proportions. The electric field was analyzed by using finite element program (FEM). It was found that the breakdown voltage of mixture (mineral oil 25%, ester 75%) was higher than the breakdown voltage of natural ester, mineral oil, and palm oil respectively. Besides, the positive impulse breakdown voltage of mineral oil was higher than the impulse breakdown voltage of natural ester, and palm oil respectively. Moreover, the negative impulse breakdown voltage of mineral oil was higher than the impulse breakdown voltage of natural ester, and palm oil respectively. Furthermore, testing results are related with the analysis.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรฤทธิ ยุทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษา รวมไปถึงคุณบุญยวีร์ ฉายศิริ ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไข ปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี ขอขอบคุณ พี่สุรศักดิ์ น้อยหอม พี่กิตติพิศ จรรย์านูรัตน์ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ที่ได้ให้ความเอาใจใส่ และช่วยเหลือในด้านต่างๆ ด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้เปิดใช้เครื่องมือ ตลอดจนคุณกมลวรรณ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเบิกใบเสร็จของโครงการ

ขอขอบคุณ คุณศักดิ์ดา มณีโรจน์ เจ้าของบริษัท ละมุลวิศวกรรม จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เกี่ยวกับเครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบ จนการทดลองเสร็จสมบูรณ์

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจอีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 คุณสมบัติของฉนวน	4
2.1.1 ความต้านทานของฉนวน	4
2.1.2 เพอร์มิตติวิตีหรือค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ)	5
2.1.3 แฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$)	8
2.1.4 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน (Dielectric Strength)	16
2.2 ฉนวนเหลว	17
2.2.1 น้ำมันหม้อแปลง	17
2.2.2 เอสเทอร์	19
2.2.3 น้ำมันปาล์ม	20
2.3 ฉนวนแข็ง	21
2.3.1 กระดาษอัดแรง (Press Board)	22
2.4 สนามไฟฟ้า	23
2.4.1 สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ	24
2.4.2 สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ	25
2.5 พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความคงทนทางไฟฟ้า	28
2.5.1 องค์ประกอบทางเคมีของฉนวน	28
2.5.2 ความชื้น	28
2.5.3 แก๊ส	29
2.5.4 ประจุค้าง	30
2.5.5 การเคลื่อนที่	30
2.5.6 อุณหภูมิ	30
2.5.7 การกระจายสนามไฟฟ้า	31
2.5.8 ชนิดของรูปคลื่นแรงดัน	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.9 อนุภาคเจือปนของแข็ง	31
2.6 การเบรกดาวนในฉนวนเหลว	32
2.6.1 การเกิดเบรกดาวนของฉนวนเหลวบริสุทธิ์	33
2.6.2 กลไกการเกิดเบรกดาวนของฉนวนเหลวเชิงการค้า	33
2.7 การเกิดเบรกดาวนในฉนวนแข็ง	35
2.7.1 การเบรกดาวนแบบแท้จริง (Intrinsic Breakdown)	36
2.7.2 การเบรกดาวนแบบสตรีมเมอร์ (Streamer Breakdown)	36
2.7.3 การเบรกดาวนจากแรงทางกลที่เกิดจากไฟฟ้า (Electromechanical Breakdown)	37
2.7.4 การเกิดเบรกดาวนจากรอยที่ผิวและการร้าวในฉนวน (Edge Breakdown or tracking and treeing)	37
2.7.5 การเกิดเบรกดาวนจากผลทางความร้อน (Thermal Breakdown)	37
2.7.6 การเกิดเบรกดาวนเนื่องจากการดิสชาร์จภายใน (Cavity Breakdown)	38
2.8 ทฤษฎีการสร้างและการวัดแรงดันอิมพัลส์	38
2.8.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน	38
2.8.2 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	40
2.8.3 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายขั้น	41
2.8.4 การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลเตจดีไวเดอร์	43
บทที่ 3 การออกแบบการทดสอบและการประกอบสร้างชุดทดสอบ	45
3.1 การออกแบบและการประกอบสร้างชุดทดสอบ (Test Vessel)	46
3.1.1 ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพรสบอร์ด	46
3.1.2 ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว	50
3.2 การเตรียมฉนวนเหลวสำหรับการทดสอบ	54
3.2.1. ฉนวนบริสุทธิ์ 3 ชนิด	54
3.2.2 ฉนวนเหลวผสม	54
3.3 การเตรียมเพรสบอร์ดสำหรับการทดสอบ	55
3.4 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบ	56
3.4.1 การทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ด ที่อิมเพรกเนตด้วยฉนวนเหลว	56
3.4.2 การทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว	59
3.4.3 การทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนเหลว	63
3.4.4 การทดสอบค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเหลว (ϵ_r) และ ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียต่อไอเล็กทริก ($\tan \delta$) ของฉนวนเหลว	64
บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดสอบ	67
4.1 การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพรสบอร์ด ที่อิมเพรกเนตด้วยฉนวนเหลว	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.1 วงจรทดสอบ	67
4.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ	68
4.1.3 ผลการทดสอบ	68
4.2 การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว	69
4.2.1 วงจรทดสอบ	69
4.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ	70
4.2.3 ผลการทดสอบ	70
4.3 การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนเหลว	75
4.3.1 วงจรทดสอบ	75
4.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ	76
4.3.3 ผลการทดสอบ	76
4.4 การทดสอบวัดค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเหลว (ϵ_r) และ ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) ของฉนวนเหลว	77
4.4.1 วงจรทดสอบ	77
4.4.2 ขั้นตอนการทดสอบ	77
4.4.3 ผลการทดสอบ	78
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	82
5.1 สรุป	82
5.2 ข้อเสนอแนะ	83
เอกสารอ้างอิง	84
ภาคผนวก	86
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ	87
ภาคผนวก ข มาตรฐาน IEC 60243-1, Edition 3.0 – 2010	92
ภาคผนวก ค มาตรฐาน IEC 60897, First Edition 1987 – 03	96
ภาคผนวก ง มาตรฐาน IEC 156, Second Edition 1995 – 07	102
ภาคผนวก จ มาตรฐาน IEC 60296, Edition 4.0 2012 – 02	109
ภาคผนวก ฉ มาตรฐาน IEC 62770, Edition 1.0 2013 – 11	112
ประวัติผู้เขียน	115

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ค่าเก็บประจุระหว่างแผ่นระนาบที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีเป็นสุญญากาศ ϵ_0 และ ϵ	6
2.2	วงจรมุมลของไดโอดีเล็กตริกแบบขนาน	7
2.3	วงจรมุมลของไดโอดีเล็กตริกแบบอนุกรม	7
2.4	ค่า $\tan \delta$ ของนอนโพลาร์ไดโอดีเล็กตริกและความถี่	9
2.5	ค่า $\tan \delta$ ของนอนโพลาร์ไดโอดีเล็กตริกและความถี่	12
2.6	ค่า $\tan \delta$ ของโพลีเมทิลเมเตครายเลตและความถี่ ที่อุณหภูมิ 20°C	12
2.7	ค่า ϵ กับ $\epsilon \tan \delta$ กับความถี่ของโพลีบิวทิลเมเตครายเลต	12
2.8	ค่า $\tan \delta$ ของ $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ และ $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$ ที่ความถี่ 1 MHz กับอุณหภูมิ	13
2.9	การเปลี่ยนแปลงของค่า $\tan \delta$ กับอุณหภูมิของโพลาร์โพลีเมอร์	13
2.10	การเปลี่ยนแปลงของค่า $\tan \delta$ กับ อุณหภูมิของโพลาร์โพลีไวนิลคลอไรด์ ที่ 50 Hz	14
2.11	ค่า $\tan \delta$ ของกระดาษที่ชุ่มด้วยน้ำมันผสมโคลโลไฟน์กับอุณหภูมิที่ 50 Hz	14
2.12	ค่า $\tan \delta$ ของกระดาษกับความชื้นในรูปเปอร์เซ็นต์ปริมาตรที่ความถี่ 1 MHz (แกนตั้งเป็นลอการิทึม)	15
2.13	เส้นโค้งไอออไนเซชัน	15
2.14	ตัวอย่างสูตรโครงสร้างออลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน	17
2.15	ตัวอย่างสูตรโครงสร้างอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน	18
2.16	โครงสร้างโมเลกุลของเอสเตอรส์สังเคราะห์ และเอสเตอรส์ธรรมชาติ	20
2.17	กระดาษอัดแรง (Press Board)	22
2.18	เส้นใยธรรมชาติ (Organic fiber)	23
2.19	อิเล็คโตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆกัน	23
2.20	การเปรียบเทียบแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ในไดโอดีเล็กตริกตามลักษณะทางไฟฟ้า	25
2.21	สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า	25
2.22	สนามไฟฟ้ากระจายเปรียบเทียบของอิเล็คโตรดลักษณะต่างๆ	27
2.23	การเรียงตัวของอนุภาคไฟเบอร์ระหว่างช่องว่างภายใต้แรงดันสูง	34
2.24	การยืดออกของหยดน้ำที่อยู่ในฉนวนหลายชนิดภายใต้สนามไฟฟ้า	35
2.25	ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์เมื่อป้อนแรงดันให้กับฉนวนของแข็งที่ระยะเวลาต่างกัน	36
2.26	รูปแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม	39
2.27	รูปแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตัดหางคลื่น	39
2.28	แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตัดหน้าคลื่น	40
2.29	วงจรรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ วงจร A	40
2.30	วงจรรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ วงจร B	41
2.31	วงจรรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบหลายขั้นตามวงจรรมาร์กซ์	42
2.32	วงจรรวัดแรงดันอิมพัลส์	43

↑
M

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ VII ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.1	แบบจำลองที่บรรจุน้ำมันและใส่เพรสบอร์ดชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพรสบอร์ด	46
3.2	ที่บรรจุน้ำมันและใส่เพรสบอร์ดชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพรสบอร์ดที่ออกแบบสร้างจริง	46
3.3	แบบจำลองอิเล็กทรอนิกส์ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพรสบอร์ด	47
3.4	อิเล็กทรอนิกส์ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพรสบอร์ดที่ออกแบบสร้างจริง	47
3.5	แบบจำลองชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพรสบอร์ด	48
3.6	ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพรสบอร์ดที่ออกแบบสร้างจริง	48
3.7	แบบจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพรสบอร์ด	49
3.8	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพรสบอร์ด	49
3.9	แบบจำลองที่บรรจุน้ำมันและใส่เพรสบอร์ดชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว	50
3.10	ที่บรรจุน้ำมันและใส่เพรสบอร์ดชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลวที่ออกแบบสร้างจริง	50
3.11	แบบจำลองอิเล็กทรอนิกส์ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว	51
3.12	อิเล็กทรอนิกส์ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลวที่ออกแบบสร้างจริง	51
3.13	แบบจำลองชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว	52
3.14	ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลวที่ออกแบบสร้างจริง	52
3.15	แบบจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว	53
3.16	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว	53
3.17	ชนิดของฉนวนเหลวสำหรับการทดสอบ	54
3.18	ตู้อบสุญญากาศ	55
3.19	การเตรียมอิมเพรกเนตเพรสบอร์ด	55
3.20	หม้อแปลงปรับค่าได้	56
3.21	หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง 235/100 kV, 5 kVA	57
3.22	ตัวต้านทานน้ำ	57
3.23	โวลเตจดีไวเดอร์ พิกัด 100kV	58
3.24	ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ด	58
3.25	ชุดอัดประจุ	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.26 ชุดกำเนิดอิมพัลส์	59
3.27 โวลเตจดีไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุ	60
3.28 โวลเตจดีไวเดอร์ พิกัด 100kV	61
3.29 ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ของฉนวนเหลว	62
3.30 ชุดควบคุมชุดกำเนิดอิมพัลส์	62
3.31 ดิจิตอลออสซิลโลสโคป	63
3.32 เครื่องทดสอบการเบรกดาว์ฉนวนเหลว	63
3.33 Temperature Adjust	64
3.34 C and $\tan \delta$ Meter	65
3.35 Liquid Electrode	66
4.1 วงจรทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพรสบอร์ดที่อิมเพกเน็ตด้วยฉนวนเหลว	67
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพรสบอร์ดที่อิมเพกเน็ตด้วยฉนวนเหลวชนิดต่างๆ	69
4.3 วงจรทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว	69
4.4 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว 1.2/50 μ S ที่ใช้ในการทดสอบ	70
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวกับฉนวนเหลวชนิดต่างๆ	71
4.6 ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวกับฉนวนเหลวชนิดต่างๆ	72
4.7 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว 1.2/50 μ S ที่ใช้ในการทดสอบ	73
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวกับฉนวนเหลวชนิดต่างๆ	73
4.9 ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวกับฉนวนเหลวชนิดต่างๆ	75
4.10 เครื่องทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนเหลว	75
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับกับฉนวนเหลวชนิดต่างๆ	76
4.12 วงจรทดสอบวัดค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเหลว (ϵ_r) และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$) ของฉนวนเหลว	77
4.13 ผลการทดสอบ $\tan \delta$ กับฉนวนเหลวชนิดต่างๆ	81

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	3
2.1	18
2.2	21
2.3	21
2.4	29
2.5	30
2.6	32
3.1	45
4.1	68
4.2	70
4.3	73
4.4	76
4.5	78
4.6	79
4.7	79
4.8	80
4.9	80
4.10	81

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมโยงระหว่างระบบไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้าต่างกัน โดยจะทำหน้าที่เพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะกับการส่ง การจ่าย และการใช้ไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้าจึงนับเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในบรรดาอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งหลาย ในปัจจุบัน หม้อแปลงไฟฟ้านิยมใช้น้ำมันแร่ในการเป็นฉนวนเหลวภายในตัวหม้อแปลง แต่น้ำมันแร่นั้นส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและใช้เวลาในการย่อยสลายนาน ทำให้เกิดการศึกษาค้นคว้าและวิเคราะห์หาคุณสมบัติของฉนวนเหลวชนิดอื่นมาทดแทน เช่น เอสเทอร์ และน้ำมันพาล์ม โดยประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมจึงสามารถหาทรัพยากรได้ง่ายและสามารถผลิตเองได้ ดังนั้นการวิเคราะห์คุณสมบัติของฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เพื่อศึกษาแนวโน้มคุณสมบัติของฉนวนเหลวภายในหม้อแปลงและเพื่อหาแนวทางการใช้ฉนวนเหลวชนิดอื่นทดแทนได้ในอนาคตต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาโครงสร้างพื้นฐานและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อฉนวนเหลว
2. เพื่อศึกษาทฤษฎีและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบฉนวนเหลว
3. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์สนามไฟฟ้าของฉนวนเหลว
4. เพื่อศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและออกแบบจัดสร้างชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ดที่อิมเพกเน็ทด้วยฉนวนเหลว
5. เพื่อศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและออกแบบจัดสร้างชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว
6. เพื่อศึกษาหาแนวทางการใช้ฉนวนเหลวที่ย่อยสลายด้วยธรรมชาติชนิดอื่นทดแทนน้ำมันหม้อแปลงชนิดเดิม

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษาโครงสร้างพื้นฐานและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อฉนวนเหลว
2. ศึกษาทฤษฎีและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบฉนวนเหลว
3. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและออกแบบจัดสร้างชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ดที่อิมเพกเน็ทด้วยฉนวนเหลว
4. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและออกแบบจัดสร้างชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว
5. วิเคราะห์สนามไฟฟ้าของชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ดที่อิมเพกเน็ทด้วยฉนวนเหลวโดยการใช้โปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์ในการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
6. วิเคราะห์สนามไฟฟ้าของชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลวโดยการใช้โปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์ในการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาศึกษาโครงสร้างพื้นฐานและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อฉนวนเหลวภายในหม้อแปลงไฟฟ้า
2. ศึกษามาตรฐานการทดสอบฉนวนตามมาตรฐาน IEC 60243-1, IEC 60897 รวมทั้งมาตรฐานอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง
3. ศึกษาการใช้งานโปรแกรม COMSOL Multiphysics 3.5 ในการจำลองการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า รวมทั้งโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบเพื่อนำมาวิเคราะห์ เช่น AutoCad, Solid Work เป็นต้น
4. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและออกแบบจัดสร้างชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพอร์สบอร์ดให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60243-1
5. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและออกแบบจัดสร้างชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60897
6. ทดสอบและบันทึกผลการทดสอบ
7. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ
8. จัดทำปริญญานิพนธ์



ตารางที่ 1.1 วิธีการดำเนินงาน

วิธีการดำเนินการ	ระยะเวลา									
	ปี 2558					ปี 2559				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาศึกษาโครงสร้างพื้นฐานและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อฉนวนเหลวภายในหม้อแปลงไฟฟ้า	←-----→									
2. ศึกษามาตรฐานการทดสอบฉนวนตามมาตรฐาน IEC 60243-1, IEC 60897 รวมทั้งมาตรฐานอื่นๆที่เกี่ยวข้อง		←-----→								
3. ศึกษาการใช้งานโปรแกรม COMSOL Multiphysics 3.5 ในการจำลองการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า		←-----→								
4. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและออกแบบจัดสร้างชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ดให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60243-1			←-----→							
5. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและออกแบบจัดสร้างชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าอิมพัลส์ให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60897			←-----→							
6. ทดสอบและบันทึกผลการทดสอบ					←-----→					
7. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ							←-----→			
8. จัดทำปริญญานิพนธ์								←-----→		

←-----→ วางแผน

←-----→ ปฏิบัติจริง

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงมาตรฐาน ขั้นตอน และวิธีการทดสอบฉนวนเหลวภายในหม้อแปลงในปัจจุบัน
2. ทราบถึงปัญหา เทคนิคต่างๆ ในการทดสอบ และวิธีการแก้ไข
3. ใช้เป็นแหล่งข้อมูลในการวิจัยเกี่ยวกับฉนวนเหลวภายในหม้อแปลงสำหรับใช้ในการศึกษาและนำไปพัฒนาต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะเกี่ยวข้องกับการฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้า คุณสมบัติของฉนวนชนิดต่างๆ ที่อยู่ภายในหม้อแปลง ปัจจัยต่างๆ ที่ทำให้ฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพและนำไปสู่การเบรกดาวน์ในที่สุด

2.1 คุณสมบัติของฉนวน [1]

ฉนวนในระบบไฟฟ้ากำลังจะทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าให้กับตัวนำหรือส่วนที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าไม่ให้เกิดลัดวงจรถึงกัน โดยทั่วไปแบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ฉนวนก๊าซ ฉนวนเหลว และฉนวนของแข็ง ฉนวนแต่ละชนิดนอกจากจะทำหน้าที่ทางไฟฟ้าแล้วยังมีหน้าที่เฉพาะเพิ่มเติม เช่น ฉนวนก๊าซและฉนวนเหลวจะมีหน้าที่ช่วยระบายความร้อนให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้า ส่วนฉนวนแข็งจะมีหน้าที่รับภาระทางกลของตัวนำไฟฟ้า เป็นต้น การฉนวนมักจะเป็นการใช้ฉนวนร่วมกันมากกว่าหนึ่งประเภท เช่น ในหม้อแปลงมักจะทำน้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนหลัก และใช้กระดาษฉนวนเป็นฉนวนรอบๆ ขดลวดรวมทั้งกระดาษอัดแรงใช้คั่นระหว่างรอบของขดลวดตัวนำและยึดไม่ให้เคลื่อนที่ เป็นต้น โดยลักษณะสำคัญที่เป็นตัวชี้บอกถึงคุณสมบัติ และคุณภาพของไดอิเล็กตริกมี 4 ประการ คือ

2.1.1 ความต้านทานของฉนวน (Resistance)

ฉนวนไฟฟ้าเป็นสารที่นำไฟฟ้าได้น้อยมากหรือไม่นำไฟฟ้าเลยเมื่อมีสนามไฟฟ้ามากระทำต่อฉนวน โดยฉนวนที่สมบูรณ์จริงๆ เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าจะไม่มีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระอยู่เลย นั่นคือจะไม่มีสภาพนำไฟฟ้าอยู่เลย หรือกล่าวอีกแบบหนึ่งก็คือ สารฉนวนนั้นมีค่าความต้านทานสูงเป็นอนันต์ แต่ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในทางปฏิบัตินั้นมักจะนำกระแสแต่มีค่าน้อยมาก เมื่อนำฉนวนไปคั่นระหว่างอิเล็กโตรดที่ป้อนแรงดันกระแสตรงเป็นเวลานานพอจะมีกระแสไหลผ่านฉนวนนั้นแต่น้อย เรียกว่ากระแสรั่ว หรือกระแสค้ำ กระแสรั่วที่ไหลผ่านฉนวนที่แบ่งออกเป็นสองทาง คือ หนึ่งไหลผ่านฉนวนใน เนื่องจากฉนวนมีสภาพนำไฟฟ้าอยู่บ้างดังกล่าวแล้ว ส่วนอีกทางหนึ่งไหลผ่านตามผิวฉนวนเนื่องจากผิวฉนวนมีสภาพนำ เนื่องจากสิ่งเปื้อน และความชื้นที่ผิว ด้วยเหตุนี้เอง การวัดความต้านทานฉนวนจึงแยกเป็นความต้านทานเชิงปริมาตร (Volume resistance) และความต้านทานเชิงผิว (Surface resistance)

ค่าความต้านทานของไดอิเล็กตริกอาจคำนวณหรือวัดได้ เช่นเดียวกับความต้านทานของตัวนำ ถ้าทราบความต้านทานจำเพาะ ρ ความยาว L พื้นที่หน้าตัด A ของไดอิเล็กตริก เช่น ในกรณีแผ่นไดอิเล็กตริกระหว่างแผ่นระบายตัวนำ ความต้านทานของฉนวนจะหาได้จาก

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.1)$$

ส่วนในกรณีของไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุแบบทรงกระบอกซ้อนกันร่วม ความต้านทานของฉนวน หาได้จาก

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2.2)$$

เมื่อ r_1, r_2 คือ รัศมีของตัวนำในและตัวนอกตามลำดับ
 L คือ ความยาว

2.1.2 เปรอริมิตติวิตีหรือค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (Permittivity, ϵ)

เปรอริมิตติวิตีหรือค่าคงตัวไดอิเล็กตริก เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่บอกลักษณะของไดอิเล็กตริกหรือสารฉนวนไฟฟ้า เป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดความสามารถของการสร้างค่าความเก็บประจุ หรือกล่าวง่าย ๆ ϵ ก็คือ ค่าตัวเลขที่บอกให้ทราบว่าค่าความเก็บประจุจะเพิ่มขึ้นกี่เท่าของค่าความเก็บประจุสุญญากาศ

$$C = \epsilon C_0 \quad (2.3)$$

และ

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (2.4)$$

เมื่อ ϵ คือ เปรอริมิตติวิตีของตัวกลาง
 ϵ_0 คือ เปรอริมิตติวิตีของสุญญากาศ = 8.854×10^{-12} F/m
 ϵ_r คือ เปรอริมิตติวิตีสัมพัทธ์

ถ้าใส่ไดอิเล็กตริกที่มีสารอื่น เข้าไปแทนที่สุญญากาศระหว่างแผ่นอิเล็กโตรด จะพบว่าถึงแม้ว่าแรงดันที่ป้อนมีค่าคงที่ก็ตาม แต่กระแสในวงจรจะมากขึ้น ซึ่งแสดงว่าค่าเก็บประจุเพิ่มสูงขึ้น ความหนาแน่นของประจุบนอิเล็กโตรดเพิ่มขึ้น และอาจเนื่องจากจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนไหลผ่านไดอิเล็กตริกมากขึ้น ในตัวเก็บประจุสุญญากาศที่มีค่าเก็บประจุ C_0 กระแสที่ไหลผ่านจะเป็น

$$I(t) = C \frac{du(t)}{dt} \quad (2.5)$$

หรือ

$$\bar{I} = j\omega C_0 \bar{U} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องหมาย j แสดงให้เห็นเด่นชัดว่ากระแสหน้าแรงดันเป็นมุม 90 องศาส่วนตัวเก็บประจุที่มีสารไดอิเล็กตริก ค่าเก็บประจุ C จะไม่เท่ากับ C_0 และยิ่งกว่านั้นจะสังเกตเห็นว่าในทางปฏิบัติเฟสเซอร์ระหว่างแรงดันกับกระแสมีมุนน้อยกว่า 90 องศา เพราะมีพลังงานสูญเสียไปในลักษณะความต้านทาน นั้นแสดงว่าค่าเก็บประจุเป็นจำนวนเชิงซ้อน คือ มีค่าจริงและค่าจินตภาพ ซึ่งรวมอยู่ในรูปของเปอร์มิตติวิตี้ คือ

$$\bar{c} = \bar{\epsilon}_r c_0 \tag{2.7}$$

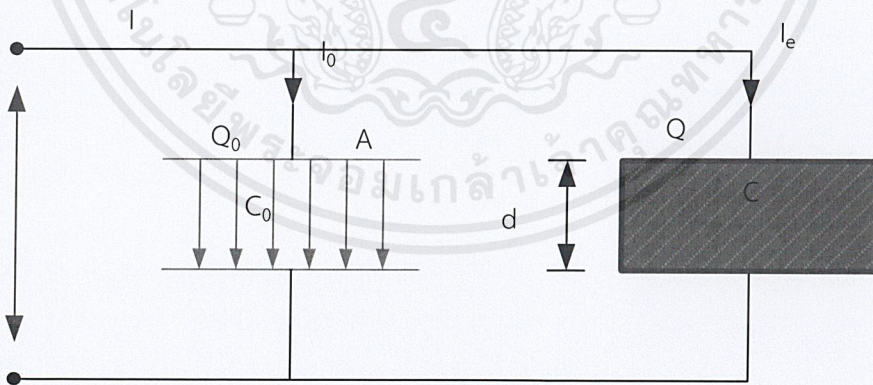
โดยที่ $\bar{\epsilon}_r = \epsilon' - j\epsilon''$

ฉะนั้น กระแสที่ไหลผ่านค่าเก็บประจุ จากสมการที่ (2.7)

$$\begin{aligned} \bar{c} &= \bar{\epsilon}_r c_0 \\ \bar{T} &= j\omega \bar{c} U \end{aligned} \tag{2.8}$$

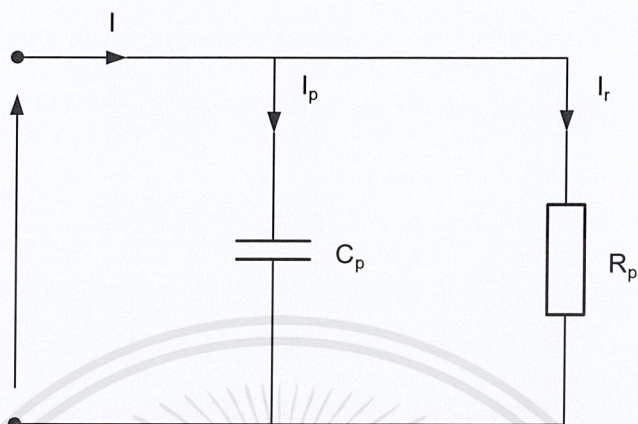
$$\begin{aligned} &= I_c + I_r \\ &= j\omega(\epsilon' - j\epsilon'')U \\ \bar{T} &= j\omega\epsilon' C_0 U + \omega\epsilon'' C_0 U \end{aligned} \tag{2.9}$$

โดยที่เทอมแรกของสมการ คือกระแสเก็บประจุ I_c และเทอมหลัง คือกระแสกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก I_r



รูปที่ 2.1 ค่าเก็บประจุระหว่างแผ่นระนาบที่มีค่าเปอร์มิตติวิตี้เป็นสัจญญากาศ ϵ_0 และ ϵ

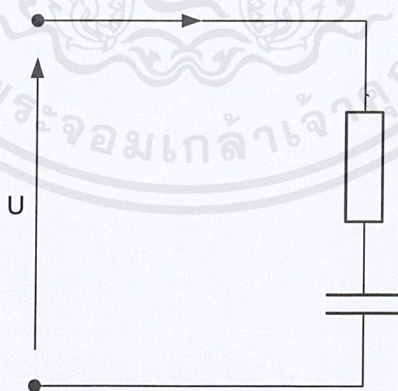
ไดอิเล็กตริกมีพลังงานสูญเสีย และสามารถเก็บประจุไว้ในตัวเก็บประจุ จึงอาจเขียนแทนด้วยวงจรสมมูล คือ ดังรูปที่ 2.2 เป็นวงจรขนาน และรูปที่ 2.3 เป็นวงจรรอนุกรม



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของไดอิเล็กตริกแบบขนาน

วงจรรขนาน

$$\begin{aligned} C_p &= \epsilon' c_0 \\ R_p &= 1 / (\omega \epsilon'' c_0) \\ \tan \delta &= \frac{1}{\omega R_p C_p} = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \end{aligned} \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของไดอิเล็กตริกแบบอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรรอนุกรม

$$\begin{aligned}
 C_s &= \frac{|\bar{\epsilon}_r|^2}{\epsilon'} C_0 = \epsilon' \{1 + (\tan \delta)^2\} C_0 \\
 R_s &= \frac{\epsilon''}{\omega |\bar{\epsilon}_r|^2 C_0} \\
 \tan \delta &= \omega R_s C_s = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (2.11)
 \end{aligned}$$

มุม δ นี้เรียกว่ามุมพลังงานสูญเสีย (loss angle)

จากสมการ C_p และ C_s จะเห็นได้ว่า ค่าเก็บประจุที่มีสารไดอิเล็กตริกขึ้นอยู่กับวงจรรอนุกรม ในกรณีที่พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกมีค่าต่ำ คือ $\epsilon'' \ll \epsilon'$ หรือ $\tan \delta \ll 1$ ค่าเก็บประจุทั้งสองจะเท่ากัน คือ $C_p = C_s$ และจะได้ $\bar{\epsilon}_r \rightarrow \epsilon_r = \epsilon'$ นั่นก็คือ ϵ' จะเป็นค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (relative dielectric constant, ϵ_r) ที่ใช้กัน

ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ ϵ_r นี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยทั่วไปฉนวนที่มีใช้ทั่วไปในฉนวน อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ϵ_r จะเพิ่มสูงขึ้น

2.1.3 แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$)

การใช้งานฉนวนในระบบไฟฟ้ากำลังนั้น ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่จะต้องพิจารณา ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียจะเป็นดัชนีชี้วัดตัวหนึ่งของอายุการใช้งานฉนวน ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

1. ค่าความสูญเสียเนื่องจากการที่ฉนวนไม่ได้เป็นฉนวนบริสุทธิ์ เมื่อฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้ามีผลให้เกิดสภาพนำไฟฟ้าขึ้นมา ทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากมีกระแสรั่วไหลผ่านฉนวน

2. ค่าความสูญเสียเนื่องจากพฤติกรรมการมีขั้ว ฉนวนโดยสภาวะปกตินั้นโมเลกุลของฉนวนจะดำรงอยู่อย่างอิสระ เมื่อฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า ประจุบวกและลบของโมเลกุลจะแยกออกจากกันและประจุในตัวเสมือนไดโพลที่มีขนาดของประจุเท่ากันแต่มีขั้วตรงข้ามกัน แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าจะกระทำต่อไดโพลทำให้เกิดการปรับทิศทางให้วางตัวอยู่ในแนวสนามไฟฟ้า ในกรณีที่ฉนวนอยู่ภายใต้สนามฟ้ากระแสสลับ ไดโพลจะเกิดการเรียงตัวสลับไปมาตลอดเวลา ทำให้เกิดการสูญเสียในรูปของความร้อน

3. ค่าความสูญเสียเนื่องจากการดิสซาร์จบางส่วนภายในเนื้อฉนวน การเกิดดิสซาร์จบางส่วนภายในเนื้อฉนวนจะเกิดขึ้นได้ในกรณีที่เนื้อฉนวนไม่ได้เป็นเนื้อเดียวกันสมบูรณ์ทั้งหมด (Nonhomogeneous) ภายในเนื้อฉนวนอาจจะมีโพรงอากาศหรือวัสดุแปลกปลอมรวมอยู่ด้วย โพรงอากาศหรือวัสดุแปลกปลอมจะมีค่าความจุไฟฟ้าและค่าคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ต่ำกว่าเนื้อฉนวน เมื่อฉนวนได้รับแรงดันไฟฟ้ามักจะเกิดเบรกดาวน์ขึ้นในโพรงอากาศหรือวัสดุแปลกปลอม กระแสดิสซาร์จจะอยู่ในโพรงอากาศ เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนชนกับผนังโพรง เกิดปฏิกิริยาเคมีและความร้อนขึ้น การเกิดดิสซาร์จบางส่วนดังกล่าวภายในเนื้อฉนวนจะทำให้อายุการใช้งานของฉนวนลดลง

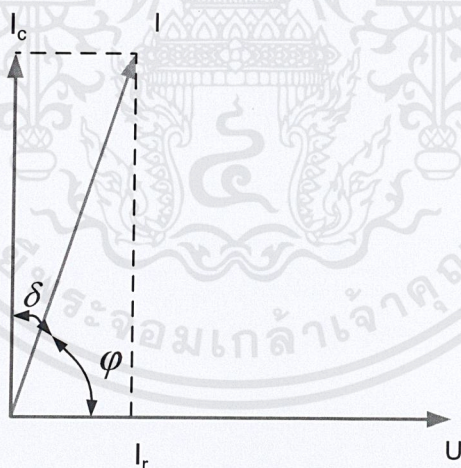
ถ้าป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์กับตัวเก็บประจุที่สมบูรณ์ ไม่มีกำลังสูญเสียได้อิเล็กทริก กระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีเฟสนำหน้าแรงดันเป็นมุม 90 องศา

$$u = U_m \sin \omega t \quad (2.12)$$

$$i = \omega C U_m \cos \omega t$$

$$I = \omega C U \quad (2.13)$$

ในความเป็นจริงกระแสที่ไหลในตัวเก็บประจุจะนำหน้าแรงดันน้อยกว่า 90 องศา ดังรูปที่ 2.4 φ เป็นมุมเฟสของตัวเก็บประจุ ดังนั้น แฟกเตอร์กำลังเป็น $\cos \varphi$ หรืออีกทางหนึ่ง $= \sin \varphi$



รูปที่ 2.4 มุมเฟสกระแสในตัวเก็บประจุ

ฉะนั้น กำลังไฟฟ้าสูญเสียในตัวเก็บประจุที่ไม่สมบูรณ์ คือ

$$\begin{aligned} P_d &= UI \cos \phi \\ &= UI \sin \delta \end{aligned} \quad (2.14)$$

เมื่อ U คือ ค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันที่ป้อน

δ คือ $90 - \phi$ เป็นมุมเล็กๆ

ฉะนั้น $\sin \delta = \tan \delta$

δ คือ มุมพลังงานสูญเสียเปล่าไดโอดีเล็กตริก

$\tan \delta$ คือ แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดโอดีเล็กตริก

จากรูปที่ 2.4 จะหาค่า $\tan \delta$ ได้จากสมการ

$$\begin{aligned} \tan \delta &= \frac{I_c}{I_p} \\ &= \frac{U/R_p}{\omega C_p U} \\ &= \frac{1}{\omega C_p R_p} \end{aligned} \quad (2.15)$$

ฉะนั้น กำลังสูญเสียไดโอดีเล็กตริกจะเขียนได้ว่า

$$P_d = \frac{U^2}{R} \quad (2.16)$$

$$= U^2 \omega C_p \tan \delta \quad (2.17)$$

ถ้าคิดเป็นกำลังสูญเสียต่อปริมาตรของฉนวน จะได้

$$P_d' = E^2 \omega \epsilon \cdot \tan \delta \quad (2.18)$$

เมื่อ P_d' คือ พลังงานสูญเสียเปล่าต่อปริมาตร

E คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า

C คือ ค่าเก็บประจุไฟฟ้า

U คือ ค่าแรงดันที่ป้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า $\tan \delta$ เป็นค่าพารามิเตอร์ของไดอิเล็กตริกอย่างหนึ่งที่ช่วยบอกคุณสมบัติของสาร และเป็นค่าที่ไม่คงที่ แต่ขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอกหลายชนิด ดังนี้ [2]

- ค่า $\tan \delta$ กับความถี่

พิจารณาค่า $\tan \delta$ กับความถี่ของไดอิเล็กตริกที่ป้อนแรงดันกระแสสลับ ปัญหานี้สามารถวิเคราะห์ได้จากสมการ

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega RC} \quad (2.19)$$

จากสมการ (2.18) จะได้

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \tan \delta = \infty \quad (2.20)$$

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \tan \delta = 0 \quad (2.21)$$

ความหมายทางฟิสิกส์ของค่าลิมิตจะเป็นดังนี้ คือ ทั้ง $\omega = 0$ และ $\omega = \infty$ ตามสมการ (2.17) จะเป็นการจำกัดค่าของ P; เมื่อ $\omega = 0$ สมการ (2.17) จะแปลงมาจากสมการ (2.16)

