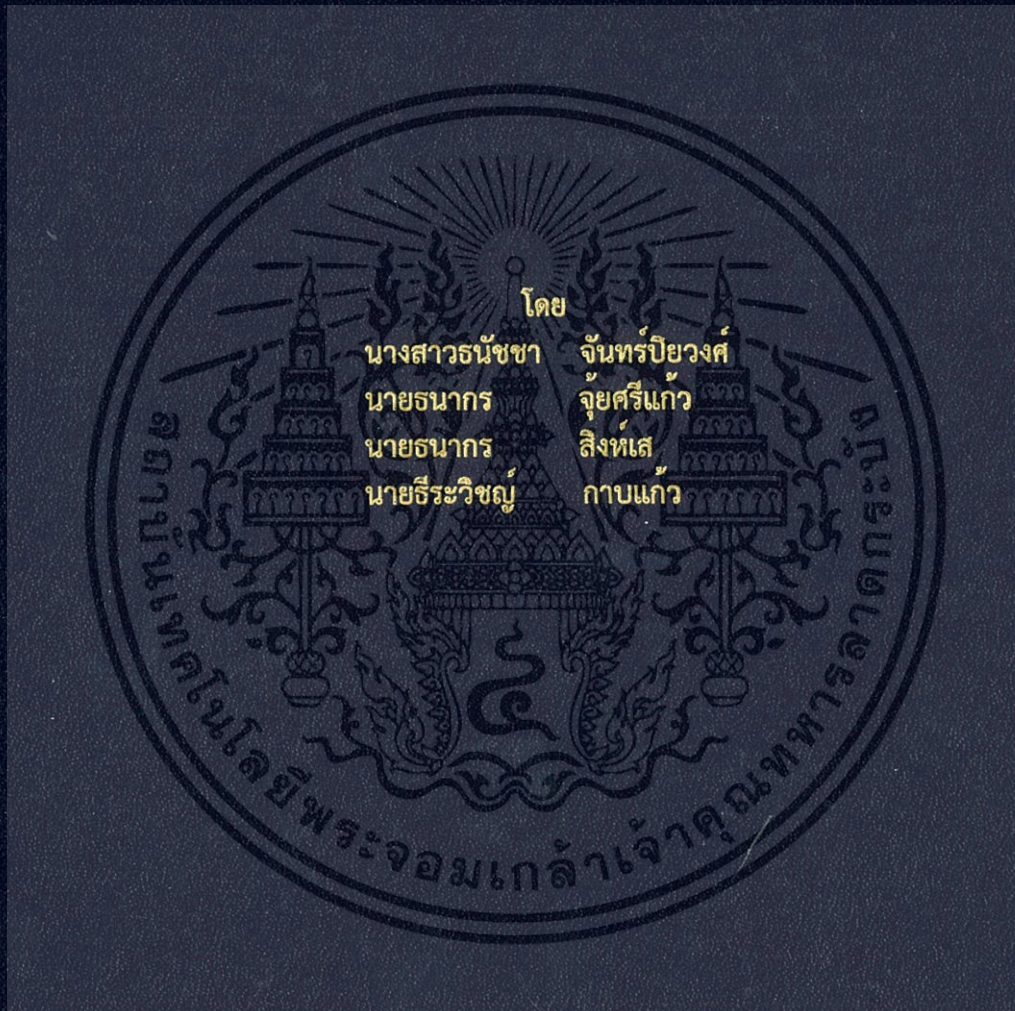


การศึกษาการใช้เอสเทอร์เป็นฉนวนในหม้อแปลง
THE STUDY OF USING NATURAL ESTER FOR TRANSFORMER DIELECTRIC



โดย
นางสาวรัชชา จันทร์ปียวงศ์
นายธนากร จุ้ยศรีแก้ว
นายธนากร สิงห์เส
นายธีระวิชญ์ กาบแก้ว

ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การศึกษาการใช้เอสเทอร์เป็นฉนวนในหม้อแปลง
THE STUDY OF USING NATURAL ESTER FOR TRANSFORMER DIELECTRIC



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ **ปีการศึกษา 2559** นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY OF USING NATURAL ESTER FOR TRANSFORMER DIELECTRIC



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

2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2559

การศึกษาการใช้เอสเทอร์เป็นฉนวนในหม้อแปลง

THE STUDY OF USING NATURAL ESTER FOR TRANSFORMER DIELECTRIC



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์

รศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาการใช้เอสเทอร์เป็นฉนวนในหม้อแปลง

ผู้จัดทำ

- 1.นางสาวธัญชา จันทร์ปियวงศ์
- 2.นายธนากร จุ้ยศรีแก้ว
- 3.นายธนากร สิงห์เส
- 4.นายธีระวิชญ์ กาบแก้ว



..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐู พัฒนเดช)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการใช้เอสเทอร์เป็นฉนวนในหม้อแปลง

นางสาวรัชชา	จันทร์ปิยวงศ์	
นายธนากร	จ้อยศรีแก้ว	
นายธนากร	สิงห์เส	
นายธีระวิษญ์	กาบแก้ว	
รศ.ดร.มณฑล	ลีลาจินดาไกรฤกษ์	อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ดร.นรเศรษฐ์	พัฒนเดช	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2559		

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และคุณสมบัติของฉนวนไฟฟ้า ได้แก่ คาปาซิแตนซ์ (C) เพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ (ϵ_r) และแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียต่อไอเล็กตริก ($\tan \delta$) ของเพรสบอร์ดที่อิมเพกเน็ทด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติและน้ำมันแร่ โดยได้ออกแบบสร้างชุดทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดตามมาตรฐาน IEC 60243-1 ขึ้นมา ในการทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดจะทำการทดสอบทั้งชั่วคราวและชั่วคราว โดยเพรสบอร์ดที่ใช้ในการทดสอบจะอิมเพกเน็ทด้วยเวลาและฉนวนเหลวที่แตกต่างกัน แล้วเปรียบเทียบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่เกิดขึ้น รวมทั้งวัดค่าคุณสมบัติของฉนวนไฟฟ้าของเพรสบอร์ดเมื่ออยู่ภายใต้อุณหภูมิแวดล้อมที่แตกต่างกัน จากการทดสอบพบว่า ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดที่อิมเพกเน็ทด้วยน้ำมันแร่และเอสเทอร์ธรรมชาติมีค่าใกล้เคียงกันทั้งชั่วคราวและชั่วคราวและสูงกว่าเพรสบอร์ดที่ไม่อิมเพกเน็ทประมาณ 2.5 เท่า ส่วนค่าคาปาซิแตนซ์ เพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียต่อไอเล็กตริกของเพรสบอร์ดมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY OF USING NATURAL ESTER FOR TRANSFORMER DIELECTRIC

THANATCHA JANPIYAWONG

THANAKORN JUISRIKAEW

THANAKORN SINGSE

TEERAWIT KABKAEW

Assoc.Prof.Dr.Monthon Leelachindakraierk Advisor

Assoc.Prof.Dr.techn.Norasage Pattanadech Advisor

Year 2016

ABSTRACT

This project presents the study of lightning impulse withstand voltage test and properties of insulation including capacitance (C), relative permittivity (ϵ_r), and dielectric loss factor ($\tan\delta$) of the pressboards impregnated with mineral oil and natural ester respectively. The test vessel for the lightning impulse withstand voltage test of the impregnated pressboards was designed and constructed according to IEC standard 60243-1. The experiments were performed to investigate the positive and negative lightning impulse voltages of the pressboards impregnated with different liquid insulations, namely mineral oil and natural ester, including various impregnation time from 3 -24 hours. Besides, the mentioned dielectric characteristic of the impregnated pressboards under different temperatures were examined. The test results showed the lightning impulse withstand voltages both positive and negative polarities of the mineral oil impregnated pressboards were nearly the same as these of the natural ester impregnated pressboards. Moreover, the lightning impulse withstand voltages both positive and negative polarities of the liquid impregnated pressboards were higher than these of the non-impregnated pressboards about 2.5 times. Furthermore, it was obviously shown that the capacitance, relative permittivity, and dielectric loss factor of the impregnated pressboards increased with temperature increasing.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยการช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆอย่างดียิ่ง จากรองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช และ รองศาสตราจารย์ ดร.มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา รวมไปถึงคุณปยุณวีร์ ฉายศิริ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไขปริญญาโทฉบับนี้จนสำเร็จเรียบร้อย เป็นอย่างดี ขอขอบคุณ คุณกิตติพิศ จรียนารัตน์ ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษาในด้านการทดสอบ ที่เกี่ยวข้องกับโครงการ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ที่ได้ให้ความเอาใจใส่ และช่วยเหลือ ในด้านต่างๆ ด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณบริษัท โฟคัสแลป จำกัด, บริษัท ดันแอนด์ซันส์ จำกัด,บริษัท โกลว์ พลังงาน จำกัด (มหาชน) และการไฟฟ้านครหลวง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเข้าชมเพื่อศึกษาดูงาน อุปกรณ์และ เครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดสอบ และขอขอบคุณบริษัท เมเดนชา จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ เรื่องทุนทรัพย์

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุน ในด้านการเงินและเป็นกำลังใจในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ทฤษฎีและหลักการทำงานของหม้อแปลง	5
2.2 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า	7
2.2.1 การทดสอบประจำ	7
2.2.2 การทดสอบตามรุ่น	9
2.3 ฉนวนภายในหม้อแปลง	10
2.3.1 ฉนวนแข็ง	10
2.3.2 ฉนวนเหลว	10
2.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของฉนวนเหลวหม้อแปลง	13
2.4.1 การเปรียบเทียบความหนืด	15
2.4.2 การเปรียบเทียบการทนความชื้น	16
2.4.3 ความสามารถในการละลายของน้ำในฉนวนน้ำมัน	16
2.4.4 ความปลอดภัยด้านสิ่งแวดล้อม	17
2.4.5 การย่อยสลายทางชีวภาพ	17
2.4.6 การเกิดออกซิเดชันของฉนวนเหลว	18
2.5 คุณสมบัติของฉนวน	19
2.5.1 ความต้านทานของฉนวน	19
2.5.2 เพอร์มิตติวิตี	20
2.5.3 แฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.4 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน	25
2.6 ชั้นฉนวนเหลวกับฉนวนแข็ง	25
2.7 สนามไฟฟ้า	27
2.8 การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนเหลว	30
2.8.1 การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนเหลวบริสุทธิ์	30
2.8.2 การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนเหลวเชิงการค้า	30
2.9 การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนแข็ง	32
2.9.1 การเบรกดาวน์แบบแท้จริง	33
2.9.2 การเบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์	33
2.9.3 การเกิดเบรกดาวน์จากแรงทางกลที่เกิดจากไฟฟ้า	34
2.9.4 การเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากการดิสชาร์จภายใน	34
2.10 ทฤษฎีการสร้างและการวัดแรงดันอิมพัลส์	35
2.10.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน	35
2.10.2 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	37
2.10.3 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายชั้น	38
2.11 การวัดค่าคุณสมบัติของฉนวน	39
2.11.1 การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของฉนวน	39
2.11.2 การวัดค่าคาปาซิแตนซ์ และแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก	40
บทที่ 3 การออกแบบการทดสอบและการประกอบสร้างชุดทดสอบ	44
3.1 การออกแบบและการประกอบสร้างชุดทดสอบ	44
3.1.1 ชุดทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด	44
3.1.2 ชุดทดสอบหาค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์ด	48
3.2 การออกแบบการทดสอบ	52
3.3 การเตรียมเพรสบอร์ดสำหรับการทดสอบ	53
3.4 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบ	54
3.4.1 การทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด สำหรับแรงดันน้อยกว่า 150 kV	54
3.4.2 การทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด สำหรับแรงดันมากกว่า 150 kV	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.3 การทดสอบค่าการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของเพอร์สบอร์ด	62
3.5 วงจรทดสอบ	65
บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดสอบ	66
4.1 การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพอร์สบอร์ด	66
4.1.1 วงจรทดสอบ	61
4.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ	68
4.1.3 ผลการทดสอบ	68
4.2 การทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ เปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของเพอร์สบอร์ด	77
4.2.1 วงจรทดสอบ	77
4.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ	78
4.2.3 ผลการทดสอบ	79
4.3 การจำลองรูปแบบสนามไฟฟ้าของฉนวนเพอร์สบอร์ด	95
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	99
5.1 สรุป	99
5.2 ข้อเสนอแนะ	100
เอกสารอ้างอิง	101
ภาคผนวก	102
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ	103
ภาคผนวก ข ตัวอย่างกราฟของการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพอร์สบอร์ด	108
ภาคผนวก ค การเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าที่ได้ระหว่างตัวโปรแกรมกับค่าที่คำนวณ	126
ภาคผนวก ง มาตรฐาน IEC 60243, Edition 3.0-2013 – 01	128
ภาคผนวก จ มาตรฐาน IEC 60897, Edition 1.0 1987 – 03	132
ภาคผนวก ฉ การใช้กระดาษฉนวนสำหรับหม้อแปลง	136
ภาคผนวก ช แนวโน้มการก่อตัวของแก๊ส	143
ภาคผนวก ซ ความสามารถในการย่อยสลายโดยกระบวนการทางชีวภาพ	151
ภาคผนวก ฌ การบำรุงรักษาเชิงป้องกันสำหรับหม้อแปลง	157
ประวัติผู้เขียน	181