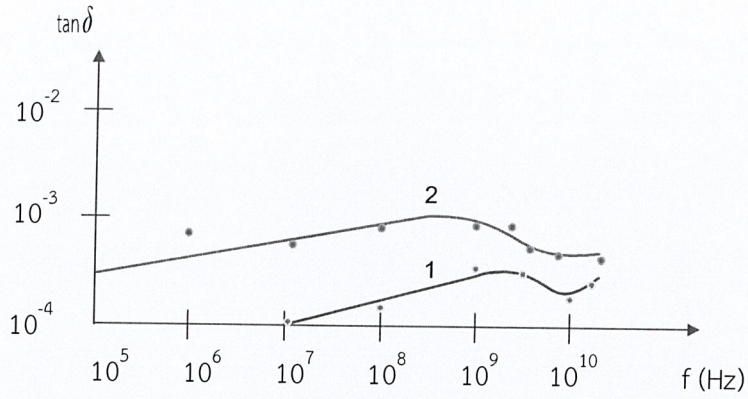
ถ้าพิจารณาในกรณีที่พลังงานสูญเสียไปต่อไดอิเล็กตริกจะเกิดขึ้นเนื่องจากการนำไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว พลังงานสูญเสียดังสมการ (2.17) คือ ค่า P จะไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ ซึ่งเราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $\tan \delta$ กับความถี่ ดังนี้

$$\tan \delta = \frac{1.8 \times 10^{10}}{f \epsilon \rho} \quad (2.22)$$

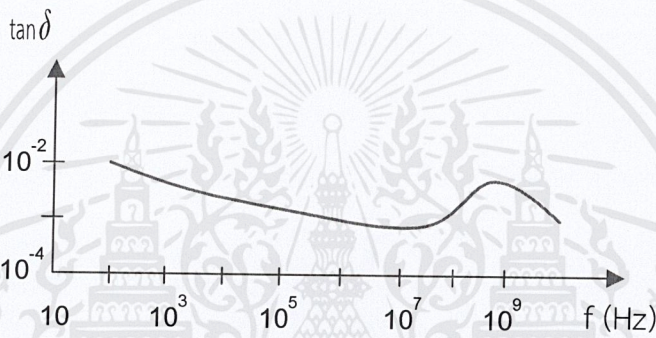
ค่า $\tan \delta$ จะเป็นสัดส่วนผกผันกับความถี่ ตัวอย่างของไดอิเล็กตริกที่มีลักษณะเป็นไปตามสมการ (2.22) คือ น้ำมันฉนวน (a thorough purified insulating petroleum oil)

แต่สมการ (2.22) ก็ไม่สามารถใช้ได้กับโพลีเอธิลีน, โพลีเตตระฟลูออโรเอธิลีน และไดอิเล็กตริกแข็งชนิดนอนโพลาร์ได้ (ดูรูปที่ 2.5) อย่างไรก็ตาม ก็ยังสามารถสรุปได้ เมื่อค่า $\tan \delta$ ในวัสดุเหล่านี้มีค่าน้อยมากจนไม่สามารถวัดได้อย่างละเอียด จากรูปที่ 2.5 ถ้าสารนอนโพลาร์โพลีเมอร์มีสารเจือปนชนิดโพลาร์ เช่น สเตบิลไลเซอร์ (stabilizers) หรือตัวช่วยทำปฏิกิริยา (catalysts) ของโพลีเมอร์โรเซชัน ทำให้กราฟระหว่าง $\tan \delta$ กับความถี่ไม่เป็นไปตามสมการ (2.22)

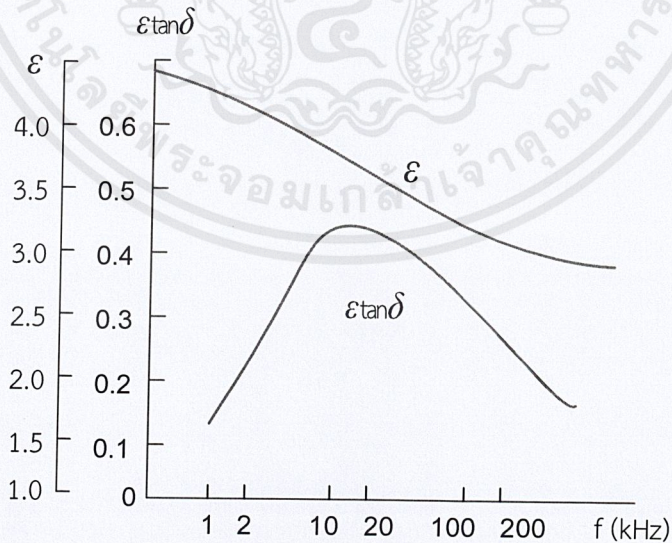
เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่า $\tan \delta$ หรือ $\epsilon \tan \delta$ ของวัสดุฉนวนไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ ก็จะสังเกตเห็นว่ามีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันในช่วงความถี่ที่เปลี่ยนไป คือ จะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงที่ความถี่ที่สูงขึ้น ตัวอย่างวัสดุต่างๆ แสดงในรูปที่ 2.5 ถึง 2.7



รูปที่ 2.5 ค่า $\tan \delta$ ของนอนโพลาร์ไดอิเล็กตริกและความถี่



รูปที่ 2.6 ค่า $\tan \delta$ ของโพลีเมทิลเมตะครายเลตและความถี่ ที่อุณหภูมิ 20°C (แกนตั้งและแกนนอนเป็นลอการิทึม)

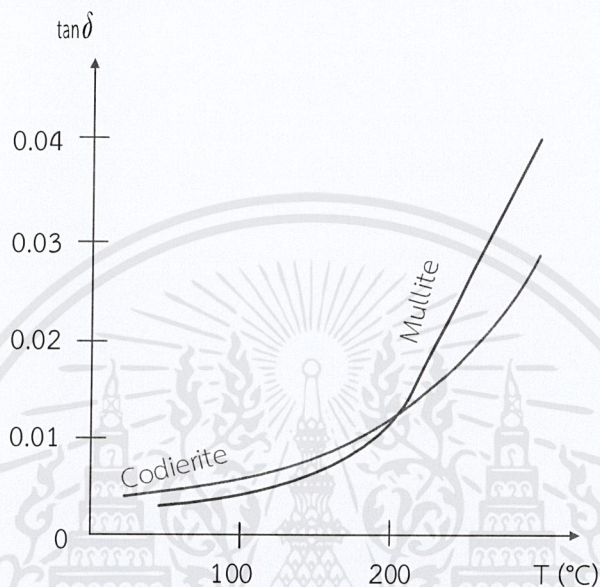


รูปที่ 2.7 ค่า ϵ กับ $\epsilon \tan \delta$ กับความถี่ของโพลีบิวทิลเมตะครายเลต (แกนนอน เป็นลอการิทึม)

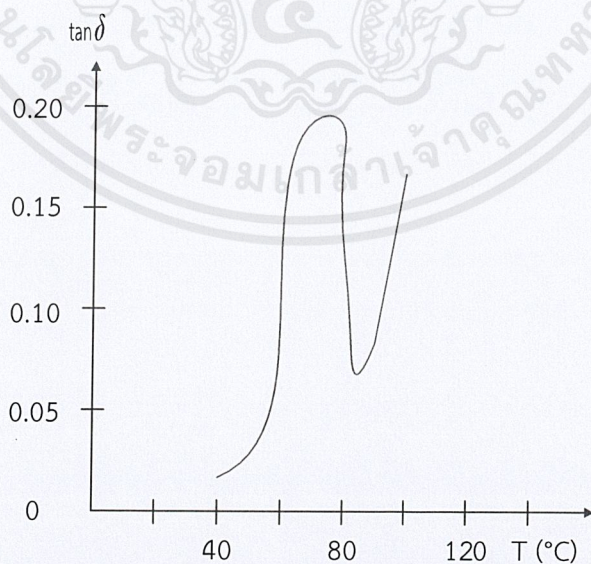
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ค่า $\tan \delta$ กับอุณหภูมิ

ค่า $\tan \delta$ จะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (ดูรูปที่ 2.7) ในสารโพลาร์หรือสารผสมของมันกับสารที่เป็นกลาง พลังงานสูญเสียจะเกิดขึ้นเนื่องจากการนำไฟฟ้า ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และจะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดที่อุณหภูมิค่าหนึ่ง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไป จะทำให้ค่า $\tan \delta$ ลดลง (ดูรูปที่ 2.8 ถึง 2.10)

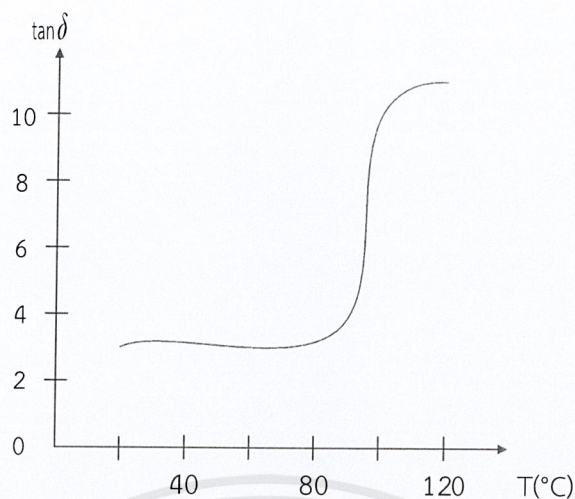


รูปที่ 2.8 ค่า $\tan \delta$ ของ $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ และ $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$ ที่ความถี่ 1 MHz กับอุณหภูมิ



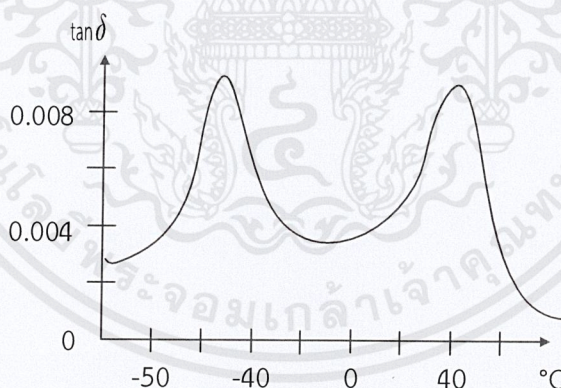
รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงของค่า $\tan \delta$ กับอุณหภูมิของโพลาร์โพลิเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงของค่า $\tan \delta$ กับ อุณหภูมิของโพลาร์โพลีไวนิลคลอไรด์ ที่ 50 Hz

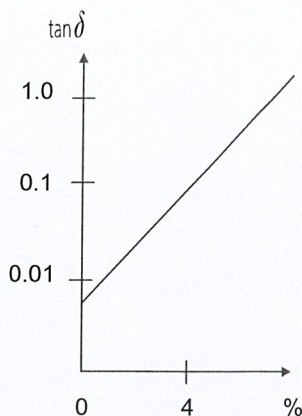
ถ้าไดอิเล็กตริกเป็นสารผสมของสารโพลาร์ ก็จะได้ค่าสูงสุดได้หลายค่า ซึ่งเกิดจากผลของส่วนประกอบในสารผสม เช่น รูปที่ 2.9 และรูปที่ 2.10 ซึ่งค่าสูงสุดค่าแรก (ที่ -55°C) เกิดขึ้นเนื่องจากพลังงานสูญเสียในกระดาษ (cellulose) เอง ค่าสูงสุดที่สอง (ที่ 35°C) เกิดขึ้นโดยพลังงานสูญเสียในสารประกอบที่ชุ่ม (impregnating compound คือ oil-colophony composition)



รูปที่ 2.11 ค่า $\tan \delta$ ของกระดาษที่ชุ่มด้วยน้ำมันผสมโคโลโฟนี กับอุณหภูมิที่ 50 Hz

- ค่า $\tan \delta$ กับความชื้น

ค่า $\tan \delta$ ของสารไดอิเล็กตริก จะเพิ่มขึ้นตามความชื้น ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.12 ซึ่งจากกราฟที่แสดง ทำให้ทราบว่าค่าความชื้นที่สูงๆ มีผลทำลายคุณสมบัติของการฉนวนไฟฟ้า



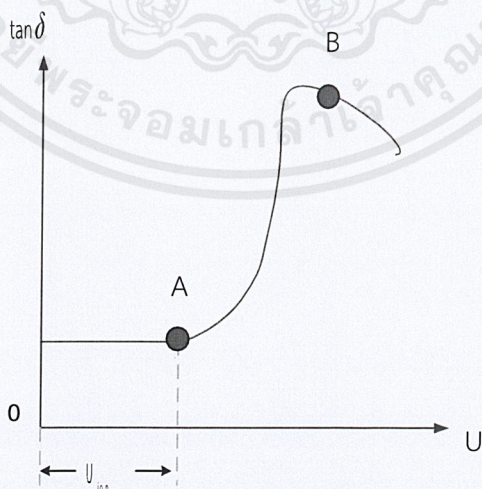
รูปที่ 2.12 ค่า $\tan \delta$ ของกระดาษกับความชื้นในรูปเปอร์เซ็นต์ปริมาตร ที่ความถี่ 1 MHz (แกนตั้งเป็นลอการิทึม)

- ค่า $\tan \delta$ กับแรงดัน

เมื่อคุณภาพของฉนวน (โดยเฉพาะในเคเบิลแรงสูง, อุปกรณ์ต่างๆ และเครื่องจักรกลไฟฟ้า) ถูกคาดคะเนขึ้นโดยส่วนที่สำคัญจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของ $\tan \delta$ ซึ่ง $\tan \delta$ ขึ้นกับค่าแรงดัน U ที่ป้อนให้

ในหลายๆ กรณี ค่า $\tan \delta$ จะไม่ขึ้นกับแรงดัน เมื่อให้เงื่อนไขอื่นๆ เท่ากัน ค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของแรงดันที่ป้อนให้ฉนวน ดูได้จากสมการ (2.17)

อย่างไรก็ตามค่า $\tan \delta$ ที่ขึ้นกับแรงดัน บางครั้งสามารถอธิบายได้โดยกราฟที่แสดงในรูปที่ 2.13 โดยค่า $\tan \delta$ นี้เกือบจะคงที่ในบางค่ากับแรงดัน แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่อแรงดันเกิดค่า U_{ion} กราฟที่แสดงในรูปที่ 2.13 เรียกว่า เส้นโค้งไอออไนเซชัน



รูปที่ 2.13 เส้นโค้งไอออไนเซชัน

จุด A บนเส้นโค้ง เรียกว่า จุดไอออไนเซชัน และจะเป็นไปตามการเกิดไอออไนเซชัน (การเกิดของโคโรนาหรือชนิดอื่นๆ ของดีสชาร์จบางส่วน) ในอากาศหรือก๊าซอื่นๆ ในฉนวน ตัวอย่างเช่น อากาศและก๊าซในฉนวนเส้นใยที่มีความหนาแน่นน้อยและฉนวนที่ได้รับแรงกดดัน ซึ่งไม่ได้ทำการอบแห้ง (deep vacuum drying)

หลังจากผ่านจุดสูงสุด (จุด B) กราฟจะลาดลงเล็กน้อย เพราะเป็นส่วนประกอบของอากาศมีค่าความนำสูงและแรงดันตกคร่อมสารนั้นมีค่าน้อยลง การไอออไนเซชันของอากาศจะเกี่ยวพันกับเงื่อนไขที่สำคัญ 2 ประการ คือ

1. พิจารณาการดูดซับของพลังงาน คือ การเพิ่มอย่างมากของพลังงานสูญเสียเปล่า $\tan \delta$
2. ขบวนการทางเคมีเมื่อจุดเดือดต่ำลง บางส่วนของออกซิเจนในอากาศจะเปลี่ยนเป็นโอโซนและไนโตรเจนออกไซด์ สารเหล่านี้จะทำให้เนื้อฉนวนถูกทำลาย

ตามหลักการแล้ว แรงดันที่ใช้ควรมีค่าต่ำกว่าไอออไนเซชัน ซึ่งสอดคล้องกับจุด A (รูปที่ 2.13) คุณสมบัติที่ดีขึ้นจะเกิดกับฉนวนซึ่ง U_{ion} สูงขึ้น และการเพิ่มขึ้นของกราฟไอออไนเซชันหลังจากจุด A จะมีความชันเพิ่มขึ้น บางครั้งคุณสมบัติของการเป็นฉนวนที่แรงดันแรงสูงสามารถประเมินได้โดยการกำหนดค่าที่เพิ่มขึ้นของ $\tan \delta$ (loss tangent) เมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นจากขนาดที่กำหนด

ในไม่กี่ปีที่ผ่านมา ได้มีผู้ให้ความสนใจมากในการศึกษาเกี่ยวกับดีสชาร์จบางส่วนในฉนวนก๊าซและฉนวนของแข็ง เนื่องจากการเกิดขึ้นของดีสชาร์จบางส่วนเหล่านี้จะลดความน่าเชื่อถือในการทำงานของฉนวนลง โดยเฉพาะวิธีที่ถูกปรับปรุงขึ้นได้ถูกนำมาใช้กับการประมาณค่าเชิงตัวเลขของความเข้มของดีสชาร์จบางส่วน

2.1.4 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน (Dielectric Strength)

ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน หมายถึงค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric Field Strength) สูงสุดที่ฉนวนนั้นจะสามารถทนอยู่ได้ โดยไม่เกิดความเสียหาย หรือเกิดการเบรกดาวน หรือทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ลักษณะมิติของอิเล็กโตรด ลักษณะสมบัติของไดอิเล็กตริก คุณลักษณะของแรงดันที่ฉนวนนั้นได้รับระยะเวลาที่ฉนวนได้รับแรงดันไฟฟ้า โดยปกติไดอิเล็กตริกแข็งจะทนต่อแรงดันเบรกดาวนได้สูงกว่าไดอิเล็กตริกเหลว การเบรกดาวนในฉนวนเหลวสภาพการฉนวนจะกลับสู่สภาพปกติได้หลังจากเบรกดาวนผ่านไปแล้ว แต่ในฉนวนแข็งเกิดเบรกดาวนแล้วสภาพการฉนวนจะเสียไป ทำให้ไม่สามารถใช้งานเพื่อการฉนวนได้อีก

2.2 ฉนวนความร้อน [1]

คุณสมบัติที่สำคัญของฉนวนความร้อนคือการระบายความร้อนและความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า คุณสมบัติด้านการระบายความร้อนจะมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องได้แก่ ความหนาแน่น ความหนืด และ อุณหภูมิ

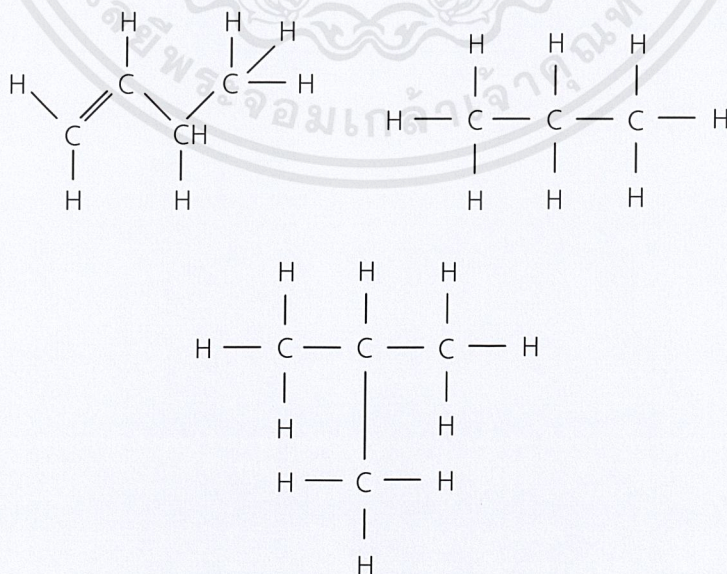
ความสามารถในการระบายความร้อนเป็นคุณสมบัติที่ดีที่มีอยู่ในฉนวนความร้อน ฉนวนจะถูกถ่ายเทโดยการนำความร้อนของฉนวนความร้อน ซึ่งอยู่กับค่าความต้านทานจำเพาะและค่าความหนืดของของเหลว รวมทั้งค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของฉนวนความร้อน และในกรณีที่ฉนวนความร้อนได้บรรจุอยู่ในระบบที่มีการสูบลม หรือทำให้ของเหลวเกิดการไหลวนก็จะมีผลต่อการระบายความร้อนด้วย อุณหภูมิของฉนวนความร้อนจะมีผลต่อค่าการนำความร้อนของฉนวนความร้อน

อุณหภูมิยังมีผลต่อความหนืดของฉนวนความร้อน โดยความหนืดเป็นปัจจัยที่สำคัญมาก เพราะความหนืดต่ำหมายถึงการระบายความร้อนได้ดี โดยทั่วไปแล้วของเหลวเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความหนืดจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว

2.2.1 น้ำมันหม้อแปลง [4]

น้ำมันหม้อแปลงเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากการกลั่นปิโตรเลียมที่ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนหลายชนิด สามารถจำแนกตามโครงสร้างโมเลกุลได้ 3 ประเภท คือ อลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน, อลิไซคลิกไฮโดรคาร์บอน และอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

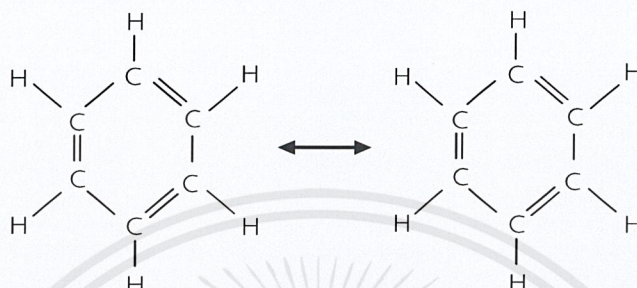
1. อลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (Aliphatic Hydrocarbon) สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในโมเลกุลมีอะตอมของ คาร์บอน (C) ต่อกันเป็นลูกโซ่ ในลักษณะปลายเปิด ซึ่งอาจเป็นโซ่ตรง (Straight Chain) หรือโซ่ที่มีกิ่งก้านสาขา (Branched Chain) และพันธะระหว่างคาร์บอนอะตอมอาจเป็นพันธะเดี่ยว พันธะคู่ พันธะสาม หรือมีพันธะมากกว่าหนึ่งชนิด ผสมกันก็ได้ อลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ แอลคีน (Alkene), แอลเคน (Alkane) และ แอลไคน์ (Alkyne)



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างสูตรโครงสร้างอลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน

2. อลิไซคลิกไฮโดรคาร์บอน (Alicyclic Hydrocarbon) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างของคาร์บอนจัดเรียงตัวเป็นโซ่ปิด เช่น ไซโคลแอลเคน ไซโคลแอลคีนและไซโคลแอลคีน

3. อโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Aromatic Hydrocarbon) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีวงแหวนเบนซินเป็นองค์ประกอบภายในโมเลกุล เส้นพันธะแบบวงกลมหมายถึงอิเล็กตรอนไม่เสถียรซึ่งวิ่งวนรอบวงแหวน



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างสูตรโครงสร้างอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

นอกจากองค์ประกอบดังกล่าวแล้ว ในน้ำมันหม้อแปลงยังมีการใส่สารเติมแต่ง (Additive) เพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง โดยเฉพาะสารยับยั้งการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation Inhibitor) ช่วยให้น้ำมันหม้อแปลงเกิดออกซิเดชันยากขึ้นจึงมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น ลักษณะสมบัติที่ต้องการของน้ำมันหม้อแปลงสำหรับการฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจะกำหนดด้วยคุณสมบัติทางฟิสิกส์ เคมี และไฟฟ้า ซึ่งต้องใช้ให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์การใช้งาน คุณสมบัติดังกล่าวแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางฟิสิกส์ เคมี และไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง [5]

สมบัติทางฟิสิกส์	สมบัติทางเคมี	สมบัติทางไฟฟ้า
การระบายความร้อน - ความหนาแน่น - ความหนืด - สัมประสิทธิ์การกระจาย	องค์ประกอบทางเคมี - โครงสร้างโมเลกุล - อัตราส่วนปริมาณของอลิฟาติก, อลิไซคลิก และอโรมาติก	- ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า - ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก - ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ - ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า
ความร้อน - ความนำไฟฟ้าเนื่องจากความร้อน	- ค่าความเป็นกลาง - แรงตึงผิว	- ความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ - การดิสชาร์จบางส่วนและแรงดันเริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วน
การเก็บรักษา และปฏิบัติงาน - จุดติดไฟ - จุดวาบไฟ - ความดันไอ - อุณหภูมิติดไฟ		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 เอสเทอร์ [6]

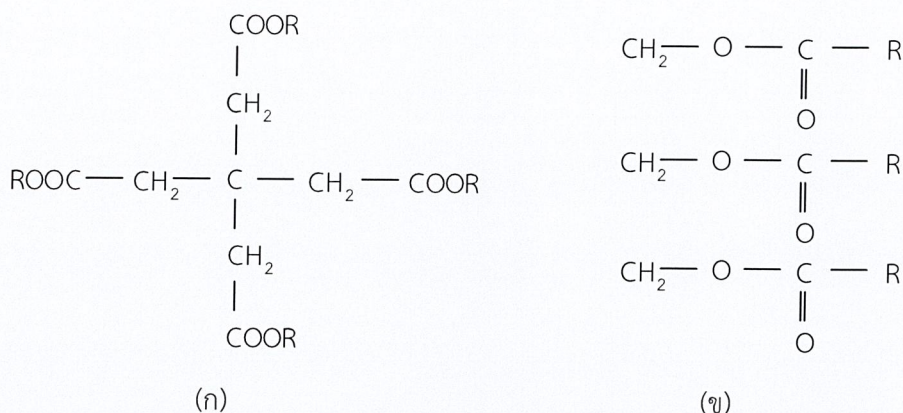
เอสเทอร์นั้นมีหลายรูปแบบและถูกใช้ในงานที่หลากหลาย โดยเอสเทอร์ที่ใช้ในหม้อแปลงนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทคือ โดยสังเคราะห์ และโดยธรรมชาติ

เอสเทอร์สังเคราะห์นั้นถูกผลิตจากการเลือกวัตถุดิบอย่างละเอียดเพื่อปรับปรุงให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่นำไปใช้ในงานที่เฉพาะเจาะจง เอสเทอร์ที่ได้จากธรรมชาตินั้นสามารถสกัดจากเมล็ดของพืช เช่น ถั่วเหลือง, ดอกทานตะวัน, เรพซีด เอสเทอร์จากธรรมชาตินั้นทนต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี จึงเหมาะที่จะใช้กับอุปกรณ์แบบปิดเพื่อไม่ให้เอสเทอร์สัมผัสกับอากาศ อีกทั้งยังมีจุดไหลเทสูงเมื่อเทียบกับเอสเทอร์สังเคราะห์ (จุดไหลเทคืออุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันยังเป็นของเหลวพอที่จะไหลได้) ดังนั้นจึงเหมาะกับการใช้งานภายในเพื่อให้น้ำมันยังคงมีสภาพเป็นของเหลว

ในส่วนของเอสเทอร์สังเคราะห์นั้น เป็นสารประกอบที่สังเคราะห์จากกรดกับแอลกอฮอล์ เอสเทอร์จะไม่สร้างไดออกซินหรือสารพิษอื่นๆ เมื่อเกิดเพลิงไหม้ จะสร้างเฉพาะคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำเท่านั้น อีกทั้งยังสามารถย่อยสลายได้อย่างดี ปัจจุบันเอสเทอร์ได้ถูกพัฒนาให้ต้านทานปฏิกิริยาออกซิเดชันและสามารถดูดซับความชื้นได้สูงกว่าน้ำมันแร่โดยไม่เกิดการเสื่อมสภาพของความเป็นฉนวน จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าเอสเทอร์สามารถใช้แทนน้ำมันแร่ในหม้อแปลงได้ การผสมเอสเทอร์ 3% ในน้ำมันแร่ไม่ทำให้คุณสมบัติความเป็นฉนวนลดลง เอสเทอร์หลายชนิดถูกนำไปใช้ในงานไฟฟ้าด้านต่างๆ

1. Tetraesters (pentaerythritol esters) เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมแต่มีราคาสูงเมื่อเทียบกับของไหลชนิดอื่นๆ ที่มีคุณสมบัติทนไฟ ในหม้อแปลงชนิดปิดผนึกทำงานที่อุณหภูมิปกติ tetraesters สามารถดูดซับความชื้นที่เกิดจากการที่ความร้อนจากขดลวดไปย่อยสลายเซลลูโลส (กระดาษฉนวน) อีกทั้งยังไม่ต้องมีการบำรุงรักษาในช่วงชีวิตของหม้อแปลง ส่วนในหม้อแปลงแบบเปิดความต้องการฉนวนเหลวจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการทำงานและประสิทธิภาพของหม้อแปลง Tetraesters สามารถดูดซับน้ำเป็นปริมาณได้มากกว่าน้ำมันแร่เพราะโครงสร้างคาร์บอนิลของมัน เอสเทอร์นั้นมีความหนืดสูงกว่าน้ำมันแร่ทำให้ต้องใช้ระบบถ่ายเทความร้อนที่ต่ำกว่าเดิม ความชื้นที่อยู่ในเอสเทอร์ส่งผลให้เกิดการไฮโดรไลซิสเล็กน้อยก่อให้เกิดเพียงกรดไขมันอิสระที่ไม่รุนแรง

2. Phosphoric esters ถูกใช้ในงานที่หลากหลายเช่น ใช้ในตัวเก็บประจุ ใช้ในหม้อแปลงเนื่องจากมีจุดติดไฟที่สูง แต่อย่างไรก็ตามจะถูกใช้ค่อนข้างจำกัดเนื่องจากส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมโดยมันจะก่อให้เกิด Dibutyl sebacate, dioctyl-sebacate, และ benzyl-neocapratoe ปัจจุบันจึงไม่ถูกนำมาใช้เนื่องจากเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต



รูปที่ 2.16 โครงสร้างโมเลกุลของเอสเทอร์สังเคราะห์ (ก) และเอสเทอร์ธรรมชาติ (ข)

2.2.3 น้ำมันปาล์ม [3]

น้ำมันปาล์มสามารถสกัดได้จาก 2 ส่วน คือ ส่วนเปลือกนอกประมาณ 16 - 25 % ของน้ำหนักทะลาย และส่วนเนื้อในประมาณ 3 - 5 % ของน้ำหนักทะลาย กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม (Mill Processing) หลังการเก็บเกี่ยวทะลายปาล์มน้ำมัน จะมีการขนส่งผลผลิตเข้าสู่โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ซึ่งมีกระบวนการสกัดน้ำมัน 2 แบบ คือ แบบมาตรฐาน (หีบน้ำมันแยก) และแบบหีบน้ำมันผสม โดยโรงงานแบบมาตรฐานเป็นโรงงานที่มีกำลังการผลิตสูง และน้ำมันที่ได้จัดเป็นน้ำมันเกรดเอ เนื่องจากมีการแยกชนิดของน้ำมันปาล์ม สำหรับโรงงานแบบหีบน้ำมันผสมเป็นโรงงานที่มีกำลังการผลิตค่อนข้างต่ำ และน้ำมันที่สกัดได้เป็นน้ำมันผสมระหว่างน้ำมันปาล์มจากเปลือก และน้ำมันเมล็ดในปาล์ม

โดยทั่วไปน้ำมันปาล์มดิบมีองค์ประกอบดังต่อไปนี้ คือ

1. Glycerides ประมาณ 95 %
2. Fatty acids ประมาณ 3 - 5 %
3. Minor & Trace component ประมาณ 1% ซึ่งประกอบไปด้วย phytonutrient ที่มีคุณค่าทางอาหารสูง และสารอื่นๆ เช่น carotenoid, tocopherols, tocotrienols, sterols, triterpene alcohols, phospholipids, glycolipids, terpenic hydrocarbons, waxes และ impurities

จากกระบวนการสกัดปาล์มน้ำมัน สามารถแบ่งน้ำมันปาล์มตามวัตถุประสงค์ที่ใช้สกัดเป็น 2 ชนิด คือ น้ำมันปาล์มดิบ และน้ำมันเมล็ดในปาล์มดิบ ซึ่งมีองค์ประกอบกรดไขมันที่แตกต่างกัน โดยน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเมล็ดในปาล์ม มีองค์ประกอบของกรดไขมันอิ่มตัว:กรดไขมันไม่อิ่มตัว ในสัดส่วนประมาณ 50:50 และ 82:18 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันปาล์มดิบ และน้ำมันเมล็ดในปาล์ม

กรดไขมัน	น้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil)	น้ำมันเมล็ดในปาล์ม (Palm Kernel Oil)
กรดไขมันอิ่มตัว	50 %	82 %
C 6:0 (caproic acid)	-	0.1 - 0.5
C 8:0 (caprylic acid)	-	3.4 - 5.9
C10:0 (capric acid)	-	3.3 - 4.4
C12:0 (lauric acid)	0.1 - 0.4	46.3 - 51.1
C14:0 (myristic acid)	1.0 - 1.4	14.3 - 16.8
C16:0 (palmitic acid)	40.9 - 47.5	6.5 - 8.9
C18:0 (stearic acid)	3.8 - 4.8	1.6 - 2.6
C20:0 (arachidic acid)	0 - 0.8	-
กรดไขมันไม่อิ่มตัว	50 %	18 %
C16:1 (palmitoleic acid)	0 - 0.6	-
C18:1 (oleic acid)	36.4 - 41.2	13.2 - 16.4
C18:2 (linoleic acid)	9.2 - 11.6	2.2 - 3.4
C18:3 (linolenic acid)	0 - 0.5	-
Others	-	tr - 0.9

2.3 ฉนวนแข็ง [1]

ฉนวนแข็งนอกจากจะทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าแล้วบางส่วนยังจะต้องทำหน้าที่ยึดหรือรับแรงกล อันเกิดจากน้ำหนักของโครงสร้าง หรือแรงกลไดนามิกส์ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าอีกด้วย ฉนวนแข็งเมื่อทำการแบ่งประเภทโดยอาศัยโครงสร้างทางเคมีจะสามารถจำแนกได้เป็น สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และโพลีเมอร์ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การแบ่งประเภทของฉนวนแข็ง

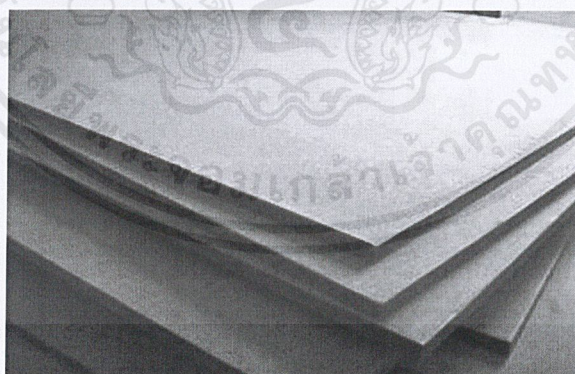
Organic	Inorganic	Synthetic polymers	
		Thermoplastic	Thermosetting
Amber	Ceramics	Prespex	Epoxy
Paper	Glass	Polyethylene	Phenolics
Pressboard	Mica	Polypropylene	Melamine
Rubber	Fiber glass	Polystyrene	Urea formaldehyde
Wood	Enamel	Polyvinyl chloride	Crosslinked polystyrene
Resins		Polyamic	Elastomers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

ฉนวนแข็งที่เป็นประเภทสารอินทรีย์ที่เกิดจากพืช และสัตว์นั้นจะให้คุณสมบัติความเป็นฉนวนที่ดี แต่จะเสื่อมสภาพเร็วโดยเฉพาะเมื่ออุณหภูมิขณะทำงานของฉนวนมากกว่า 100 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงต้องนำฉนวนแข็งดังกล่าวไปปรับปรุงคุณสมบัติเสียก่อนก่อนที่จะนำไปใช้งานซึ่งมักจะนำไปใช้ร่วมกับฉนวนเหลวในการเป็นฉนวนของสายเคเบิล ตัวเก็บประจุ และหม้อแปลง ฉนวนแข็งที่เป็นสารอินทรีย์ จะมีคุณสมบัติแตกต่างชัดเจน ทั้งคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้า ซึ่งจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางโครงสร้างของฉนวนดังกล่าว อุณหภูมิขณะทำงานอาจสูงถึง 250 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปแล้วฉนวนแข็งที่เป็นสารอินทรีย์จะนำไปใช้ทำลูกถ้วยฉนวนหรือปลอกฉนวนนำสาย ฉนวนแข็งประเภทสุดท้ายได้แก่ โพลีเมอร์ ซึ่งอาจแบ่งได้ 2 กลุ่มคือ เทอร์โมพลาสติก และเทอร์โมเซตติง โพลีเมอร์จะมีคุณสมบัติเด่นในเรื่องความคงทนต่อการกัดกร่อน ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า และการเกิดโคโรนา มีน้ำหนักเบา และคุณสมบัติการไม่ชอบน้ำซึ่งเป็นประโยชน์ในการผลิตลูกถ้วยฉนวนที่นำไปใช้ในบริเวณที่มีมลภาวะ

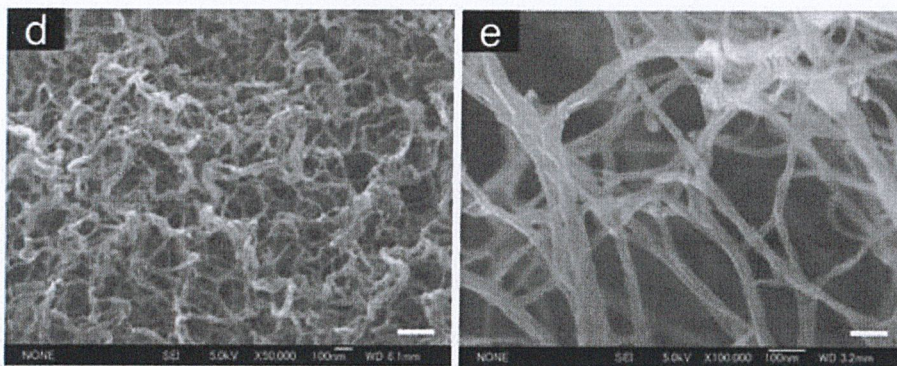
2.3.1 กระดาษอัดแรง (Press Board) [4]

กระดาษอัดแรงเป็นวัสดุประเภทเซลลูโลสหลายชั้นที่มาจากกระดาษ ที่ถูกบีบอัดด้วยแรงดันและความร้อน โดยขึ้นรูปเป็นวัสดุแข็งที่มีความหนาแน่นสูง โดย Press Board ถือเป็นพอลิเมอร์อินทรีย์ที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางกลอย่างดี เนื่องจากเซลลูโลสเป็นเส้นใยธรรมชาติ (Organic fiber) ที่มีการซ้อนทับกันไปมาทำให้มีลักษณะเป็นรูพรุน จึงทำให้มีความไวต่อความชื้น และอุณหภูมิ

ไฟเบอร์ (Fiber) แต่ละเส้นในเซลลูโลส ประกอบด้วยพอลิเมอร์ เรียงตัวขนานกัน โดยพอลิเมอร์แต่ละเส้นที่ขนานกันจะยึดติดกันด้วยไฮโดรเจน เมื่อโมเลกุลของน้ำสัมผัสกับผิวหน้าของเซลลูโลสไฟเบอร์ (Cellulose Fiber) จะทำให้เกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างอะตอมออกซิเจนกับไฮโดรเจน ทำให้กระดาษฉนวนสามารถดูดซับความชื้นได้ดี



รูปที่ 2.17 กระดาษอัดแรง (Press Board)



รูปที่ 2.18 เส้นใยธรรมชาติ (Organic fiber)

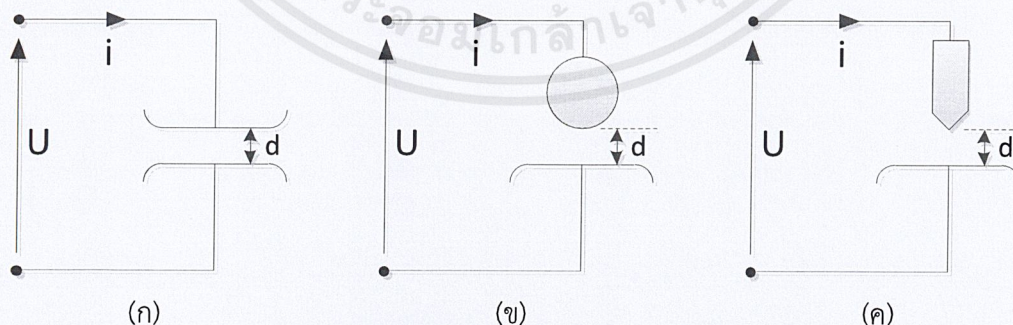
2.4 สนามไฟฟ้า [7]

สนามไฟฟ้าเกิดจากประจุไฟฟ้าซึ่งปริมาณวัดจากแรงที่เกิดขึ้นตากลูกของคูลอมบ์ (Coulomb's law) เมื่อมีประจุ Q_1 และ Q' อยู่ห่างกันระยะ r จะเกิดแรงกระทำต่อกันในทิศทางต่อเชื่อมโยระหว่างสองประจุนั้น สมมติแรงที่เกิดจาก Q_1 ซึ่งมีตำแหน่งทางเวกเตอร์เทียบกับ Q' เป็น \vec{r} แรงที่เกิดเป็นไปตามสมการ [8]

$$F_{Q_1 \rightarrow Q'} = \frac{Q_1 Q' \vec{r}}{4\pi\epsilon r^3} \quad (2.23)$$

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 2.19 [9]



รูปที่ 2.19 อิเล็กโตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆกัน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หมายถึงอิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้าทุกๆ จุดในช่วงระหว่างอิเล็กโตรดเท่ากัน ซึ่งคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_{\max} = \frac{U}{d} \quad (2.24)$$

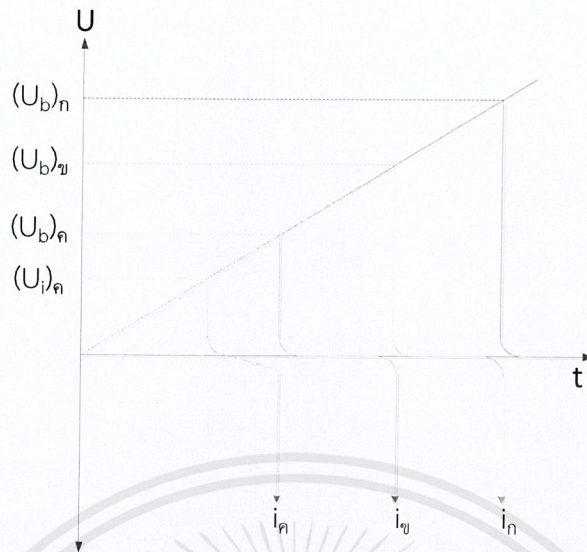
- เมื่อ U คือ แรงดันที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโตรด
 d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด
 E คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า ณ จุดใดๆ ระหว่างอิเล็กโตรด
 E_{\max} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

หมายความว่าเมื่อป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ จะเกิดการเบรกดาวนหรือสปาร์กทันที ที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรด (ซึ่งเท่ากันทุกจุด) ถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณ และกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมากทันทีทันใด ค่ากระแสเบรกดาวนนี้จะถูกจำกัดด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของตัวจ่าย และวงจรภายนอกเท่านั้น ซึ่งก่อนจะเบรกดาวนนั้นค่ากระแสจะวัดไม่ได้ ดังรูปที่ 2.20 (ก) และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันขณะจะเกิดเบรกดาวนนี้ก็คือนค่าความคงทนทางไฟฟ้า (dielectric strength) หรือความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของการฉนวน สามารถคำนวณได้จาก

$$E_b = \frac{U_b}{d} \quad (2.25)$$

- เมื่อ U_b คือ แรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวนด้วยสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ
 E_b คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน ซึ่งเรียกว่าความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวน

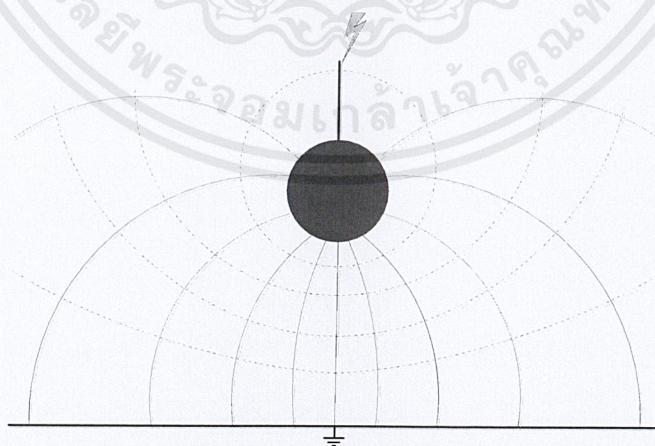
อย่างไรก็ตามค่า E_b นี้ ของไดอิเล็กตริกชนิดหนึ่งก็มีค่าไม่คงตัวเสมอไป เพราะขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ แม้แต่ความหนา หรือระยะห่าง d ที่ไม่เท่ากัน ค่า E_b ก็ไม่เท่ากัน ฉะนั้นในมาตรฐานที่กำหนดค่าความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวน มักจะกำหนดความหนาของไดอิเล็กตริกไว้ด้วยเสมอ



รูปที่ 2.20 การเปรียบเทียบแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ในไดอิเล็กทริกตามลักษณะทางไฟฟ้า
 ในรูป : ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ
 ข) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย
 ค) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง

2.4.2 สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอคือ ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้น ความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆ จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะของเรขาคณิตของอิเล็กโตรด ที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย เช่น อิเล็กโตรดในรูปที่ 2.19 (ข) ถ้าเขียนเส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าๆ จะได้ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า

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

ในรูปที่ 2.21 จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_{\max} จะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโทรดทรงกลม ซึ่งอาจคำนวณได้จากสมการ

$$E_{\max} = \frac{U}{d \cdot \eta^*} \quad (2.26)$$

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

$$\eta^* = \frac{E_{\text{avg}}}{E_{\max}} \quad 0 < \eta^* \leq 1 \quad (2.27)$$

โดยที่ E_{av} คือ ค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ U/d

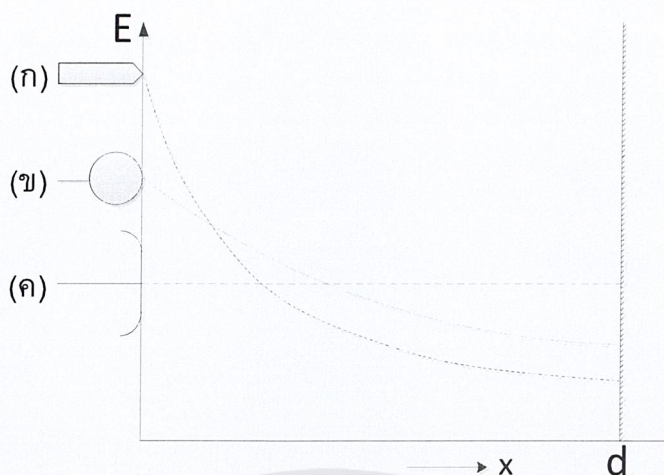
อาจกล่าวได้ว่า η^* คือ ดรรชนีแสดงให้ทราบว่าอิเล็กโทรดนั้น มีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากน้อยเพียงใด และโดยอาศัยแฟกเตอร์สนามไฟฟ้านี้เอง จึงคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ของฉนวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (แบบ ข) ได้คือ

$$E_b = \frac{U_b}{d \cdot \eta^*} \quad (2.28)$$

และค่าแรงดันเบรกดาวน์ $U_b = E_b \cdot d \cdot \eta^* \quad (2.29)$

แสดงว่า อิเล็กโทรดที่มีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าลดลง ค่าแรงดันเบรกดาวน์ก็จะลดลง สมการนี้ใช้ได้เฉพาะกรณีที่มีอิเล็กโทรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย หรือใช้กับกรณีที่ไม่มีโคโรนา คือไม่มีดิสชาร์จนำหน้า (predischARGE) เกิดก่อนเบรกดาวน์ ดังอิเล็กโทรดรูปที่ 2.19 (ข) กล่าวคือ ก่อนเกิดเบรกดาวน์จะไม่ปรากฏว่ามีกระแสไหลระหว่างอิเล็กโทรดเลย และลักษณะสนามไฟฟ้า จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง จะเกิดเบรกดาวน์ทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าความคงทน คือ $E_{\max} = E_b$

ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (highly nonuniform field) ความเครียดสนามไฟฟ้าสูง จะอยู่บริเวณใกล้กับผิวอิเล็กโทรด ที่มีพื้นที่ผิวน้อยที่สุด เช่น ปลายแหลมดังรูปที่ 2.19 (ค) เมื่อ ระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโทรดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังเส้นกราฟ ความเครียดสนามไฟฟ้ากระจายเปรียบเทียบในรูปที่ 2.22 อิเล็กโทรดแบบ ค นี้ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าวิกฤตแล้วก็ตาม เบรกดาวน์จะยังไม่เกิดแต่จะเกิดโคโรนา [7]



รูปที่ 2.22 สนามไฟฟ้ากระจายเปรียบเทียบของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ

บริเวณที่ผิวอิเล็กโตรดเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ส่วนบริเวณอื่นๆ ที่ห่างออกไปจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าลดลงและโคโรนาไม่เกิด ฉะนั้นในช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรด จะเกิดดิสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ เรียกว่าดิสชาร์จบางส่วน (partial discharge = PD) ปรากฏการณ์อาจเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง หรือเป็นช่วงๆ จึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรด กระแสนี้จะขึ้นและวัดได้ก่อนเกิดเบรกดาวน์ เรียกว่ากระแสโคโรนา หรือกระแสพรีดิสชาร์จ ดังรูปที่ 2.20 (ค)

การเกิดโคโรนาจะทำให้สนามไฟฟ้าของเรขาคณิตเปลี่ยนไป เพราะมีประจุค้าง (space charge) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะคำนวณจากสมการที่ (2.26) ไม่ได้ อย่างไรก็ตามสมการนี้อาจใช้คำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดได้ เพราะสนามไฟฟ้าของเรขาคณิตยังไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือ

$$E_i = \frac{U_i}{d \cdot \eta^*} \quad (2.30)$$

เมื่อ E_i คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่โคโรนาเริ่มเกิด

U_i คือ แรงดันป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด

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

2.5 พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า [4]

2.5.1 องค์ประกอบทางเคมีของฉนวน

องค์ประกอบทางเคมี มีผลต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าอย่างยิ่ง โดยโครงสร้างโมเลกุลขององค์ประกอบทางเคมีมีผลต่อการเคลื่อนที่ของสตริมเมอร์ซึ่งนำไปสู่การเบรกดาวนได้ เช่น ปริมาณของโครงสร้างอโรมาติกซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนแบบไม่อิ่มตัวในน้ำมันหม้อแปลงมีผลต่อความสามารถในการละลายของแก๊ส และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า นอกจากนี้การเกิดออกซิเดชันก็มีผลทำให้โครงสร้างทางเคมีของน้ำมันหม้อแปลงเปลี่ยนแปลงไป และกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า [10]

2.5.2 ความชื้น

Moisture content หรือ Water content เป็นค่าความชื้นที่ปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง ส่งผลทำให้ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Break down) ของฉนวนน้ำมันมีค่าต่ำลง โดยค่า Moisture content เป็นสัดส่วนโดยมวลของน้ำต่อมวลทั้งหมด ซึ่งในเรื่องของน้ำมันหม้อแปลงนั้น Moisture content จะมีปริมาณน้อยมาก จึงนิยมแสดงในหน่วย part per million (ppm)

รูปแบบของน้ำที่อยู่ในน้ำมัน แบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ [11]

1. Dissolved Water น้ำที่อยู่ในน้ำมันมีปริมาณน้อยมาก โมเลกุลของน้ำจะกระจายตัวอยู่ในน้ำมันทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นได้
2. Emulsified Water เมื่อน้ำที่อยู่ในน้ำมันมีปริมาณมากกว่า Saturation point โมเลกุลของน้ำมีมากพอจนรวมตัวกันเป็นหยดน้ำเล็กๆ ทำให้สังเกตเห็นได้ว่ามีเป็นลักษณะเป็น Emulsion
3. Free Water หากน้ำมีมากขึ้น หรือทิ้ง Emulsion ไว้นานๆ น้ำกับน้ำมันจะแยกชั้นกัน เนื่องจากความหนาแน่นที่ต่างกัน

จุดการอิ่มตัวของน้ำ (Water saturation point) หรือ ขอบเขตการอิ่มตัว (Saturation limit) ของน้ำมันจะขึ้นอยู่กับ ชนิด และ อุณหภูมิของน้ำมัน ดังนั้นการบ่งบอก ขอบเขตการอิ่มตัวต้องระบุอุณหภูมิมาด้วย เช่น Mineral oil : 55 ppm, Synthetic ester : 2700 ppm และ Natural ester : 1100 ppm ที่ 20°C

ความชื้นมักจะละลายในฉนวนเหลว โดยอยู่ในรูปของน้ำภายในน้ำมัน จะมีปริมาณน้อยในสถานะอิ่มตัว ซึ่งเป็นสถานะที่มีปริมาณความชื้นมากที่สุดที่สามารถอยู่ในรูปของน้ำภายในน้ำมันได้ และมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง ปริมาณความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงที่เกิดจากสถานะอิ่มตัว จะอยู่ในรูปของน้ำในสถานะความเข้มข้นสูง (Condensed water) ส่วนน้ำที่จับกันด้วยพันธะเคมี (Bound water) เกิดจากการกลั่นที่ไม่ดีพอหรือการเกิดปฏิกิริยาเมื่อน้ำมันหม้อแปลงมีการเสื่อมสภาพ

ความชื้นที่เจือปนอยู่ในฉนวนเหลวจะทำให้ฉนวนมีอุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากการสูญเสียไดอิเล็กตริกที่เพิ่มขึ้นทำให้ฉนวนเหลวเกิดการเสื่อมสภาพ ถ้าเป็นหยดน้ำที่อยู่ในน้ำมันหม้อแปลง หยดน้ำจะยึดออกตามแนวสนามไฟฟ้าทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นเมื่อถึงค่าวิกฤติจะเกิดการเบรกดาวน โดยแนวการเบรกดาวนจะเริ่มที่ปลายของหยดน้ำไปสู่เล็กโตรด นอกจากนี้ยังมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแยกน้ำออกเป็นแก๊สไฮโดรเจนกับแก๊สออกซิเจนที่มีอยู่ในรูปฟองแก๊สทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วน และอาจทำให้เกิดการเบรกดาวนตามมา

วิธีการป้องกันความชื้นไม่ให้เจือปนในฉนวนเหลวที่ดีที่สุดคือไม่ให้ฉนวนเหลวสัมผัสกับอากาศภายนอกด้วยการบรรจุในภาชนะที่ปิดมิดชิด แต่ต้องมีวิธีแก้ปัญหาคายตัวของฉนวนเหลวเมื่อได้รับความร้อนหรือให้สัมผัสกับอากาศโดยผ่านสารดูดความชื้น เช่น ซิลิกาเจล (Silica gel) ก็สามารถลดปริมาณความชื้นจากภายนอกได้

2.5.3 แก๊ส [11]

ภายในน้ำมันหม้อแปลงอาจมีแก๊สปะปนอยู่ แต่แก๊สจะถูกขจัดออกไปจากน้ำมันหม้อแปลงก่อนการเติมลงในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง แต่เนื่องจากสภาพใช้งานจริง เช่น การสัมผัสกับอากาศของกระดาด และน้ำมันหม้อแปลงจะมีการเสื่อมสภาพขึ้น (Aging) หรือมีการลัดวงจรภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทำให้มีการเจือปนในน้ำมันหม้อแปลงได้อีกฟองแก๊สที่เข้าไปอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงอาจทำให้เกิดการปล่อยประจุบางส่วนที่เป็นสาเหตุของการที่ทำให้ฉนวนเสื่อมคุณภาพ และเกิดการเบรกดาวนในที่สุด

ตารางที่ 2.4 ค่าคงที่การละลายของแก๊ส (A) ตามกฎของเฮนรี ($\mu\text{atm}/(\mu\text{L/L})$) ที่ความดันแก๊สเหนือน้ำมันหม้อแปลง 760 mmHg

อุณหภูมิ (°C)	0	20	40	60	80	100
อากาศ	-	9.9	9.7	9.5	9.3	9.1
N ₂ , ไนโตรเจน	13.0	11.6	11.4	11.1	10.3	10.3
O ₂ , ออกซิเจน	6.4	6.2	6.1	6.0	5.9	5.8
H ₂ , ไฮโดรเจน	24.6	20.4	17.5	15.4	13.8	-
CO, คาร์บอนมอนอกไซด์	8.9	8.3	7.9	7.6	7.3	-
CO ₂ , คาร์บอนไดออกไซด์	0.72	0.89	1.07	1.23	1.5	-

ตารางที่ 2.5 ความสามารถในการละลายของแก๊ส (K, %Vol) ที่ความดันแก๊สเหนือน้ำมันหม้อแปลง 760 mmHg

อุณหภูมิ(°C)	0	20	40	60	80	100
อากาศ	-	10.1	0.3	10.5	10.8	10.9
N ₂ , ไนโตรเจน	7.7	8.6	8.8	9.0	9.7	9.7
O ₂ , ออกซิเจน	15.6	16.1	16.4	16.7	16.9	17.2
H ₂ , ไฮโดรเจน	4.1	4.9	5.7	6.5	7.2	-
CO, คาร์บอนมอนอกไซด์	11.2	12.0	12.7	13.2	13.7	-
CO ₂ , คาร์บอนไดออกไซด์	138.8	112.3	93.5	81.3	66.7	-

2.5.4 ประจุค้ำง

ประจุค้ำงเกิดจากการดิสชาร์จบางส่วนในบริเวณที่มีความเครียดสูงหรือเกิดหลังจากเกิดเบรกดาวน์ขึ้น ประจุมีผลทำให้ลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป โดยมีผลกระทบจากแรงดันที่ไม่มีขั้วไฟฟ้า [12] (เช่น แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง, แรงดันเกิดอิมพัลส์) มากกว่าแรงดันที่ไม่มีขั้วทางไฟฟ้า เช่น แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ นอกจากนี้ประจุค้ำงยังเกิดจากปรากฏการณ์ streaming electrification ที่น้ำมันหม้อแปลงเคลื่อนที่ และเสียดสีกับฉนวนแข็ง เช่น กระจก, แผ่นไม้อัด เป็นต้น และทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างฉนวนแข็งกับน้ำมันหม้อแปลงเนื่องจากการสะสมประจุไฟฟ้าที่ผิวฉนวนแข็งกับน้ำมันหม้อแปลงที่มีประจุตรงข้ามกัน ความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นสูงเพียงพอที่จะทำให้เกิด ดิสชาร์จบางส่วน และดิสชาร์จตามผิวซึ่งนำไปสู่การเบรกดาวน์ได้ [13]

2.5.5 การเคลื่อนที่

การเคลื่อนที่ของน้ำมันหม้อแปลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ, การทำงานของปั๊มหรือพัดลมในการระบายความร้อน และจากปรากฏการณ์ EHD (Electro Hydro Dynamic) ทำให้เกิดฟองแก๊สในน้ำมันหม้อแปลง, เกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคเจือปน และเกิดประจุอิสระเนื่องจากการเสียดสีระหว่างฉนวนเหลวกับฉนวนแข็งที่เรียกว่าปรากฏการณ์ Streaming Electrification [10] ซึ่งกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าด้วย

2.5.6 อุณหภูมิ

คุณสมบัติของพาราเมเตอร์หลายตัวที่มีผลกระทบต่อความคงทนต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เช่น ความหนืด, ความตึงผิว และความหนาแน่น ทำให้กระบวนการเกิดฟองแก๊ส และลักษณะการเคลื่อนที่ของน้ำมันหม้อแปลงเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิด้วย [10] เช่นเดียวกับปริมาณความชื้นที่สภาวะอิ่มตัวซึ่งขึ้นกับอุณหภูมินั้น โดยทั่วไปจะมีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วง 20 – 100 ppm เนื่องจากต้องพิจารณาถึงเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่ความชื้นให้ใกล้เคียงกันในการทดสอบแต่ละครั้ง และการทดสอบผลกระทบของอุณหภูมิจะรอให้อุณหภูมินิ่งก่อนจะเริ่มทำการทดสอบ

2.5.7 การกระจายสนามไฟฟ้า

ลักษณะความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงคล้ายกับแก๊ส กล่าวคืออิเล็กโตรดที่มีการกระจายสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของอิเล็กโตรดที่มีการกระจายสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงจะต่ำที่สุด โดยกลไกการเบรกดาวนของอิเล็กโตรดที่มีการกระจายสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจะเกิดเบรกดาวนโดยตรง ส่วนการเบรกดาวนของอิเล็กโตรดที่มีการกระจายของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอสูงมีการเกิดดิสชาร์จบางส่วนก่อนที่จะนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน ดังนั้นการออกแบบฉนวนควรออกแบบให้มีการกระจายสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอเท่ากันในทุกจุดเพื่อให้มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงที่ช่องว่างระยะห่างเดียวกัน

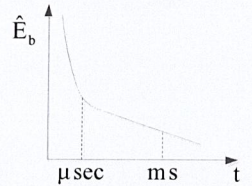
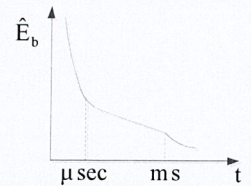
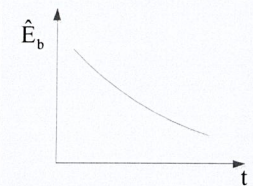
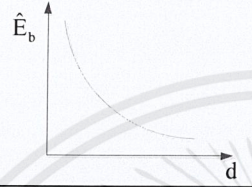
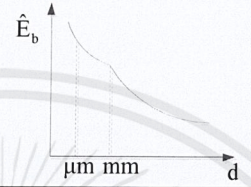
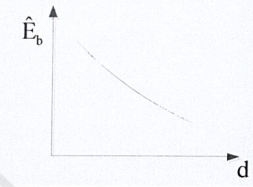
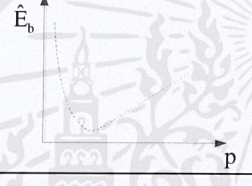
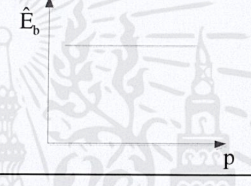
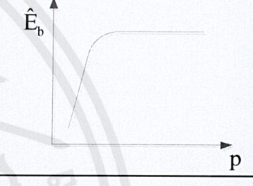

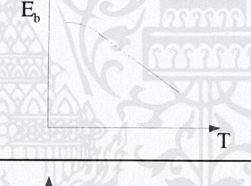
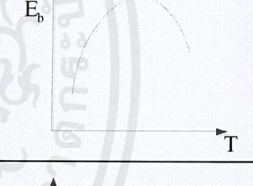
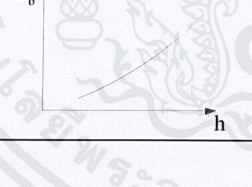
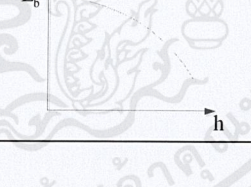
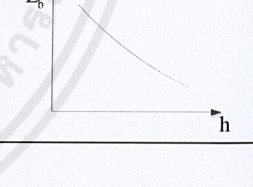
2.5.8 ชนิดของรูปคลื่นแรงดัน [7]

แรงดันเบรกดาวนของฉนวนเหลวขึ้นอยู่กับชนิดของรูปคลื่นแรงดันที่ป้อน วิธีการป้อน และช่วงเวลาการป้อน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าที่คงมีอยู่ ซึ่งในการออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดต่างๆ ภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเป็นเรื่องสำคัญมาก วิธีการตรวจสอบคุณภาพฉนวนที่ดีที่สุดคือการทดสอบจริง โดยความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าคงตัว (แรงดันกระแสตรง และแรงดันกระแสสลับ) ของฉนวนเหลวจะมีค่าต่ำกว่าความคงทนต่อแรงดันอินพัลส์

2.5.9 อนุภาคเจือปนของแข็ง

อนุภาคของแข็งอาจเจือปนในน้ำมันหม้อแปลงในรูปของไฟเบอร์ (Fiber) หรือฝุ่นละอองซึ่งเกิดมาจากกระบวนการผลิตในทางอุตสาหกรรมหรือจากภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เช่น ไฟเบอร์ที่เป็นเยื่อของกระดาษฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้า เศษทองแดงหรือเศษเหล็กซิลิคอนที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจากกระบวนการผลิต อนุภาคคาร์บอนที่เกิดจากการทำงานตัวเองเปลี่ยนระดับแรงดัน (หรือการดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้าหรือการดับอาร์คในเซอร์กิตเบรกเกอร์ เป็นต้น) ซึ่งอนุภาคเจือปนของแข็งในน้ำมันหม้อแปลงนี้ไปสู่กลไกการเกิดเบรกดาวนได้

ตารางที่ 2.6 ความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของวัสดุฉนวน ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ [9]

ผลกระทบของ/ ฉนวน	ก๊าซ	ของแข็ง	ของเหลว
รูปคลื่นแรงดัน	ค่ายอด	ค่า rms.	ค่ายอด หรือrms.
เวลา t ที่ป้อน แรงดัน			
ระยะช่องห่าง d			
ความดันอัด p			
อุณหภูมิ T			
ความชื้น h			

2.6 การเบรกดาวนในฉนวนเหลว

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความคงทนแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวได้แก่ ชนิด รูปร่างอิเล็กทรอนิกส์ ระยะแกป อัตราการไหลของฉนวนเหลว ความดัน อุณหภูมิ และอีกทั้งสิ่งเจือปนต่างๆ ที่อยู่ในฉนวนเหลวเช่น ฟองก๊าซ อนุภาคเจือปนของแข็ง และความชื้น เป็นต้น สิ่งเจือปนต่างๆ ที่อยู่ในฉนวนเหลวทำให้ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวลดลง ในกรณีของความชื้นหรือหยดน้ำที่อยู่ในฉนวนน้ำมันนั้น ความชื้นที่เจือปนอยู่ในฉนวนเหลวจะทำให้ฉนวนเหลวมีอุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากการสูญเสียไดอิเล็กตริกที่เพิ่มขึ้น ทำให้ฉนวนเหลวเกิดการเสื่อมสภาพ ถ้าเป็นหยดน้ำที่อยู่ในน้ำมันหม้อแปลง หยดน้ำจะยึดออกตามแนวสนามไฟฟ้าทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น เมื่อถึงค่าวิกฤติจะเกิดการเบรกดาวน โดยแนวการเบรกดาวนจะเริ่มที่ปลายของหยดน้ำไปสู่อิเล็กโตรด นอกจากนี้ยังมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าแยกน้ำออกเป็นก๊าซไฮโดรเจนกับก๊าซออกซิเจนที่อยู่ในรูปของฟองก๊าซทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนและอาจทำให้เกิดเบรกดาวนตามมา

การอธิบายกลไกการเบรกดาว์นของฉนวนเหลว อาจแบ่งฉนวนเหลวออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ฉนวนเหลวบริสุทธิ์ และฉนวนเหลวเชิงการค้า โดยทั่วไปฉนวนเหลวเชิงการค้าที่นำมาใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงไม่สามารถที่จะทำให้ความบริสุทธิ์สูงได้เหมือนฉนวนเหลวบริสุทธิ์ กลไกการเบรกดาว์นจึงขึ้นอยู่กับสิ่งเจือปนที่ปะปนอยู่ในฉนวนเหลวเช่น ความชื้น เศษโลหะ ปริมาณก๊าซ และไฟเบอร์ เป็นต้น [1]

2.6.1 การเกิดเบรกดาว์นของฉนวนเหลวบริสุทธิ์

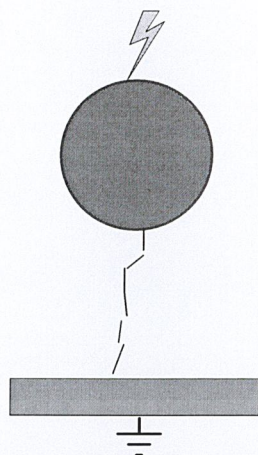
กลไกการเกิดเบรกดาว์นของฉนวนเหลวบริสุทธิ์มีหลักการแบบเดียวกับกรณีของฉนวนก๊าซที่เกิดจากอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ โดยเกิดจากการชนกันของอิเล็กตรอนกับอนุภาคในสนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนเริ่มต้นที่ออกจากแคโทดเนื่องจากผลของสนามไฟฟ้า (field emission) หรือเป็นผลมาจากความร้อน (thermionic emission) มีรายงานผลการศึกษาการนำไฟฟ้าในฉนวนเหลว ระบุว่าเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าสูง พบว่าการไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดเกิดจากการปล่อยอิเล็กตรอนจากแคโทดโดยสนามไฟฟ้ามากกว่าที่จะเป็นการปล่อยอิเล็กตรอนจากแคโทดด้วยความร้อน การเบรกดาว์นน่าจะเกิดจากการที่ไอออนบวกของอนุภาคเจือปนเคลื่อนที่มาสู่แคโทด ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณใกล้ผิวแคโทดสูงขึ้นเพียงพอที่อิเล็กตรอนสามารถหลุดออกจากผิวแคโทดได้อิเล็กตรอนอิสระที่หลุดออกมาเหล่านี้ จะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรด ทำให้เกิดการเคลื่อนที่โดยมีทิศทางไปสู่ขั้วแอโนด ระหว่างทางจะชนกับโมเลกุลของฉนวนเหลวทำให้พลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้าสูญเสียไปกับการชน ในกระบวนการนี้จะมีอิเล็กตรอนบางตัวที่สูญเสียพลังงานไปกับการชนต่ำกว่าพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้า ถ้าอิเล็กตรอนเหล่านี้ถูกเร่งจนมีพลังงานสูงพอที่จะชนกับโมเลกุลแล้ว ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนและก่ออะวาลานซ์ การเกิดเบรกดาว์นของฉนวนเหลวก็จะเกิด

2.6.2 กลไกการเกิดเบรกดาว์นของฉนวนเหลวเชิงการค้า

การเกิดเบรกดาว์นของฉนวนเหลวเชิงการค้าอาจเกิดได้จากสาเหตุต่อไปนี้

1. เกิดเบรกดาว์นเนื่องจากอนุภาคเจือปนของแข็ง

สิ่งเจือปนของแข็งที่ปะปนอยู่ในฉนวนเหลวอาจเป็นอนุภาคตัวนำ ไฟเบอร์หรือฝุ่นละออง เมื่อมีสนามไฟฟ้าอนุภาคเจือปนเหล่านี้จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วภายใต้สนามไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงกระทำต่ออนุภาคโดยผลของแรงที่เกิดขึ้นจะทำให้อนุภาคเจือปนของแข็งเรียงตัวกันเป็นลูกโซ่เชื่อมโยงระหว่างอิเล็กโตรดทำให้เกิดเบรกดาว์นในที่สุดดังแสดงในรูปที่ 2.23



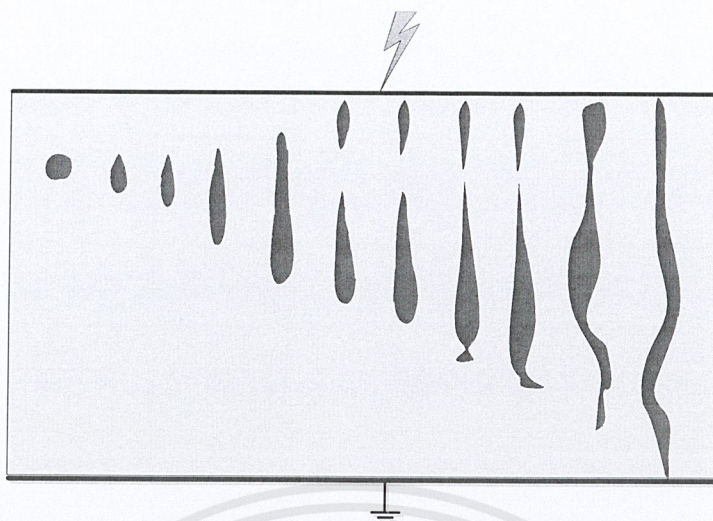
รูปที่ 2.23 การเรียงตัวของอนุภาคไฟเบอร์ระหว่างช่องว่างภายใต้แรงดันสูง

2. กลไกการเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากฟองก๊าซ

ก๊าซสามารถละลายในฉนวนเหลวได้ในปริมาณน้อยหรือมาก ขึ้นอยู่กับสถานะความดัน และอุณหภูมิของฟองก๊าซในฉนวนเหลว ฟองก๊าซอาจเกิดจากฉนวนที่มีคุณภาพต่ำหรือเสื่อมคุณภาพ หรือในขณะที่เติมฉนวนเหลวในภาชนะบรรจุ ก๊าซอาจจะจับอยู่ที่ผิวอิเล็กโทรดที่ขรุขระหรือร่องผิวอิเล็กโทรด หรืออาจจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีภายในฉนวนเหลว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความดัน การชนของไอออน และอิเล็กตรอน ทำให้ฉนวนเหลวสลายตัวเป็นก๊าซออกมา หรืออาจจะเกิดจากการผลของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนบริเวณผิวผิวอิเล็กโทรดที่มีความเครียดสูง ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นเมื่อได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าก็จะขยายตัวยึดตามแนวสนามไฟฟ้าเพื่อลดพลังงานศักย์ในสนามไฟฟ้า การเบรกดาวน์จะเกิดเมื่อแรงดันตกคร่อมความยาวของฟองก๊าซมีค่าเท่ากับความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของก๊าซก็จะเกิดดิสชาร์จผ่านฟองก๊าซ เป็นผลให้เกิดการแยกตัวของโมเลกุลฉนวนเหลว นำไปสู่การเบรกดาวน์ได้