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมในวงจรทางด้านปฐมภูมิ	5
2.2	วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า	6
2.3	แสดงวงจรวัดกระแสแบบวัดโดยตรงเหมาะสำหรับกระแสที่ไม่เกิน Range ของแอมป์มิเตอร์	7
2.4	แสดงวงจรวัดกระแสแบบวัดโดยตรงเหมาะสำหรับกระแสมากกว่า Range ของแอมป์มิเตอร์	7
2.5	วงจรทดสอบสำหรับหม้อแปลง 3 เฟส	8
2.6	หม้อแปลง 3 เฟส Delta connection	9
2.7	กระดาศ้อัดแรง	10
2.8	การเชื่อมโยงเอสเทอร์	12
2.9	โครงสร้างของเอสเทอร์ธรรมชาติ	12
2.10	กราฟล็อกการิทึมความหนืดกับอุณหภูมิ	15
2.11	การเปรียบเทียบความหนืด กับ อุณหภูมิที่แปรผัน	15
2.12	เปรียบเทียบการอิมิตัวความชื้นกับอุณหภูมิ	17
2.13	การเปรียบเทียบอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพ	17
2.14	ตัวเก็บประจุแบบขนาน	21
2.15	ปรากฏการณ์โพลาไรเซชัน	22
2.16	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ป้อนให้กับฉนวน	24
2.17	แสดงชั้นฉนวน	25
2.18	สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า	27
2.19	เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ	28
2.20	การเรียงตัวของอนุภาคไฟเบอร์ระหว่างช่องว่าง (gap) ภายใต้อิทธิพลของแรงดันสูง	31
2.21	ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์เมื่อป้อนแรงดันให้กับฉนวนแข็งที่ระยะเวลาต่างกัน	33
2.22	รูปแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม	36
2.23	รูปแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตัดหลังคลื่น	36
2.24	แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตัดหน้าคลื่น	36
2.25	วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ วงจร A	37
2.26	วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ วงจร B	37
2.27	วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบหลายขั้นตามวงจรมาร์กซ์	38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.28 อิเล็กโตรดวัดความต้านทานจำเพาะของฉนวนแข็ง	39
2.29 วงจร Schering bridge	40
2.30 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของวงจร Schering bridge	41
2.31 Glynne bridge	43
3.1 หัวอิเล็กโตรดตามมาตรฐาน IEC 60243-1	45
3.2 แบบจำลองอิเล็กโตรดชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด	45
3.3 อิเล็กโตรดชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด	45
3.4 แบบจำลองชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด	46
3.5 ขอบเขตการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าของชุดทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด	47
3.6 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของชุดทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด	47
3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดของชุดทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด	48
3.8 หัวอิเล็กโตรด	49
3.9 แบบจำลองอิเล็กโตรดชุดทดสอบหาค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์ด	49
3.10 อิเล็กโตรดชุดทดสอบหาค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์ด	49
3.11 แบบจำลองชุดทดสอบหาค่าคาปาซิเตอร์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์ด	50
3.12 ขอบเขตการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าของชุดทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์ด	50
3.13 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของชุดทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์ด	50
3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดของชุดทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์ด	51
3.15 เพรสบอร์ด 10×10 cm	52
3.16 เพรสบอร์ดเส้นผ่านศูนย์กลาง 85 mm	52
3.17 ตู้อบสูญญากาศ	53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.18 ชุดอัดประจุ	54
3.19 ชุดกำเนิดอิมพัลส์ขนาด พิกัดแรงดัน 200 kV	54
3.20 ชุดควบคุม Impulse voltage generator พิกัดกำลัง 7000 VA	55
3.21 โวลเตจดีไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุ	55
3.22 โวลเตจดีไวเดอร์ พิกัดแรงดัน 100 kV	56
3.23 ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด	56
3.24 ดิจิตอลออสซิลโลสโคป	57
3.25 หม้อแปลงอัดประจุเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	58
3.26 ตัวเก็บประจุไหลด 2000 pF	59
3.27 ชุดกำเนิดอิมพัลส์ พิกัดแรงดัน 1500 kV	60
3.28 ชุดควบคุม Impulse voltage generator พิกัดแรงดัน 1200 kV	61
3.29 Temperature adjust	62
3.30 Thermocouple	62
3.31 Heater type aluminium	63
3.32 C and tan δ meter for Insulation Material	64
3.33 ชุดทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์ด	64
3.34 วงจรทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด	65
3.35 การจำลองวงจรทดสอบค่าการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์ด	65
4.1 วงจรทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด สำหรับแรงดันน้อยกว่า 150 kV	66
4.2 วงจรทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด สำหรับแรงดันมากกว่า 150 kV	67
4.3 ชุดทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า	67
4.4 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว 1.24/60 μ s ที่ใช้ในการตรวจสอบเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60060-1	68
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่ขนาด 1.6 mm และจำนวนชั่วโมงในการอิมเพรกเนต	69

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเน็ตด้วยน้ำมันแร่ขนาด 3.2 mm และจำนวนชั่วโมงในการอิมเพรกเน็ต	70
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเน็ตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติขนาด 1.6mmและจำนวนชั่วโมงในการอิมเพรกเน็ต	71
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเน็ตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติขนาด 3.2mmและจำนวนชั่วโมงในการอิมเพรกเน็ต	72
4.9 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว 1.24/60 μ s ที่ใช้ในการตรวจสอบเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60060-1	73
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเน็ตด้วยน้ำมันแร่ขนาด 1.6 mm และจำนวนชั่วโมงในการอิมเพรกเน็ต	74
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเน็ตด้วยน้ำมันแร่ขนาด 3.2 mm และจำนวนชั่วโมงในการอิมเพรกเน็ต	75
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเน็ตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติขนาด 1.6 mm และจำนวนชั่วโมงในการอิมเพรกเน็ต	75
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเน็ตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติขนาด 3.2 mm และจำนวนชั่วโมงในการอิมเพรกเน็ต	76
4.14 วงจรทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์ด	77
4.15 ชุดทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก	78
4.16 ผลการทดสอบค่าคาปาซิแตนซ์ของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่อิมเพรกเน็ตด้วยน้ำมันแร่ ณ ที่อุณหภูมิต่างๆ	80
4.17 ผลการทดสอบค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่อิมเพรกเน็ตด้วยน้ำมันแร่ ณ ที่อุณหภูมิต่างๆ	81
4.18 ผลการทดสอบค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่อิมเพรกเน็ตด้วยน้ำมันแร่ ณ ที่อุณหภูมิต่างๆ	82
4.19 ผลการทดสอบค่าคาปาซิแตนซ์ของเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm ที่อิมเพรกเน็ตด้วยน้ำมันแร่ ณ ที่อุณหภูมิต่างๆ	84
4.20 ผลการทดสอบค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm ที่อิมเพรกเน็ตด้วยน้ำมันแร่ ณ ที่อุณหภูมิต่างๆ	85

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 ผลการทดสอบค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm ที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่ ณ ที่อุณหภูมิต่างๆ	86
4.22 ผลการทดสอบค่าคาปาซิแตนซ์ของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ ณ ที่อุณหภูมิต่างๆ	88
4.23 ผลการทดสอบค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ ณ ที่อุณหภูมิต่างๆ	89
4.24 ผลการทดสอบค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ ณ ที่อุณหภูมิต่างๆ	90
4.25 ผลการทดสอบค่าคาปาซิแตนซ์ของเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm ที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ ณ ที่อุณหภูมิต่างๆ	92
4.26 ผลการทดสอบค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm ที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ ณ ที่อุณหภูมิต่างๆ	93
4.27 ผลการทดสอบค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm ที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ ณ ที่อุณหภูมิต่างๆ	94
4.28 ขอบเขตการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าของฉนวนเพรสบอร์ด	95
4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดและเวลาในการอิมเพรกเนตที่ความหนาของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm	96
4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดและเวลาในการอิมเพรกเนตที่ความหนาของเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm	97
4.31 รูปแบบสนามไฟฟ้าที่ความหนาของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่ไม่อิมเพรกเนตกับน้ำมันแร่	98
4.32 รูปแบบสนามไฟฟ้าที่ความหนาของเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm ที่ไม่อิมเพรกเนตกับน้ำมันแร่	98

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 วิธีการดำเนินงาน	3
2.1 การใช้งานของฉนวนเหลวแต่ละชนิดที่ใช้ในหม้อแปลง	11
2.2 แสดงภาพรวมคุณสมบัติของฉนวนเหลวชนิดน้ำมันแร่และเอสเทอร์ธรรมชาติ	13
2.3 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และไฟฟ้าของฉนวนเหลวชนิดน้ำมันแร่และเอสเทอร์	14
2.4 การละลายของน้ำในฉนวนน้ำมัน	16
2.5 ค่าเปอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของวัสดุ	21
2.6 ความสัมพันธ์ของ η^* กับ p และ q ของอิเล็กโตรดรูปทรงพื้นฐาน	29
3.1 ขนาดของอิเล็กโตรดสำหรับการทดสอบ	44
4.1 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่	69
4.2 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm ที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่	70
4.3 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ	71
4.4 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm ที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ	72
4.5 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่	73
4.6 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm ที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่	74
4.7 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ	75
4.8 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm ที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ	76
4.9 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่	79
4.10 ผลการทดสอบวัดค่าเปอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่	80

สารบัญญัตราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.11 ผลการทดสอบวัดค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์ด ขนาด 1.6 mm ที่อิมเพรกเน็ตด้วยน้ำมันแร่	81
4.12 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm ที่อิมเพรกเน็ต ด้วยน้ำมันแร่	83
4.13 ผลการทดสอบวัดค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm ที่อิมเพรกเน็ต ด้วยน้ำมันแร่	84
4.14 ผลการทดสอบวัดค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์ด ขนาด 3.2 mm ที่อิมเพรกเน็ตด้วยน้ำมันแร่	85
4.15 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่อิมเพรกเน็ต ด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ	87
4.16 ผลการทดสอบวัดค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่อิมเพรกเน็ต ด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ	88
4.17 ผลการทดสอบวัดค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์ด ขนาด 1.6 mm ที่อิมเพรกเน็ตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ	89
4.18 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm ที่อิมเพรกเน็ต ด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ	91
4.19 ผลการทดสอบวัดค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm ที่อิมเพรกเน็ต ด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ	92
4.20 ผลการทดสอบวัดค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์ด ขนาด 3.2 mm ที่อิมเพรกเน็ตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ	93
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าสูงสุดและค่าเปอร์มิตติวิตี้ของเพรสบอร์ด ที่มีความหนา 1.6 mm	96
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าสูงสุดและค่าเปอร์มิตติวิตี้ของเพรสบอร์ด ที่มีความหนา 3.2 mm	96

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้ในการถ่ายเทพลังงานไฟฟ้าจากวงจรหนึ่งไปยังอีกวงจรหนึ่ง โดยทั่วไปจะเชื่อมโยงระบบไฟฟ้าที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกัน หม้อแปลงไฟฟ้าจึงนับเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในระบบไฟฟ้า เนื่องจากการชำรุดหรือขัดข้องของหม้อแปลงไฟฟ้าจะส่งผลกระทบต่อการใช้งานไฟฟ้าและกระบวนการผลิตของสถานประกอบการต่างๆ ดังนั้นการศึกษาโครงสร้างพื้นฐาน และปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงจึงเป็นเรื่องที่สำคัญเพื่อที่จะสามารถวางแผนทดสอบและบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อยืดอายุการใช้งานและเผื่อระวังก่อนที่ปัญหาจะเกิดขึ้น

ในปัจจุบันนิยมใช้น้ำมันแร่เป็นฉนวนเหลวภายในหม้อแปลงไฟฟ้า แต่น้ำมันแร่นั้นยังมีข้อเสียอยู่หลายประการ เช่น ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ลดลงมากเมื่อมีความชื้นปะปนมา และใช้เวลาในการย่อยสลายนานซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้เกิดการศึกษาและวิเคราะห์หาคุณสมบัติของฉนวนเหลวชนิดอื่นมาทดแทนซึ่งในที่นี้คือเอสเทอร์ธรรมชาติ ที่มีข้อดีคือสามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ มีจุดวาบไฟและจุดติดไฟที่สูงทำให้มีความปลอดภัยในการใช้งานมากขึ้น แต่ก็มีข้อจำกัดบางประการ การศึกษาคุณสมบัติและแนวทางการออกแบบหม้อแปลงโดยใช้เอสเทอร์ธรรมชาติจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก และเป็นทางเลือกในการใช้งานต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า
2. เพื่อศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า
3. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของเอสเทอร์ที่เป็นฉนวนเหลวในหม้อแปลงไฟฟ้า
4. เพื่อศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและออกแบบจัดสร้างชุดทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดที่อิมเพกต์ด้วยฉนวนเหลว
5. เพื่อศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและออกแบบจัดสร้างชุดทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์(C) เปรอริมิตติวิตีสัมพัทธ์ (ϵ_r) และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$) ของเพรสบอร์ด

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า
2. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า
3. ศึกษาคุณสมบัติของเอสเทอร์ที่เป็นฉนวนเหลวในหม้อแปลงไฟฟ้า รวมทั้งข้อได้เปรียบเสียเปรียบเมื่อเปรียบเทียบกับฉนวนเหลวที่ใช้ในหม้อแปลงชนิดอื่น
4. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและออกแบบจัดสร้างชุดทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพอร์สบอร์ดที่อิมเพกต์ด้วยฉนวนเหลว
5. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและออกแบบจัดสร้างชุดทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์เพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก
6. ทำการทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพอร์สบอร์ดที่อิมเพกต์ด้วยฉนวนเหลว
7. ทำการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ เพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า
2. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า
3. ศึกษาคุณสมบัติของเอสเทอร์ที่เป็นฉนวนเหลวในหม้อแปลงไฟฟ้า รวมทั้งข้อได้เปรียบเสียเปรียบเมื่อเปรียบเทียบกับฉนวนเหลวที่ใช้ในหม้อแปลงชนิดอื่น
4. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและออกแบบจัดสร้างชุดทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพอร์สบอร์ดที่อิมเพกต์ด้วยฉนวนเหลว
5. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและออกแบบจัดสร้างชุดทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์เพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของเพอร์สบอร์ด
6. วางแผนการทดสอบและทำการทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพอร์สบอร์ดที่อิมเพกต์ด้วยฉนวนเหลว
7. วางแผนการทดสอบและทำการทดสอบทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ เพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกเพอร์สบอร์ด
8. สรุปการดำเนินงาน
9. จัดทำปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 วิธีการดำเนินงาน

วิธีการดำเนินการ	ระยะเวลา									
	ปี 2559					ปี 2560				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการ ทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า										
2. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง กับการทดสอบหม้อแปลง ไฟฟ้า										
3. ศึกษาคุณสมบัติของ เอสเทอร์ที่เป็นฉนวนเหลว ในหม้อแปลงไฟฟ้า รวมทั้ง ข้อได้เปรียบเสียเปรียบเมื่อ เปรียบเทียบกับฉนวนเหลว ที่ใช้ในหม้อแปลงชนิดอื่น										
4. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และออกแบบจัดสร้าง ชุดทดสอบวัดค่าความคงทน ต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของ เพอร์สบอร์ดที่อิมเพรกเนต ด้วยฉนวนเหลว										
5. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และออกแบบจัดสร้าง ชุดทดสอบวัดค่าคาปาซิ แตนซ์,เปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และ ค่าแฟกเตอร์พลังงาน สูญเสียไดอิเล็กตริก										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. วางแผนการทดสอบและทำการทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเน็ทด้วยฉนวนเหลว											
7. วางแผนการทดสอบและทำการทดสอบทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ เปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแพกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก											
8. สรุปรายการดำเนินงาน											
9. จัดทำปริญญานิพนธ์											