3. กลไกการเกิดเบรกดาวน์จากหยดของเหลวเจือปน

ฉนวนเหลวที่มีหยดของเหลวต่างชนิดเจือปนอยู่ สามารถทำให้เกิดเบรกดาวน์ได้ เนื่องจากการเปลี่ยนรูปร่างของหยดของเหลวเจือปน โดยมีการยืดออกตามแนวสนามไฟฟ้า ความยาวของการยืดออกแปรผันตรงกับค่าเปอร์มิตทิวิตี้ของฉนวนเหลว เมื่อของเหลวเกิดการยืดตัว ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนเหลวที่ปลายทั้งสองของหยดของเหลวมีค่าสูงขึ้น ถ้ามีค่าสูงเกินค่าวิกฤตจะทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วน เกิดโพรงก๊าซและนำมาสู่การเบรกดาวน์



รูปที่ 2.24 การยืดออกของหยดน้ำที่อยู่ในฉนวนเคลือบซิลิโคนภายใต้สนามไฟฟ้าจนเป็นสาเหตุให้เกิดการเบรกดาวน หยดน้ำเกิดการระเหยโดยการดีสชาร์จ

4. กลไกการเกิดเบรกดาวนจากความร้อน

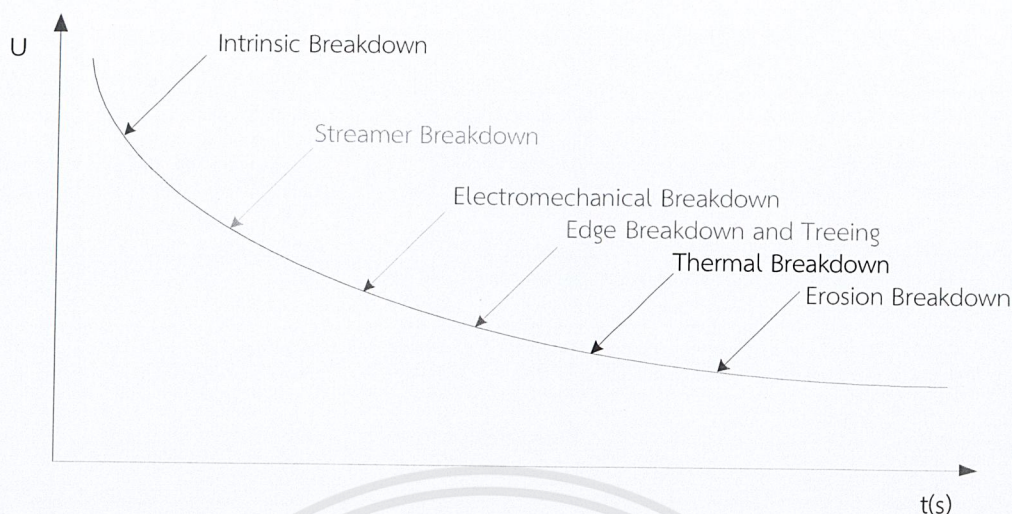
การเบรกดาวนเนื่องจากความร้อน เกิดขึ้นในกรณีที่มีการป้อนแรงดันชนิดพัลส์ จากการทดลองวัดพัลส์กระแสในฉนวนเหลวพบว่ากระแสมีค่าสูงก่อนเกิดเบรกดาวน โดยมีค่าความหนาแน่นกระแสประมาณ 1 A/cm^2 ซึ่งเชื่อว่ามีแหล่งกำเนิดจากปลายของผิวอิเล็กโตรดขั้วลบหรือแคโทด ทำให้ฉนวนเหลวบริเวณนั้นมีอุณหภูมิสูงและกลายเป็นไอหรือฟองก๊าซ เมื่อฟองก๊าซมีการยืดตัวจนกระทั่งมีความยาวเกินความยาววิกฤตหรือเกิดโพรงตลอดแนวระยะแยกของอิเล็กโตรดจะเกิดเบรกดาวนตามมา

2.7 การเกิดเบรกดาวนในฉนวนของแข็ง [1]

ฉนวนแข็งที่มีใช้งานอยู่นั้นเมื่อเบรกดาวนแล้วจะเสียสภาพฉนวนอย่างถาวร ใช้งานอีกไม่ได้ การเกิดเบรกดาวนในฉนวนแข็งจะต่างไปจากการเกิดเบรกดาวนในฉนวนก๊าซ และฉนวนเหลวซึ่งสามารถกลับคืนสู่สภาพฉนวนได้อีก คุณสมบัติของฉนวนแข็งขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอกหลายอย่าง เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ระยะเวลาในการทดสอบ ชนิดของแรงดันที่ป้อนเข้า การเกิดถ่ายประจุภายในโพรงที่เกิดขึ้นภายในฉนวนแข็ง และปัจจัยอื่นๆ อีกหลายประการ กลไกการเกิดเบรกดาวนของฉนวนแข็งค่อนข้างซับซ้อน ขึ้นอยู่กับเงื่อนไข และกระบวนการป้อนแรงดันที่สำคัญคือ ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาคงอยู่ของแรงดัน หรือสนามไฟฟ้าที่ป้อน การเกิดเบรกดาวนในฉนวนแข็งอาจแบ่งออกตามช่วงเวลาของแรงดันที่ป้อนและปรากฏการณ์การเกิดเบรกดาวนได้ คือ

1. Intrinsic Breakdown
2. Streamer Breakdown
3. Electromechanical Breakdown
4. Edge Breakdown and Treeing
5. Thermal Breakdown
6. Erosion Breakdown

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์เมื่อป้อนแรงดันให้กับฉนวนของแข็งที่ระยะเวลาต่างกัน

2.7.1 การเบรกดาวน์แบบแท้จริง (Intrinsic Breakdown)

ในกรณีของฉนวนแข็งที่มีคุณสมบัติบริสุทธิ์และเป็นเนื้อเดียวกัน อุณหภูมิ และสภาวะแวดล้อมภายนอกถูกควบคุม เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าให้กับวัตถุทดสอบนี้จะไม่เกิดการดิสชาร์จภายนอก ดังนั้นเมื่อป้อนสนามไฟฟ้าภายใต้ระยะเวลาสั้นๆ ความเครียดจากสนามไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจนถึงขอบเขตบนสุด ซึ่งเรียกว่า Intrinsic Strength ซึ่งการเกิด Intrinsic Strength จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและอุณหภูมิเท่านั้น ทฤษฎีที่ใช้ในการเกิด Intrinsic Strength นั้นยังไม่มีคำอธิบายที่สมบูรณ์ แต่ได้มีการทดลองมากมายเพื่อบันทึกค่าเอาไว้สำหรับวัสดุหลายชนิด

การเกิด Intrinsic Breakdown จะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ภายในเวลา 10^{-8} วินาที ส่วนความเครียดสนามไฟฟ้าที่สามารถทำให้เกิด Intrinsic Breakdown ได้ดีนั้นควรมากกว่า 10^6 MV/cm ได้มีข้อสันนิษฐานว่าการเกิด Intrinsic Strength จะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนภายในฉนวนได้รับพลังงานเพียงพอที่จะข้ามช่องแกปจาก Valence Band สู่ Conduction Band ได้

2.7.2 การเบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์ (Streamer Breakdown)

การเกิดเบรกดาวน์แบบนี้จะเหมือนกับการเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซ ซึ่งอธิบายได้จากการเกิดไอออนไนเซชัน การเบรกดาวน์จะเกิดขึ้นเมื่อมีอิเล็กตรอนจำนวนมากพอเรียงตัวทอดต่อเชื่อมระหว่างแคโทดกับแอโนด

อิเล็กตรอนที่อยู่ในฉนวนของแข็งจะเคลื่อนที่โดยเริ่มจากขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นแคโทดไปยังแอโนด และในระหว่างทางที่เคลื่อนที่ไปนั้น อิเล็กตรอนจะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า ในขณะที่เคลื่อนที่ไป เมื่ออิเล็กตรอนตัวนี้ได้ชนอะตอมอาจทำให้อิเล็กตรอนตัวใหม่หลุดจากวงโคจรของอะตอมตัวที่โดนชนได้ ถ้าพลังงานจากการชนมากกว่าค่าศักย์ไอออนไนซ์ภายในผลึกของแข็งของอะตอมที่ถูกชน กระบวนการนี้จะเกิดซ้ำๆ เป็นทวีคูณ (การเกิดอะวาลานซ์) ในระหว่างที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้น จนเกิดเบรกดาวน์ขึ้นเมื่อมีปริมาณอิเล็กตรอนในอะวาลานซ์มีจำนวนถึงค่าวิกฤต

ในทางปฏิบัติจริง การเกิดอะวอลานซ์จะไม่ได้เกิดเพียงครั้งเดียว แต่จะเกิดขึ้นหลายครั้งกว่าจะเบรกดาว์นขึ้น การทดลองที่กระทำโดยจ่ายแรงดันอิมพัลส์ให้กับฉนวนแข็งที่มีความหนาพอสมควร โดยใช้อิเล็กโทรดปลายแหลม-ระนาบ (Point-Plane Electrode) และจะจ่ายแรงดันทีละครั้งพบว่าเส้นทางในการเบรกดาว์นของฉนวนจะค่อยๆ แดงกิ่งก้านไปในลักษณะของรากไม้

2.7.3 การเบรกดาว์นจากแรงทางกลที่เกิดจากไฟฟ้า (Electromechanical Breakdown)

เมื่อจ่ายสนามไฟฟ้าในระดับสูงๆ ให้แก่ฉนวนของแข็ง จะทำให้เกิดแรงกดกระทำต่อฉนวนนั้น แรงกดที่เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างผิวประจุ (surface charge) ซึ่งเมื่อแรงนี้มีค่ามากจนเกินค่าความคงทนทางกลของฉนวนจะทำให้เกิดการแตกร้าวได้

2.7.4 การเกิดเบรกดาว์นจากรอยที่ผิว และการร้าวในฉนวน (Edge Breakdown or tracking and treeing)

การเกิด tracking จะเป็นการฟอร์มตัวทางเดินตัวนำถาวรบนผิวฉนวน โดยมักเกิดจากความชื้น หรือน้ำค้าง รวมตัวกับสิ่งเปราะเปื้อน เช่น ไอเกลือ ฝุ่นละออง สารเคมี กลายเป็นฟิล์มตัวนำบนผิวฉนวน ทำให้กระแสสามารถไหลผ่านได้ซึ่งเรียกระแสดังกล่าวว่า กระแสรั่วไหล กระแสรั่วไหลทำให้เกิดความร้อนขึ้น ฉนวนจะแห้งลง ความร้อนที่เกิดขึ้นแต่ละจุดบนผิวฉนวนมีค่าไม่เท่ากันเกิดการแห้งเฉพาะบางส่วน และจะมีแรงดันตกคร่อมบริเวณดังกล่าว ซึ่งอาจก่อให้เกิดการสปาร์คได้ การเกิด tracking จะหมายถึงการเกิดเป็นทางของคาร์บอนบนผิวฉนวนซึ่งเกิดได้เฉพาะฉนวนแบบอินทรีย์เท่านั้น

ส่วนการเกิด treeing นั้นมักเกิดขึ้นในสายเคเบิล ที่ใช้ฉนวนแข็งเป็นหลัก เช่น PE, XLPE หรือ EPR ลักษณะการเกิดจะเป็นรอยแตกแขนงคล้ายกิ่งไม้แตกกิ่งก้านสาขาออกไป มีผลทำให้เกิดการเบรกดาว์นของฉนวนต่อมา treeing อาจแบ่งเป็น 2 แบบคือ electrical treeing และ water treeing การเกิด electrical treeing นั้นจะเกิดขึ้นในบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าค่อนข้างสูง ซึ่งสามารถหาค่า partial discharge ได้ ในกรณีของ water treeing จะเกิดขึ้นเมื่อเนื้อฉนวนแข็งมีน้ำผสมอยู่ด้วย ซึ่งอาจมาจากการบวนการผลิต เมื่อจุดดังกล่าวได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าตัว water treeing ก็จะทำตัวขึ้นมาโดยจะเริ่มจากบริเวณที่มีความบกพร่องของเนื้อฉนวนก่อน แนวของ treeing จะอยู่ในแนวเดียวกับสนามไฟฟ้า

2.7.5 การเกิดเบรกดาว์นจากผลทางความร้อน (Thermal Breakdown)

เมื่อป้อนศักดาไฟฟ้าให้กับฉนวนของแข็งทำให้เกิดการนำกระแส (Conduction current) ขึ้น ค่าของกระแสจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ กระแสจะเพิ่มเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความร้อนที่เกิดเนื่องจากกระแสการนำบางส่วนจะถ่ายเทออกสู่บรรยากาศ ส่วนที่เหลือก็จะทำให้อุณหภูมิของฉนวนแข็งเพิ่มขึ้นอีก ถ้าอัตราการความร้อนที่เกิดขึ้นมากกว่าความร้อนที่ถูกถ่ายเทออกไปทำให้ฉนวนแข็งมีอุณหภูมิสะสมเพิ่มขึ้นจนเกิดเบรกดาว์นได้

2.7.6 การเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากการดิสชาร์จภายใน (Cavity Breakdown)

วัสดุฉนวนที่ใช้งานอยู่โดยทั่วไปจะมีโพรงหรือช่องว่างอยู่ภายในเนื้อฉนวนหรือตรงบริเวณรอยต่อระหว่างฉนวนกับอิเล็กโทรด โดยส่วนมากโพรงนี้จะมีก๊าซหรือของเหลวบรรจุอยู่ ซึ่งมีความคงทนต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์ได้น้อยกว่าของแข็ง นอกจากนี้ค่าความจุไฟฟ้าของสิ่งแปลกปลอมที่อยู่ภายในฉนวนแข็งส่วนมากแล้วจะมีค่าน้อยกว่าฉนวนแข็ง จึงเป็นผลให้ความเครียดสนามไฟฟ้าภายในโพรงมีค่าสูงกว่าเนื้อฉนวน ดังนั้นภายใต้การใช้งานที่ความเครียดสนามไฟฟ้าปกติของฉนวน แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโพรงนี้จะมีค่ามากกว่าแรงดันเบรกดาวน์ และจะเป็นตัวที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์ภายในโพรงก่อนที่จะนำมาสู่การเบรกดาวน์ของเนื้อฉนวนอีกต่อไป

2.8 ทฤษฎีการสร้างและการวัดแรงดันอิมพัลส์ [7]

แรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันที่มีรูปคลื่นเลียนแบบมาจากแรงดันเกินเสิร์จทรานเซียนต์ที่เกิดจากเหตุภายนอก ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ฟ้าผ่า เรียกว่า แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า และที่เกิดขึ้นจากสาเหตุภายในในระบบส่งจ่ายเอง คือเกิดจากการทำงานของสวิตช์ หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ เมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้นในระบบ เรียกว่าแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง

2.8.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน

แรงดันอิมพัลส์อาจกำหนดด้วยข้อกำหนดต่อไปนี้

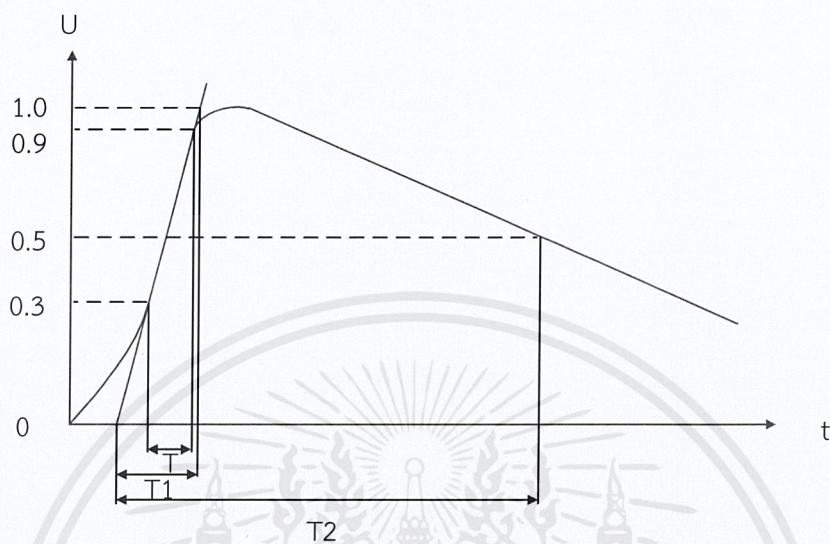
1. ขนาดของแรงดัน โดยปกติจะหมายถึงค่ายอดของรูปคลื่นแรงดัน ในกรณีที่มีระลอกซ้อนที่เกิดจากออสซิลเลชันไกล์ๆ ยอดรูปคลื่น ให้ถือเอาค่าเฉลี่ยจากค่ายอดรูปคลื่นระลอก
2. ขั้วของแรงดันอาจเป็นขั้วบวกหรือลบก็ได้ เมื่อเทียบกับดิน
3. เวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 หมายถึงช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากค่าศูนย์จนถึงค่ายอด
4. เวลาช่วงหางคลื่น T_2 หมายถึงช่วงเวลาตั้งแต่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านค่ายอดจนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด

รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์อาจแบ่งเป็น

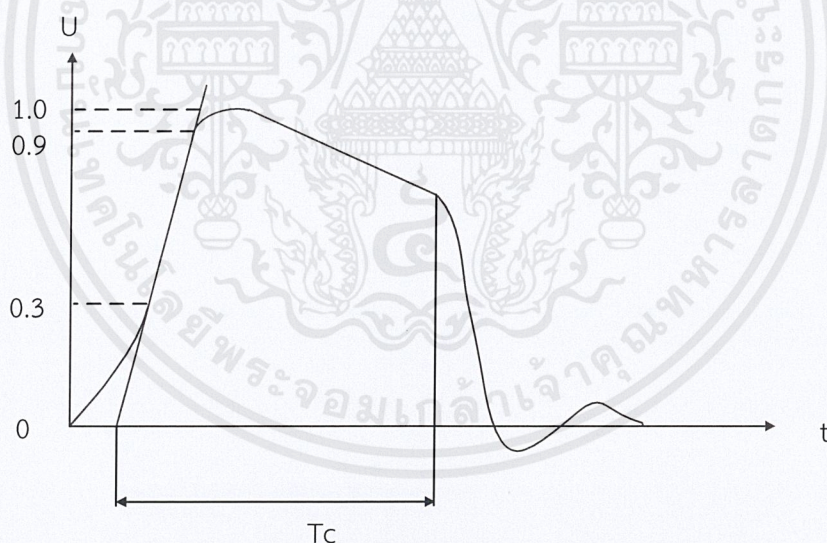
1. รูปคลื่นเต็ม (full wave) ซึ่งหมายถึงรูปคลื่นที่มีขนาดเพิ่มขึ้นถึงค่ายอด แล้วค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเป็นศูนย์
2. รูปคลื่นตัด (chopped wave) ซึ่งเกิดจากการป้อนแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มเข้าไปที่วัสดุทดสอบ และการฉนวนของวัสดุทดสอบนั้นทนต่อแรงดันที่ป้อนเข้าไปไม่ได้ จึงเกิดการสปาร์กผ่านเกิดวาบไฟตามผิว หรือเกิดเบรกดาวน์เจาะทะลุ ทำให้เกิดการลัดวงจร ณ จุดนั้น การเกิดคลื่นตัดนี้อาจจะเกิดขึ้นที่ส่วนหางคลื่น หรือส่วนหน้าคลื่นก็ได้

ในรูปที่ 2.26 แสดงถึงแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม รูปที่ 2.27 แสดงถึงแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตัดหางคลื่น และรูปที่ 2.28 แสดงถึงแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตัดหน้าคลื่นตามลำดับ

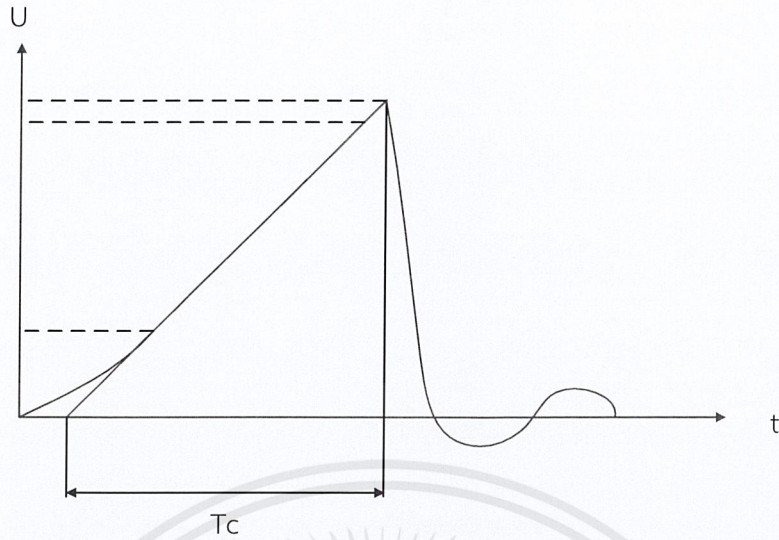
รูปคลื่นตัดมีส่วนกำหนดที่สำคัญ คือ เวลาช่วงคลื่นตัด (chopped time) T_c ถ้าเกิดตัดที่ทางคลื่น ขนาดของแรงดันคือ ค่ายอด (peak) ถ้าเกิดตัดที่หน้าคลื่นขนาดแรงดันก็คือ ค่าที่ได้ ณ จุดตัด ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของรูปคลื่นที่เหลือ



รูปที่ 2.26 รูปแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม



รูปที่ 2.27 รูปแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตัดทางคลื่น

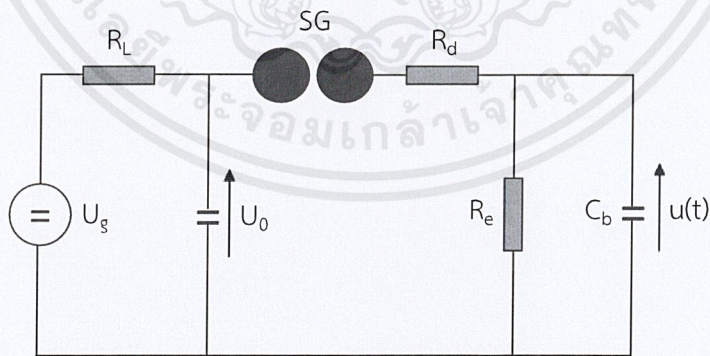


รูปที่ 2.28 แสดงถึงแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตัดหน้าคลื่น

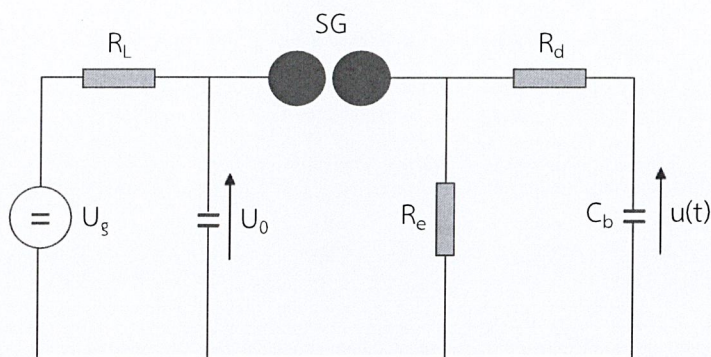
ถ้าต้องการทราบว่าแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นมานั้นเป็นไปตามมาตรฐานกำหนดหรือไม่ ให้หาค่า T_1 , T_2 หรือ T_c โดยวิธีที่แสดงไว้ในรูป 2.26 ว่าอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดต่อไปนี้หรือไม่ คือ เวลาช่วงหน้าคลื่น $T_1 = 1.2 \mu\text{s} \pm 30\%$ คือ จะต้องอยู่ในช่วง $0.84 - 1.56 \mu\text{s}$ เวลาช่วงหลังคลื่น $T_2 = 50 \mu\text{s} \pm 20\%$ คือ จะต้องอยู่ในช่วง $40 - 60 \mu\text{s}$ ค่ายอดแรงดัน U_m ยอมให้ผิดพลาดได้ $\pm 3\%$ ของค่าที่ระบุรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

2.8.2 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

วงจรพื้นฐานที่ใช้สร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ามี 2 แบบ ดังในรูปที่ 2.29 และ รูปที่ 2.30



รูปที่ 2.29 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ วงจร A



รูปที่ 2.30 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ วงจร B

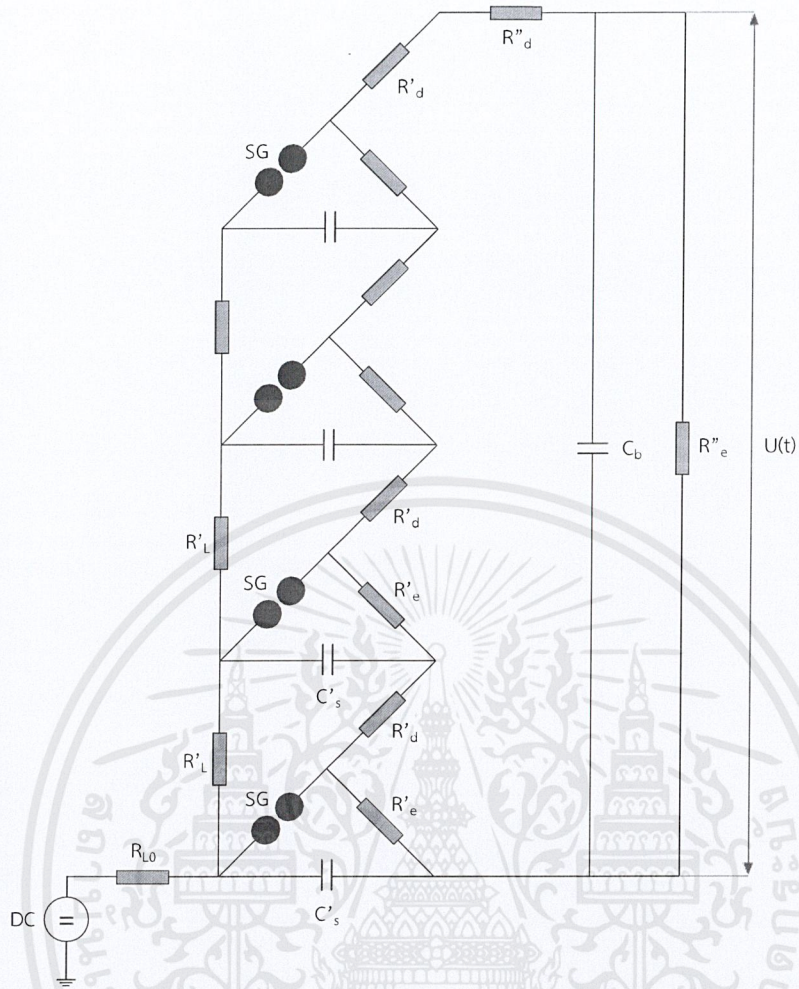
ความหมายในรูปวงจร 2.29 และ 2.30

- 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

2.8.3 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายชั้น

จากวงจรพื้นฐานของการสร้างแรงดันอิมพัลส์ ปกติจะออกแบบให้สร้างแรงดันได้ถึง 200 kV ซึ่งไม่เพียงพอสำหรับการทดสอบ BIL ของอุปกรณ์ที่ใช้กับแรงดันระบบ 52 kV หรือสูงกว่า ค่าแรงดันอิมพัลส์สูงๆ อาจสร้างได้ด้วยเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบหลายชั้น โดยใช้วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ ตามหลักการของมาร์กซ์ (Marx's circuit) ดังในรูปที่ 2.31

ความหมายของสัญลักษณ์ในวงจร จะเหมือนกับวงจรชั้นพื้นฐาน (เครื่องหมาย ‘ แสดงถึงเป็นค่าต่อชั้น และเครื่องหมาย ” แสดงถึงองค์ประกอบภายนอกที่เพิ่มขึ้นเพื่อปรับรูปคลื่น)



รูปที่ 2.31 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบหลายชั้นตามวงจรมาร์กซ์

ค่าในองค์ประกอบในวงจร

C'_s : ค่าเก็บประจุอิมพัลส์ต่อชั้น

C_b : ค่าเก็บประจุโพลด

R'_d : ความต้านทานปรับหน้าคลื่นต่อชั้น

R''_d : ความต้านทานปรับหน้าคลื่นต่อชั้น

R'_e : ความต้านทานปรับหน้าคลื่นต่อชั้น

R''_e : ความต้านทานปรับหน้าคลื่นต่อชั้น

เมื่อเกิดสปาร์กวงจรจะต่อกันแบบอนุกรมจะได้ค่ารวมเป็น

$$C_s = C'_s / n$$

$$R_d = nR'_d$$

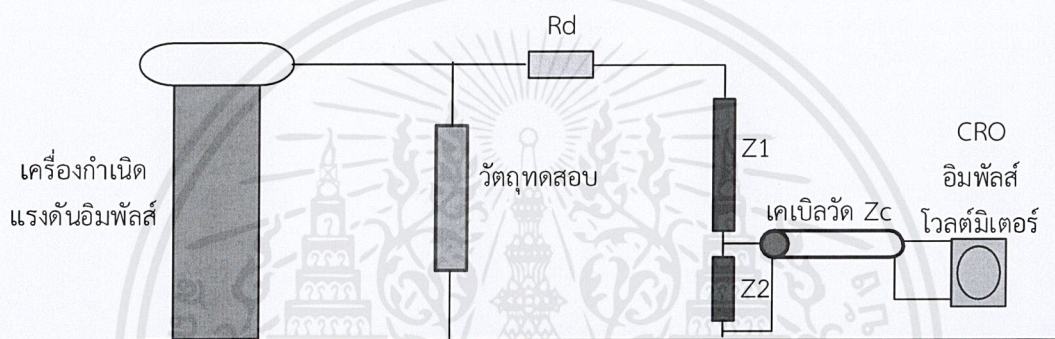
$$R_e = nR'_e$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.4 การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลเตจดีไวเดอร์

การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยแกปทรงกลมนั้น ทราบแต่ค่ายอดเท่านั้น แต่ไม่ทราบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันตามเวลา คือรูปคลื่นแรงดัน ซึ่งจำเป็นต้องทำการวัด และมีทางทำได้ โดยใช้ออสซิลโลสโคป (CRO) หรือเครื่องบันทึกแรงดันอิมพัลส์ ประกอบเข้ากับโวลเตจดีไวเดอร์ ถ้าแรงดันที่วัดค่ายังสูงไม่มากนัก คือ ต่ำกว่า 100 kV เทคนิคการวัดก็ไม่ยุ่งยากอะไร เมื่อแรงดันเพิ่มสูงมากขึ้น เทคนิคและปัญหาการวัดก็มีมากขึ้นตามขนาดแรงดันที่วัด ยิ่งในปัจจุบันนี้มีการสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าสูงหลายล้านโวลต์ เมื่อสร้างขึ้นมาก็ต้องการวิธีวัดให้ได้

การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยระบบโวลเตจดีไวเดอร์ โดยทั่วไปจะประกอบด้วย 4 ส่วนด้วยกัน คือ สายตัวนำแรงสูง ตัวดีไวเดอร์ Z_1 , Z_2 สูงประมาณ 2.5 m/MV เคเบิลวัดแบบแกนร่วม Z_c และออสซิลโลสโคป CRO ดังในรูปที่ 2.32 [15]



รูปที่ 2.32 วงจรวัดแรงดันอิมพัลส์

จากวงจรรูปที่ 2.32 องค์ประกอบในระบบวัดแรงดันจะมีหน้าที่ต่างๆ ดังนี้

1. ตัวความต้านทานหน่วง R_d ทำหน้าที่หน่วงการแกว่งในภาวทรานเซียนต์ ที่เกิดจากค่าความเหนี่ยวนำของสายตัวนำกับค่าเก็บประจุของโวลเตจดีไวเดอร์ ตัวความต้านทานหน่วงที่ใช้เป็นแบบไร้ความเหนี่ยวนำ โดยอาจต่อที่ต้นสายตัวนำ หรือที่อเล็กโตรดแรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์ ในกรณีที่สายตัวนำมีความยาวมาก การต่อตัวความต้านทานหน่วงที่ต้นสายตัวนำ โดยให้มีค่าประมาณเท่าค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายตัวนำ จะช่วยหน่วงการแกว่งที่เกิดจากค่าอิมพีแดนซ์ที่ไม่เท่ากันของสายตัวนำกับวงจรกำเนิดแรงดัน และโวลเตจดีไวเดอร์ [15]

2. สายตัวนำระหว่างวัสดุทดสอบกับโวลเตจดีไวเดอร์ โดยทั่วไปโวลเตจดีไวเดอร์จะต้องอยู่ห่างจากอุปกรณ์ทดสอบ ความยาวของสายตัวนำจะต้องมีความยาวอย่างน้อยเท่ากับค่าความสูงของโวลเตจดีไวเดอร์ เพื่อลดผลกระทบจากสนามไฟฟ้าที่มีต่อโวลเตจดีไวเดอร์ ขนาดของสายตัวนำควรจะต้องมีขนาดโตพอที่จะไม่ทำให้เกิดโคโรนา ซึ่งเป็นคลื่นรบกวนต่อระบบวัดแรงดันได้ ในวงจรทดสอบทั่วไปสายตัวนำมักอยู่ในแนวระดับ เวลาคลื่นเดินทาง τ_L จะมีค่าขึ้นอยู่กับความเร็วแสง c จากสูตร $Z_L = \sqrt{L_L/C_L}$ และ $\tau_L = \sqrt{L_L C_L} = l/c$ โดย L_L คือค่าความเหนี่ยวนำ C_L คือค่าเก็บประจุ และ l คือความยาวของสายตัวนำ ตามลำดับ ดังนั้น จะได้ $Z_L = \dots/(c C_L)$ ค่าเก็บประจุของสายตัวนำสามารถคำนวณได้ โดยสมมติว่า สายตัวนำเป็นทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง d วางอยู่สูง H เหนือระนาบดิน สมการหาค่าเก็บประจุของสายตัวนำคือ

$$C_L = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{B} \quad (2.31)$$

โดยที่

$$B = \ln\left(\frac{4H}{d}\right) - \ln\frac{1}{2}(1 + \sqrt{1 + 2(H/L)^2}) \quad (2.32)$$

เนื่องจาก $c = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ เมื่อ μ_0 คือค่าเพอร์มิบิลิตี และ ϵ_0 คือค่าเพอร์มิตติวิตีอวกาศ ตามลำดับ ดังนั้น จะได้ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายตัวนำเป็น

$$(Z_L)_{hor} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} B \approx 60 B (l,d,H) \Omega \quad (2.33)$$

3. โวลเตจดีไวเดอร์ VD ทำหน้าที่ลดทอนแรงดันสูงลงมา ให้มีขนาดอยู่ในย่านที่อุปกรณ์วัดในภาคแรงต่ำสามารถวัดได้

4. เคเบิลวัด Z_c ทำหน้าที่ส่งสัญญาณจากภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์มายังอุปกรณ์วัด เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน และลดการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยทั่วไปเป็นแบบแกนร่วม (coaxial cable) ที่มีการลดทอนสัญญาณต่ำ

5. อุปกรณ์วัดและบันทึกรูปคลื่น อาจเป็นโวลเตจดีไวเดอร์วัดค่ายอดหรือออสซิลโลสโคป CRO หรือเครื่องบันทึกอิมพัลส์ อุปกรณ์เหล่านี้จะอยู่ในห้องที่มีชิลด์ เพื่อลดสัญญาณรบกวนจากภายนอก

6. ระบบสายดิน ทำหน้าที่เชื่อมจุดต่อลงดินของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบทดสอบให้มีความต้านทานไฟฟ้าเท่ากัน ปกติสายดินจะเป็นชนิดที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เพื่อให้ได้แรงดันตกในสายดินมีค่าน้อยที่สุด โดยทั่วไปจะใช้แผ่นโลหะบาง เช่น ทองแดงแผ่นบาง

บทที่ 3

การออกแบบการทดสอบและการประกอบสร้างชุดทดสอบ

โดยปกติหม้อแปลงไฟฟ้าส่วนใหญ่มีการใช้ฉนวนเหลวเป็นสารไดอิเล็กทริกภายในตัวหม้อแปลง ซึ่งจะทำหน้าที่แทรกซึมเข้าไปในรูพรุนของเนื้อฉนวนกระดาษเพื่อป้องกันการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในโพรงอากาศ และทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการนำพาความร้อนจากขดลวดออกมาสู่ตัวถังเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศภายนอกที่ผิวสัมผัสของตัวถังหม้อแปลง ทำให้หม้อแปลงไฟฟ้ามีอัตราการเสื่อมสภาพน้อยลงและปลอดภัยมากยิ่งขึ้น ในการทดสอบนี้ประกอบด้วย

1. การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพรสเซอร์ที่อิมเพกเน็ทด้วยฉนวนเหลว
2. การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว
3. การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนเหลว
4. การทดสอบวัดค่าเปอร์เซ็นต์วิดีตีส์สัมพัทธ์ของฉนวนเหลว (ϵ) และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กทริก $\tan\delta$ ของฉนวนเหลว ซึ่งฉนวนเหลวสำหรับการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ชนิดของฉนวนเหลวสำหรับการทดสอบ

ฉนวนเหลว ชนิดที่	ชนิดของฉนวนเหลว	เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร (V/V)
1	0 % Natural Ester in Mineral Oil	0 %
2	25 % Natural Ester in Mineral Oil (Mixture 25%)	25 %
3	50 % Natural Ester in Mineral Oil (Mixture 50%)	50 %
4	75 % Natural Ester in Mineral Oil (Mixture 75%)	75 %
5	100 % Natural Ester in Mineral Oil	100 %
6	100 % Palm Oil	100 %

ก่อนที่จะทำการทดลอง จะต้องทำการออกแบบและประกอบสร้างชุดทดสอบ (Test Vessel) เพื่อนำมาใช้ทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพรสเซอร์ โดยการออกแบบได้ทำการออกแบบตามมาตรฐาน IEC 60243-1 [14] และการออกแบบและประกอบสร้างชุดทดสอบ (Test Vessel) เพื่อนำมาใช้ทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์สำหรับฉนวนเหลว โดยการออกแบบได้ทำการออกแบบตามมาตรฐาน IEC 60897 [15] โดยใช้โปรแกรม Solid Work ในการจำลองรูปแบบ 3 มิติ ขึ้นมา เพื่อนำไปประกอบสร้างชุดทดสอบ (Test Vessel) จริง

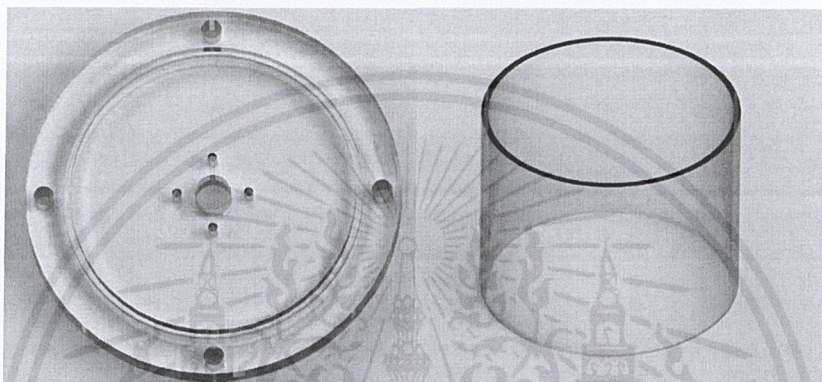
3.1 การออกแบบและการประกอบสร้างชุดทดสอบ (Test Vessel)

3.1.1 ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแทกสลับของเพรสบอร์ด

1. ออกแบบ 3 มิติด้วยโปรแกรม Solid Works

- ที่บรรจุน้ำมันและใส่เพรสบอร์ด

ทำจากวัสดุอะคริลิกใส มีลักษณะเป็นทรงกระบอกกึ่งกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 20 cm หนา 5 mm ด้านบนและล่างของกระบอกประกอบด้วยแผ่นอะคริลิกวงกลมขนาดเจาะรูสำหรับยึดตัวตัวฉนวนของอิเล็กทรอนิกส์ และทำร่องสำหรับใส่ยางกันซึมในส่วนขั้วรอยต่อ



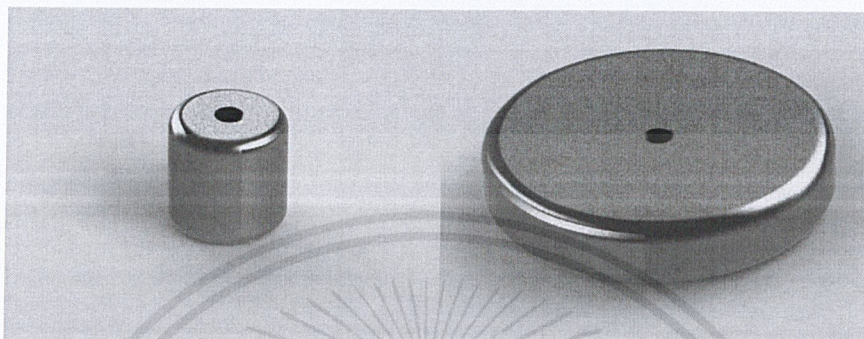
รูปที่ 3.1 แบบจำลองที่บรรจุน้ำมันและใส่เพรสบอร์ดชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแทกสลับของเพรสบอร์ด



รูปที่ 3.2 ที่บรรจุน้ำมันและใส่เพรสบอร์ดชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแทกสลับของเพรสบอร์ดที่ออกแบบสร้างจริง

- อิเล็กโตรด

หัวอิเล็กโตรดที่ใช้ในชุดทดสอบนั้นอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC 60243-1 ทำจากวัสดุทองเหลืองโดยจะประกอบไปด้วยสองอิเล็กโตรดทรงกระบอกทำจากทองเหลืองที่มีขอบโค้งมนรัศมี 3 mm อิเล็กโตรดที่หนึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 ± 1 mm และมีความสูง 25 mm ส่วนอิเล็กโตรดที่สองมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 ± 1 mm และมีความสูง 15 mm [12]



รูปที่ 3.3 แบบจำลองอิเล็กโตรดชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพอร์สบอร์ด



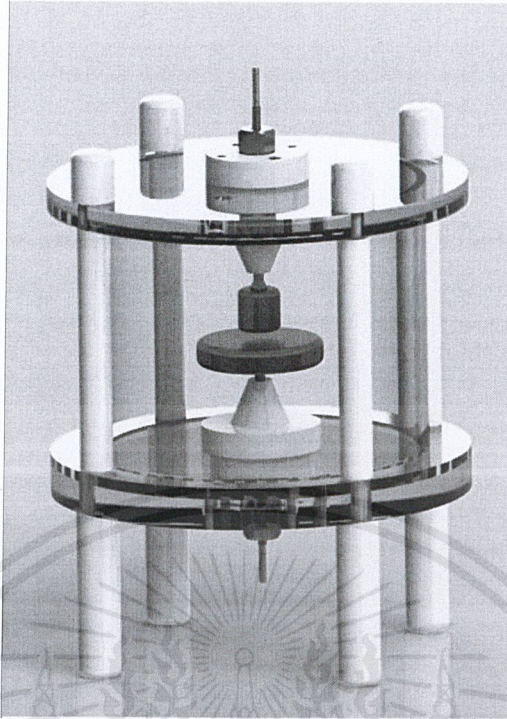
รูปที่ 3.4 อิเล็กโตรดชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพอร์สบอร์ด
ที่ออกแบบสร้างจริง

- แกนตัวนำ

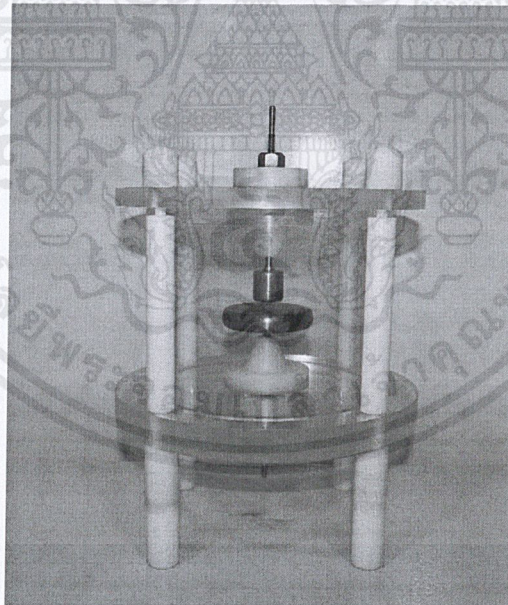
ทำจากสแตนเลสเป็นก้านยาว สำหรับจับยึดอิเล็กโตรดและต่อสายจากด้านไฟฟ้าแรงสูงและกราวนด์

- ตัวฉนวนจับยึดแกนตัวนำ

ทำจากวัสดุซูเปอร์อินสำหรับจับยึดก้านตัวนำให้อยู่ตรงกลางทั้งอิเล็กโตรดบนและล่าง



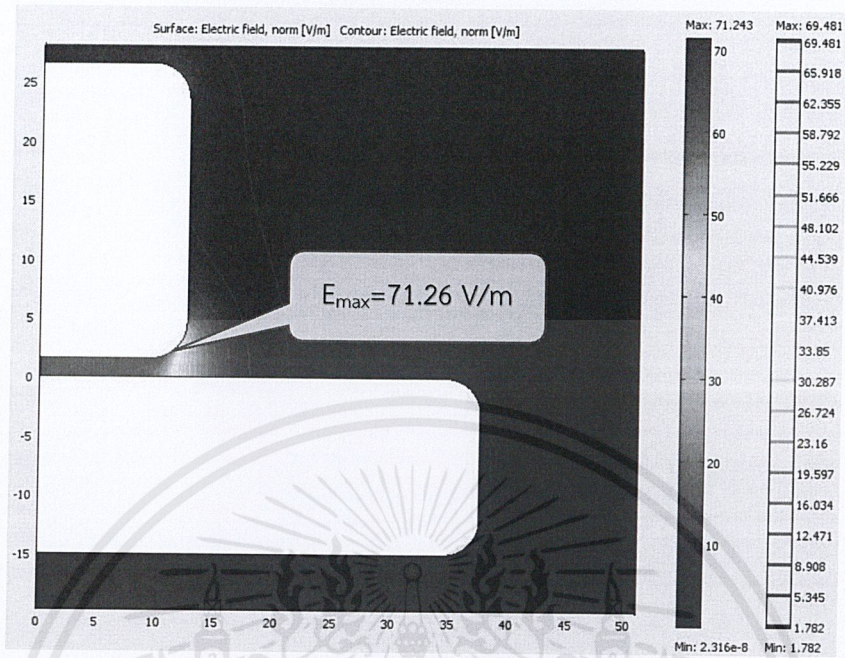
รูปที่ 3.5 แบบจำลองชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงด้นกระแสสลับของเพรสบอร์ด



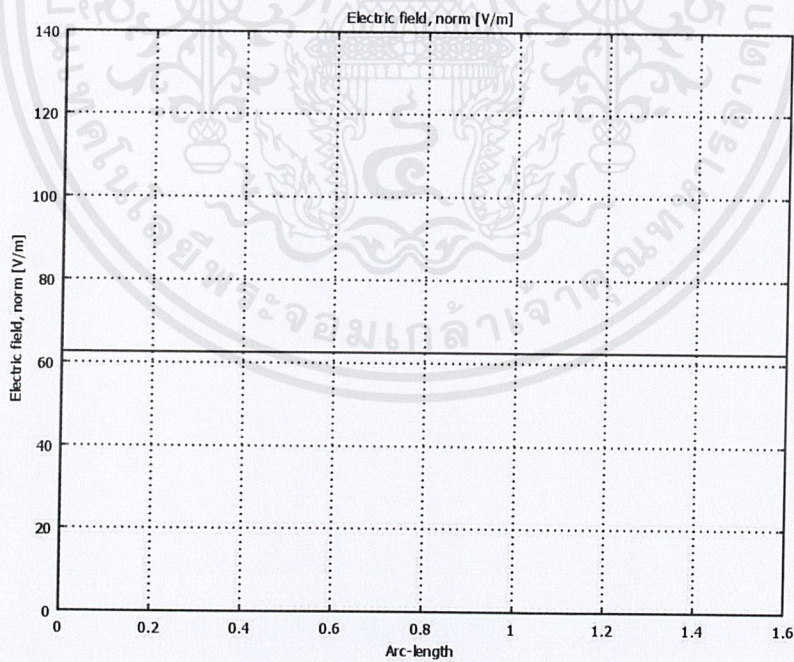
รูปที่ 3.6 ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงด้นกระแสสลับของเพรสบอร์ดที่ออกแบบสร้างจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์



รูปที่ 3.7 แบบจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพอร์สบอร์ด



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพอร์สบอร์ด

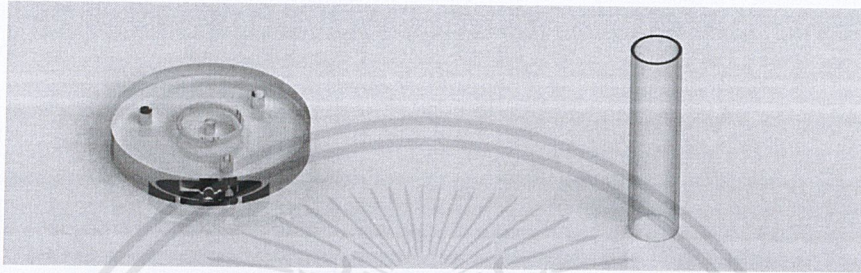
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว

1. ออกแบบ 3 มิติด้วยโปรแกรม Solid Works

- ที่บรรจุน้ำมันและใส่เพรสเซอร์

ชุดทดสอบออกแบบตามมาตรฐาน IEC 60897 โดยส่วนบรรจุน้ำมันมีปริมาตร 300 ml. ใช้วัสดุอะคริลิกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 50 mm หนา 3 mm สูง 195 mm ด้านบนและล่างของกระบอกประกอบด้วยแผ่นอะคริลิกวงกลมขนาดเจาะรูสำหรับยึดตัวตัวฉนวนของอิเล็กโตรด และทำร่องสำหรับใส่ยางกันซึมในส่วนของรอยต่อ



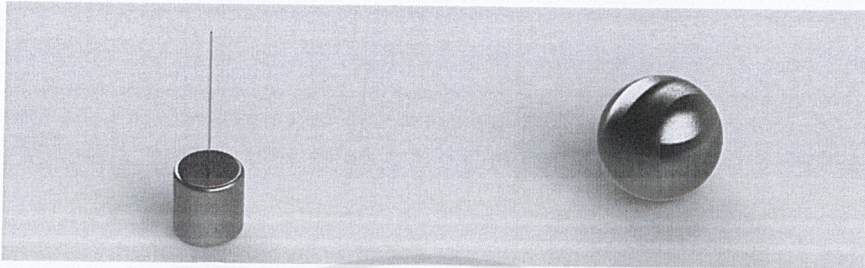
รูปที่ 3.9 แบบจำลองที่บรรจุน้ำมันและใส่เพรสเซอร์ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว



รูปที่ 3.10 ที่บรรจุน้ำมันและใส่เพรสเซอร์ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลวที่ออกแบบสร้างจริง

- อิเล็กโทรด

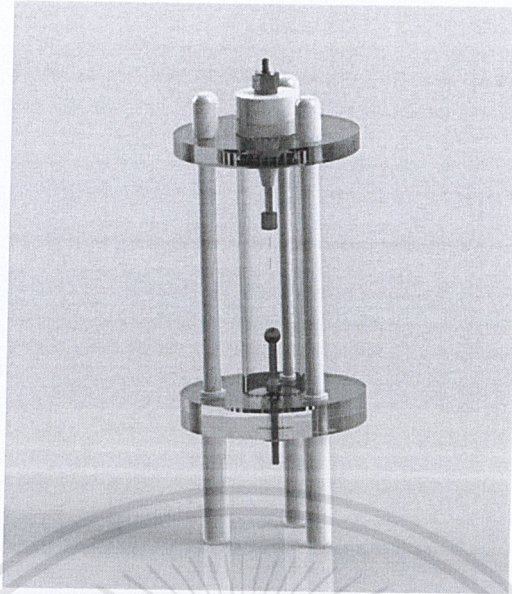
หัวอิเล็กโทรดที่ใช้ในชุดทดสอบนั้นอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC 60243-1 โดยอิเล็กโทรดทรงกลมทำจากวัสดุทองเหลืองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 mm และเข็มทำจากทังสเตน โดยที่ปลายเข็มมีรัศมีความโค้ง 40 μm



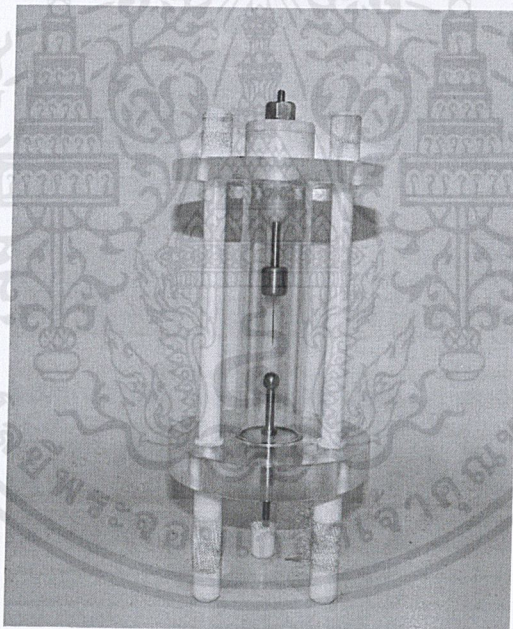
รูปที่ 3.11 แบบจำลองอิเล็กโทรดชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว



รูปที่ 3.12 อิเล็กโทรดชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว
ที่ออกแบบสร้างจริง



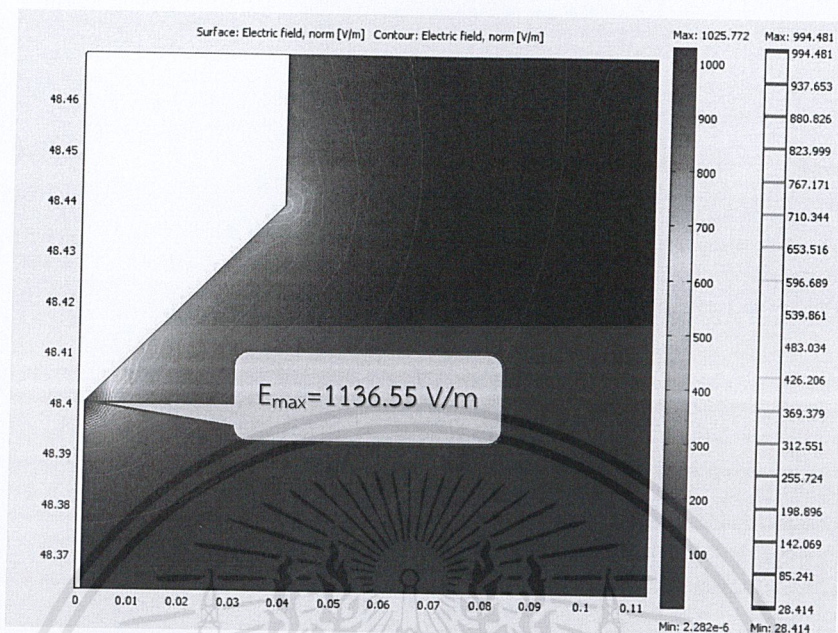
รูปที่ 3.13 แบบจำลองชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว



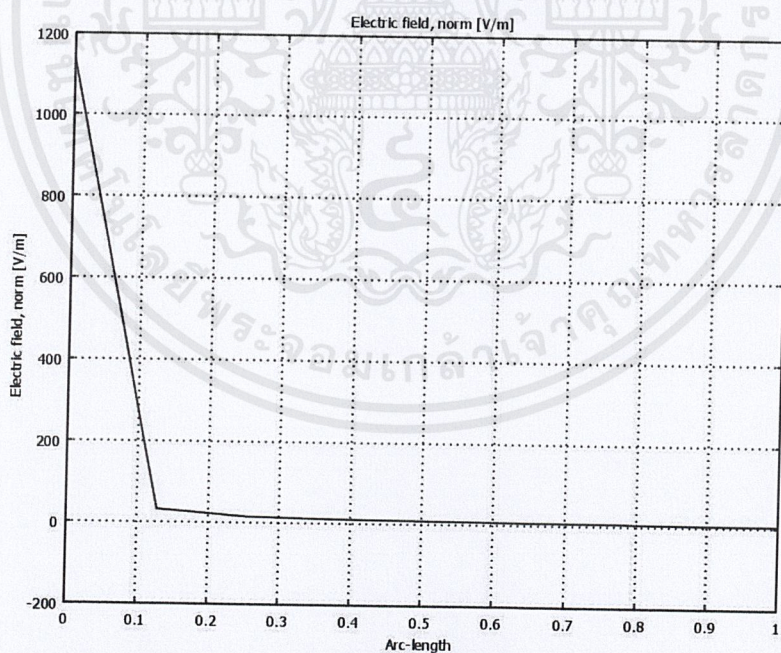
รูปที่ 3.14 ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลวที่ออกแบบสร้างจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์



รูปที่ 3.15 แบบจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว



รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การเตรียมฉนวนเหลวสำหรับการทดสอบ

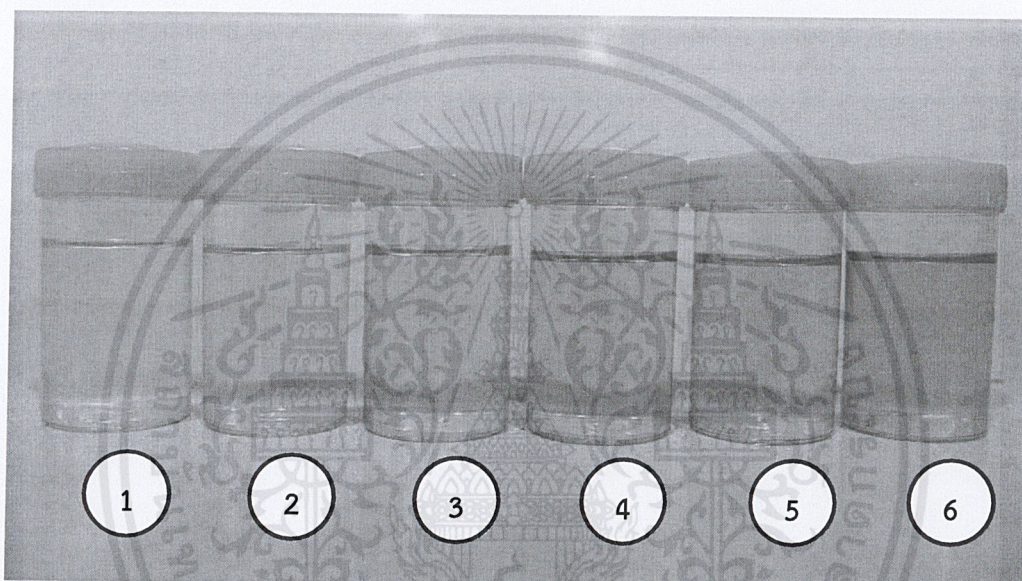
3.2.1 ฉนวนบริสุทธิ์ 3 ชนิด

1. น้ำมันแร่
2. เอสเทอร์ธรรมชาติ
3. น้ำมันปาล์ม

3.2.2 ฉนวนเหลวผสม

ทำการผสมเอสเทอร์ธรรมชาติลงในน้ำมันแร่ตามอัตราส่วน 25%, 50%, 75% กวนให้เข้ากันแล้วให้ความร้อนที่ 60°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

ฉนวนเหลวทั้ง 6 ชนิดจะนำไปอบเป็นเวลา 12 ชั่วโมงก่อนทำการทดสอบ

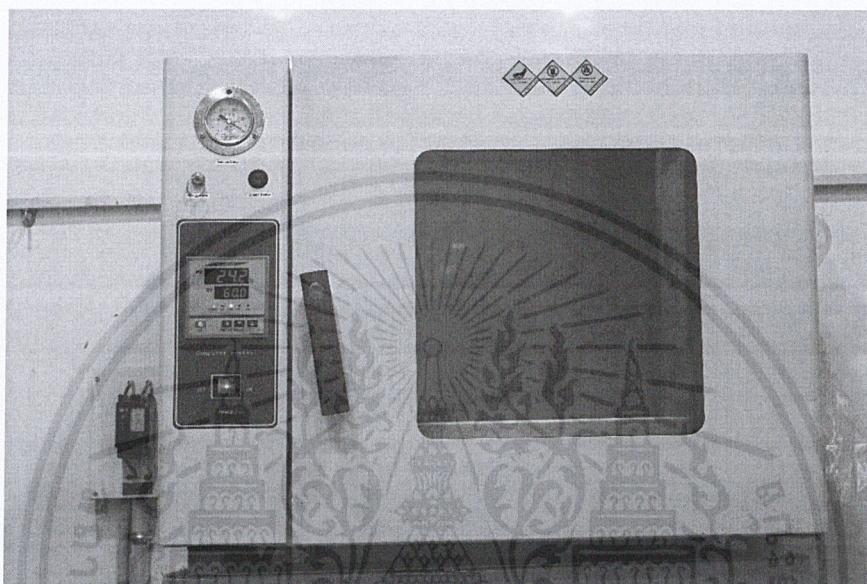


รูปที่ 3.17 ชนิดของฉนวนเหลวสำหรับการทดสอบ

1. น้ำมันแร่บริสุทธิ์
2. เอสเทอร์ผสมในน้ำมันแร่ 25%
3. เอสเทอร์ผสมในน้ำมันแร่ 50%
4. เอสเทอร์ผสมในน้ำมันแร่ 75%
5. เอสเทอร์บริสุทธิ์
6. น้ำมันปาล์ม

3.3 การเตรียมเพรสบอร์ดสำหรับการทดสอบ

1. ตัดเพรสบอร์ดให้มีขนาด 10×10 cm
2. อบเพรสบอร์ดเพื่อลดความชื้นที่อุณหภูมิ 80 °C ในตู้อบสุญญากาศเป็นเวลา 8 ชั่วโมง
3. อิมเพรกเนตเพรสบอร์ดด้วยฉนวนเหลวทั้ง 6 ชนิดที่อุณหภูมิ 60°C ในตู้อบสุญญากาศเป็นเวลา 12 ชั่วโมง



รูปที่ 3.18 ตู้อบสุญญากาศ



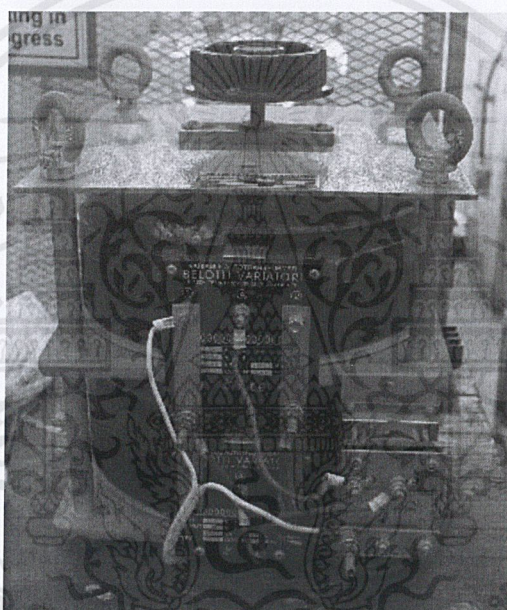
รูปที่ 3.19 การเตรียมอิมเพรกเนตเพรสบอร์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบ

3.4.1 การทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพอร์สบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยฉนวนเหลว

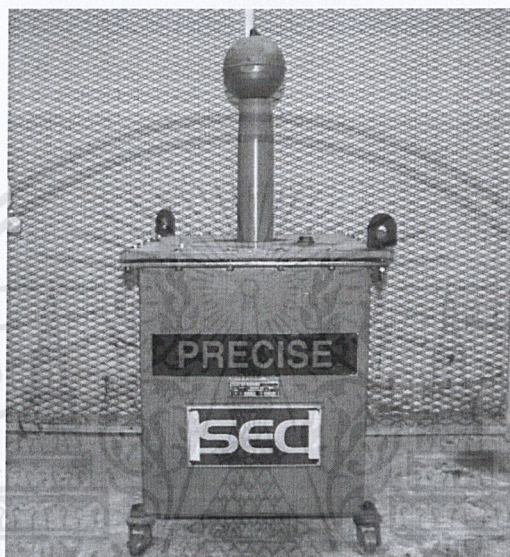
1. หม้อแปลงปรับค่าได้
 - Rated power 14000 VA
 - Input Voltage 220 V
 - Output Voltage 0-220 V
 - Frequency 45-60 Hz



รูปที่ 3.20 หม้อแปลงปรับค่าได้

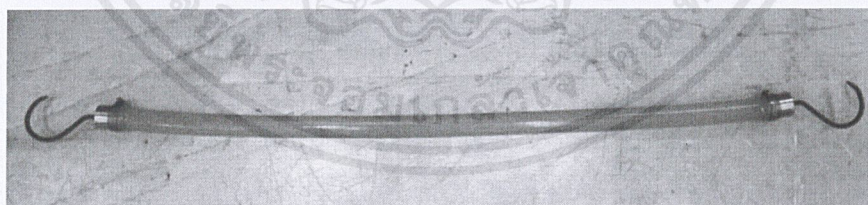
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับ พิกัด 100 kV 50 mA
- Rated Power 5 kVA
 - Input Voltage Max. 300 V 50 Hz
 - Output Voltage 100 kV 1 P
 - Output current 50 mA
 - Frequency 50 Hz



รูปที่ 3.21 หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง 235/100 kV, 5 kVA

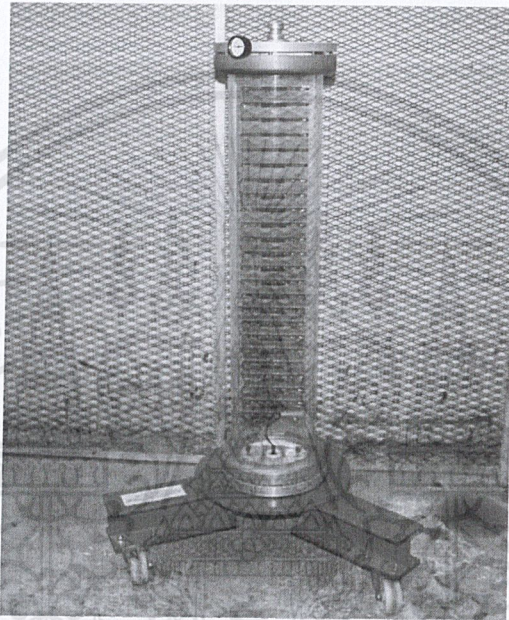
3. ตัวต้านทานน้ำ



รูปที่ 3.22 ตัวต้านทานน้ำ

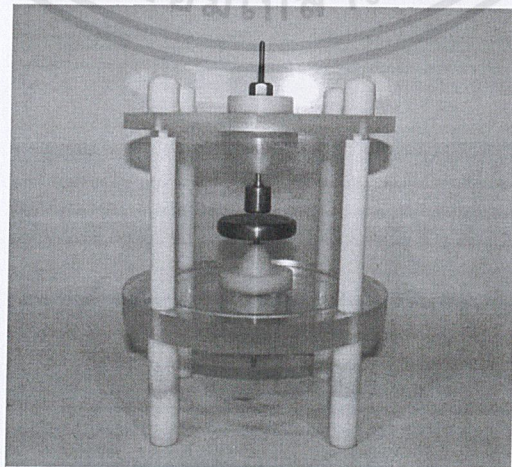
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. โวลเตจดีไวเดอร์ พิกัด 100kV บรรจุแก๊ส SF₆
- Rated Voltage A.C./D.C./Impulse 100kV.
 - Rated Ratio A.C. 980:1/D.C. 985:1/Impulse 993:1
 - Rated Capacitance (High) 110 pF
 - Rated Capacitance (Low) 110 nF
 - Rated Resistance (High) 250 M Ω
 - Rated Resistance (Low) 250 Ω
 - Frequency 50 Hz



รูปที่ 3.23 โวลเตจดีไวเดอร์ พิกัด 100kV

5. ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ด



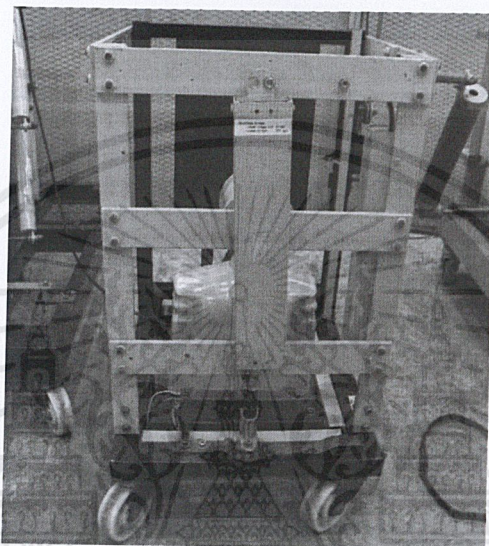
รูปที่ 3.24 ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว

1. ชุดอัดประจุ

- Type 6DC-100
- Rated Voltage 100 kV
- Supply Voltage 220 V
- Maximum current 0.02 A
- Middle Current 0.01 A



รูปที่ 3.25 ชุดอัดประจุ

2. ชุดกำเนิดอิมพัลส์

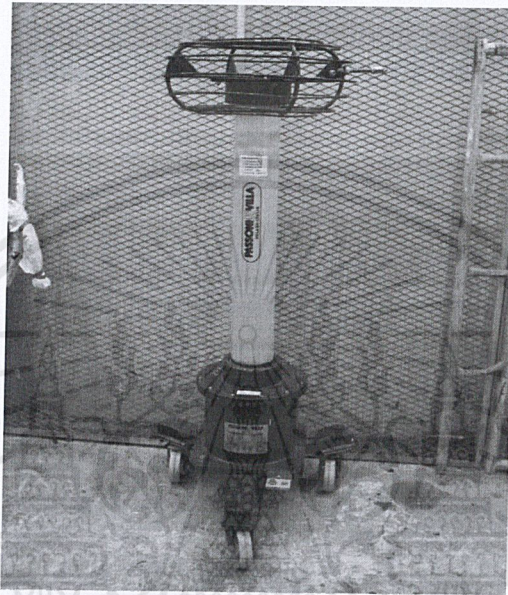
- Test set 200 kV, 7 kJ



รูปที่ 3.26 ชุดกำเนิดอิมพัลส์

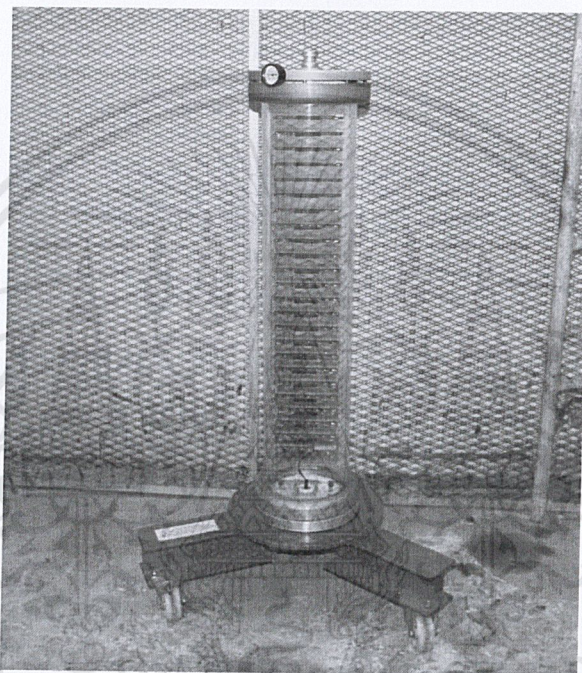
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. โวลเตจดีไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุ
- Impulse Voltage 1.2/50 μ S 200 kV
 - Continuous Voltage 50 Hz 50 kV
 - Rated Capacitance 4200 pF
 - Rated series resistance 50 Ω
 - Connector type LEMO RA 4250



รูปที่ 3.27 โวลเตจดีไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุ

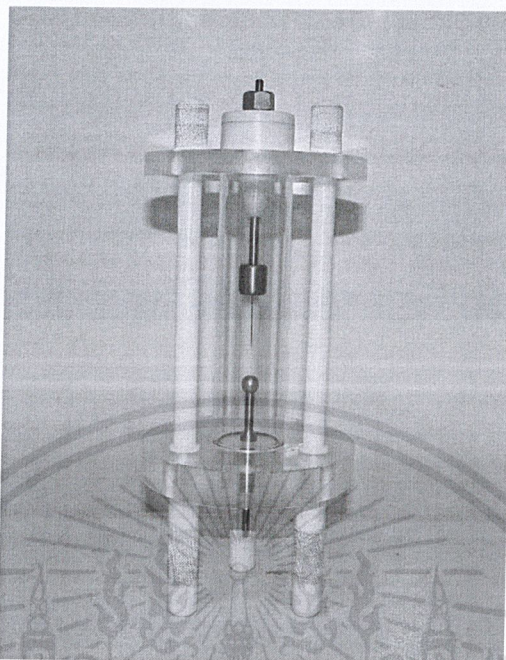
4. โวลเตจดีไวเดอร์ พิกัด 100kV บรรจุแก๊ส SF₆
- Rated Voltage A.C./D.C./Impulse 100kV.
 - Rated Ratio A.C. 980:1/D.C. 985:1/Impulse 993:1
 - Rated Capacitance (High) 110 pF
 - Rated Capacitance (Low) 110 nF
 - Rated Resistance (High) 250 M Ω
 - Rated Resistance (Low) 250 Ω
 - Frequency 50 Hz



รูปที่ 3.28 โวลเตจดีไวเดอร์ พิกัด 100kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

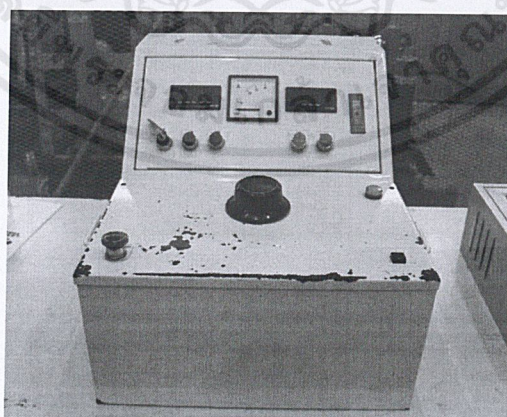
5. ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ของฉนวนเหลว