← →
วางแผน

← →
ปฏิบัติจริง

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างของหม้อแปลง และสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้า
2. มีความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับคุณสมบัติของฉนวนเหลวที่ใช้ในหม้อแปลง
3. ทราบถึงมาตรฐาน ขั้นตอน และวิธีการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในปัจจุบัน
4. ใช้เป็นแหล่งข้อมูลในการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการออกแบบหม้อแปลงโดยใช้เอสเทอร์เพื่อนำไปศึกษาและพัฒนาต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีและหลักการการทำงานของหม้อแปลง [1]

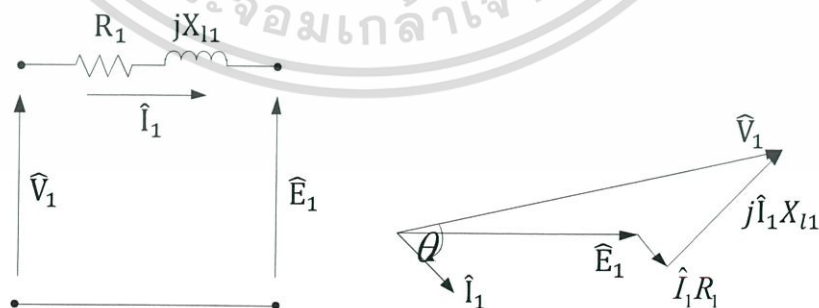
หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ถ่ายโอนพลังงานจากวงจรหนึ่งไปอีกวงจรหนึ่งโดยอาศัยหลักการของสนามแม่เหล็กเมื่อมีไฟฟ้ากระแสสลับไหลในตัวนำจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆ ตัวนำ ถ้ามีตัวนำอื่นอยู่ในพื้นที่ที่ตัวนำชุดที่หนึ่งสร้างสนามแม่เหล็กไว้ก็จะเกิดเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำล้อมที่ตัวนำชุดนั้นและทำให้มีแรงดันตกคร่อมที่ตัวนำชุดนั้น หลักการนี้เป็นหลักการพื้นฐานที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้า

วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า (Equivalent Circuits of transformer)

ในการหาค่าแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้า กระแสไฟฟ้าป้อนเข้า หรือค่าตัวประกอบกำลังทางด้านป้อนเข้าจำเป็นต้องใช้วงจรสมมูลของหม้อแปลงช่วยในการคำนวณหา ซึ่งในความเป็นจริงขดลวดปฐมภูมิจะมีค่าความต้านทานของเส้นลวดและมีสนามแม่เหล็กรั่ว ซึ่งจาก Kirchhoff's voltage law ของวงจรทางด้านปฐมภูมิจะได้ว่าแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าที่ขั้วทางด้านปฐมภูมิ (\hat{V}_1) จะเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมในวงจรที่เกิดจากค่าความต้านทาน (R_1) และแรงดันไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำในขดลวดปฐมภูมิ เพื่อให้สามารถใช้ในส่วนที่เป็นหม้อแปลงในอุดมคติจึงแยกเส้นแรงแม่เหล็กออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นสนามแม่เหล็กรั่วและส่วนที่เป็นสนามแม่เหล็กร่วมสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\hat{V}_1 = \hat{I}_1(R_1 + jX_{l1}) + \hat{E}_1 \quad (2.1)$$

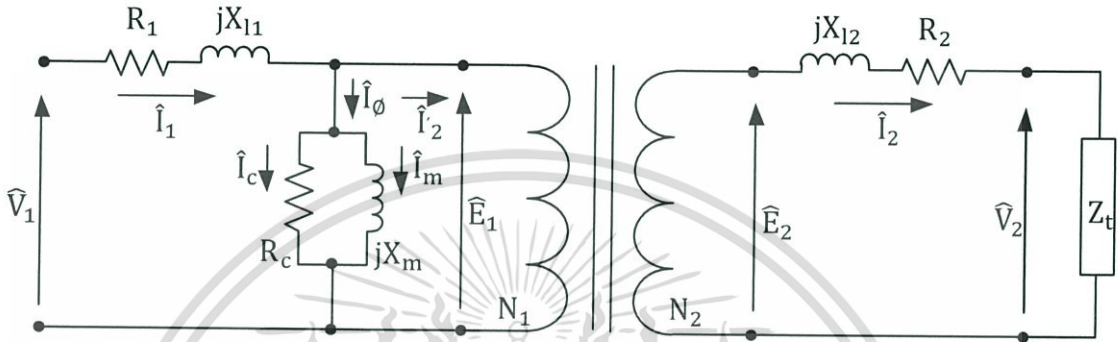
โดยที่ \hat{E}_1 เป็นแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากสนามแม่เหล็กร่วม (Mutual flux) และ X_m เป็นค่ารีแอกแตนซ์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็กรั่วทางด้านปฐมภูมิ



รูปที่ 2.1 แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมในวงจรทางด้านปฐมภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากแกนเหล็กที่ใช้เป็นวงจรมแม่เหล็กมีค่าความต้านทานแม่เหล็กและมีความสูญเสียในแกนเหล็กจึงมีส่วนของกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (I_m) และส่วนของกระแสที่แสดงถึงความสูญเสียในแกนเหล็ก (I_c) โดยแทนผลของการกระตุ้นสนามแม่เหล็กด้วยวงจรค่าความต้านทานของความสูญเสียในแกนเหล็ก (R_c) ขนานกับรีแอกแตนซ์ส่วนสร้างสนามแม่เหล็ก (X_m) ในการประยุกต์ใช้งานโดยป้อนเข้าด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าและความถี่ที่จะมีวงจรสมมูลดังแสดงตามรูปที่ 2.2 โดยที่ X_{12} และ R_2 เป็นค่ารีแอกแตนซ์รั่วและค่าความต้านทานของขดลวดทางด้านทุติยภูมิตามลำดับ



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า

เนื่องจากแกนเหล็กที่ใช้ทำวงจรมแม่เหล็กไม่เป็นอุดมคติทำให้กระแสไฟฟ้าป้อนเข้าทางด้านปฐมภูมิ (I_1) เท่ากับกระแสทางด้านทุติยภูมิถ่ายโอนมาทางด้านปฐมภูมิ (I_2') บวกกับกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก (I_0)

$$I_1 \neq I_2' + I_0 \quad (2.2)$$

เมื่อแยกส่วนที่ไม่เป็นอุดมคติออกจากส่วนที่เป็นหม้อแปลงในอุดมคติ ในส่วนของหม้อแปลงในอุดมคติแรงเคลื่อนทางแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากภาระทางด้านปฐมภูมิ ($N_1 I_2'$) จะเท่ากับแรงเคลื่อนทางแม่เหล็กเนื่องจากภาระทางด้านทุติยภูมิ ($N_2 I_2$)

$$N_1 I_2' = N_2 I_2 \quad (2.3)$$

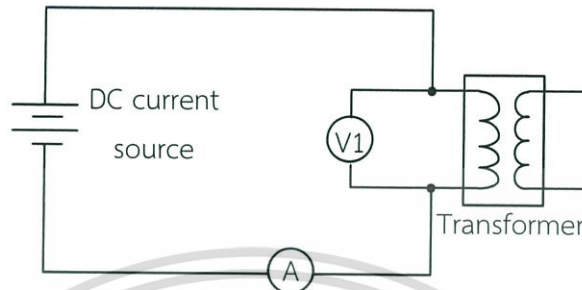
ซึ่งสรุปกระแสทางด้านทุติยภูมิถ่ายโอนมาทางด้านปฐมภูมิ (I_2') จะได้ว่า

$$I_2' = \frac{N_2}{N_1} I_2 = \frac{I_2}{a} \quad (2.4)$$

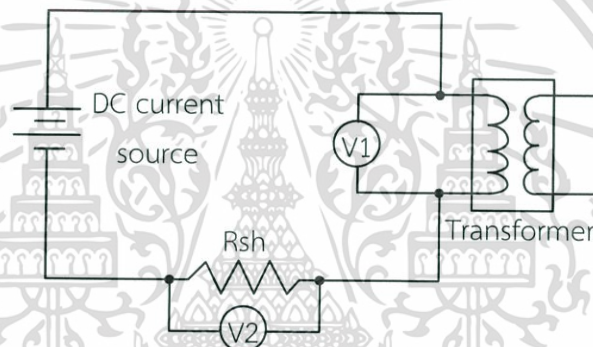
และกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก (I_0) จะประกอบด้วยส่วนประกอบของกระแสที่เกิดจากความสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss current component : I_c) และส่วนประกอบกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (Magnetizing current component : I_m)

2.2 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า [2]

ในการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ การทดสอบตามรุ่น (Type test) , การทดสอบประจำ(Routine test) และ การทดสอบเฉพาะ(Special test) โดยในที่นี่จะกล่าวถึงการทดสอบแบบตามรุ่นและการทดสอบแบบประจำ



รูปที่ 2.3 แสดงวงจรวัดกระแสแบบวัดโดยตรงเหมาะสำหรับกระแสที่ไม่เกิน Range ของแอมป์มิเตอร์



รูปที่ 2.4 แสดงวงจรวัดกระแสแบบวัดโดยตรงเหมาะสำหรับกระแสมากกว่า Range ของแอมป์มิเตอร์

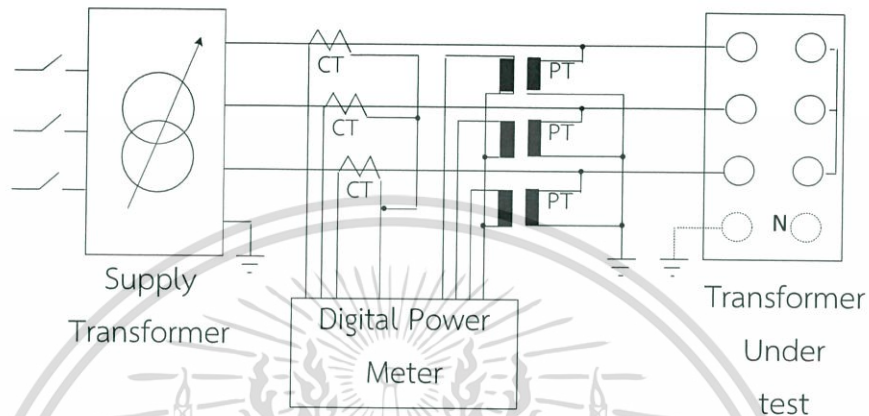
2.2.1 การทดสอบประจำ (Routine test)

1) การวัดค่าความต้านทานของขดลวด (Measurement of winding resistance) เป็นการทดสอบเพื่อวัดค่าความต้านทานแยกแต่ละชุดขดลวดโดยวัดผ่าน Terminal ของหม้อแปลง สำหรับค่าที่ยอมรับได้นั้นคือเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างเฟสไม่เกิน 0.5 เปอร์เซ็นต์

2) การวัดค่าอัตราส่วนแรงดันและตรวจสอบการเคลื่อนของเฟส (Measurement of voltage ratio and check of phase displacement) เป็นการทดสอบเพื่อหาอัตราส่วนแรงดันซึ่งจะต้องวัดทุกแท๊ปของขดลวด สำหรับหม้อแปลง 1 เฟสจะต้องมีการวัดด้วย และสำหรับหม้อแปลง 3 เฟส จะต้องทำการตรวจสอบลักษณะการต่อของขดลวดด้วย สำหรับค่าที่ยอมรับได้นั้นคือ Ratio ที่วัดได้ต้องแตกต่างไม่เกิน 0.5 เปอร์เซ็นต์ ของค่าที่การันตี และสำหรับการต่อของขดลวดก็ต้องถูกต้องตามค่าที่การันตีด้วยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) การวัดแรงดันอิมพีแดนซ์และค่าความสูญเสียขณะมีโหลด (Measurement of short-circuit impedance and load loss) เป็นการทดสอบเพื่อยืนยันค่าความสูญเสียขณะมีโหลด โดยค่าความสูญเสียดังกล่าวเกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านชุดขดลวดทองแดงเป็นหลัก สำหรับค่าที่ยอมรับได้นั้นคือค่าที่วัดได้ต้องไม่เกินกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นของค่าที่การันตีไว้ สำหรับอีกการทดสอบซึ่งใช้ในวงจรเดียวกันนั้นคือวัดแรงดันอิมพีแดนซ์ ที่ได้รับไว้ใน Nameplate



รูปที่ 2.5 วงจรทดสอบสำหรับหม้อแปลง 3 เฟส

4) การวัดค่าความสูญเสียขณะไร้โหลดและกระแส (Measurement of no-load loss and current) เป็นการทดสอบเพื่อยืนยันค่าความสูญเสียขณะไม่มีโหลด ซึ่งจะไม่แปรผันไปตามปริมาณโหลดที่ใช้งาน โดยค่าความสูญเสียดังกล่าวเกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแกนเหล็กเป็นหลัก สำหรับค่าที่ยอมรับได้นั้นคือค่าที่วัดได้ต้องไม่เกินกว่า 15 เปอร์เซ็นต์

5) การทดสอบอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนแรงดัน (tap-changer) เมื่อมีการติดตั้งอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนแรงดันเข้ากับหม้อแปลงเป็นที่เรียบร้อยแล้ว การทดสอบการใช้งานจะต้องถูกกระทำไปตามขั้นตอน และสำหรับการที่ยอมรับได้คือสามารถทนได้โดยไม่พบความเสียหายระหว่างทดสอบ

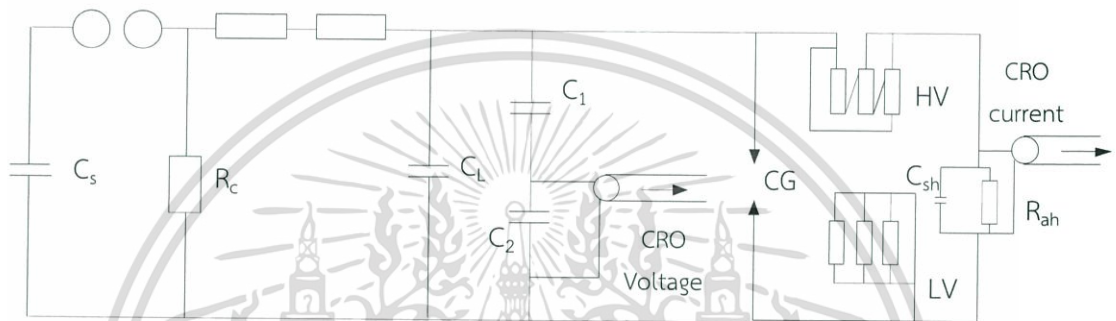
6) การทดสอบความคงทนของฉนวน Separate source AC withstand voltage test และ Induce voltage test ซึ่งการทดสอบทั้ง 2 ชนิดนี้ได้มีการยืนยันความคงทนของฉนวนแตกต่างกัน โดย Separate source AC withstand voltage test เป็นการยืนยันการทนได้ในชุดฉนวนหลัก คือการทนได้ต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC withstand strength) ของขั้วที่ทดสอบเฟสนั้นและนิวทรัลกับขดลวดชุดอื่นๆ ซึ่งถูกต่อรวมกันและต่อลงดินไว้ นั่นคือการทดสอบความคงทนได้ของฉนวนที่อยู่ระหว่างชุดขดลวดที่นำมาทดสอบกับระยะห่างที่ออกแบบไว้กับอุปกรณ์อื่นทั้งชุดขดลวดอื่นๆ ทั้งกับแกนเหล็กทั้งกับตัวถังด้วยเป็นต้น ซึ่งแตกต่างกับ Induce AC voltage test เป็นการยืนยันการทนได้ในชุดฉนวนรอง คือการทนได้ต่อการใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันกระแสสลับป้อนเข้าที่ขดลวดด้านใดด้านหนึ่งของหม้อแปลง รูปคลื่นของแรงดันจะต้องใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์และมีความถี่สูงกว่าความถี่ที่กำหนดที่เพียงพอต่อการป้องกันการอิ่มตัวของหม้อแปลง

2.2.2 การทดสอบตามรุ่น (Type test)

การทดสอบตามรุ่นนั้นคือใช้การทดสอบแบบเดียวกันในการสังเกตผล สามารถนำตัวใดตัวหนึ่งมาทดสอบ ผลที่ได้จากการทดสอบถือเสมือนว่าเป็นตัวแทนของตัวอื่นๆ ที่ใช้แบบเดียวกันในการผลิตว่าเทียบเท่ากัน



รูปที่ 2.6 หม้อแปลง 3 เฟส Delta connection

1) การทดสอบการเพิ่มของอุณหภูมิ (Temperature rise test) เป็นการทดสอบเพื่อหาอุณหภูมิเพิ่มในสภาวะคงที่ ซึ่งก็คือตรวจสอบขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นจริงตามที่ได้ตกลงกันไว้หรือไม่ เพราะหากทดสอบผ่านหมายถึงสามารถใช้งานหม้อแปลงได้ตลอดเวลาตามที่ระบุไว้ใน Nameplate ในขณะที่อุณหภูมิ Ambient สูงสุดไม่สูงเกินกว่าค่าที่ตกลงกันไว้ โดยไม่จำเป็นต้องติดพัดลมเพิ่ม หรือไม่ต้อง Overload หม้อแปลงเพราะเป็นการทำลายอายุการใช้งานของหม้อแปลงในระยะยาว สำหรับค่าการทดสอบที่ยอมรับได้คือค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำมันด้านบนและของค่าเฉลี่ยของขดลวดนั้นต้องไม่เกินค่าการันตี

2) การวัดเสียง (Determination of sound levels) เป็นการทดสอบวัดค่าเสียงที่เกิดขึ้นขณะใช้งานหม้อแปลง โดยปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดเสียงประกอบด้วย Magnetostriction, Electromagnetic forces ในขดลวด, Magnetic tank shield, เสียงของพัดลมและมอเตอร์ สำหรับค่าที่ยอมรับได้คือค่าที่ต่ำกว่าการันตี

2.3 ฉนวนภายในหม้อแปลง

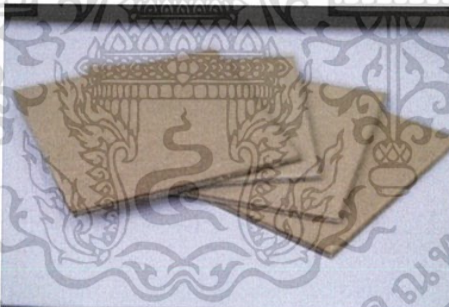
ฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 2 ชนิดได้แก่

2.3.1 ฉนวนแข็ง [3]

ฉนวนแข็งนอกจากจะทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าแล้วบางส่วนยังจะต้องทำหน้าที่ยึด หรือรับแรงกลอันเกิดจากน้ำหนักของโครงสร้าง หรือแรงกลไดนามิกส์ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าอีกด้วย โดยฉนวนแข็งที่ใช้หลักๆในหม้อแปลงไฟฟ้าคือกระดาษอัดแรง

กระดาษอัดแรง (Press Board)

กระดาษอัดแรงเป็นวัสดุประเภทเซลลูโลสหลายชั้นที่มาจากกระดาษที่ถูกบีบอัดด้วยแรงดันและความร้อน โดยขึ้นรูปเป็นวัสดุแข็งที่มีความหนาแน่นสูง โดยเพอร์สบอร์ดถือเป็นพอลิเมอร์อินทรีย์ที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางกลอย่างดี เนื่องจากเซลลูโลสเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีการซ้อนทับกันไปมาทำให้มีลักษณะเป็นรูพรุน จึงทำให้มีความไวต่อความชื้น และอุณหภูมิ โดยไฟเบอร์ (Fiber) แต่ละเส้นในเซลลูโลสประกอบด้วยพอลิเมอร์เรียงตัวขนานกันโดยพอลิเมอร์แต่ละเส้นที่ขนานกันจะยึดติดกันด้วยไฮโดรเจน เมื่อโมเลกุลของน้ำสัมผัสกับผิวหน้าของเซลลูโลสไฟเบอร์ จะทำให้เกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างอะตอมออกซิเจนกับไฮโดรเจน ทำให้กระดาษฉนวนสามารถดูดซับความชื้นได้ดี



รูปที่ 2.7 กระดาษอัดแรง

2.3.2 ฉนวนเหลว [4]

ฉนวนเหลวที่อยู่ในหม้อแปลงจะมีหน้าที่หลักในการเป็นฉนวนของหม้อแปลงและถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงออกสู่สิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ น้ำมันที่ใช้ในหม้อแปลงยังช่วยป้องกัน การเกิดปฏิกิริยาเคมีภายในหม้อแปลง ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังส่วนใหญ่ นั้นจะใช้น้ำมันแร่เป็นฉนวนเหลวภายในหม้อแปลง นอกจากนี้ยังมีฉนวนเหลวทางเลือกอื่นที่สามารถนำมาใช้ในหม้อแปลงดังแสดงตารางที่ 2.1

ตาราง 2.1 การใช้งานของฉนวนเหลวแต่ละชนิดที่ใช้ในหม้อแปลง

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

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

ฉนวนเหลวที่ใช้ในหม้อแปลงมีหลายประเภท แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงน้ำมันแร่ และ เอสเทอร์ธรรมชาติดังนี้

1) น้ำมันแร่

น้ำมันแร่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกิดจากการกลั่นน้ำมันดิบ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่มีประโยชน์และต้นทุนต่ำ น้ำมันแร่เป็นฉนวนเหลวที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมหม้อแปลงและ ปัจจุบันฉนวนเหลวใช้มากที่สุดสำหรับหม้อแปลงขนาดกลางและหม้อแปลงขนาดใหญ่

น้ำมันแร่เป็นของเหลวโปร่งแสงและไม่มีสี ประเภทต่างๆของไฮโดรคาร์บอนของน้ำมันแร่ ได้แก่

- แอลเคนแบบโซ่ตรง
- แอลเคนแบบกิ่ง
- พาราฟิน
- อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

น้ำมันแร่ที่ใช้สำหรับหม้อแปลง มีอยู่ 2 ประเภทหลักๆ ซึ่งมาจากกระบวนการกลั่นน้ำมันที่แตกต่างกัน

น้ำมันพาราฟิน ที่ได้มาจากน้ำมันดิบที่มีปริมาณของ n-paraffins มากกว่าแนฟทาโนค โดยเกิดขึ้นตามธรรมชาติ น้ำมันพาราฟิน มีจุดไหลเทค่อนข้างสูงและอาจต้องเติมสารบางอย่างเพื่อลดจุดไหลเท

น้ำมันแนฟทา ที่ได้มาจากน้ำมันดิบที่มีปริมาณของ n-paraffins ต่ำมาก(หรือไม่มี) น้ำมันแนฟทามีจุดไหลเทต่ำโดยไม่ต้องเติมสารใดๆเพื่อลดจุดไหลเท และน้ำมันแนฟทามีลักษณะขุ่นมากกว่าน้ำมันพาราฟิน

น้ำมันแร่ใหม่ที่มีการผลิตเพื่อให้สอดคล้องกับ IEC 60296 [5]หรือ ASTM D3487[6] เพราะน้ำมันแร่ถูกใช้เป็นระยะเวลาที่ยาวนาน ฐานข้อมูลขนาดใหญ่ของข้อมูลที่สามารถตีความหมายของการเปลี่ยนแปลงลักษณะของมันและทำให้คาดการณ์ความผิดปกติของหม้อแปลง IEC 60422[7]

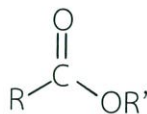
เป็นเครื่องมือที่ดีในการประเมินคุณภาพของฉนวนน้ำมันที่ใช้ในหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) เอสเทอร์

“เอสเทอร์” มาจากการเชื่อมโยงทางเคมีซึ่งเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของแอลกอฮอล์และกรดไขมัน การเชื่อมโยงโมเลกุลระหว่างเอสเทอร์จะแสดงดังรูป 2.8

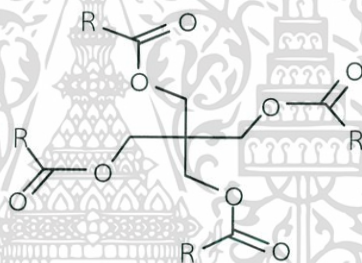


รูปที่ 2.8 การเชื่อมโยงเอสเทอร์[4]

ในรูปที่ 2.8 O แทน ออกซิเจน, C แทน คาร์บอน, R และ R' แทนไฮโดรคาร์บอน ซึ่งอาจจะเหมือนหรือต่างกัน เส้นเดี่ยวแสดงให้เห็นถึงพันธะเดี่ยวและสองเส้นหมายถึงพันธะคู่

- เอสเทอร์ธรรมชาติ

เอสเทอร์ธรรมชาติผลิตจากน้ำมันที่ได้จากพืชโดยโครงสร้างของเอสเทอร์ธรรมชาติจะแสดงดังรูป 2.9



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของเอสเทอร์ธรรมชาติ [4]

โครงสร้างของเอสเทอร์ธรรมชาติจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างพันธะของกลีเซอรอลซึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติและ 3 กลุ่มกรดไขมันซึ่งเป็นพันธะต่อกัน กรดไขมันเหล่านี้อาจจะเหมือนหรือต่างกัน ผลผลิตเหล่านี้ทำให้เอสเทอร์เป็นส่วนหนึ่งของวงจรการเจริญเติบโตโดยธรรมชาติ

เอสเทอร์ธรรมชาติมีข้อได้เปรียบคือจุดติดไฟสูงและการย่อยสลายที่ดี แต่เอสเทอร์ธรรมชาติทุกประเภทไม่เสถียรภาพต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันเหมือนฉนวนเหลวประเภทอื่นๆ

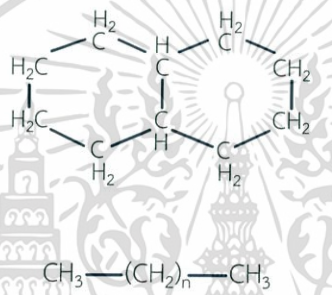
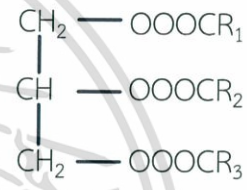
แม้ว่าเอสเทอร์ธรรมชาติสามารถผลิตได้จากน้ำมันพืชหลายชนิด แต่เอสเทอร์ธรรมชาติสำหรับการใช้งานเกี่ยวกับไฟฟ้ามีส่วนใหญ่มาจากน้ำมันถั่วเหลืองและน้ำมันดอกทานตะวัน

เนื่องจากปัจจัย เช่น ความพร้อม, ต้นทุน, ที่มีคุณลักษณะที่ต้องการมากกว่าน้ำมันพืชอื่นๆ เช่น น้ำมันมะพร้าวได้ถูกนำมาใช้งาน แต่ไม่กว้างขวางนัก ในสหรัฐอเมริกา มีสองมาตรฐานที่ใช้กับเอสเทอร์ธรรมชาติคือ IEEE c57.147-2008 [8] และ ASTM D6871-O3 (2008) [9]

2.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของฉนวนเหลวหม้อแปลง [4]

ภาพรวมของคุณสมบัติของประเภทที่แตกต่างกันของฉนวนเหลว ดังแสดงในตารางที่ 2.2 และคุณสมบัติทางฟิสิกส์และไฟฟ้าของฉนวนเหลวชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 แสดงภาพรวมคุณสมบัติของฉนวนเหลวชนิดน้ำมันแร่และเอสเทอร์ธรรมชาติ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