รูปที่ 3.29 ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ของฉนวนเหลว

6. ชุดควบคุม Impulse Voltage Generator

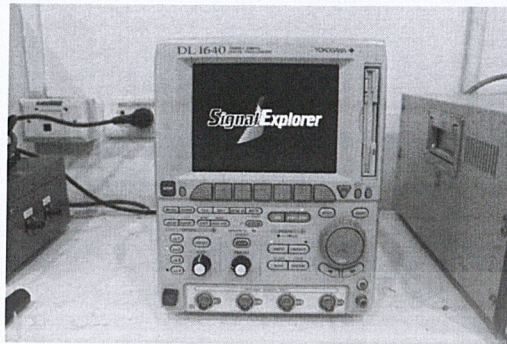
- Rated power 7000 VA
- Input Voltage 220 V
- Output Voltage 0-220 V
- Frequency 45-60 Hz



รูปที่ 3.30 ชุดควบคุมชุดกำเนิดอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

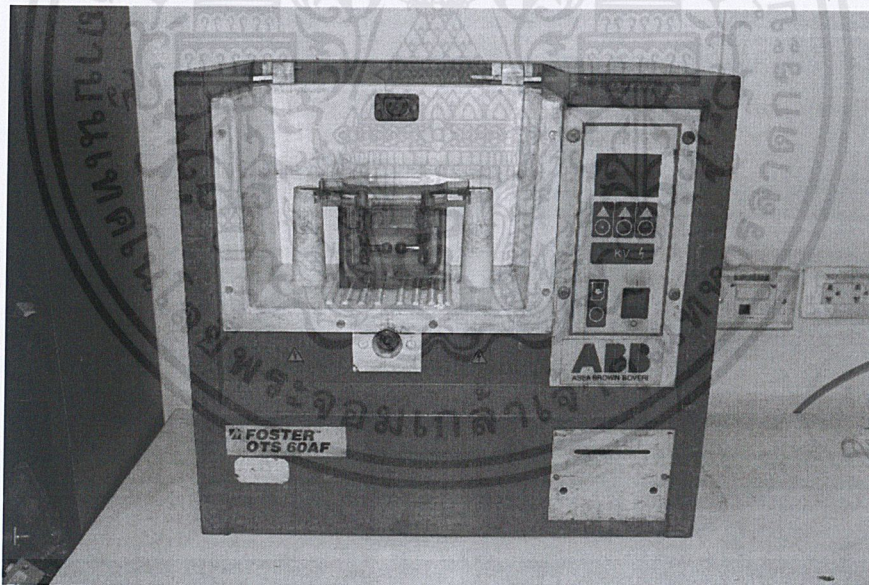
6. ดิจิตอลออสซิลโลสโคป
- YOKOGAWA DL 1640



รูปที่ 3.31 ดิจิตอลออสซิลโลสโคป

3.4.3 การทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนเหลว

1. เครื่องทดสอบการเบรกดาว์ฉนวนเหลว (ตามมาตรฐาน IEC 156)
 - Input Voltage 250 V_{AC}
 - Frequency 50/60 Hz

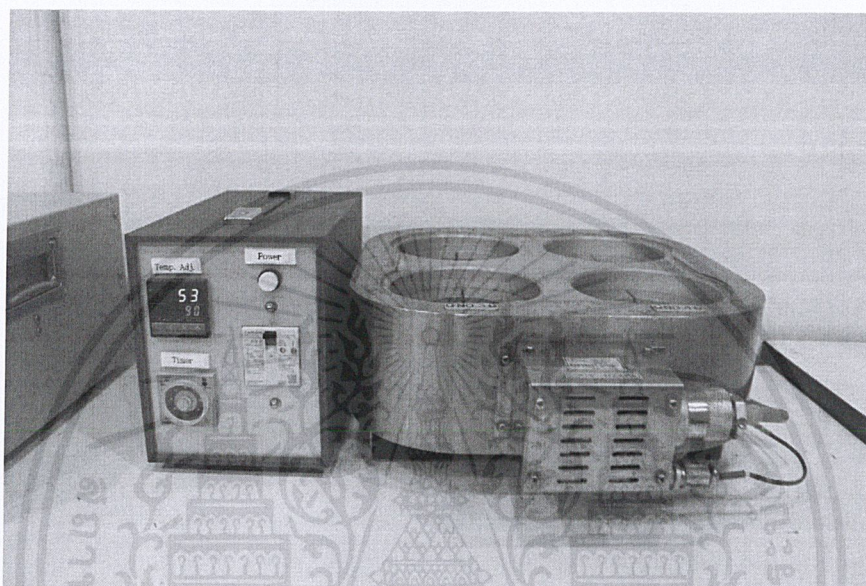


รูปที่ 3.32 เครื่องทดสอบการเบรกดาว์ฉนวนเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.4 การทดสอบค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเหลว (ϵ_r) และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสีย
เปล้าไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$) ของฉนวนเหลว

1. Temperature Adjust
 - Input Voltage 220 V
 - Rated Power 1500 W
 - Frequency 50/60 Hz



รูปที่ 3.33 Temperature Adjust

2. C and $\tan \delta$ Meter for Insulation Material

- Input Voltage 100-240 V_{AC} $\pm 10\%$
- Frequency 50/60 Hz

Measurement Voltage

- Measuring Voltage 0-2000 V, 50/60 Hz
- Capacitance 20-1000 pF
- $\tan \delta$ 0-50 %
- Relative Permittivity 0.02-50.0

Measurement Voltage

- Measuring Voltage 0-2000 V, 50/60 Hz
- Capacitance 20-1000 pF
- $\tan \delta$ 0-50 %
- Relative Permittivity 0.02-50.0

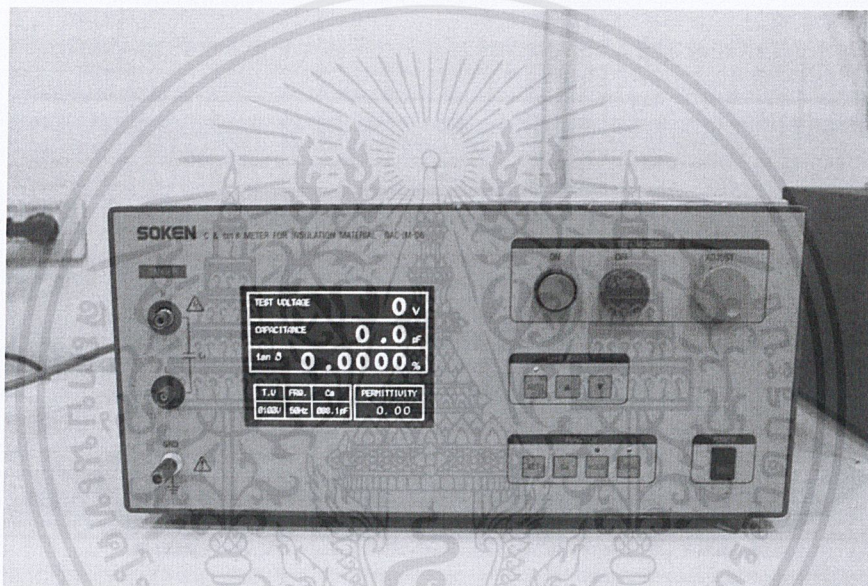
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Minimum Resolution

- Measuring Voltage 1 V
- Capacitance 0.1 pF
- $\tan \delta$ 0.0001% (1 ppm)
- Relative Permittivity 0.01

Measuring Accuracy

- Measuring Voltage $\pm 3\%$
- Capacitance $\pm(0.5\%$ of reading +2 digits)
- $\tan \delta$ $\pm(0.001\%$ + 1% of reading +2 digits)
- Relative Permittivity $\pm(1\%$ of reading+2 digits)

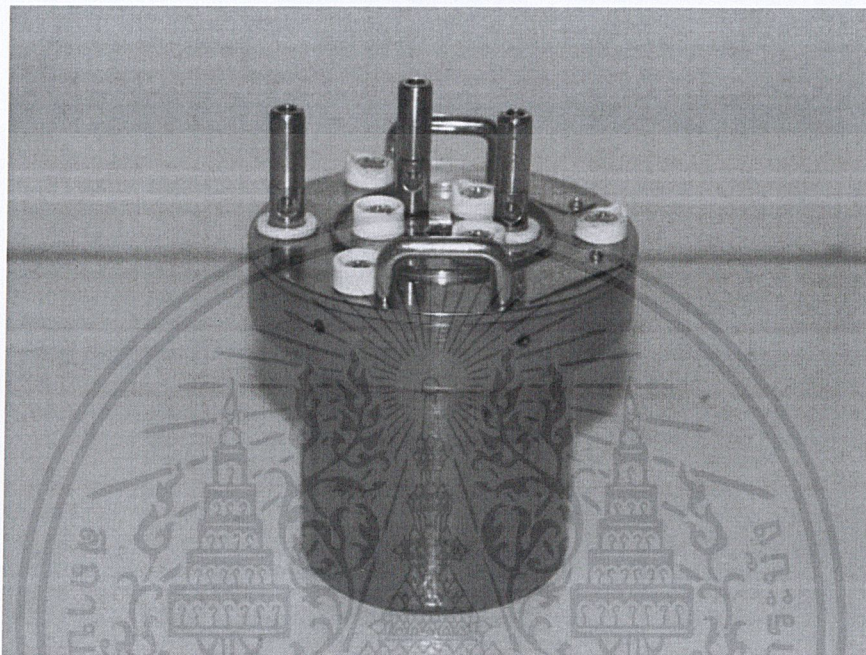


รูปที่ 3.34 C and $\tan \delta$ Meter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Liquid Electrode

- Surface Area of Electrode 100 cm^2
- Constant of Electrode 996
- Capacitance 88.1 pF
- Voltage Withstand 1500/1 min. GOOD



รูปที่ 3.35 Liquid Electrode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

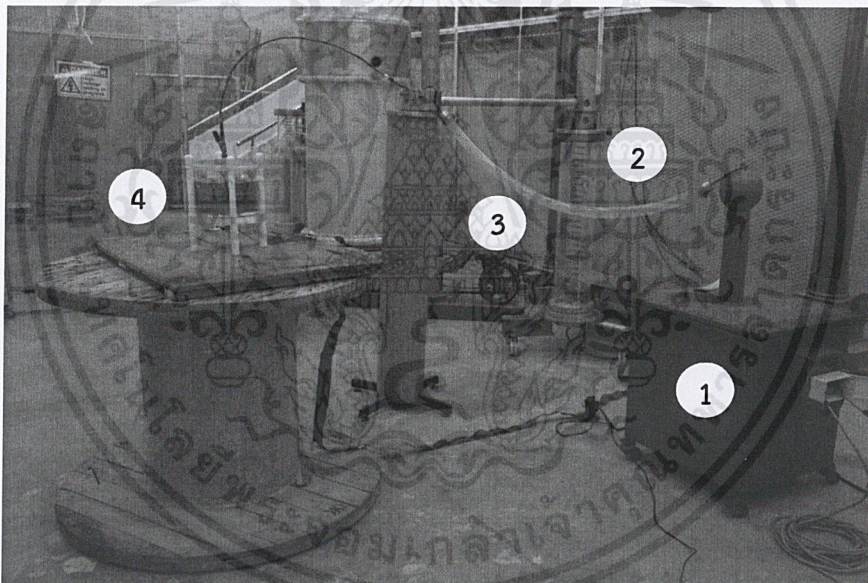
การทดสอบและผลการทดสอบ

การทดสอบถูกแบ่งออกเป็น 4 ส่วน

1. การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพอร์สบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยฉนวนเหลว
2. การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว
3. การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนเหลว
4. การทดสอบวัดค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของฉนวนเหลว (ϵ_r) และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$) ของฉนวนเหลว

4.1 การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพอร์สบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยฉนวนเหลว

4.1.1 วงจรทดสอบ



รูปที่ 4.1 วงจรทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพอร์สบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยฉนวนเหลว

1. หม้อแปลงทดสอบ
2. โวลต์เมตเตอร์
3. ตัวต้านทานน้ำ
4. ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันของเพอร์สบอร์ด

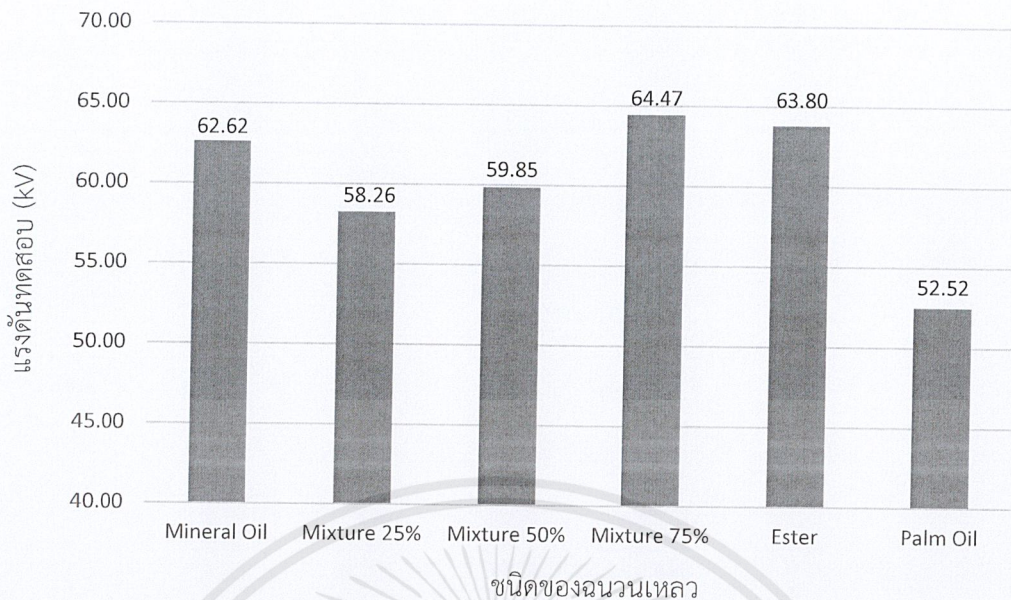
4.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. ทำการต่อวงจรทดสอบตามรูปที่ 4.1
2. นำเพรสบอร์ดที่อิมเพกเน็ทแล้ว ใส่ลงไปในชุดทดสอบจากนั้นเทจนวนเหลวลงในชุดทดสอบ โดยให้จนวนเหลวอยู่ในระดับที่ห่างจากขอบบนของชุดทดสอบ 0.8-1.0 cm.
3. ตรวจสอบจนวนเหลวที่ถูกเทลงในชุดทดสอบว่ามีฟองอากาศอยู่หรือไม่ ถ้ามีฟองอากาศใช้แท่งแก้วคนเบาๆ จนกว่าฟองอากาศที่มีจะหายไปจนหมด
4. จดบันทึกค่าอุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันบรรยากาศ
5. ทำการขึ้นแรงดัน โดยให้อัตราการเพิ่มแรงดันคงที่อย่างช้าๆ โดยให้อยู่ในระดับที่ 2 kV/s ขึ้นไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดการเบรกดาว์นผ่านเพรสบอร์ด
6. บันทึกค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับที่อ่านได้จากมิเตอร์วัดแรงดัน
7. เมื่อจนวนเหลวที่ใช้ทดสอบเกิดการเบรกดาว์นแล้วให้นำเพรสบอร์ดออกจากชุดทดสอบ ทำความสะอาดอิเล็กทรอนิกส์ที่มีเขม่าติด จากนั้นตั้งพักชุดทดสอบทิ้งไว้ระยะเวลา 2 นาที แล้วจึงนำเพรสบอร์ดชิ้นต่อไปมาติดตั้ง
8. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 5-7 ไปเรื่อยๆ จนกว่าจะทดสอบครบจำนวน 6 ครั้ง

4.1.3 ผลการทดสอบ

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพรสบอร์ดที่อิมเพกเน็ทด้วยจนวนเหลว

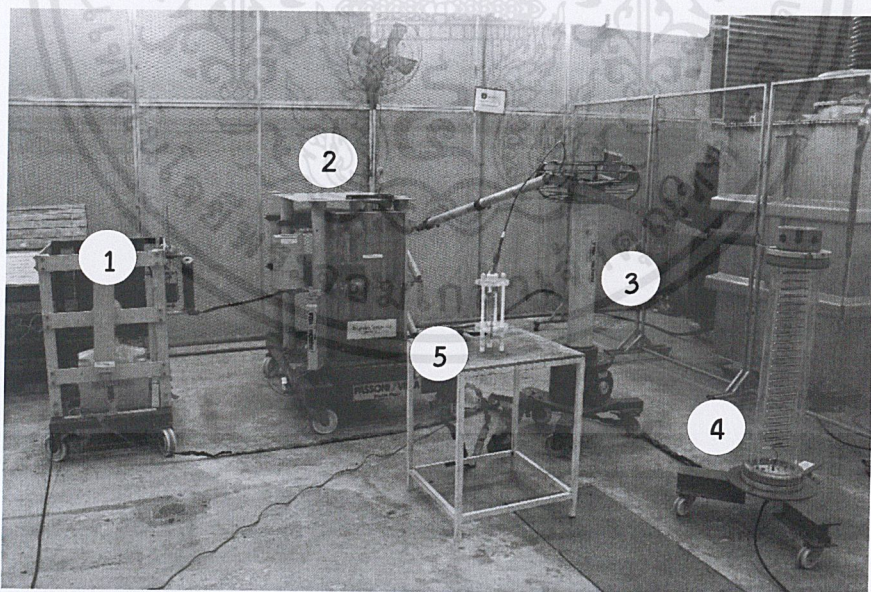
จนวนเหลว	ค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพรสบอร์ดที่อิมเพกเน็ทด้วยจนวนเหลว (kV)						ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	
Mineral oil	65.60	63.70	63.80	61.90	59.50	61.20	62.62
Mixture 25%	51.90	61.20	59.90	58.93	60.35	57.26	58.62
Mixture 50%	56.64	52.50	57.94	62.17	65.30	64.57	59.85
Mixture 75%	67.00	65.70	65.00	65.80	64.20	59.10	64.47
Ester	66.50	63.18	65.04	63.09	62.59	62.42	63.80
Palm oil	52.70	52.00	55.10	54.90	52.20	48.20	52.52



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพอร์สบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยฉนวนเหลวชนิดต่างๆ

4.2 การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว

4.2.1 วงจรทดสอบ



รูปที่ 4.3 วงจรทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว

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

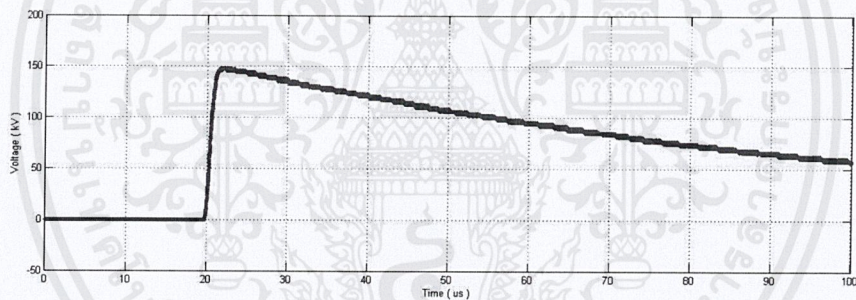
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. ทำการต่อวงจรทดสอบตามรูปที่ 4.3
2. นำฉนวนเหลวที่ต้องการทดสอบเทลงในชุดทดสอบ โดยให้ฉนวนเหลวอยู่ในระดับที่ห่างจากขอบบนของชุดทดสอบ 1-2 cm.
3. ตรวจสอบฉนวนเหลวที่ถูกเทลงในชุดทดสอบว่ามีฟองอากาศอยู่หรือไม่ ถ้ามีฟองอากาศใช้แท่งแก้วคนเบาๆ จนกว่าฟองอากาศที่มีจะหายไปจนหมด
4. จดบันทึกค่าอุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันบรรยากาศ
5. ทำการขึ้นแรงดัน โดยให้อัตราการเพิ่มแรงดันคงที่อย่างช้าๆ จนกระทั่งเกิดการเบรกดาวน์
6. บันทึกกราฟค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่อ่านได้จากออสซิลโลสโคป
7. เมื่อฉนวนเหลวที่ใช้ทดสอบเกิดการเบรกดาวน์แล้วให้ทำการเทเปลี่ยนใหม่ทั้งหมดทำความสะอาดอิเล็กโตรดที่มีเขม่าติด และเปลี่ยนเข็มที่ใช้ในการทดสอบ จากนั้นตั้งพักชุดทดสอบทิ้งไว้ระยะเวลา 5 นาที
8. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 5-7 ไปเรื่อยๆ จนกว่าจะทดสอบครบจำนวน 6 ครั้ง

4.2.3 ผลการทดสอบ

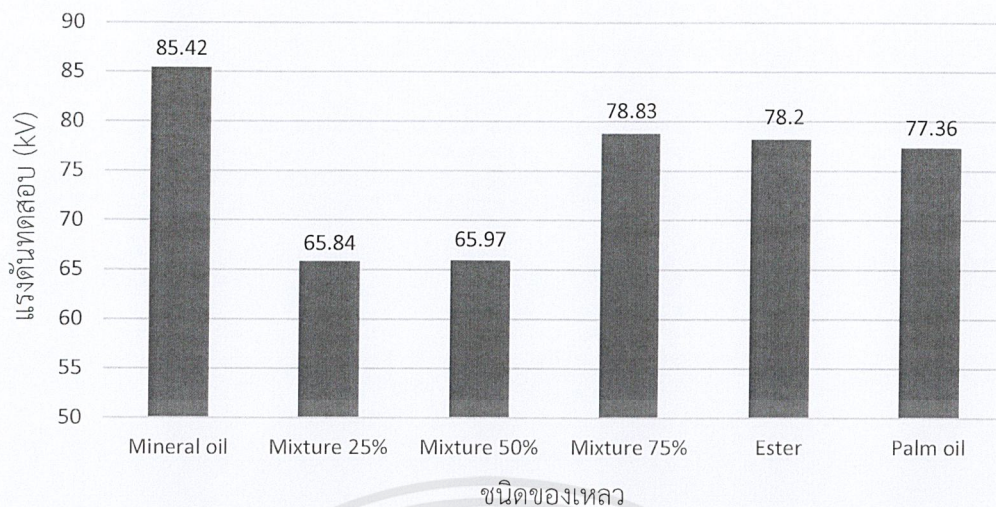
1. แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว



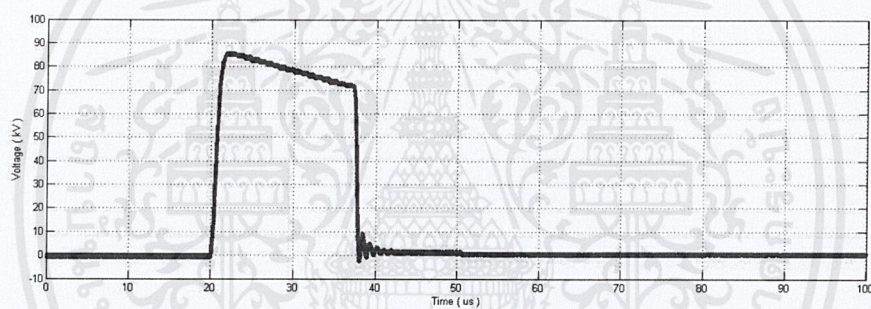
รูปที่ 4.4 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว 1.2/50 μs ที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของฉนวนเหลว

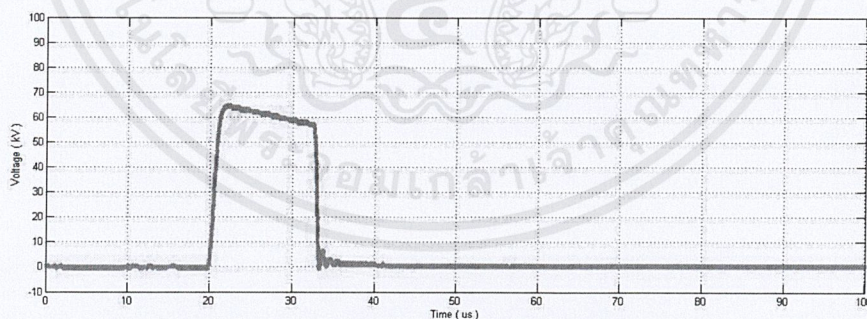
ฉนวนเหลว	ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของฉนวนเหลว (kV)						ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	
Mineral oil	89.17	85.00	85.83	84.17	84.17	84.17	85.42
Mixture 25%	66.67	66.67	64.17	68.33	64.17	65.00	65.84
Mixture 50%	65.83	72.50	65.83	63.33	65.00	63.33	65.97
Mixture 75%	78.33	76.67	72.5	73.33	73.33	74.83	78.83
Ester	79.17	80.00	81.67	79.17	77.50	71.67	78.20
Palm oil	81.67	78.33	73.33	74.17	75.00	81.67	77.36



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวกับ
ฉนวนเหลวชนิดต่างๆ



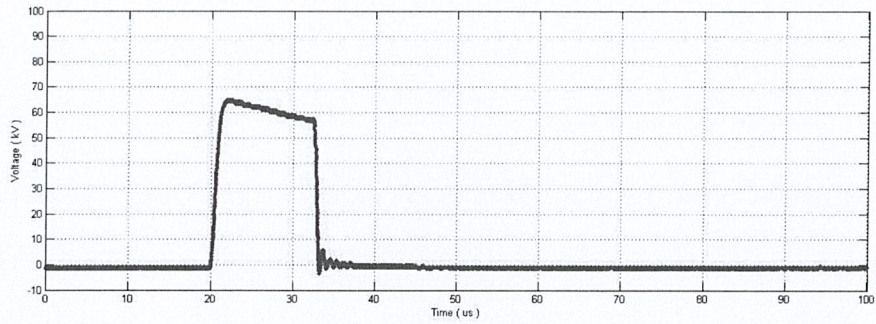
a) Mineral oil



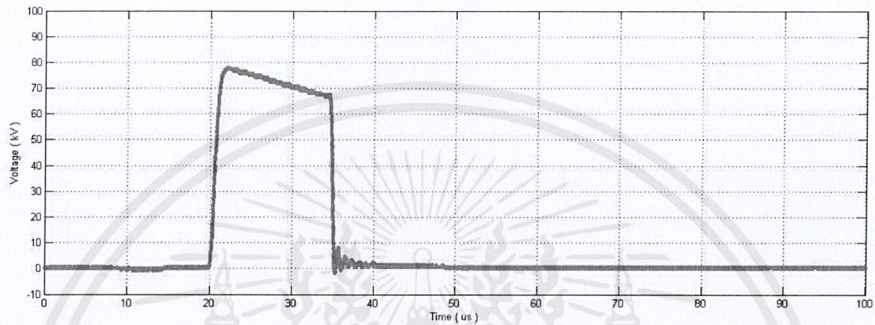
b) Mixture 25%

รูปที่ 4.6 ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวกับ
ฉนวนเหลวชนิดต่างๆ

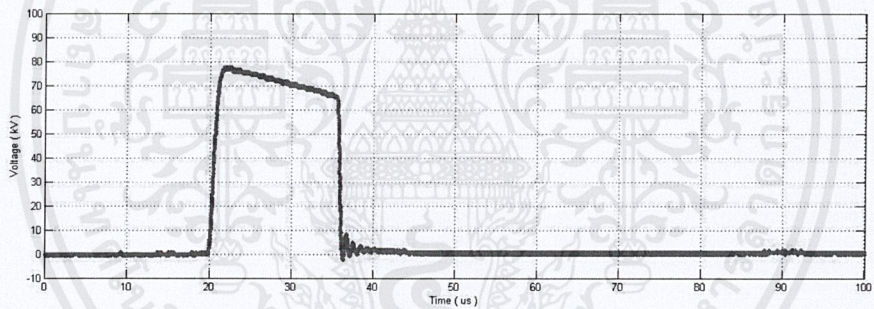
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



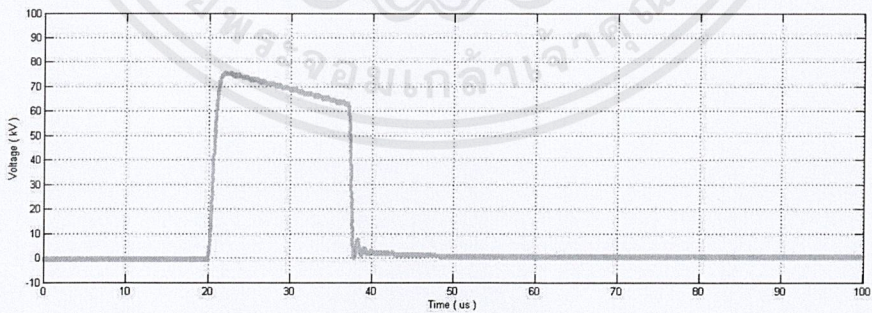
c) Mixture 50%



d) Mixture 75%



e) Ester

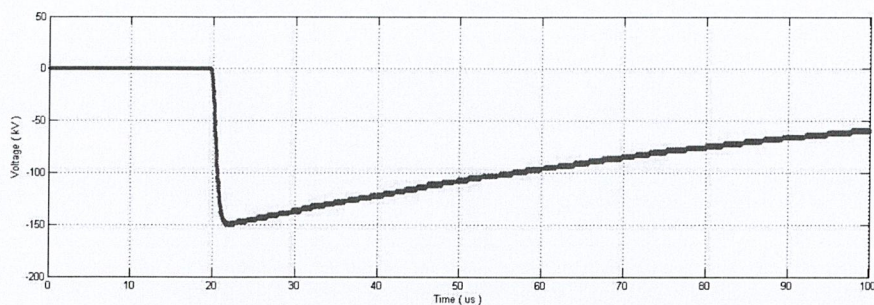


f) Palm oil

**รูปที่ 4.6 (ต่อ) ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวกับ
ฉนวนหลายชนิดต่างๆ**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

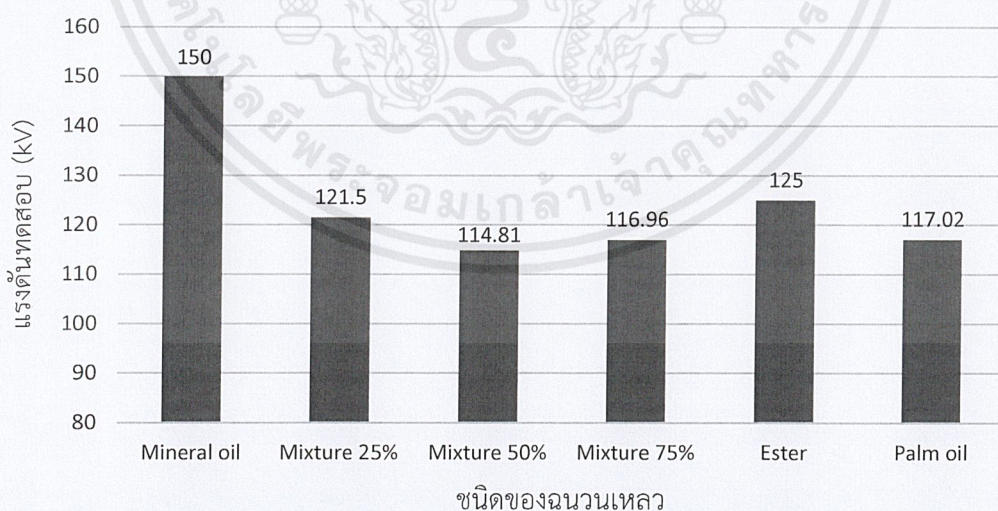
2. แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วพล



รูปที่ 4.7 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วพล 1.2/50 μ s ที่ใช้ในการทดสอบ

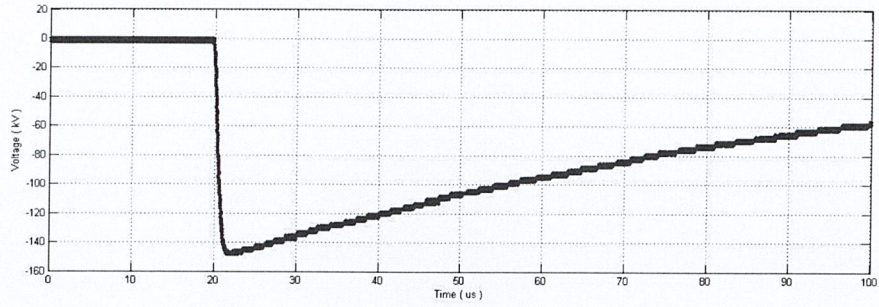
ตารางที่ 4.3 การทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วพลของฉนวนเหลว

ฉนวนเหลว	ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วพลของฉนวนเหลว (kV)						ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	
Mineral oil	<-150	<-150	<-150	<-150	<-150	<-150	<-150
Mixture 25%	-120.83	-125.00	-118.75	-125.00	-118.75	-120.67	-121.50
Mixture 50%	-120.83	-114.58	-110.42	-110.42	-118.02	-114.58	-114.81
Mixture 75%	-112.50	-122.92	-112.50	-106.25	-127.08	-120.50	-116.96
Ester	-120.83	-127.08	-122.92	-127.08	-127.08	-125.00	-125.00
Palm oil	-112.50	-116.67	-122.92	-122.92	-110.42	-116.67	-117.02

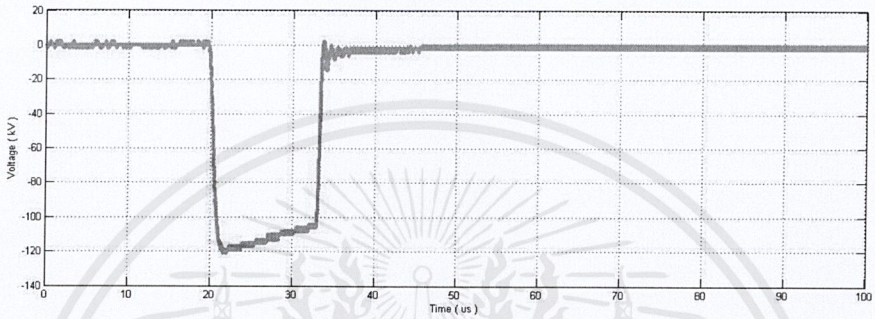


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วพลกับฉนวนเหลวชนิดต่างๆ

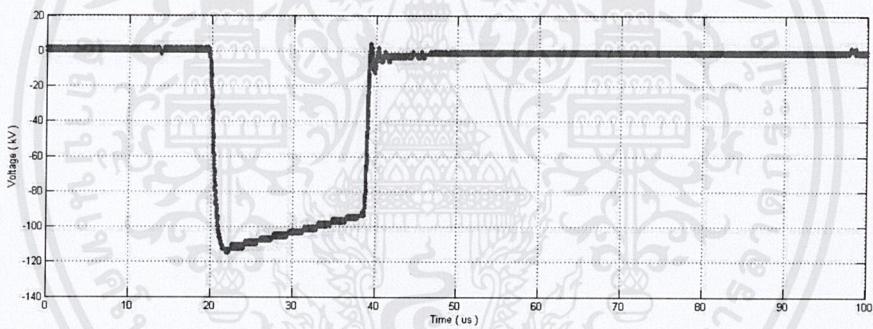
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