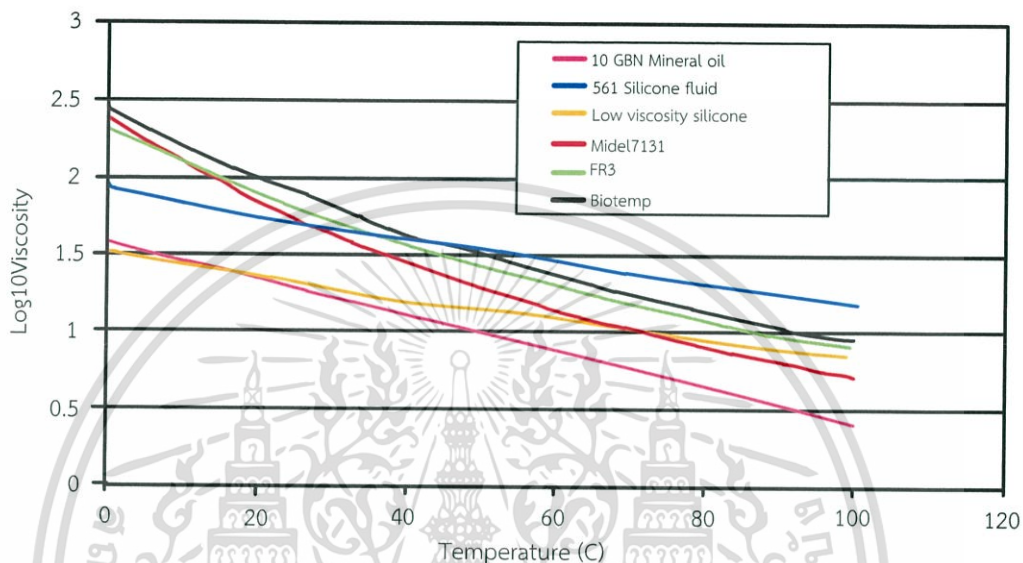
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และไฟฟ้าของฉนวนเหลวชนิดน้ำมันแร่และเอสเทอร์

		mineral oil	Natural ester	
		Nynas	Cooper Industries	ABB
General properties	Units	10 GBN Mineral oil	FR3	BIOTEMP
Density at 20°C	g/ml	0.88	0.92	0.91
Specific heat at 20°C	J/kg K	1860	1883	1943
Thermal conductivity at 20°C	W/m K	0.126	0.167	0.16
Kinematic viscosity at 0°C	mm ² /s	37.5	207	276
Kinematic viscosity at 20°C	mm ² /s	22	78	97
Kinematic viscosity at 40°C	mm ² /s	9	36	42
Kinematic viscosity at 100°C	mm ² /s	2.6	8	9
Pour point	°C	-50	-21	-19 to -20
Expansion coefficient	°C	0.00075	0.00074	0.00068
Flash point	°C	148	330	330
Fire point	°C	170	360	360
Autoignition temperature	°C	280		
Fire hazard classification to IEC 61100		O	K2	K2
Biodegradability at 28 days				
- OECD 301F	%	N/A	>99	
- OECD 301D	%	<10		
- OECD 301B	%		95-100	readily biodegradable
Gassing Tendency	µL/min	+5 ; Nitro 10CX = 30	-79.2	-50
RBOT Test	minutes	300	17	197
Chemical Propoties				
Neutralisation value	mg KOH/g	<0.01	0.022	<0.03
Net calorific value	MJ/kg	46		36.9
Electrical Properties				
Breakdown Strength IEC 60156 2.5mm	kV	>70	56 (ATSM 1816)	>75
Dielectric dissipation factor at 90°C		<0.02	0.005	0.014
Permittivity at 20°C		2.2	3.2	3.2

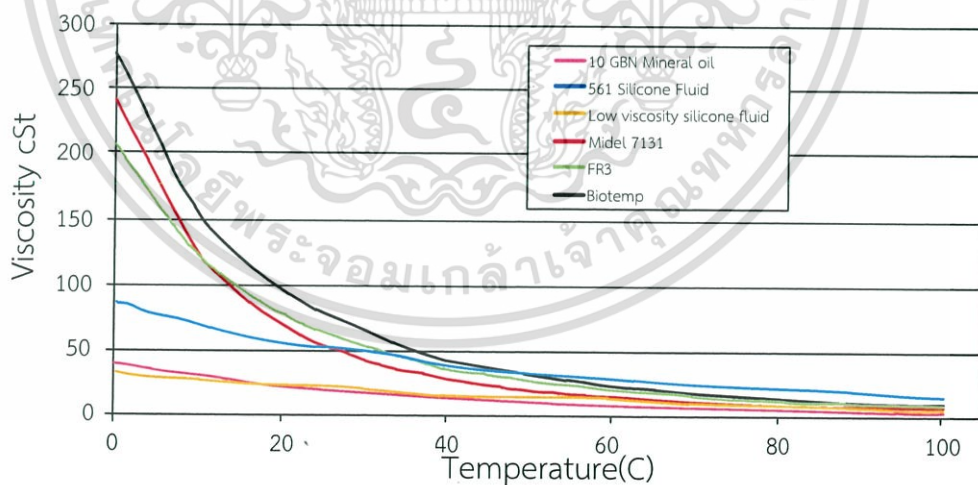
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 การเปรียบเทียบความหนืด

ความหนืดของฉนวนเหลวเป็นหนึ่งในตัวแปรสำคัญในการกำหนดความสามารถในการระบายความร้อนของฉนวนเหลวจากมุมมองของการออกแบบหม้อแปลง กราฟต่อไปนี้จะแสดงทั้งการพล็อตแบบล็อกการิทึมดังรูปที่ 2.10 และแบบเชิงเส้นของความหนืดดังรูปที่ 2.11 เมื่อเทียบกับอุณหภูมิของฉนวนเหลวหม้อแปลงที่ใช้กันโดยทั่วไป



รูปที่ 2.10 กราฟล็อกการิทึม (ความหนืด) กับ อุณหภูมิ



รูปที่ 2.11 การเปรียบเทียบความหนืด กับ อุณหภูมิที่แปรผัน

จากรูปที่ 2.10 และ 2.11 ก็ จะเห็นได้ว่า แก๊สซิลิโคนเหลวความหนืดต่ำ ส่วนฉนวนเหลวทางเลือกที่เหลือทั้งหมดมีความหนืดมากกว่าน้ำมันแร่ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง แต่ความแตกต่างลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ความหนืดของของเหลวแสดงให้เห็นถึงความต้านทานต่อการไหลเพราะฉนวนเหลวยังทำหน้าที่ระบายความร้อน ความหนืดสูงอาจชะลอการไหลของฉนวนน้ำมันในร่องน้ำมัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในตัวอย่างแปลงและการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการทำงานของหม้อแปลง ที่อุณหภูมิมากกว่า 80°C อัตราการไหลเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณา ซึ่งที่อุณหภูมิดังกล่าวทำให้การย่อยสลายของเซลลูโลสกลายเป็นปัญหา และยังทำให้เซลลูโลสมีความหนืดสูงขึ้น

2.4.2 การเปรียบเทียบการทนความชื้น

น้ำเป็นโมเลกุลที่มีขั้วมากและขั้วโมเลกุลมีแนวโน้มที่จะดึงดูดขั้วโมเลกุลอื่นๆ ในบริบทนี้คำว่า "ขั้ว" หมายถึงขอบเขตของสารที่มีความดึงดูดแตกต่างกันเช่นขั้วของแม่เหล็ก

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

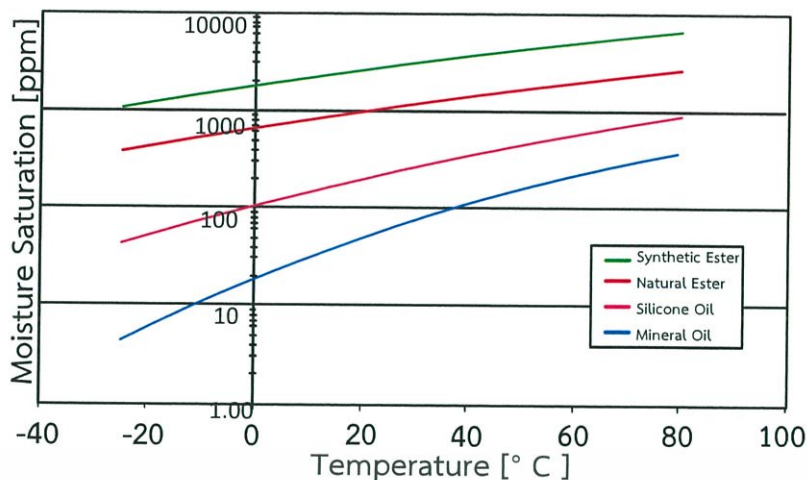
2.4.3 ความสามารถในการละลายของน้ำในฉนวนน้ำมัน

ในตารางที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงการละลายของน้ำในฉนวนน้ำมันที่ใช้ในหม้อแปลง ที่อุณหภูมิห้อง นั่นคือปริมาณของความชื้นซึ่งฉนวนน้ำมันสามารถกักเก็บได้โดยที่ยังไม่เกิดน้ำขึ้น

ตารางที่ 2.4 การละลายของน้ำในฉนวนน้ำมัน

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

การละลายของน้ำในฉนวนน้ำมันทั้งหมดเหล่านี้เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ รูปที่ 2.12 แสดงการพล็อตลอการิทึมของการละลายน้ำกับอุณหภูมิสำหรับฉนวนน้ำมันที่ใช้ในหม้อแปลงที่ศึกษา เห็นได้ชัดว่าเอสเทอร์ซึ่งมีขั้วมากขึ้นสามารถที่จะดูดซับน้ำมากขึ้นในช่วงอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.12 เปรียบเทียบการอิ่มตัวความชื้นกับอุณหภูมิ

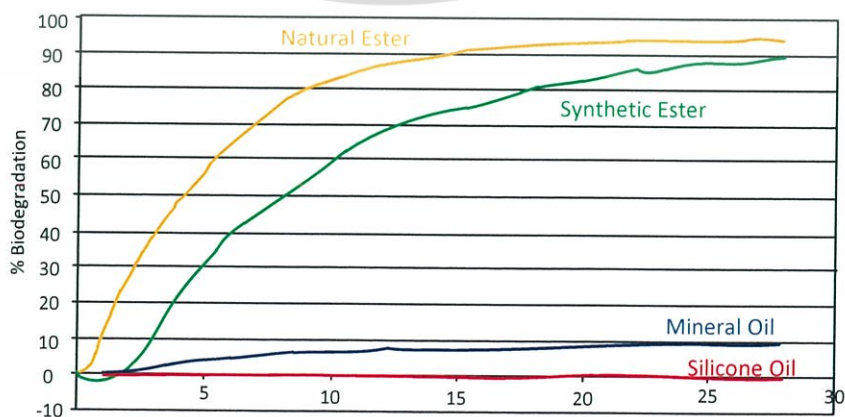
2.4.4 ความปลอดภัยด้านสิ่งแวดล้อม

ความปลอดภัยด้านสิ่งแวดล้อมจะถูกกำหนดด้วย 2 เกณฑ์ขั้นพื้นฐานคือการย่อยสลายทางชีวภาพและความเป็นพิษต่ำ ในฉนวนเหลวซึ่งมีอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพได้อย่างรวดเร็ว และสามารถแสดงให้เห็นว่ามีความเป็นพิษต่ำจะถูกจัดประเภทให้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ปัจจัยเหล่านี้มีความสำคัญเมื่อมีการพิจารณาการใช้งานของฉนวนเหลวในพื้นที่เสี่ยงต่อสิ่งแวดล้อม เช่น เส้นทางน้ำให้หลีกเลี่ยงการปนเปื้อนสารพิษ

2.4.5 การย่อยสลายทางชีวภาพ

การย่อยสลายทางชีวภาพสะท้อนให้เห็นถึงการที่ฉนวนเหลวจะถูกย่อยสลายตามธรรมชาติที่เกิดขึ้นโดยจุลินทรีย์ในดินหรือน้ำ เห็นได้ชัดว่าถ้าฉนวนเหลวที่รั่วไหลออกมาสามารถหายไปได้อย่างรวดเร็วตามธรรมชาติโดยไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการทำความสะอาด

ทั้งเอสเทอร์ธรรมชาติและเอสเทอร์สังเคราะห์จะถูกจัดประเภทการย่อยสลายทางชีวภาพได้ ในขณะที่น้ำมันแร่และซิลิโคนเหลวมีความสามารถในการย่อยสลายต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การเปรียบเทียบอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทดสอบโดยวิธีการได้รับการยอมรับมาตรฐาน น้ำมันซิลิโคนแทบจะย่อยสลายไม่ได้ แต่ถ้าน้ำมันซิลิโคนมาผสมกับสารเคมีจะทำให้กระบวนการย่อยสลายเกิดได้เร็วขึ้น

ซึ่งหมายความว่าน้ำมันซิลิโคนในสภาพแวดล้อมมีความซับซ้อนการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยตัวเองมากกว่า อย่างไรก็ตามปัจจัยที่แตกต่างกันซึ่งทำให้ซิลิโคนเสื่อมสภาพในธรรมชาติแสดงให้เห็นว่าควรได้รับการพิจารณามากกว่าฉนวนเหลวที่สามารถย่อยสลายเองได้ตามธรรมชาติ

2.4.6 การเกิดออกซิเดชันของฉนวนเหลว

ความกังวลของผู้ใช้ของเหลวทางเลือกคือการเกิดออกซิเดชันของฉนวนเหลวในหม้อแปลง ความสัมพันธ์ของความเสถียรภาพของการเกิดออกซิเดชันเรียงจากมากไปน้อยตามลำดับดังนี้ น้ำมันซิลิโคน, เอสเทอร์สังเคราะห์, น้ำมันแร่ และเอสเทอร์ธรรมชาติ

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

การเบรกดาวนทางความร้อนของฉนวนเหลวซิลิโคนเริ่มต้นที่อุณหภูมิมากกว่า 230°C (450°F) ที่อุณหภูมิเหล่านี้โซ่โพลีเมอร์ยาวจะเริ่มสลายโดยที่ระเหยเป็นไอได้รวดเร็วมากกว่าวัสดุซิลิโคน

ในกรณีของเอสเทอร์สังเคราะห์การเกิดออกซิเดชันจะขึ้นอยู่กับกรดอิมิด์และ pentaerythritol รวมตัวกับออกซิเจนแต่จะเกิดขึ้นช้ามากที่อุณหภูมิสูงกว่า 125°C การออกซิเดชันของเอสเทอร์สังเคราะห์จะไม่ทำให้เกิดกากตะกอนแต่จะเกิดกรดอินทรีย์

ในกรณีของน้ำมันแร่ น้ำมันแร่เริ่มมีการระเหยและรวมตัวกับออกซิเจนที่อุณหภูมิสูงกว่า 105°C ผลของการเกิดออกซิเดชันทำให้เกิดสารมากมายซึ่งรวมถึงกรดอินทรีย์และกากตะกอน ผลิตภัณฑ์เหล่านี้โดยอาจทำให้เกิดปัญหาในหม้อแปลงไฟฟ้าโดยทำให้คุณสมบัติเป็นฉนวนลดลง และเกิดการกัดกร่อนโลหะ

ในกรณีเอสเทอร์ธรรมชาติส่วนใหญ่มีความไวต่อการเกิดออกซิเดชันเพราะโครงสร้างทางเคมีเอสเทอร์ธรรมชาติมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นกลีเซอรอลที่ติดกับ 3 กลุ่มกรดไขมัน

2.5 คุณสมบัติของฉนวน

ฉนวนในระบบไฟฟ้ากำลังจะทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าให้กับตัวนำหรือส่วนที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าไม่ให้เกิดลัดวงจรถึงกัน โดยทั่วไปฉนวนถูกแบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ฉนวนก๊าซ, ฉนวนเหลว และฉนวนของแข็ง ฉนวนแต่ละชนิดนอกจากจะทำหน้าที่ทางไฟฟ้าแล้วยังมีหน้าที่เฉพาะเพิ่มเติม เช่น ฉนวนก๊าซและฉนวนเหลวจะมีหน้าที่ช่วยระบายความร้อนให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้า ส่วนฉนวนแข็งจะมีหน้าที่รับภาระทางกลของตัวนำไฟฟ้า เป็นต้น การฉนวนมักจะเป็นการใช้ฉนวนร่วมกันมากกว่าหนึ่งประเภท เช่น ในหม้อแปลงมักจะทำฉนวนน้ำมันแร่เป็นฉนวนหลัก และใช้กระดาษฉนวนเป็นฉนวนรอบๆ ขดลวดรวมทั้งเพอร์สบอร์ดใช้คั่นระหว่างรอบของขดลวดตัวนำ และยึดไม่ให้เคลื่อนที่ เป็นต้น โดยลักษณะสำคัญที่เป็นตัวชี้บอกถึงคุณสมบัติ และคุณภาพของไดอิเล็กตริกมี 4 ประการ คือ

2.5.1 ความต้านทานของฉนวน (Resistance) [3]

ฉนวนไฟฟ้าเป็นสารที่นำไฟฟ้าได้น้อยมากหรือไม่นำไฟฟ้าเลยเมื่อมีสนามไฟฟ้ามากระทำต่อฉนวนโดยฉนวนที่สมบูรณ์จริงๆ เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าจะไม่มีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ นั่นคือจะไม่มีสภาพนำไฟฟ้าอยู่เลย หรือกล่าวอีกแบบหนึ่งก็คือ สารฉนวนนั้นมีค่าความต้านทานสูงเป็นอนันต์ แต่ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในทางปฏิบัตินั้นมักจะนำกระแสแต่มีค่าน้อยมาก เมื่อนำฉนวนไปคั่นระหว่างอิเล็กโตรดที่บ่อนแรงดันกระแสตรงเป็นเวลานานพอจะมีกระแสไหลผ่านฉนวนนั้นแต่น้อย เรียกว่ากระแสรั่ว หรือกระแสค้ำ กระแสรั่วที่ไหลผ่านฉนวนที่แบ่งออกเป็นสองทาง คือ หนึ่งไหลผ่านในฉนวน เนื่องจากฉนวนมีสภาพนำไฟฟ้าอยู่บ้างดังกล่าวแล้ว ส่วนอีกทางหนึ่งไหลผ่านตามผิวฉนวนเนื่องจากผิวฉนวนมีสภาพนำไฟฟ้า เนื่องจากสิ่งเปื้อนและความชื้นที่ผิว ด้วยเหตุนี้การวัดความต้านทานฉนวนจึงแยกเป็นความต้านทานเชิงปริมาตร (Volume resistance) และความต้านทานเชิงผิว (Surface resistance)

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

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.5)$$

ส่วนในกรณีของไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุแบบทรงกระบอกซ้อนกันรวม ความต้านทานของฉนวน หาได้จาก

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2.6)$$

เมื่อ r_1, r_2 คือ รัศมีของตัวนำในและตัวนอกตามลำดับ

L คือ ความยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 เปรอ์มิติตวิติ [10]

เปรอ์มิติตวิติเป็นค่าตัวเลขที่บอกให้ทราบว่าจะมีค่าคาปาซิแตนซ์เป็นกี่เท่าของ ฉนวนสุญญากาศ โดยกำหนดให้ฉนวนที่พิจารณาและฉนวนสุญญากาศอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ใช้อิเล็กโตรดเดียวกันหรืออาจจะพิจารณาค่า ϵ เป็นอัตราส่วนดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิด

ค่าเปรอ์มิติตวิติของวัสดุคำนวณได้จาก

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad \text{F/m} \quad (2.7)$$

เมื่อ ϵ คือค่าเปรอ์มิติตวิติของวัสดุ

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

ϵ_r คือค่าเปรอ์มิติตวิติสัมพัทธ์ของวัสดุ

ค่า ϵ_r สามารถที่จะนิยามได้จากค่าอัตราส่วนระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ใช้วัสดุจำเพาะเป็นฉนวน (C) ต่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ใช้สุญญากาศเป็นฉนวนคั่นระหว่างอิเล็กโตรด (C_0)

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (2.8)$$

เมื่อ C คือค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ใช้วัสดุจำเพาะเป็นฉนวน

C_0 คือค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ใช้สุญญากาศเป็นฉนวน

ในกรณีทั่วไปเมื่อฉนวนได้รับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ค่าเปรอ์มิติตวิติสัมพัทธ์ของวัสดุสามารถเขียนอยู่ในรูปจำนวนเชิงซ้อน ดังแสดงในสมการ

$$\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2.9)$$

เมื่อ ϵ_r คือส่วนจริงของค่าเปรอ์มิติตวิติสัมพัทธ์เชิงซ้อน เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฉนวน

มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถของฉนวนในการเก็บพลังงานในรูปของสนามไฟฟ้า

ϵ'' คือส่วนจินตภาพของค่าเปรอ์มิติตวิติสัมพัทธ์เชิงซ้อน เป็นค่าที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับ

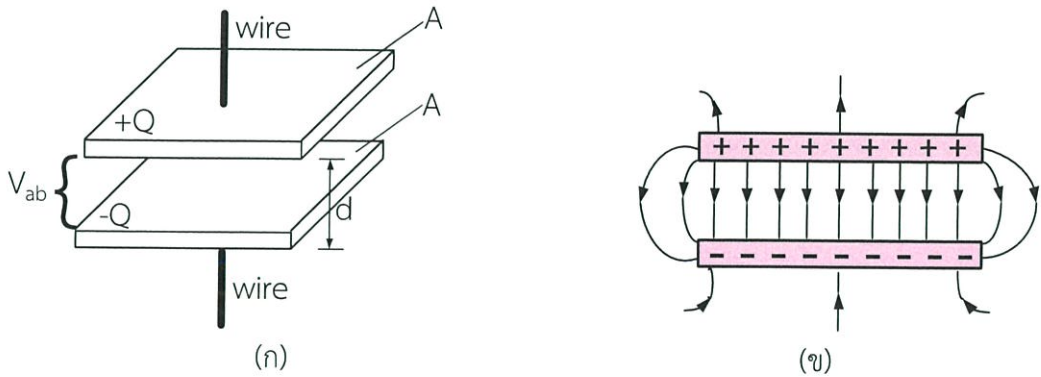
ค่าแพกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสนามไฟฟ้า และค่าความเข้มสนามไฟฟ้า

$$D = \epsilon E = \epsilon_0 \epsilon_r E \quad (\text{C/m}^2) \quad (2.10)$$

ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบขนานที่มีพื้นที่หน้าตัดของตัวนำเป็น A และระยะห่างระหว่างแผ่นเพลตเป็น d ดังรูปที่ 2.14 วัสดุที่คั่นระหว่างแผ่นเพลตตัวนำมีค่าเปรอ์มิติตวิติ ϵ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.8

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad \text{F} \quad (2.11)$$



รูปที่ 2.14 ตัวเก็บประจุแบบขนาน

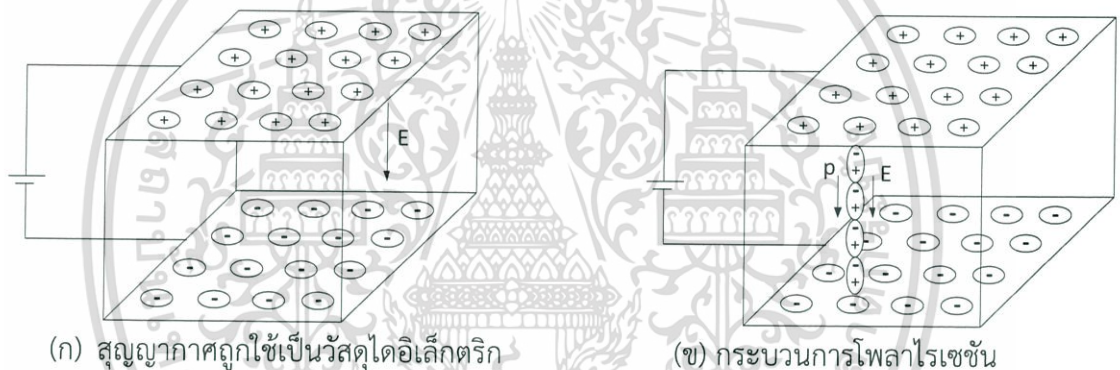
ตารางที่ 2.5 ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของวัสดุ

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

พิจารณาตัวเก็บประจุแบบขนานอย่างง่าย ในรูปที่ 2.15 โดยมีแผ่นเพลตตัวนำพื้นที่หน้าตัด A สองแผ่นวางขนานห่างกันเป็นระยะ d โดยมีสุญญากาศเป็นตัวกลางคั่นอยู่ เมื่อนำแบตเตอรี่ที่มีแรงดันไฟฟ้า V_{ab} ต่อเข้ากับแผ่นตัวนำทั้งสอง จะเกิดประจุ $\pm Q$ ขึ้นบนแผ่นตัวนำ ประจุจะกระจายไปทั่วทั้งผิวของแผ่นตัวนำทันที การเคลื่อนที่ของประจุบวกและอิเล็กตรอน (ประจุลบ) เป็นไปอย่างอิสระ (Free charge) ความหนาแน่นของประจุ $\pm Q$ ทำให้ความเครียดของสนามไฟฟ้า E ขึ้นมา มีทิศทางจากแผ่นเพลตตัวนำประจุบวกไปยังแผ่นเพลตตัวนำประจุลบ ดังแสดงในรูปที่ 2.15(ก) ต่อมาหากใส่วัสดุฉนวนหรือวัสดุไดอิเล็กตริกเข้าไปเติมช่องระหว่างแผ่นเพลตตัวนำพอดี แต่ละอะตอมและ/หรือ โมเลกุลที่อยู่ภายในเนื้อฉนวนจะถูกโพลาริซ์ทำให้เกิดพฤติกรรมเชิงขั้วขึ้นมาเนื่องจากสนามไฟฟ้า E พิจารณาพฤติกรรมของอะตอมภายใต้สนามไฟฟ้า กลุ่มหมอกอิเล็กตรอนจะพยายามเคลื่อนที่สวนทางกับสนามไฟฟ้า ในขณะที่ประจุบวกในนิวเคลียสจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้า ประจุบวกและอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ห่างออกจากกันได้ไม่เกินกว่าคุณสมบัติความยืดหยุ่นของพันธะ ของอะตอม การเคลื่อนที่ของประจุบวกและกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนทำให้จุดศูนย์กลางรวมมวลของอิเล็กโตรดแยกออกจากนิวเคลียส รูปร่างของอะตอมจะเปลี่ยนไปเล็กน้อย อะตอมและ/หรือ โมเลกุลที่เกิดโพลาริซ์ทำให้เกิดไดโพลไฟฟ้า (Electric dipole) ในวัสดุฉนวน ไดโพลไฟฟ้าแต่ละไดโพล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเรียงตัวตามทิศทางของสนามไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.15(ข) การเรียงตัวของไดโพลไฟฟ้าให้ประจุไดโพลที่เรียงตัวต่อกันภายในเนื้อฉนวนหักล้างกันหมด ในขณะที่ประจุที่อยู่บริเวณผิวเนื้อฉนวนหน้าที่ติดกับแผ่นเพลตตัวนำทั้งสองยังคงอยู่ จะมีประจุลบอยู่ที่ผิวบนฉนวนและประจุบวกอยู่ที่ผิวล่างฉนวน ประจุที่ผิวเหล่านี้จะดึงดูดและยึดเหนี่ยวกับประจุที่มีจำนวนเท่ากันแต่เป็นชนิดตรงกันข้ามบนแผ่นเพลตตัวนำ พฤติกรรมของฉนวนภายใต้สนามไฟฟ้าที่กล่าวมานี้คือ คุณสมบัติโพลาไรเซชัน (Polarization characteristic) ของวัสดุฉนวนหรือวัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric material) ที่ได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าภายนอก กระบวนการเกิดโพลาไรเซชันทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นมาภายในเนื้อฉนวนในทิศทางตรงกันข้ามกับสนามไฟฟ้าที่เกิดจากความต่างศักย์ของแผ่นอิเล็กโทรดการหักล้างกันระหว่างสนามไฟฟ้าที่มีทิศทางต่างกันนั้น ส่งผลให้แรงดันระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดลดลง ซึ่งจะเห็นได้ชัดในกรณีที่มีการบ่อนแรงดันให้แผ่นอิเล็กโทรดทั้งสองเพียงชั่วคราว แล้วนำแหล่งจ่ายแรงดันออกไป จากนั้นจึงทำการใส่ฉนวนเข้าไประหว่างแผ่นอิเล็กโทรด การลดลงของแรงดันระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดจะมีผลต่อเนื่องให้ค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นอิเล็กโทรดที่มีฉนวนเป็นตัวกลางมีค่าสูง