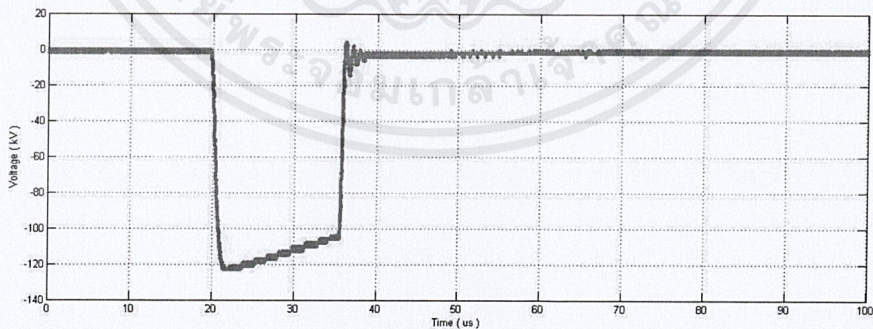
a) Mineral oil



b) Mixture 25%



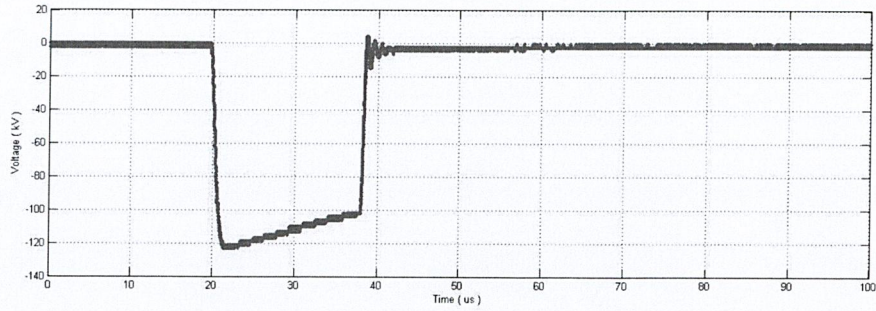
c) Mixture 50%



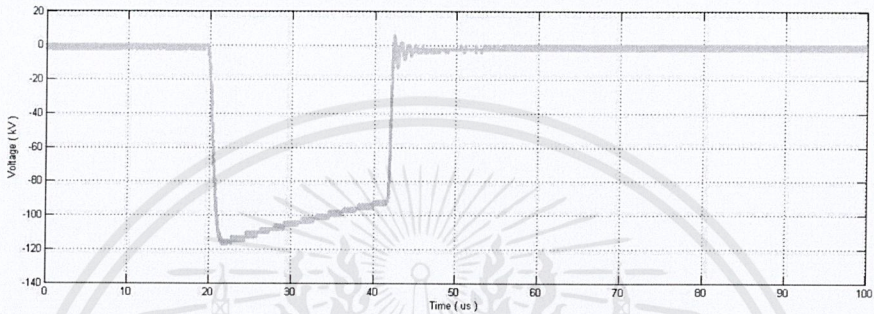
d) Mixture 75%

รูปที่ 4.9 ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่วลบกับ
ฉนวนเหลวชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



e) Ester

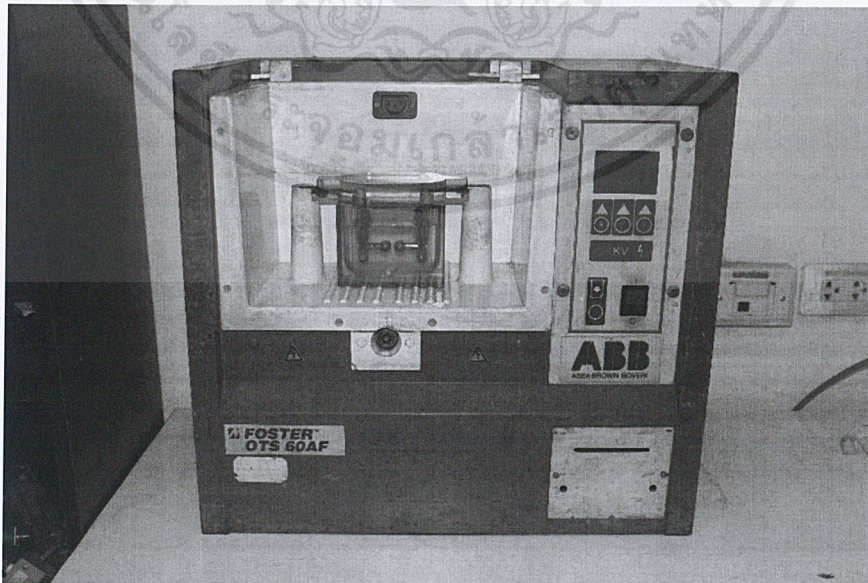


f) Palm oil

รูปที่ 4.9 (ต่อ) ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วพลบกับ
ฉนวนเหลวชนิดต่างๆ

4.3 การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนเหลว

4.3.1 วงจรทดสอบ



รูปที่ 4.10 เครื่องทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

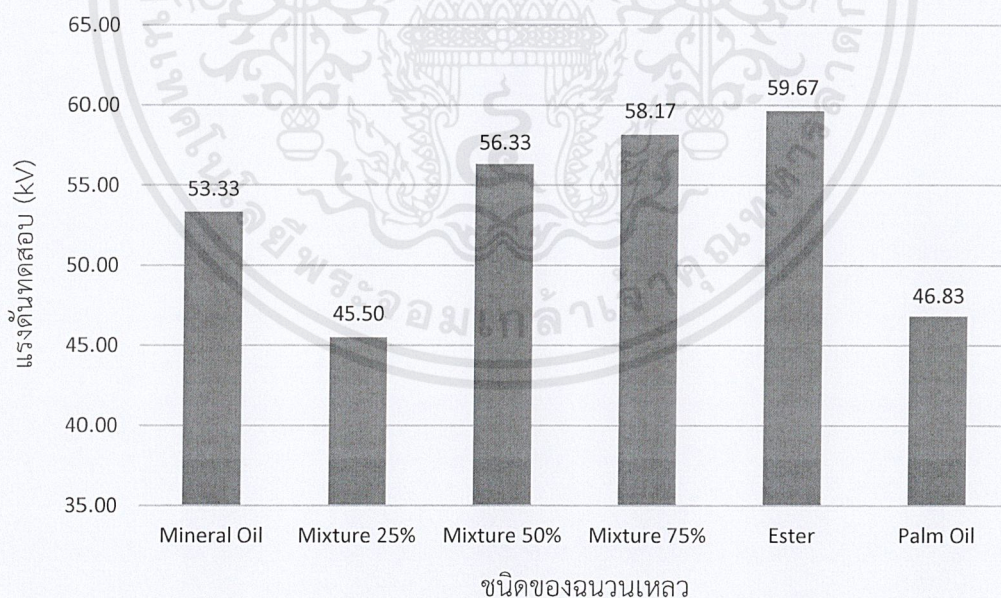
4.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. นำฉนวนเหลวที่ต้องการทดสอบเทใส่ลงไปในชุดทดสอบ
2. ตรวจสอบฉนวนเหลวที่ถูกเทลงในชุดทดสอบว่ามีฟองอากาศอยู่หรือไม่ ถ้ามีฟองอากาศใช้แท่งแก้วคนเบาๆ จนกว่าฟองอากาศที่มีจะหายไปจนหมด
3. เปิดเครื่องทดสอบ ทำการเลือกมาตรฐานการทดสอบ โดยเลือกมาตรฐาน IEC 60156
4. หลังจากเครื่องทดสอบ ทำการทดสอบเสร็จ จดบันทึกค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับ

4.3.3 ผลการทดสอบ

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนเหลว

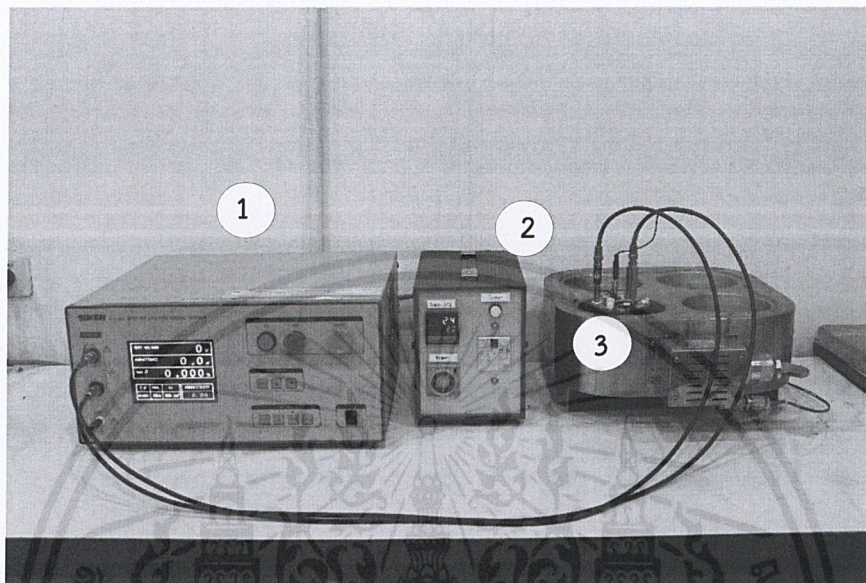
ฉนวนเหลว	ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่ววอกของฉนวนเหลว (kV)						ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	
Mineral oil	47	29	31	40	57	28	53.33
Mixture 25%	29	53	56	41	48	46	45.50
Mixture 50%	60	43	60	60	60	55	56.33
Mixture 75%	60	59	55	60	60	55	58.17
Ester	60	60	59	60	59	60	59.67
Palm oil	60	60	42	40	32	47	46.83



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับกับฉนวนเหลวชนิดต่างๆ

4.4 การทดสอบวัดค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเหลว (ϵ_r) และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสีย ไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) ของฉนวนเหลว

4.4.1 วงจรทดสอบ



รูปที่ 4.12 วงจรทดสอบวัดค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเหลว (ϵ_r) และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสีย
เปล่าไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) ของฉนวนเหลว
1.C & $\tan\delta$ Meter 2.Temperature Adjust 3.Liquid Electrode

4.4.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. ทำการต่อวงจรทดสอบตามรูปที่ 4.12
2. นำฉนวนเหลวที่ต้องการทดสอบเทลงในกระบอกของ Liquid Electrode
3. นำ Liquid Electrode ที่บรรจุฉนวนเหลวแล้ว ใส่ลงในช่องใดช่องหนึ่งของชุดทดสอบ
4. เปิดเครื่อง Temperature Adjust ปรับอุณหภูมิที่ต้องการที่ทดสอบ โดยทำการกำหนดให้วัดค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนเหลวในช่วงอุณหภูมิ 30 – 90 °C โดยเพิ่มอุณหภูมิขึ้นทีละ 5 °C
5. เมื่ออุณหภูมิของ Test Cell ถึงค่าที่ปรับตั้งไว้ ซึ่งสามารถดูได้จากเครื่อง Temperature Adjust ให้ทำการจดบันทึกค่า $\tan\delta$, ค่าความจุไฟฟ้าและค่าเปอร์มิตติวิตี จากเครื่อง C & $\tan\delta$ meter
6. หลังจากจดบันทึกค่า $\tan\delta$, ค่าความจุไฟฟ้า และค่าเปอร์มิตติวิตี ณ อุณหภูมิที่ต้องการแล้วให้ปรับเพิ่มอุณหภูมิไปยังค่าใหม่ที่ต้องการ

4.4.3 ผลการทดสอบ

1. น้ำมันแร่บริสุทธิ์

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบวัดค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเหลว (ϵ_r) และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) ของน้ำมันแร่

Temperature (°C)	Capacitance (pF)	$\tan\delta$ (%)	Permittivity
30	186.6	0.0070	2.12
35	186.5	0.0073	2.12
40	186.3	0.0075	2.11
45	186.1	0.0078	2.11
50	185.7	0.0081	2.11
55	185.1	0.0089	2.10
60	184.8	0.0097	2.10
65	184.4	0.0105	2.09
70	184.2	0.0107	2.09
75	183.6	0.0118	2.09
80	183.5	0.0130	2.08
85	183.1	0.0141	2.08
90	182.7	0.0158	2.07

2. เอสเทอร์ผสมในน้ำมันแร่ 25%

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบวัดค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเหลว (ϵ_r) และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) ของเอสเทอร์ผสมในน้ำมันแร่ 25%

Temperature (°C)	Capacitance (pF)	$\tan\delta$ (%)	Permittivity
30	206.8	0.0333	2.35
35	206.3	0.0360	2.34
40	205.7	0.0412	2.33
45	205.5	0.0431	2.33
50	205.1	0.0487	2.33
55	204.6	0.0542	2.32
60	203.9	0.0640	2.31
65	203.3	0.0731	2.31
70	202.4	0.0944	2.30
75	201.7	0.1100	2.29
80	201.3	0.1190	2.28
85	200.7	0.1370	2.28
90	199.6	0.1740	2.27

3. เอสเทอร์ผสมในน้ำมันแร่ 50%

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบวัดค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเหลว (ϵ_r) และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) ของเอสเทอร์ผสมในน้ำมันแร่ 50%

Temperature (°C)	Capacitance (pF)	$\tan\delta$ (%)	Permittivity
30	228.2	0.0405	2.59
35	227.8	0.0438	2.59
40	227.0	0.0497	2.58
45	226.4	0.0553	2.57
50	225.6	0.0634	2.56
55	225.0	0.0740	2.55
60	224.1	0.0837	2.54
65	223.5	0.0958	2.54
70	222.6	0.1110	2.53
75	221.8	0.1290	2.52
80	220.8	0.1500	2.51
85	219.8	0.1800	2.49
90	218.2	0.2320	2.48

4. เอสเทอร์ในน้ำมันแร่ 75%

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบวัดค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเหลว (ϵ_r) และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$) ของเอสเทอร์ผสมในน้ำมันแร่ 75%

Temperature (°C)	Capacitance (pF)	$\tan \delta$ (%)	Permittivity
30	250.7	0.0639	2.85
35	250.1	0.0682	2.84
40	249.3	0.0752	2.83
45	248.6	0.0852	2.82
50	247.6	0.0972	2.81
55	246.7	0.110	2.80
60	245.6	0.1290	2.79
65	244.6	0.1480	2.78
70	243.3	0.1760	2.76
75	242.2	0.2040	2.75
80	241.0	0.2380	2.74
85	239.6	0.2880	2.72
90	237.3	0.3820	2.69

5. เอสเทอร์บริสุทธิ์

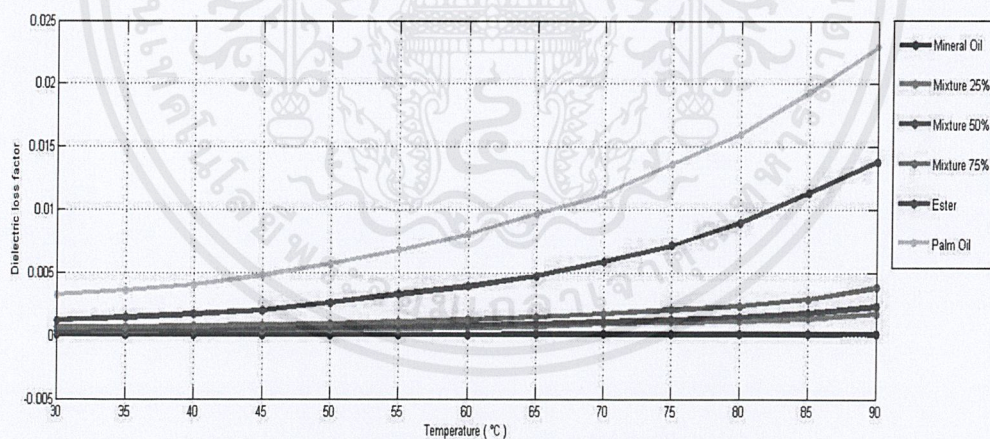
ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบวัดค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเหลว (ϵ_r) และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$) ของเอสเทอร์

Temperature (°C)	Capacitance (pF)	$\tan \delta$ (%)	Permittivity
30	285.3	0.1240	3.23
35	283.7	0.1460	3.21
40	282.4	0.1710	3.20
45	281.4	0.2010	3.19
50	279.6	0.2650	3.17
55	277.3	0.3290	3.14
60	276.4	0.3910	3.13
65	275.5	0.4750	3.12
70	273.5	0.5900	3.10
75	271.0	0.7160	3.08
80	270.2	0.8960	3.06
85	269.5	1.1300	3.05
90	267.6	1.3800	3.03

6. น้ำมันปาล์ม

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบวัดค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเหลว (ϵ_r) และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) ของน้ำมันปาล์ม

Temperature (°C)	Capacitance (pF)	$\tan\delta$ (%)	Permittivity
30	285.0	0.3240	3.23
35	284.2	0.3590	3.22
40	283.6	0.4040	3.21
45	282.4	0.4800	3.20
50	280.1	0.5690	3.18
55	279.2	0.6790	3.17
60	277.5	0.8030	3.14
65	276.4	0.9670	3.13
70	274.3	1.1200	3.11
75	273.0	1.3600	3.10
80	272.1	1.6000	3.09
85	270.3	1.9300	3.06
90	269.0	2.2900	3.05



รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบ $\tan\delta$ กับฉนวนเหลวชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

จากการทดสอบคุณสมบัติของเพอร์สโบริดที่อิมเพร็กเน็ตด้วยฉนวนเหลว และคุณสมบัติของฉนวนเหลวชนิดต่างๆ สามารถสรุปออกมาได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. จากการทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพอร์สโบริดที่อิมเพร็กเน็ตด้วยฉนวนเหลวต่างชนิดกัน พบว่า เพอร์สโบริดที่อิมเพร็กเน็ตด้วยฉนวนเหลวชนิดเอสเทอร์ผสมน้ำมันแร่ที่เอสเทอร์ 75 % มีค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับสูงสุดที่ระดับแรงดัน 64.47 kV และเพอร์สโบริดที่อิมเพร็กเน็ตด้วยฉนวนเหลวชนิดเอสเทอร์ผสมน้ำมันแร่ที่เอสเทอร์ 25 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับต่ำสุดที่ 58.26 kV

2. จากการทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว โดยทำการทดสอบทั้งขั้วบวกและลบ พบว่า ฉนวนเหลวชนิดน้ำมันแร่ มีค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสูงที่สุดทั้งขั้วบวกและลบ โดยขั้วบวกมีค่า 85.42 kV และขั้วลบมีค่าต่ำกว่า -150 kV

3. จากการทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของฉนวนเหลวต่างชนิดกัน ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน IEC 156 เมื่อนำค่ามาเปรียบเทียบกับค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงตามมาตรฐาน ซึ่งกำหนดว่าต้องมีค่ามากกว่า 25-30 kV พบว่า เอสเทอร์ มีค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับสูงสุดที่ระดับแรงดัน 59.67 kV และเอสเทอร์ผสมน้ำมันแร่ที่เอสเทอร์ 25 % มีค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับต่ำสุดที่ระดับแรงดัน 45.5 kV

4. จากการทดสอบวัดค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับของฉนวนเหลว พบว่า เอสเทอร์ และน้ำมันปาล์ม มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสูงที่สุดในทุกช่วงของอุณหภูมิ และฉนวนเหลวทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่น้ำมันแร่ มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับต่ำที่สุด และจากการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60247 เมื่อนำค่ามาเปรียบเทียบกับค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันแร่ตามมาตรฐาน ซึ่งกำหนดให้มีค่าไม่เกิน 0.3 % พบว่า น้ำมันปาล์มมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสูงที่สุด และน้ำมันแร่มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับต่ำที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการสร้างเครื่องป้อนแรงดันแบบอัตโนมัติ ให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดเอาไว้ เพราะถ้าอัตราการขึ้นแรงดันในการทดสอบแต่ละครั้งที่ไม่เท่ากัน ก็จะทำให้ผลการทดสอบมีความผิดพลาดไป
2. ควรมีการควบคุมความชื้นให้กับระบบ เพราะความชื้นอาจไม่คงที่แม้จะทดสอบที่เวลาเดียวกันในแต่ละวันก็ตาม เนื่องจากความชื้นมีผลอย่างมากต่อการทดสอบ ซึ่งจะทำให้ผลการทดสอบที่ได้มีความผิดพลาดไป
3. ในการทดสอบแต่ละครั้งควรให้ฉนวนเหลวแต่ละชนิดมีตะกอน หรือสิ่งแปลกปลอม น้อยที่สุด
4. การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสบลับของเพอร์สบอร์ดที่อิมเพรกเน็ตด้วย ฉนวนเหลวนั้น ต้องอาศัยการสังเกตและความว่องไวในการตัดวงจรทันที เมื่อเกิดการเบรกดาวน หากมีการตัดวงจรช้า จะทำให้เกิดผลเสียต่ออุปกรณ์ทดสอบในระบบ และเกิดเขม่าภายในฉนวนเหลวมามากขึ้น

5. การ test parameter ?

เอกสารอ้างอิง

- [1] ผศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช, “วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า(เล่ม 1) ฉนวนและวัสดุฉนวนไฟฟ้า **Electrical Engineering Materials**”, พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพมหานคร: ห้างหุ้นส่วนจำกัด มิน เซอร์วิส ซัพพลาย, 2557.
- [2] นายธนุส บุญเรืองศรี และคณะ, “การศึกษาค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกสำหรับฉนวนน้ำมัน”, ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2552.
- [3] วิชาการปาล์มน้ำมัน, [ออนไลน์]. Available: <http://www.doa.go.th/palm>. [ที่เข้าถึง 5 เม.ย. 2559].
- [4] นายนิริศ เตชะพะโลกุล และคณะ, “การศึกษาและวินิจฉัยหม้อแปลงไฟฟ้า”, ปรินญาณิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2557.
- [5] Amanpreet Singh Gill, “**The Design of transformer oil**”, IEEE Conf. Elect. Ins., Anaheim, CA USA, April 5-5, 2000: 247-250.
- [6] Pawel Rozga, Dr., PhD Eng., “**PROPERTIES OF NEW ENVIRONMENTALLY FRIENDLY BIODEGRADABLE INSULATING FLUIDS FOR POWER TRANSFORMERS**”, 1st Annual International Interdisciplinary Conference, Azores, Portugal, 24-26 April, 2013
- [7] สำรวย สังข์สะอาด, “**วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**”, พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์, 2549.
- [8] Kraus, J.D., “**Electromagnetics**”, McGrawHill International Edition, 1992, p. 43, 91.
- [9] Zaengl, W.S., “**Hochspannungstechnik (Einführung)**”, Institut für Hochspannungstechnik, ETH-Zurich, July 1984, p. 4.
- [10] Nelson, J.K., “**An assessment of the physical basis for the application of design criteria for dielectric structures**”, IEEE tran.El, vol.24 (1989): 835-847.
- [11] สุรพล ดำรงกิตติกุล, “**วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**”, พิมพ์ครั้งที่ 1, เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2535.
- [12] Hauschild, W., and Mosch, W., “**Statistical techniques for high voltage engineering**”, Peter Peregrinus Ltd, 1992.
- [13] Oommen, T.V., and Lindgren, S.R., “**Streaming electrification study of transformer insulation system using a paper tube model**”. IEEE Trans. On **Power Delivery**, vol.5, no.2 (1990): 835-847.
- [14] IEC 60243-1, Edition 3.0 – 2013, Electric strength of insulating materials – Test methods – Part 1: Tests at power frequencies.
- [15] IEC 60897, First Edition 1987 – 03 Methods for the determination of the lightning impulse breakdown voltage of insulating

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] IEC 156, Second Edition 1995 – 07 Insulating liquids – Determination of the breakdown voltage at power frequency – Test method
- [17] IEC 60296, Edition 4.0 2012 – 02 Fluids for electrotechnical applications – Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear
- [18] IEC 62770, Edition 1.0 2013 – 11 Fluids for electrotechnical applications – Unused natural esters for transformers and similar electrical equipment





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวินิจฉัยฉนวนเหลวสำหรับหม้อแปลง

DIAGNOSIS OF LIQUID INSULATION FOR TRANSFORMERS

ภัทริน กิจเจริญ, ภาวิษฐ์ โหมศสุวรรณ, กุศลเรศ เหลี่ยมโสภณ, เมธากร สมบุญ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-Mail: phattarin.ki@gmail.com

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ และแรงดันอิมพัลส์ของเพรสบอร์ดที่อิมเพกต์ด้วยฉนวนเหลวชนิดต่างๆ ได้แก่ น้ำมันหม้อแปลง เอสเทอร์ธรรมชาติ และน้ำมันปาล์ม โดยได้สร้างชุดทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ตามมาตรฐาน IEC 60243-1 และชุดทดสอบแรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 60897 ในการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 8 กรณี เพื่อหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ และแรงดันอิมพัลส์ของเพรสบอร์ดที่อยู่ภายในฉนวนเหลวชนิดต่างๆ ฉนวนเหลวผสมระหว่างน้ำมันหม้อแปลงกับเอสเทอร์ธรรมชาติ ในอัตราส่วนที่ต่างกัน แล้วเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวน์และแรงดันอิมพัลส์ที่เกิดขึ้น รวมทั้งใช้โปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์ (FEM) จำลองหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้า เพื่อเปรียบเทียบกับทดสอบจริง ช่วยให้สามารถคาดเดาจุดที่เกิดความเสียหายจากการทดสอบความทนต่อแรงดันเบรกดาวน์และแรงดันอิมพัลส์ จากการทดสอบพบว่า ค่าแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวผสม (น้ำมันหม้อแปลง 25% กับเอสเทอร์ธรรมชาติ 75%) มีค่าสูงสุด และแรงดันอิมพัลส์ของเพรสบอร์ดในเอสเทอร์ธรรมชาติ และน้ำมันปาล์ม มีค่าสูงสุด

คำสำคัญ: น้ำมันแร่, เอสเทอร์, น้ำมันปาล์ม, น้ำมันผสม, เพรสบอร์ด

Abstract

This paper is a study breakdown voltage and impulse voltage of the pressboard impregnated with various types of liquid insulation, i.e., mineral oil, natural ester, palm oil and mineral oil mixed with different volume of natural ester. Breakdown's test vessel was designed following IEC standard 60243-1 and impulse's test vessel was designed following IEC standard 60897 respectively. Experimentation was performed into 8 cases to find the breakdown voltage and the impulse voltage of pressboard impregnated with such liquid insulation and mixtures between mineral oil and natural ester in various proportions. The electric field was analyzed by using finite element program (FEM). It was found that the breakdown voltage of mixture (mineral oil 25%, ester 75%) was higher than the breakdown voltage of natural ester, mineral oil, and palm

oil respectively. Besides, the positive impulse breakdown voltage of mineral oil was higher than the impulse breakdown voltage of natural ester, and palm oil respectively. Moreover, the negative impulse breakdown voltage of mineral oil was higher than the impulse breakdown voltage of natural ester, and palm oil respectively. Furthermore, testing results are related with the analysis.

Keyword: mineral oil, ester, palm oil, oil mixtures, press boards

1. บทนำ

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมโยงระหว่างระบบไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้าต่างกัน โดยจะทำหน้าที่เพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะกับการส่ง การจ่าย และการใช้ไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้าจึงนับเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในบรรดาอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งหลาย ในปัจจุบันหม้อแปลงไฟฟ้านิยมใช้น้ำมันแร่ในการเป็นฉนวนเหลวภายในตัวหม้อแปลง แต่น้ำมันแร่นั้นส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและใช้เวลาในการย่อยสลายนาน ทำให้เกิดการศึกษาค้นคว้าและวิเคราะห์หาคุณสมบัติของฉนวนเหลวชนิดอื่นมาทดแทน เช่น เอสเทอร์ และน้ำมันปาล์ม โดยประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมจึงสามารถหาทรัพยากรได้ง่าย และสามารถผลิตเองได้ ดังนั้นการวิเคราะห์คุณสมบัติของฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เพื่อศึกษาแนวโน้มคุณสมบัติของฉนวนเหลวภายในหม้อแปลงและเพื่อหาแนวทางการใช้ฉนวนเหลวชนิดอื่นทดแทนได้ในอนาคตต่อไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำมันหม้อแปลง [1]

น้ำมันหม้อแปลงเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากกรกลั่นปิโตรเลียมที่ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนหลายชนิด สามารถจำแนกตามโครงสร้างโมเลกุลได้ 3 ประเภท คือ อลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน อลิไซคลิกไฮโดรคาร์บอน และอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

2.2 เอสเทอร์ [2]

เอสเทอร์นั้นมีหลายรูปแบบและถูกใช้ในงานที่หลากหลาย โดยเอสเทอร์ที่ใช้ในหม้อแปลงนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทคือ โดยสังเคราะห์ และโดยธรรมชาติ

เอสเทอร์สังเคราะห์นั้นถูกผลิตจากการเลือกวัตถุดิบอย่างละเอียดเพื่อปรับปรุงให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่นำไปใช้งานที่เฉพาะเจาะจง เอสเทอร์ที่ได้จากธรรมชาตินั้นสามารถสกัดจากเมล็ดของพืช เช่น ถั่วเหลือง ดอกทานตะวัน เรพซีด เอสเทอร์จากธรรมชาตินั้นทนต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี จึงเหมาะที่จะใช้กับอุปกรณ์แบบปิดเพื่อไม่ให้เอสเทอร์สัมผัสกับอากาศ อีกทั้งยังมีจุดไหลเทสูงเมื่อเทียบกับเอสเทอร์สังเคราะห์ (จุดไหลเทคืออุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันยังเป็นของเหลวพอที่จะไหลได้) ดังนั้นจึงเหมาะกับการใช้งานภายในเพื่อให้น้ำมันยังคงมีสภาพเป็นของเหลว

2.3 น้ำมันปาล์ม [3]

น้ำมันปาล์มสามารถสกัดได้จาก 2 ส่วน คือ ส่วนเปลือกนอกประมาณ 16 – 25 % ของน้ำหนักทะลาย และส่วนเนื้อในประมาณ 3 – 5 % ของน้ำหนักทะลายโดยทั่วไปน้ำมันปาล์มดิบมีองค์ประกอบดังต่อไปนี้คือ

1. Glycerides ประมาณ 95 %
2. Fatty acids ประมาณ 3 - 5 %
3. Minor & Trace component ประมาณ 1%

จากกระบวนการสกัดปาล์มน้ำมัน สามารถแบ่งน้ำมันปาล์มตามวัตถุดิบที่ใช้สกัดเป็น 2 ชนิด คือ น้ำมันปาล์มดิบ และน้ำมันเมล็ดในปาล์มดิบ ซึ่งมีองค์ประกอบกรดไขมันที่แตกต่างกัน โดยน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเมล็ดในปาล์ม มีองค์ประกอบของกรดไขมันอิ่มตัว:กรดไขมันไม่อิ่มตัวในสัดส่วนประมาณ 50:50 และ 82:18 ตามลำดับ

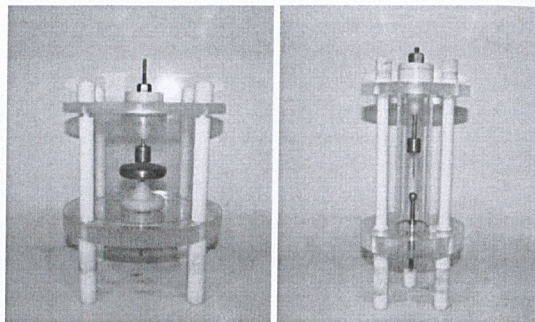
3. การออกแบบการทดสอบและการประกอบสร้างชุดทดสอบ

3.1 ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพอร์สอร์ค

อิเล็กโตรด ที่ใช้ในชุดทดสอบนั้นอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC 60243-1 ทำจากวัสดุทองเหลืองโดยจะประกอบไปด้วยสองอิเล็กโตรดทรงกระบอกทำจากทองเหลืองที่มีขอบโค้งมนรัศมี 3 mm อิเล็กโตรดที่หนึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 ± 1 mm และมีความสูง 25 mm ส่วนอิเล็กโตรดที่สองมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 ± 1 mm และมีความสูง 15 mm

3.1.2 ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ที่ฝ่าของฉนวนเหลว

ที่บรรจุน้ำมันและอิเล็กโตรดของชุดทดสอบถูกออกแบบตามมาตรฐาน IEC 60897 โดยส่วนบรรจุน้ำมันมีปริมาตร 300 ml. ใช้วัสดุอะคริลิกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 50 mm หนา 3 mm สูง 195 mm อิเล็กโตรดทรงกลมทำจากวัสดุทองเหลืองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 mm และเชื่อมที่จากทั้งสองด้าน โดยที่ปลายเชื่อมมีรัศมีความโค้ง 40 µm

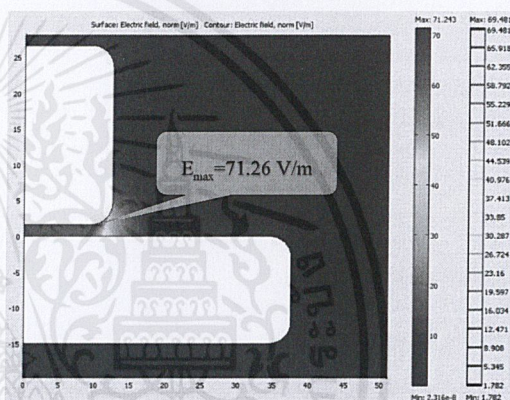


ก) ข)

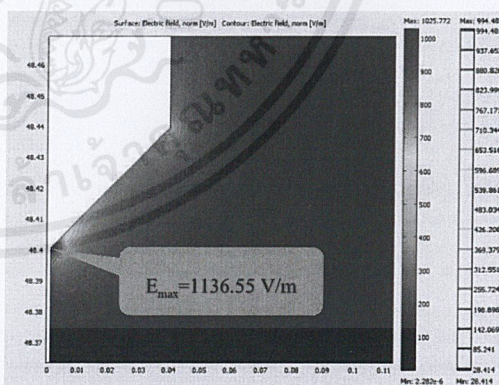
รูปที่ 1 ชุดทดสอบ

ก) ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพอร์สอร์ค

ข) ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ที่ฝ่า



รูปที่ 2 แบบจำลองสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพอร์สอร์ค



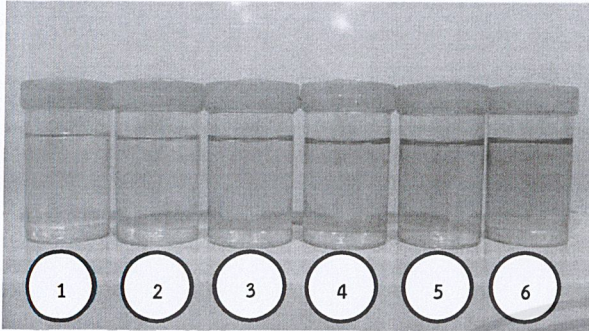
รูปที่ 3 แบบจำลองสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ที่ฝ่า

3.2 การเตรียมฉนวนเหลวสำหรับการทดสอบ

ฉนวนเหลวที่ใช้ในการทดสอบมี 2 กลุ่ม คือ ฉนวนเหลวบริสุทธิ์ และฉนวนเหลวผสม ฉนวนเหลวบริสุทธิ์ ได้แก่ น้ำมันแร่ เอสเทอร์ และน้ำมันปาล์ม ฉนวนเหลวผสม ได้จากการผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอสเทอร์ธรรมชาติลงในน้ำมันแร่ตามอัตราส่วน 25%, 50%, 75% กวนให้เข้ากันแล้วให้ความร้อนที่ 60°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และก่อนทำการทดสอบจะนําน้ำมันเป็นเวลา 12 ชั่วโมง



รูปที่ 4 ชนิดของฉนวนเหลวสำหรับการทดสอบ

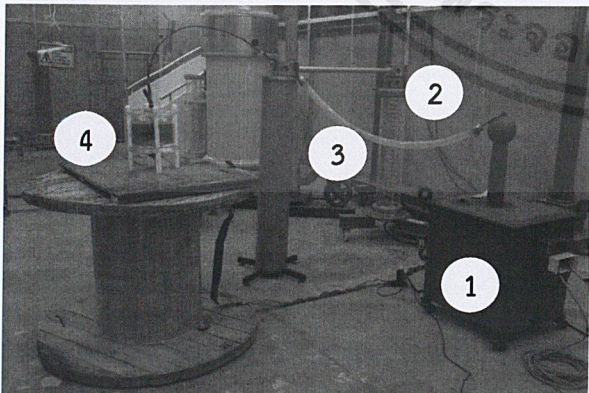
1. น้ำมันแร่บริสุทธิ์
2. เอสเทอร์ผสมในน้ำมันแร่ 25%
3. เอสเทอร์ผสมในน้ำมันแร่ 50%
4. เอสเทอร์ผสมในน้ำมันแร่ 75%
5. เอสเทอร์บริสุทธิ์
6. น้ำมันปาล์ม

3.3 การเตรียมเพรสบอร์ดสำหรับการทดสอบ

1. ตัดเพรสบอร์ดให้มีขนาด 10×10 cm
2. อบเพรสบอร์ดเพื่อลดความชื้นที่อุณหภูมิ 80 °C ในตู้อบสุญญากาศเป็นเวลา 6 ชั่วโมง
3. อิมเพกเน็ตเพรสบอร์ดด้วยฉนวนเหลวทั้ง 6 ชนิดที่อุณหภูมิ 60°C ในตู้อบสุญญากาศเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

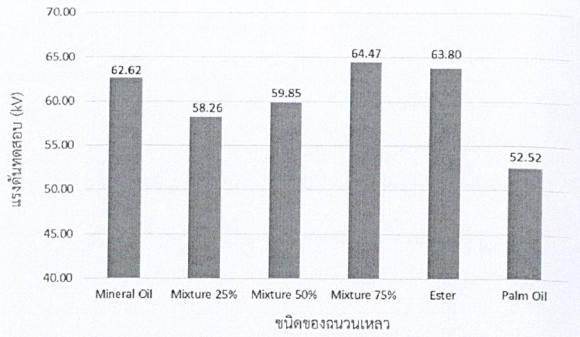
4. การทดสอบและผลการทดสอบ

4.1 การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพรสบอร์ดที่อิมเพกเน็ตด้วยฉนวนเหลว



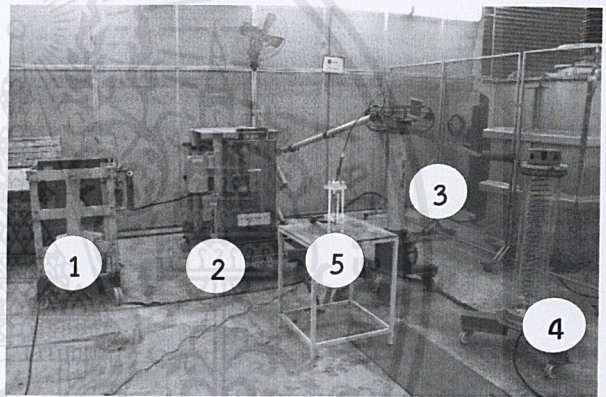
รูปที่ 5 วงจรทดสอบแรงดันกระแสสลับของเพรสบอร์ดที่อิมเพกเน็ตด้วยฉนวนเหลว