รูปที่ 2.15 ปรากฏการณ์โพลาไรเซชัน

โพลาไรเซชัน P (C/m^2) ถูกนิยามว่าเป็นอัตราส่วนของไดโพลโมเมนต์ p ($C.m$) ที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นมาภายในเนื้อฉนวนภายใต้สนามไฟฟ้าภายนอกที่บ่อนให้กับอิเล็กโทรดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของฉนวนขนาดของโพลาไรเซชัน P เป็นอัตราส่วนกับขนาดของสนามไฟฟ้า E ในกรณีที่สนามไฟฟ้าไม่มากพอที่จะทำให้ลายคุณสมบัติความเป็นฉนวนของวัสดุหรือวัสดุไดอิเล็กตริก

$$P = (\epsilon_r - 1)\epsilon_0 E = \chi\epsilon_0 E \quad (2.12)$$

เมื่อ $\chi = \epsilon_r - 1$ โดยที่ χ เป็นค่าความสามารถยอมรับได้ของไดอิเล็กตริก (Dielectric susceptibility) ค่า χ จะแสดงความสามารถของวัสดุในการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าจากภายนอก

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (2.13)$$

โพลาไรเซชัน P จะมีทิศทางเดียวกับทิศทางของความเข้มสนามไฟฟ้า ความสัมพันธ์ระหว่างโพลาไรเซชัน P กับความหนาแน่นไฟฟ้า D แสดงดังสมการที่ (2.13)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 แฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก [10]

การใช้งานฉนวนในระบบไฟฟ้ากำลังนั้น ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่จะต้องพิจารณา ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกจะเป็นดัชนีชี้วัดตัวหนึ่งของอายุการใช้งานฉนวน ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

1) ค่าความสูญเสียเนื่องจากการที่ฉนวนไม่ได้เป็นฉนวนบริสุทธิ์ เมื่อฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้ามีผลให้เกิดสภาพนำไฟฟ้าขึ้นมา ทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากมีกระแสรั่วไหลฉนวน

2) ค่าความสูญเสียเนื่องจากพฤติกรรมกรรมมีข้อผิดพลาดโดยสภาวะปกติที่โมเลกุลของฉนวนจะดำรงอยู่อย่างอิสระ เมื่อฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า ประจุบวกและลบของโมเลกุลจะแยกออกห่างจากกันและประจุติดตัวเหมือนไดโพลที่มีขนาดของประจุเท่ากันแต่มีขั้วตรงกันข้ามแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าจะกระทำต่อไดโพลให้เกิดการปรับทิศทางให้วางตัวอยู่ในแนวของสนามไฟฟ้า ในกรณีที่ฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับไดโพลจะต้องเกิดการเรียงตัวสลับที่ไปมาตลอดเวลา ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียในรูปของความร้อน

3) ค่าความสูญเสียเนื่องจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายในเนื้อฉนวน การเกิดดิสชาร์จบางส่วน(Partial discharge) ภายในเนื้อฉนวนจะเกิดขึ้นได้ในกรณีที่เนื้อฉนวนไม่ได้เป็นเนื้อเดียวสมบูรณ์ทั้งหมด (Nonhomogeneous) ภายในเนื้อฉนวนอาจจะมีโพรงอากาศหรือวัสดุแปลกปลอมรวมอยู่ด้วย โพรงอากาศหรือวัสดุแปลกปลอมจะมีค่าความจุไฟฟ้าและค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ต่ำกว่าเนื้อฉนวนเมื่อฉนวนได้รับแรงดันไฟฟ้ามักจะเกิดการเบรกดาวน์ขึ้นภายในโพรงอากาศหรือวัสดุแปลกปลอม กระแสดิสชาร์จจะอยู่ในโพรงอากาศเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนชนกับผนังโพรงเกิดปฏิกิริยาเคมีและความร้อนขึ้น การเกิดดิสชาร์จบางส่วนดังกล่าวภายในเนื้อฉนวนจะทำให้อายุการใช้งานของฉนวนลดลง

พิจารณาวงจรสมมูลของฉนวน อาจแบ่งออกเป็น 2 แบบด้วยกันคือ วงจรขนาน RC หรือ วงจรอนุกรม RC โดยที่ R แทนค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในฉนวน C แทนคุณสมบัติของฉนวนที่สามารถเก็บประจุและพลังงานไว้ได้ในรูปสนามไฟฟ้า

$$\text{โดยที่} \quad R_p = \frac{1 + (\omega C_s R_s)^2}{R_s (\omega C_s)^2} \quad (2.12)$$

$$C_p = \frac{C_s}{1 + (\omega C_s R_s)^2} \quad (2.13)$$

$$\text{ทำนองเดียวกัน} \quad R_s = \frac{1 + (\omega C_p R_p)^2}{R_p (\omega C_p)^2} \quad (2.14)$$

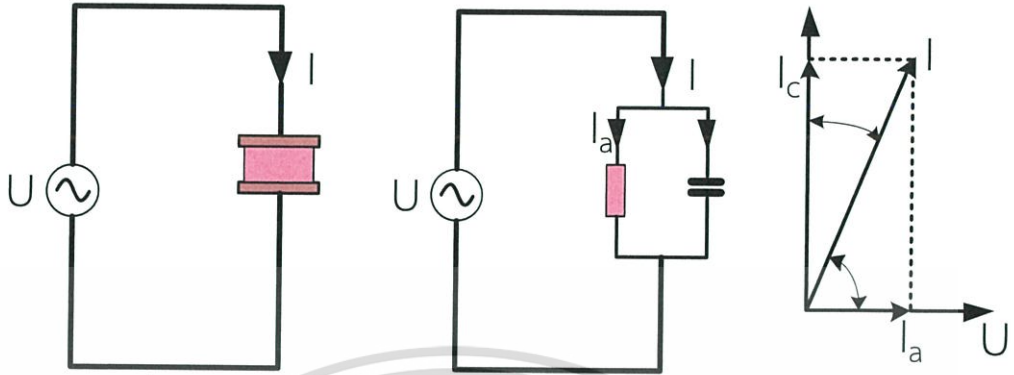
$$C_s = \frac{C_p}{1 + (\omega C_p R_p)^2} \quad (2.15)$$

$$\text{เมื่อป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ให้กับฉนวน} \quad U = U_m \sin \omega t \quad (2.16)$$

$$\text{จะได้} \quad I = I_m \sin(\omega t + \phi) \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันแสดงดังรูปที่ 2.16 เมื่อ I_a คือกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน และ I_c คือกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ



รูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ป้อนให้กับฉนวน

กำหนดให้ δ เป็นมุมระหว่าง I กับ I_c ซึ่งโดยปกติแล้วมุม δ เป็นมุมที่มีค่าน้อย กำลังสูญเสียคือ

$$P_d = UI \cos \phi \quad (2.18)$$

$$= UI \sin \delta \quad (2.19)$$

เพราะว่า $\sin \delta = \tan \delta$ เมื่อ δ มีค่าน้อย

ดังนั้น

$$P_d = UI \tan \delta \quad (2.20)$$

เรียก $\tan \delta$ แฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก

เรียกมุม δ ว่ามุมกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก

พิจารณาวจรสมมูลของฉนวน

$$\text{ทำนองเดียวกัน} \quad R_s = \frac{1 + (\omega C_p R_p)^2}{R_p (\omega C_p)^2} \quad (2.21)$$

พิจารณาวจรสมมูลของฉนวน

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega R_p C_p} \quad (2.22)$$

วงจรมอดูล

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega R_p C_p} \quad (2.23)$$

วงจรรอง

$$\tan \delta = \omega R_s C_s \quad (2.24)$$

แฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกสามารถอธิบายในเทอมของค่าเปอร์มิตติวิตีเชิงซ้อนได้ดังนี้

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (2.25)$$

ซึ่งเป็นอัตราส่วนของความสูญเสียที่เกิดขึ้นต่อพลังงานที่กักเก็บได้ของฉนวนภายในระยะเวลาที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

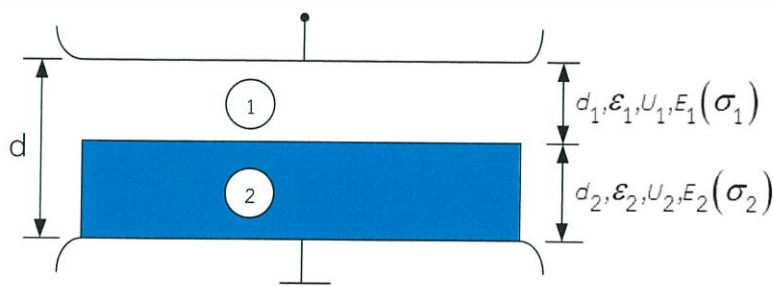
โดยทั่วไปแล้วการวัดค่าเปอร์มิตติวิตี และการวัดค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของ ฉนวนนั้นสามารถที่จะทำได้ในช่วงกว้างของความถี่ที่ใช้งาน อย่างไรก็ตามค่าเปอร์มิตติวิตี และ ค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกที่วัดได้นั้น ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความถี่และพารามิเตอร์อื่นๆ วิธีการวัด ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนแต่ละวิธีจะเหมาะสมกับช่วงความถี่ใดความถี่หนึ่ง เท่านั้น

2.5.4 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน (Dielectric Strength)

ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน หมายถึงค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric Field Strength) สูงสุดที่ฉนวนนั้นจะสามารถทนอยู่ได้ โดยไม่เกิดความเสียหาย หรือ เกิดการเบรกดาวน์ หรือทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนขึ้นอยู่กับปัจจัย หลายประการ เช่น ลักษณะมิติของอิล็กโตรด, ลักษณะสมบัติของไดอิเล็กตริก, คุณสมบัติของ แรงดันที่ฉนวนนั้นได้รับ, ระยะเวลาที่ฉนวนได้รับแรงดันไฟฟ้า โดยปกติไดอิเล็กตริกแข็งจะทนต่อ แรงดันเบรกดาวน์ได้สูงกว่าไดอิเล็กตริกเหลว การเบรกดาวน์ในฉนวนเหลวสภาพการฉนวนจะกลับสู่ สภาพปกติได้หลังจากเบรกดาวน์ผ่านไปแล้ว แต่ในฉนวนแข็งเกิดเบรกดาวน์แล้วสภาพการฉนวน จะเสียไป ทำให้ไม่สามารถใช้งานเพื่อการฉนวนได้อีก

2.6 ชั้นฉนวนเหลวกับฉนวนแข็ง [11]

ในทางปฏิบัติจะพบว่า ต้องใช้ฉนวนเหลวร่วมกับฉนวนแข็ง และอยู่ในลักษณะฉนวนเหลว จะแทรกซึมเข้าไปในฉนวนแข็ง ฉนวนเหลวช่วยระบายความร้อน ส่วนของแข็งช่วยยึดกับอุปกรณ์อื่น เช่น เคเบิลแรงสูงแบบกระดาษบรรจุน้ำมัน หรือหม้อแปลงที่มีทั้งกระดาษอัดและน้ำมันเป็น ฉนวนหลัก กระดาษที่ใช้เป็นฉนวนแข็งเหล่านี้มีรูพรุนที่สามารถดูดซึมของเหลวได้ สนามไฟฟ้าใน ฉนวนผสมเหล่านี้มีความซับซ้อน ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าจึงมีค่าของฉนวนผสมทั้งสอง เพื่อให้ง่าย ต่อการคิดคำนวณ จึงสมมติว่าฉนวนผสมกันอย่างสม่ำเสมอคือ คิดความเครียดสนามไฟฟ้าเป็น ค่าเฉลี่ย โดยคิดจากเปอร์มิตติวิตีรวม ϵ_{res} คือเสมือนหนึ่งว่าไดอิเล็กตริกซ้อนกัน ในทำนองเดียวกัน กับรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงชั้นฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาของชั้นฉนวนแต่ละชนิดเท่ากับ d_1 และ d_2 ฉะนั้นความหนาแน่นของเส้นฟลักซ์ไฟฟ้าเฉลี่ยของฉนวนแต่ละชั้นเท่ากันจะมีค่า

$$D_m = \varepsilon_{res} E_m = \varepsilon_1 E_{1m} = \varepsilon_2 E_{2m} \quad (2.26)$$

จากสมการฉนวนซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ คือ (2.27) และ (2.28) ตามลำดับ

$$\varepsilon_{res} = \frac{1}{\frac{d_1}{d\varepsilon_1} + \frac{d_2}{d\varepsilon_2}} \quad (2.27)$$

$$E_2 = \frac{U}{d} \cdot \frac{\varepsilon_1 / \varepsilon_2}{\frac{d_1}{d} (1 + \frac{\varepsilon_1 d_2}{\varepsilon_2 d_1})} \quad (2.28)$$

แทนค่า E_1 หรือ E_2 จากสมการ (2.27) หรือ (2.28) ในสมการ $\varepsilon_{res} E_m = \varepsilon_1 E_1 = \varepsilon_2 E_2$

$$\varepsilon_{res} E_m = \frac{U}{d} \cdot \frac{\varepsilon_1 / \varepsilon_2}{\frac{d_1}{d} (1 + \frac{\varepsilon_1 d_2}{\varepsilon_2 d_1})}$$

จะได้

$$\varepsilon_{res} E_m = \frac{U}{d} \cdot \frac{1}{\frac{d_1}{d\varepsilon_1} + \frac{d_2}{d\varepsilon_2}} \quad (2.29)$$

ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ $\frac{d_2}{d}$ จะได้เปอร์เซ็นต์ตัวดีผสมเป็น

$$\varepsilon_{res} = \frac{1}{\frac{d_1}{d\varepsilon_1} + \frac{d_2}{d\varepsilon_2}} \quad (2.30)$$

ถ้าให้อัตราส่วนของความหนาของฉนวนแต่ละชนิด คือ $\frac{d_1}{d}$ และ $\varepsilon_{res} = \frac{1}{V_1 / \varepsilon_1 + V_2 / \varepsilon_2}$ แทนด้วยสัดส่วนปริมาตรสัมพัทธ์ $d_1/d = V_1$ และ $d_2/d = V_2$ จะได้

$$\sum_{i=1}^n V_n = 1 \quad (2.31)$$

ในการทำงานเดียวกันถ้ามีส่วนผสมของฉนวน n ชนิด จะหาค่าเปอร์เซ็นต์ตัวดีผสมได้

$$\varepsilon_{res} = \frac{1}{V_1 / \varepsilon_1 + V_2 / \varepsilon_2 + V_3 / \varepsilon_3 + \dots + V_n / \varepsilon_n} \quad (2.32)$$

เมื่อ $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \dots, \varepsilon_n$ คือ เปอร์เซ็นต์ตัวดีของฉนวนองค์ประกอบ 1, 2, 3, ..., n

$V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$ คือ ปริมาตรสัมพัทธ์ของฉนวนองค์ประกอบ 1, 2, 3, ..., n