1. หม้อแปลงทดสอบ
2. โวลต์เกจไอโคเรอร์
3. ตัวต้านทานน้ำ
4. ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันของเพรสบอร์ด



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพรสบอร์ดที่อิมเพกเน็ตด้วยฉนวนเหลวชนิดต่างๆ

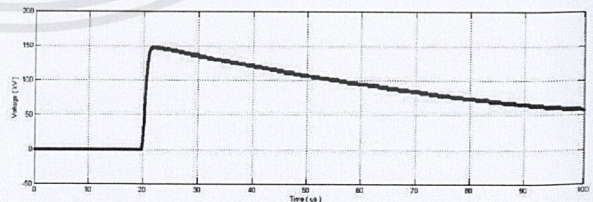
4.2 การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว



รูปที่ 7 วงจรทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

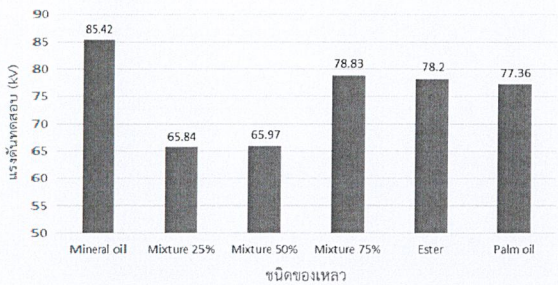
1. ชุดอัดประจุ
2. เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
3. โวลต์เกจไอโคเรอร์ตัวเก็บประจุ
4. โวลต์เกจไอโคเรอร์
5. ชุดทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว

4.2.1 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว



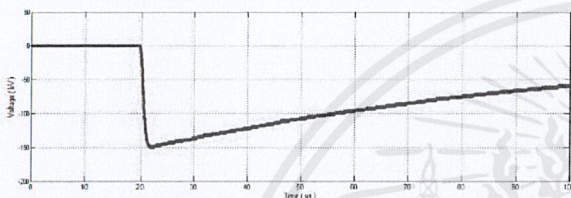
รูปที่ 8 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว 1.2/50 µs ที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

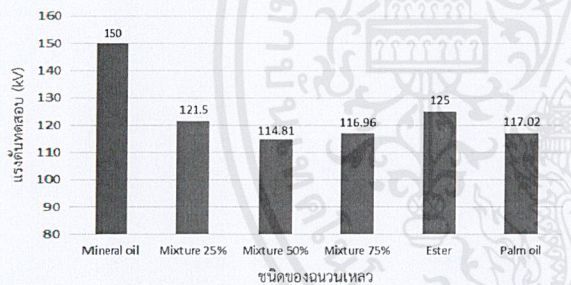


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวกับจำนวนเลขชนิดต่างๆ

4.2.2 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว



รูปที่ 10 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว 1.2/50 µs ที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวกับจำนวนเลขชนิดต่างๆ

5. สรุปผลการทดสอบ

จากผลทดสอบวัดค่าความทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพอร์สอร์คที่อิมเพกเน็ทด้วยฉนวนเหลวต่างชนิดกัน สามารถสรุปได้ว่าเพอร์สอร์คที่อิมเพกเน็ทด้วยฉนวนเหลวชนิดเอสเทอร์ผสมน้ำมันแร่ที่เอสเทอร์ 75 % มีค่าความทนต่อแรงดันกระแสสลับสูงสุดที่ระดับแรงดัน 64.47 kV และเพอร์สอร์คที่อิมเพกเน็ทด้วยฉนวนเหลวชนิดเอสเทอร์ผสมน้ำมันแร่ที่เอสเทอร์ 25 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความทนต่อแรงดันกระแสสลับต่ำสุดที่ 58.26 kV

จากผลทดสอบการวัดค่าความทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว โดยทำการทดสอบทั้งชั่วคราวและลบ สามารถสรุปได้ว่า

ฉนวนเหลวชนิดน้ำมันแร่ มีค่าความทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าสูงที่สุดทั้งชั่วคราวและลบ โดยชั่วคราวมีค่า 85.42 kV และชั่วคราวมีค่าต่ำกว่า -150 kV


6. กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.พีรภูมิ ยุทธโกวิท และคุณปณชวีร์ ฉายศิริ ที่ได้กรุณาให้ข้อแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงงานมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไข ปริญญาานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี ขอขอบคุณที่สุรศักดิ์ น้อยหอม ที่กิตติพิศ จริยานุรัตน์ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ที่ได้ให้ความเอาใจใส่ และช่วยเหลือในด้านต่างๆ ด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณ คุณศักดิ์ โรจน์ เจ้าของบริษัท ละมุลวิศวกรรม จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เกี่ยวกับเครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบ จนการทดลองเสร็จสมบูรณ์

7. เอกสารอ้างอิง

[1] ผศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒน เดช, วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า(เล่ม 1) ฉนวนและวัสดุฉนวนไฟฟ้า Electrical Engineering Materials, พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพมหานคร: ห้างหุ้นส่วนจำกัด มิน เซอร์วิส ซัพพลาย, 2557.
 [2] Pawel Rozga, Dr., PhD Eng., PROPERTIES OF NEW ENVIRONMENTALLY FRIENDLY BIODEGRADABLE INSULATING FLUIDS FOR POWER TRANSFORMERS, 1st Annual International Interdisciplinary Conference, Azores, Portugal, 24-26 April, 2013
 [3] วิชาการป่าคัม น้ำมัน, [ออนไลน์]. Available: <http://www.doa.go.th/palm>. [ที่เข้าถึง 5 เม.ย. 2559].



ภาคผนวก ข
มาตรฐาน IEC 60243, Edition 3.0 – 2013
Electric strength of insulating materials – Test methods –
Part 1 : Tests at power frequencies

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

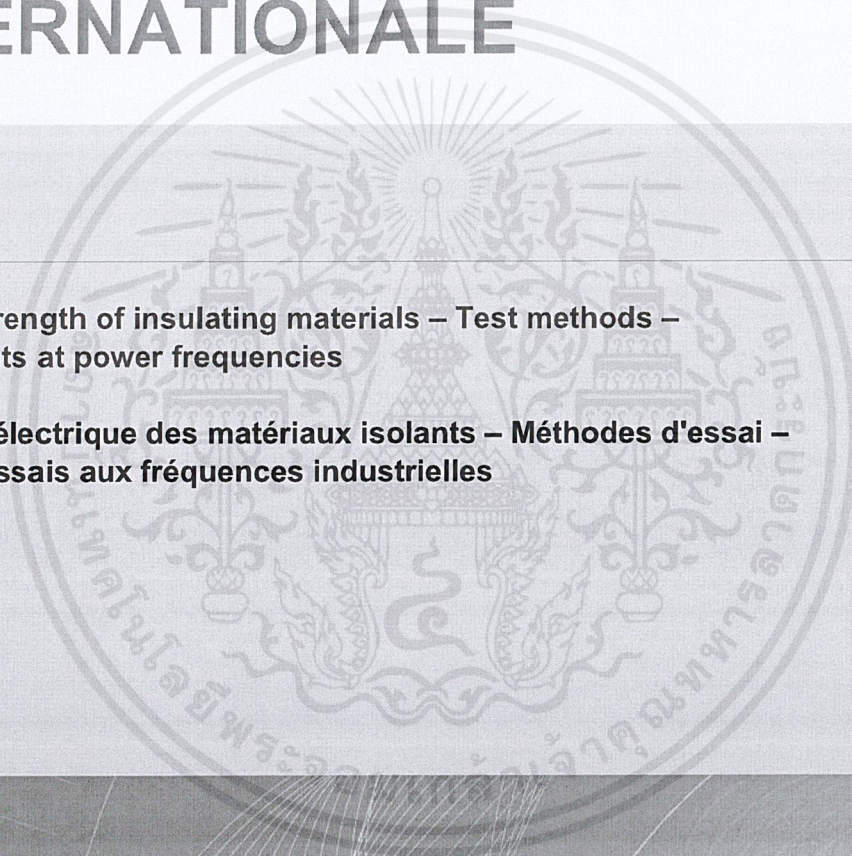


INTERNATIONAL STANDARD

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**



- 3) the presence of gaseous inclusions, moisture or other contamination.
- b) Test conditions
 - 1) the frequency, waveform and rate of rise or time of application of the voltage;
 - 2) the ambient temperature, pressure and humidity;
 - 3) the configuration, the dimensions, and thermal conductivity of the test electrodes;
 - 4) the electrical and thermal characteristics of the surrounding medium.

The effects of all these factors shall be considered when investigating materials for which no experience exists. This standard defines particular conditions which give rapid discrimination between materials and which can be used for quality control and similar purposes.

The results given by different methods are not directly comparable but each may provide information on relative electric strengths of materials. The electric strength of most materials decreases as the thickness of the specimen between the electrodes increases and as the time of voltage application increases.

The measured electric strength of most materials is significantly affected by the intensity and the duration of surface discharges prior to breakdown. For designs which are free from partial discharges up to the test voltage, it is very important to know the electric strength without discharges prior to breakdown. However, the methods in this standard are generally not suitable for providing this information.

Materials with high electric strength will not necessarily resist long-term degradation processes such as heat, erosion or chemical deterioration by partial discharges, or electrochemical deterioration in the presence of moisture, all of which may cause failure in service at much lower stress.

5 Electrodes and specimens

5.1 General

The metal electrodes shall be maintained smooth, clean and free from defects at all times. Electrode arrangements for tests on boards and sheets perpendicular to the surface are shown in Figure 1.

NOTE This maintenance becomes more important when thin specimens are being tested. Stainless steel electrodes e.g. minimize electrode damage at breakdown.

The leads to the electrodes shall not tilt or otherwise move the electrodes, nor affect the pressure on the specimen, nor appreciably affect the electric field configuration in the neighbourhood of the specimen.

When very thin films (for example $<5 \mu\text{m}$ thick) are to be tested, the standards for those materials shall specify the electrodes and special procedures for handling and specimen preparation.

5.2 Tests perpendicular to the surface of non-laminated materials and normal to laminate of laminated materials

5.2.1 Boards and sheet materials, including pressboards, papers, fabrics and films

5.2.1.1 Unequal electrodes

The electrodes shall consist of two metal cylinders with the edges rounded to give a radius of $(3 \pm 0,2)$ mm. One electrode shall be (25 ± 1) mm in diameter and approximately 25 mm high. The other electrode shall be (75 ± 1) mm in diameter and approximately 15 mm high. These two electrodes shall be arranged coaxially within 2 mm as in Figure 1a.

Dimensions en millimètres

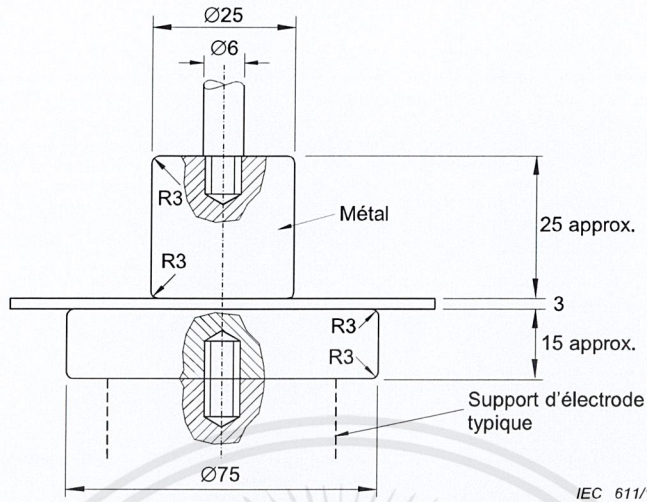


Figure 1a – Électrodes de dimensions inégales

Dimensions en millimètres

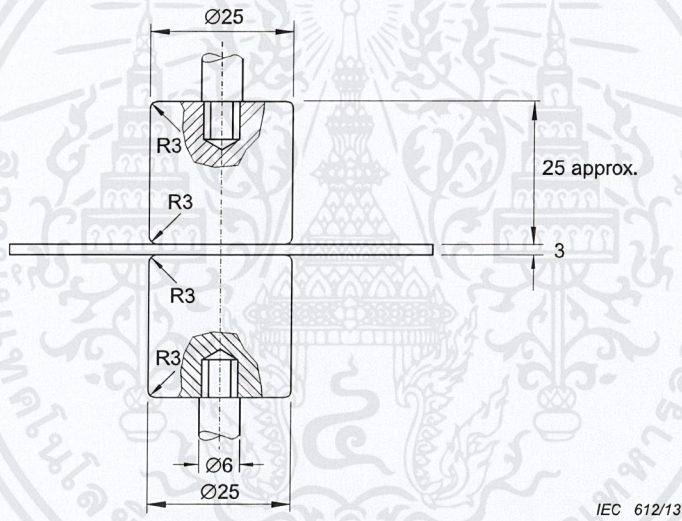


Figure 1b – Électrodes de même diamètre

Dimensions en millimètres

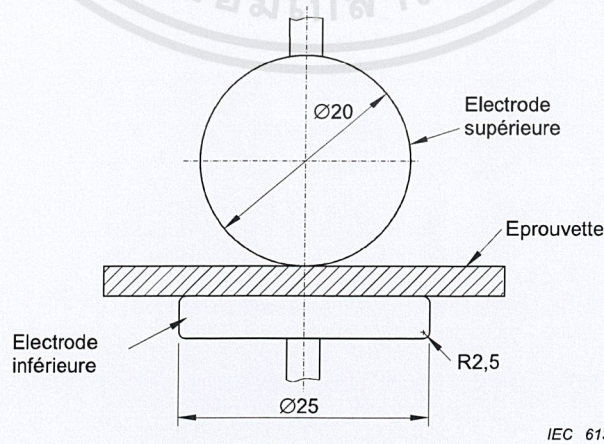


Figure 1c – Électrodes à bille et plaque

Toutes les tolérances pour les mesures linéaires ± 1 mm pour le rayon ± 2 mm

Figure 1 – Disposition des électrodes pour les essais des plaques

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนและfeuilles perpendiculairement à la surface ให้หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค

มาตรฐาน IEC 60897, First Edition 1987 - 03

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD

97
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 référence
Reference number
CEI/IEC 60897: 1987

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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.

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.

TABLE I
Selection of initial voltage and gap

Expected voltage at 15 mm	$(U_e(\text{kV}))$	$50 \leq U_e \leq 100$	$100 < U_e \leq 250$	$U_e > 250$
Gap	(mm)	25 ± 0.1	15 ± 0.1	10 ± 0.1
Initial voltage	$(U_i(\text{kV}))$	$1.5 U_e - 25$	$U_e - 50$	150
Step voltage	(kV)	5	5	10

8.1.3 Precision

The precision of a test method is characterized by its repeatability r and its reproducibility R (see ISO Standard 5725). These latter values for mineral insulating oils only, tested according to method A are given in Table II.

TABLE II
Repeatability and reproducibility of test method A for mineral transformer oil

Polarity of the impulses	r (%)	R (%)
negative	7	10
positive	15	30

Notes 1. — The values of r and R are expressed in per cent of the mean breakdown voltage.

2. — The values given in Table II are determined from results of tests performed on three different mineral insulating oils by seven laboratories.

When the method is correctly applied there is 5% probability that the difference between two "single results" (see note) obtained from two tests performed on the same oil under the same conditions (same operator, same apparatus, same laboratory and short interval of time), will exceed 7% of U in the case of negative impulses and 15% of U in the case of positive impulses, U being the average of the two results.

When two "single results" are obtained from tests performed on the same oil but under different conditions (different operators, different apparatus, different laboratories), there is 5% probability that the difference between two results will exceed 10% of U in the case of negative impulses and 30% of U in the case of positive impulses.

If the difference between the two results exceeds the value given in Table II, further action is required, for example verification of the apparatus and repetition of the tests.

Note. — A "single result" is the average of five breakdown voltages as specified in Sub-clause 8.1.1.

8.2 Method B—Sequential test

8.2.1 Principle

Experience shows that when an impulse wave is applied to the test-cell at a crest level close to the breakdown voltage measured by method A a breakdown may or may not occur. Thus the notion of breakdown probability P , which is a function of U but of unknown value, should be introduced. The sequential test permits the comparison of this breakdown probability with an arbitrary value P_0 and the testing hypothesis:

$H_0: P \leq P_0$, called the null hypothesis,
against the alternative hypothesis $H_1: P > P_0$ (see Appendix A).

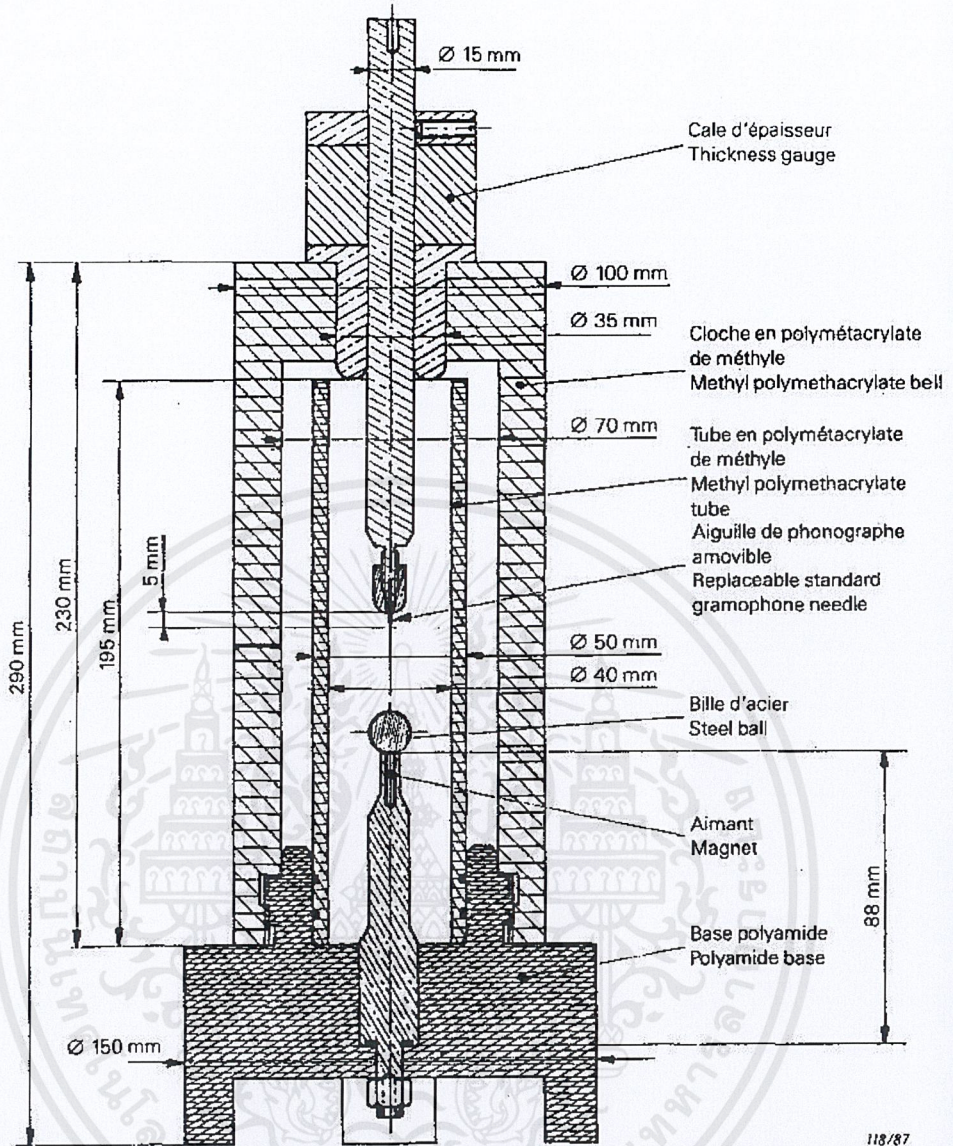



FIG. 1.— Système d'électrodes pointe-sphère pour essais de choc de liquides isolants.
Point-to-sphere electrode system for impulse strength of insulating liquids.



ภาคผนวก ง
มาตรฐาน IEC 156, Second Edition 1995 - 07
Insulating liquids – Determination of the breakdown voltage
at power frequency – Test method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD

CEI
IEC
156

Deuxième édition
Second edition
1995-07

Isolants liquides –
Détermination de la tension de claquage
à fréquence industrielle –
Méthode d'essai

Insulating liquids –
Determination of the breakdown voltage
at power frequency –
Test method

© CEI 1995 Droits de reproduction réservés — Copyright — all rights reserved

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale 3, rue de Varembe Genève, Suisse



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

Pour prix, voir catalogue en vigueur
For price, see current catalogue

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Most current limiting as above, combined with isolation of the step-up transformer primary within 10 ms, is adequate for hydrocarbons. More satisfactory performance for silicone liquids obtained by short circuiting of the primary circuit of the transformer by a low-impedance or by use of a low-voltage device for detection of breakdown acting within a few microseconds. This device may be of either analogue (for example, modulating amplifier) or switching (for example, transistor) type. By the use of this device, the output voltage of the step-up transformer shall be reduced to zero within 1 ms of detection of breakdown, and shall not thereafter increase again until the next step of the test sequence is commenced.

5 Measuring device

For the purpose of this standard, the magnitude of the test voltage is defined as its peak value divided by $\sqrt{2}$.

This voltage may be measured by means of a peak-voltmeter or by means of another type of voltmeter connected to the input or output side of the testing transformer, or to a special winding provided thereon; the instrument then used shall be calibrated against a standard up to the full voltage which it is desired to measure.

A method of calibration which has been found satisfactory is the use of a transfer standard. This is an auxiliary measuring device which is connected in place of the test cell between the high-voltage terminals to which it presents the same impedance as the filled test cell. The auxiliary device is separately calibrated against a primary standard, for example, a sphere gap in accordance with IEC 52 (see also IEC 60).

Test assembly

1 Test cell

The volume of the cell shall be between 350 ml and 600 ml.

The cell shall be made of material that is electrically insulating, transparent and chemically inert, resistant to the insulating liquid and the cleaning agents which may be used.

The cell shall be provided with a cover and shall be designed to permit easy removal of the electrodes for cleaning and maintenance.

Examples of suitable cell designs are given in figures 1 and 2.

2 Electrodes

The electrodes shall be made either of brass, bronze or austenitic stainless steel. They shall be polished and, in shape, either spherical (12,5 mm to 13,0 mm diameter) as shown in figure 1 or partially spherical of the shape and dimensions given in figure 2. The axis of the electrode system shall be horizontal, and at least 40 mm below the surface of the test liquid in the cell. No part of the electrode shall be closer than 12 mm to the cell wall or stirrer. The gap between the electrodes shall be $2,50 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$.

The electrodes shall be examined frequently for pitting or other damage, and shall be maintained or replaced as soon as such damage is observed.

4.3 *Stirring* (optional)

The test may be conducted with or without stirring. Differences between tests with or without stirring have not been found statistically significant. A stirrer, however, may be convenient especially with apparatus capable of automatic operation.

Stirring may be achieved by means of a two-bladed impeller of effective diameter 20 mm to 25 mm, axial depth 5 mm to 10 mm, rotating at a speed of 250 r.p.m to 300 r.p.m. The impeller shall not entrain air bubbles and preferably rotate in such a direction that the resulting liquid flow is directed downward. It shall be constructed so that it is easily cleaned.

Stirring by means of a magnetic bar (20 mm to 25 mm in length and 5 mm to 10 mm in diameter) is an acceptable alternative when there is no risk of removing magnetic particles.

The dimensions of the stirring device shall conform to the clearance requirements in 4.2.

5 Preparation of electrodes

New electrodes, pitted electrodes, electrodes which have not been properly stored for a considerable time shall be cleaned by the following procedure:

- clean all surfaces with a suitable volatile solvent and allow the solvent to evaporate;
- polish with fine abrasive powder (for example, jeweller's rouge) or abrasive paper or cloth (for example, crocus cloth);
- after polishing, clean with petroleum spirit (reagent quality: boiling range 60 °C - 80 °C) followed by acetone (reagent quality);
- assemble the electrodes in the cell, fill with a clean, unused insulating liquid of the type to be tested next, and raise the electrode voltage to breakdown 24 times.

6 Test assembly preparation

It is recommended that a separate test cell assembly be reserved for each insulating liquid type.

Test assemblies shall be stored in a dry place, covered and filled with dry insulating liquid of the type in regular use in the cell.

On change of the type of liquid under test, remove all residues of the previous liquid with an appropriate solvent, rinse the assembly with clean, dry liquid of the same type as that to be tested, drain and refill.

7 Sampling

7.1 Sample containers

Sample size should be approximately three times the capacity of the test cell.

Appropriate sample containers shall comply with IEC 475. An amber glass bottle is the preferred container. Clear glass bottles may be used but they shall be shielded from direct light until ready to be tested. Plastic containers which are not attacked by the liquid to be tested may be used, but these shall not be used more than once. For sealing, screw caps with polyolefine or polytetrafluoroethylene insert are preferred.

Containers and caps shall be cleaned by washing with a suitable solvent to remove residues of an earlier sample. Containers shall next be rinsed with acetone, traces of which shall be removed by blowing with warm air.

After cleaning, containers shall be immediately capped and kept sealed until used.

7.2 Sampling technique

Sampling of new and used insulating liquids shall be carried out in full compliance with procedures detailed in IEC 475.

When sampling, containers should be almost filled with sample, leaving about 3 % of the container volume as free air space.

Breakdown voltage is extremely sensitive to the slightest contamination of the sample by water and particulate matters. Special reference is made to precautions necessary to avoid contamination of the sample and the need for trained personnel and experienced supervision.

Unless otherwise required, the sample is taken where the liquid is likely to be most contaminated, usually at the lowest point of the container holding it.

8 Condition of the sample

The test is carried out, unless otherwise specified, on the sample as received without drying or degassing.

At the time of test, the temperatures of the test liquid and ambient air shall not differ by more than 5 °C and for referee tests the liquid temperature shall be 20 °C ± 5 °C.

9 Test procedure

9.1 Sample preparation

Immediately before filling the test cell, the sample container is gently agitated and turned over several times in such a way as to ensure as far as possible a homogeneous distribution of the impurities contained in the liquid without causing the formation of air bubbles.

Unnecessary exposure to the ambient air of the sample shall be avoided.

Filling of the cell

Immediately before commencing the test, drain the test cell and rinse the walls, electrodes and component parts, with the test sample. Drain and slowly fill with the test sample avoiding formation of air bubbles.

Measure and record the temperature of the liquid.

Mount the cell in the test equipment and start the stirrer if used.

Application of voltage

First application of voltage is started approximately 5 min after completion of filling and ensuring that no air bubbles are visible in the electrode gap.

Apply voltage to the electrodes and uniformly increase voltage from zero at the rate of $0.2 \text{ kV s}^{-1} \pm 0.2 \text{ kV s}^{-1}$ until breakdown occurs. The breakdown voltage is the maximum voltage reached at the time the circuit is opened either automatically (established arc) or manually (visible or audible discharge detected).

Record the value.

Carry out six breakdowns on the same cell filling allowing a pause of at least 2 min after each breakdown before re-application of voltage. Check that no gas bubbles are present within the electrode gap. If a stirrer is used, it shall run continuously throughout the test.

Calculate the mean value of the six breakdowns in kilovolts.

Report


Report the mean value, in kilovolts, of the six breakdowns as the test result.

The report shall also include: the sample identification, the value of each individual breakdown, the type of electrodes used, the frequency of the test voltage, the temperature of the liquid, the use of a stirrer (if any).

Test data dispersion

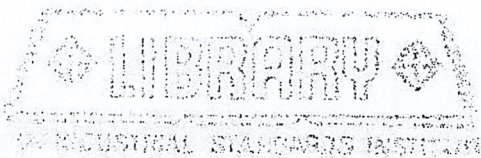
The scatter of individual breakdown voltages has been found to be very dependent on the value of the result. The graphical representation of figure 3 indicates the values of standard deviation/mean ratio which have been found in a large body of test data, in several laboratories using transformer oil.

The full line in the graph shows the distribution of the median value of SD/mean as a function of the value of the mean. The dotted lines indicate the expected 95 % range of values of SD/mean as a function of the value of the mean.



ภาคผนวก จ
มาตรฐาน IEC 60296, Edition 4.0 2012 - 02
Fluids for electrotechnical applications – Unused mineral insulating oils for
transformers and switchgear

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



110
IEC 60296

Edition 4.0 2012-02

INTERNATIONAL STANDARD

NORME

INTERNATIONALE

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของ สทอ. เท่านั้น
ห้ามคัดลอกโดยไม่ได้รับอนุญาต

Fluids for electrotechnical applications – Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear

Fluides pour applications électrotechniques – Huiles minérales isolantes neuves pour transformateurs et appareillages de connexion



TISI Library
ห้องสมุดมาตรฐาน



S0111308

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

Thai Industrial Standards Institute : TISI
Rama VI Rd., Rajathevee Bangkok 10400 Tel : 202-3510

PRICE CODE
CODE PRIX

S

ICS 29.040

ISBN 978-2-88912-928-7


**Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.
Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.**

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
© Registered trademark of the International Electrotechnical Commission
Marque déposée de la Commission Electrotechnique Internationale

Table 2 – General specifications

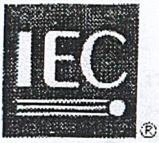
Property	Test method	Limits	
		Transformer oil	Low temperature switchgear oil
1 – Function			
Viscosity at 40 °C	ISO 3104	Max. 12 mm ² /s	Max. 3,5 mm ² /s
Viscosity at –30 °C ^a	ISO 3104	Max. 1 800 mm ² /s	–
Viscosity at –40 °C ^b	IEC 61868	–	Max. 400 mm ² /s
Pour point	ISO 3016	Max. –40 °C	Max. –60 °C
Water content	IEC 60814	Max. 30 mg/kg ^c / 40 mg/kg ^d	
Breakdown voltage	IEC 60156	Min. 30 kV / 70 kV ^e	
Density at 20 °C	ISO 3675 or ISO 12185	Max. 0,895 g/ml	
DDF at 90 °C	IEC 60247 or IEC 61620	Max. 0,005	
Particle content	IEC 60970	No general requirement ^l	
2 – Refining/stability			
Appearance	–	Clear, free from sediment and suspended matter	
Acidity	IEC 62021-1 or 62021-2	Max. 0,01 mg KOH/g	
Interfacial tension	EN 14210 or ASTM D971	No general requirement ^f	
Total sulphur content	IP 373 or ISO 14596	No general requirement	
Corrosive sulphur	DIN 51353	Not corrosive	
Potentially corrosive sulphur	IEC 62535	Not corrosive	
DBDS	IEC 62697-1 (in preparation)	Not detectable (< 5 mg/kg)	
Inhibitors of IEC 60666	IEC 60666	(U) uninhibited oil: not detectable (< 0,01%) (T) trace inhibited oil: < 0,08 % (I) inhibited oils: 0,08 % – 0,40 % (see 3.6 to 3.8)	
Metal passivator additives of IEC 60666	IEC 60666	Not detectable (< 5mg/kg), or as agreed upon with the purchaser	
Other additives		See ^g	
2-Furfural and related compounds content	IEC 61198	Not detectable (< 0,05 mg/kg) for each individual compound	
Stray gassing	See 6.22	No general requirement ^h	
3 – Performance			
Oxidation stability	IEC 61125:1992 (Method C) Test duration ^k (U) Uninhibited oil: 164 h (T) Trace inhibited oil: 332 h (I) Inhibited oil: 500 h	For oils with other antioxidant additives and metal passivator additives, see 6.12.	
- Total acidity ^l	1.9.4 of IEC 61125:1992	Max. 1,2 mg KOH/g	
- Sludge ^l	1.9.1 of IEC 61125:1992	Max. 0,8 %	
- DDF at 90 °C ^l	1.9.6 of IEC 61125, Amendment 1 (2004) + IEC 60247	Max. 0,500 ⁱ	
Gassing tendency	IEC 60628:1985, Method A	No general requirement ^h	
ECT	See 6.14	No general requirement ^h	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ฉ
มาตรฐาน IEC 62770, Edition 1.0 2013 - 11
Fluids for electrotechnical applications – Unused natural esters for transformers and
similar electrical equipment

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



IEC 62770

Edition 1.0 2013-11

INTERNATIONAL STANDARD

NORME

INTERNATIONALE

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของ IEC. การที่จะ
ใช้เอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาต

Fluids for electrotechnical applications – Unused natural esters for transformers and similar electrical equipment

Fluides pour applications électrotechniques – Esters naturels neufs pour transformateurs et matériels électriques analogues

TISI Library
มาตรฐานไทย



S0113376

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

Thai Industrial Standards Institute : TISI
Banna Vi Rd., Rajabhavee Bangkok 10400 Tel : 202 3510

PRICE CODE
CODE PRIX

ICS 29.040

ISBN 978-2-8322-1191-5

Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.

Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1 – General specifications

Property	Test method	Limits
Physical		
Appearance		Clear, free from sediment and suspended matter
Viscosity at 100 °C	ISO 3104	Max. 15 mm ² ·s ⁻¹
Viscosity at 40 °C	ISO 3104	Max. 50 mm ² ·s ⁻¹
Pour point	ISO 3016	Max. -10 °C
Water content	IEC 60814	Max. 200 mg·kg ⁻¹
Density at 20 °C	ISO 3675 or ISO 12185	Max. 1 000 kg·m ⁻³
Electrical		
Breakdown voltage	IEC 60156 (2,5 mm gap)	Min. 35 kV ^a
Dissipation factor (tan δ) 90 °C	IEC 60247	Max. 0,05
Chemical		
Soluble acidity	IEC 62021-3	Max. 0,06 mg KOH g _{oil} ⁻¹
Corrosive sulfur	IEC 62535 or ASTM D1275B	Non corrosive
DBDS	IEC 62697-1	Below detection limit
Total additives	IEC 60666 or other suitable methods	Max. weight fraction 5 %
Performance – Salient properties after oxidation stability test in accordance with Method C of IEC 61125:1992 ^b		
Total acidity	1.9.4 of IEC 61125:1992	Max. 0,6 mg KOH g _{oil} ⁻¹
Viscosity at 40 °C	ISO 3104	Max. 30 % increase over the initial value
DDF (tan δ) at 90 °C	IEC 60247	Max. 0,5
Health, safety and environment (HSE)		
Fire point	ISO 2592	Min. 300 °C
Flash point	ISO 2719	Min. 250 °C
Biodegradation	US EPA OECD 301 B, C or F US EPA OPPTS 835.311	Readily biodegradable
^a At delivery.		
^b See Annex A for details of oxidation stability parameters.		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

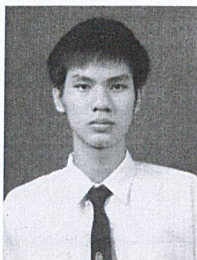
ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-สกุล นายภัทริน กิจเจริญ
 เกิดวันที่ 18 สิงหาคม พ.ศ. 2536
 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจาก โรงเรียนราชวินิตบางแคปานขำ
 กรุงเทพมหานคร
 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนราชวินิตบางแคปานขำ
 กรุงเทพมหานคร
 เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
 ลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2555
 ฝึกงานที่ บริษัท เทอร์โมเทรเซอร์ จำกัด
 ระหว่าง เดือนมิถุนายน ถึง เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2558



ชื่อ-สกุล นายภาวิชัย โหมตสุวรรณ
 เกิดวันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2536
 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจาก โรงเรียนอยุธยาวิทยาลัย จังหวัด
 พระนครศรีอยุธยา
 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนอยุธยาวิทยาลัย
 จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
 เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
 ลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2555
 ฝึกงานที่ บริษัท ฮอนด้า ออโตโมบิล (ประเทศไทย) จำกัด ระหว่าง เดือน
 มิถุนายน ถึง เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2558



ชื่อ-สกุล นายภูธรศ เหลี่ยมโสภณ

เกิดวันที่ 27 พฤศจิกายน พ.ศ. 2536

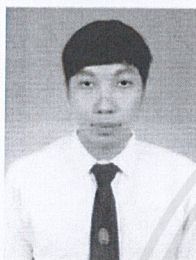
สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจาก โรงเรียนสตรีศรีน่าน จังหวัดน่าน

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนสตรีศรีน่าน จังหวัดน่าน

เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2555

ฝึกงานที่ บริษัท เทอร์โมเทรเซอร์ จำกัด

ระหว่าง เดือนมิถุนายน ถึง เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2558



ชื่อ-สกุล นายเมธากร สมบุญ

เกิดวันที่ 25 สิงหาคม พ.ศ. 2536

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจาก โรงเรียนฤทธิยะวรรณาลัย กรุงเทพมหานคร

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนฤทธิยะวรรณาลัย กรุงเทพมหานคร

เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2555

ฝึกงานที่ บริษัท วิฑูการบินแห่งประเทศไทย จำกัด

ระหว่าง เดือนมิถุนายน ถึง เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2558