$\sum_{i=1}^n V_n = 1$ หรือ 100% เป็นปริมาตรรวมทั้งหมด

ตัวอย่าง เคเบิลฉนวนผสมของกระดาษ (cellulose $\varepsilon_r = 6$) กับน้ำมันฉนวน ($\varepsilon_r = 2.2$) ความพรุนของกระดาษ = 30% ของปริมาตรเป็นรูปพรุน V

ฉะนั้น $\varepsilon_{r1} = 6$ $V_1 = 0.7$

$\varepsilon_{r2} = 2.2$ $V_2 = 0.3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

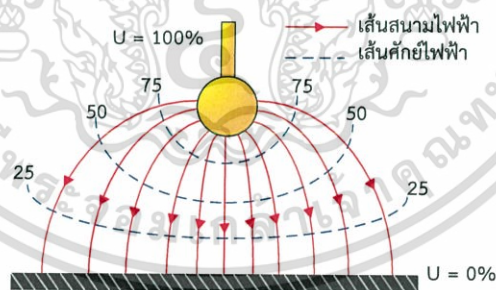
$$\varepsilon_{res} = \frac{1}{0.7/6 + 0.3/2.2} = 3.95$$

จากการวิเคราะห์ค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวนผสมจะเห็นได้ว่า เราสามารถใช้ฉนวนพูนที่มีความหนาแน่นจำเพาะต่างๆ กัน อันเป็นผลให้ได้ค่าเปอร์มิตติวิตีต่างกันได้ เช่น สายเคเบิลแรงสูงจะใช้กระดาษบางๆ ที่มีความหนาแน่นของกระดาษ (พูน) $0.75-1.05 \text{ kg/dm}^3$ (ความหนาแน่นของเยื่อเซลลูโลส = 1.5 kg/dm^3) ชั้นที่อยู่ติดตัวนำจะใช้กระดาษอัดที่มีความหนาแน่นมากที่สุด (กระดาษหนาประมาณ $50 \mu\text{m}$) ชั้นนอกๆ จะใช้กระดาษอัดที่มีความหนาแน่นน้อยลง (มีความหนาลงถึง $200 \mu\text{m}$) ทั้งนี้เพื่อความเครียดสนามไฟฟ้ากระจายในเนื้อฉนวนของเคเบิลสม่ำเสมอตามแนวรัศมี คือ รัศมีน้อยๆ จะให้ ε_r มีค่าสูงๆ เมื่อรัศมีโตขึ้นใช้ฉนวนที่มี ε_r ต่ำลง

การใช้กระดาษเป็นฉนวนจะต้องระมัดระวังในเรื่องความชื้น ซึ่งเซลลูโลสมีลักษณะสมบัติที่ดูดความชื้นได้ง่าย วิธีการที่มีผลต่อคุณภาพของการฉนวนด้วยกระดาษชุบน้ำมันฉนวนคือจะต้องทำให้แห้งก่อนด้วยการอบที่อุณหภูมิประมาณ 100°C ในถังสุญญากาศก่อนเติมน้ำมัน

2.7 สนามไฟฟ้า [10]

เมื่อ U เป็นแรงดันระหว่างอิเล็กโทรด 2 ชั้น ที่มีฉนวนคั่นอยู่ จะพบว่าพฤติกรรมของการกระจายสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวนจะขึ้นอยู่กับลักษณะอิเล็กโทรด คุณสมบัติของฉนวนที่คั่นอยู่ระหว่างอิเล็กโทรด และลักษณะรูปแบบแรงดันที่ป้อนให้กับอิเล็กโทรดแสดงดังรูป 2.18



รูปที่ 2.18 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า

จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (E_{max}) จะเกิดขึ้นที่ผิวอิเล็กโทรดทรงกลม ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$E_{max} = \frac{U}{d\eta^*} \quad (2.33)$$

เมื่อ U = แรงดันที่ป้อนให้อิเล็กโทรดทรงกลม

d = ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด

η^* = แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (Field utilization factor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง η^* มีนิยามว่า

$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{max}} \leq 1 \quad (2.34)$$

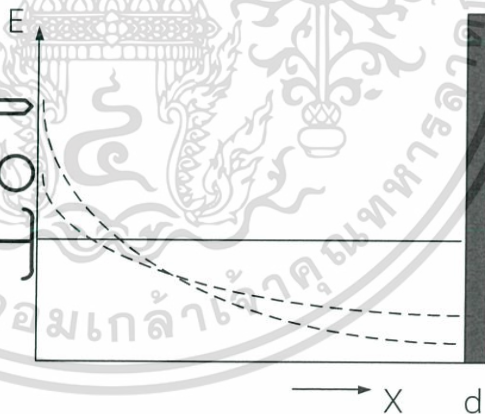
โดยที่ ค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้า (E_{av})

$$E_{av} = \frac{U}{d} \quad (2.35)$$

โดยทั่วไปสนามไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

- 1) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform field)
- 2) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly nonuniform field)
- 3) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly nonuniform field)

การศึกษาสนามไฟฟ้า เมื่อทำการบ่อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดจะเท่ากันทุกจุด เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดมีค่ามากกว่าความคงทนได้ต่อสนามไฟฟ้าของฉนวนจะเกิดเบรกดาวนหรือสปาร์คทันที โดยมีการเพิ่มขึ้นของกระแสอย่างมากทันทีทันใด ในกรณีของสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (Nonuniform field) อิเล็กโทรดจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดแตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่ง และลักษณะมิติทางเรขาคณิตของอิเล็กโทรด รูปที่ 2.19 แสดงความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดรูปทรงแบบระนาบ ทรงกลม และปลายแหลมกับระยะห่าง โดยมียุทธห่างเท่ากับ d



รูปที่ 2.19 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ

แรงดันเบรกดาวนของอากาศในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

การคำนวณแรงดันเบรกดาวนของอากาศในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอจำเป็นที่จะต้องทราบ การกระจายของสนามไฟฟ้าของฉนวนระหว่างอิเล็กโทรดที่พิจารณา ก่อนจึงจะสามารถหา ค่าแรงดันเบรกดาวนได้ หรืออาจจะหาความสัมพันธ์จากสมการ

$$E_{max} = \frac{U}{d\eta^*} \quad (2.36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทราบรูปลักษณะทางเรขาคณิตของอิเล็กโตรดจะสามารถหาค่า η^* ได้จากตารางที่ 2.6 ลักษณะรูปทรงของอิเล็กโตรดพื้นฐานแต่ละแบบนั้นสามารถหาค่า η^* จากฟังก์ชันของรูปทรงได้โดยกำหนดให้

$$p = \frac{d+r}{r} \quad (2.37)$$



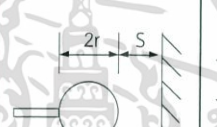
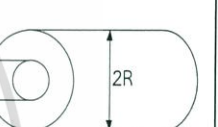
และ $q = \frac{R}{r}$

เมื่อ d = ระยะห่างระหว่างแกป

r = รัศมีของอิเล็กโตรดทรงกลมลูกเล็ก

R = รัศมีของอิเล็กโตรดทรงกลมลูกใหญ่

ตารางที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของ η^* กับ p และ q ของอิเล็กโตรดรูปทรงพื้นฐาน

SPHERE CONFIGURATION				
				
p	$q = 1$	$q = 1$	$q = \infty$	$q = p$
1	1	1	1	1
1.5	0.850	0.834	0.732	1
2	0.732	0.660	0.563	0.667
3	0.563	0.428	0.372	0.500
4	0.449	0.308	0.276	0.333
5	0.372	0.238	0.218	0.250
6	0.318	0.193	0.178	0.200
7	0.276	0.163	0.152	0.167
8	0.244	0.140	0.133	0.143
9	0.218	0.123	0.117	0.125
10	0.197	-	0.105	0.100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 การเกิดเบรกตาวนในฉนวนเหลว [10]

กลไกในการเกิดเบรกตาวนในฉนวนเหลว แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.8.1 การเกิดเบรกตาวนในฉนวนเหลวบริสุทธิ์

กลไกการเกิดเบรกตาวนในฉนวนเหลวบริสุทธิ์มีหลักการเดียวกับกรณีของฉนวนแก๊สที่เกิดจากอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ โดยเกิดจากการชนกันของอิเล็กตรอนกับอนุภาคในสนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนเริ่มต้นที่ออกจากแคโทดเนื่องจากผลของสนามไฟฟ้า(Field emission) หรือผลของความร้อน(Thermionic emission) มีรายงานผลการศึกษาก่อนนำไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดเกิดจากการปล่อยอิเล็กตรอนจากแคโทดโดยสนามไฟฟ้ามากกว่าที่จะเป็นการปล่อยอิเล็กตรอนต่อแคโทดด้วยความร้อน การเกิดเบรกตาวนน่าจะเกิดจากการที่ไอออนบวกของอนุภาคเจือปนเคลื่อนที่เข้าสู่แคโทด ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในบริเวณใกล้ผิวแคโทดเพิ่มสูงขึ้นเพียงพอที่อิเล็กตรอนสามารถหลุดออกจากผิวแคโทดได้ อิเล็กตรอนอิสระที่หลุดออกมาเหล่านี้ จะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรด ทำให้เกิดการเคลื่อนที่โดยมีทิศทางเข้าสู่ขั้วแอโนดระหว่างทางจะชนกับโมเลกุลของฉนวนเหลว ทำให้พลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้าสูญเสียไปกับการชน ในกระบวนการนี้จะมีอิเล็กตรอนบางตัวที่สูญเสียพลังงานไปกับการชนต่ำกว่าพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้าถ้าอิเล็กตรอนเหล่านี้ถูกเร่งจนมีพลังงานสูงพอที่จะชนกับโมเลกุลแล้วทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนและก่อให้เกิดอะวาลานซ์ ฉนวนเหลวก็จะเกิดการเบรกตาวน

2.8.2 การเกิดเบรกตาวนในฉนวนเหลวเชิงการค้ำ

การเกิดเบรกตาวนในฉนวนเหลวเชิงการค้ำ อาจเกิดได้จากสาเหตุดังต่อไปนี้

1) การเกิดเบรกตาวนเนื่องจากอนุภาคเจือปนของแข็งสิ่งเจือปนของแข็งที่ปะปนอยู่ในฉนวนเหลวอาจเป็นอนุภาคตัวนำไฟเบอร์หรือฝุ่นละออง ภายใต้สนามไฟฟ้าอนุภาคเจือปนเหล่านี้จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วทางไฟฟ้าขึ้นมา ถ้ากำหนดให้อนุภาคฉนวนแข็งมีรูปร่างทรงกลมที่รัศมี r_p และมีค่าเปอร์มิตติวิตี ϵ_p ฉนวนเหลวมีค่าเปอร์มิตติวิตี ϵ_{liq} จะเกิดแรงทางไฟฟ้า F_e กระทำต่ออนุภาคโพลาริซ์ ดังสมการต่อไปนี้

$$F_e = \epsilon_{liq} r_p^3 \frac{\epsilon_p - \epsilon_{liq}}{\epsilon_p + 2\epsilon_{liq}} E(\text{grad}E) \quad (2.38)$$

จากสมการจะพบว่าแรงที่กระทำบนอนุภาคจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าเปอร์มิตติวิตีของอนุภาค

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

ถ้า $\epsilon_p < \epsilon_{liq}$ แรงที่เกิดขึ้นจะกระทำต่ออนุภาคในทิศทางตรงกันข้าม กล่าวคือจะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำ ในกรณีของอนุภาคตัวนำเจือปนอยู่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายในฉนวนเหลวเนื่องจากค่าเปอร์มิตติวิตีเข้าใกล้อินฟินิต แรงที่เกิดขึ้นบนอนุภาคตัวนำ จะมีค่าตามสมการดังต่อไปนี้

$$F_e = F_\infty = r_p^3 E(\text{grad}E) \quad (2.39)$$

ผลของแรงที่กระทำต่ออนุภาคฉนวน หรืออนุภาคตัวนำนั้น จะทำให้เกิดการเรียงตัวกันใหม่ ของอนุภาคเจือปนเป็นสะพานเชื่อมต่อระหว่างอิเล็กโตรด ทำให้เกิดการเบรกดาวนซ์ขึ้นดังรูป

การจัดเรียงอนุภาคเจือปนจะง่ายหรือยากขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคภายในฉนวนเหลวก่อนที่จะได้รับสนามไฟฟ้า ชนิดอนุภาค และความหนืดของฉนวนเหลว เป็นต้น



รูปที่ 2.20 การเรียงตัวของอนุภาคไฟเบอร์ระหว่างช่องว่าง (gap) ภายใต้แรงดันสูง

- (ก) อนุภาคไฟเบอร์ก่อนทำการป้อนแรงดัน
- (ข) การจัดเรียงตัวเชื่อมต่อระหว่างอิเล็กโตรดของอนุภาคไฟเบอร์หลังจากป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรด 1 นาที

2) การเกิดเบรกดาวนซ์เนื่องจากฟองแก๊ส

แก๊สสามารถละลายในฉนวนเหลวได้ในปริมาณมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับสภาวะความดันหรืออุณหภูมิของฟองแก๊สในฉนวนเหลว ฟองแก๊สอาจเกิดจากการที่ฉนวนเสื่อมหรือมีคุณภาพต่ำ หรือขณะเติมฉนวนเหลวในภาชนะบรรจุ อาจเกิดแก๊สเกาะที่ผิวของอิเล็กโตรดที่ขรุขระหรือผิวร่องอิเล็กโตรด หรืออาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีภายในฉนวนเหลว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความดันและการชนของไอออนและอิเล็กตรอน ทำให้ฉนวนเหลวสลายตัวเป็นแก๊สออกมา หรืออาจเกิดจากผลการเกิดดิสชาร์จบางส่วนบริเวณผิวอิเล็กโตรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นเมื่อได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าก็จะขยายตัวยึดตามแนวสนามไฟฟ้าเพื่อลดพลังงานศักย์ในสนามไฟฟ้า การเบรกดาวนซ์จะเกิดเมื่อแรงดันตกคร่อมความยาวของฟองแก๊สมีค่าเท่ากับค่าต่ำสุดของเส้นโค้งพาเซน เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าของฟองแก๊สมีค่าเท่ากับค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติของแก๊สก็จะเกิดการดิสชาร์จผ่านฟองแก๊สเป็นผลทำให้เกิดการแยกตัวของโมเลกุลของเหลว นำไปสู่การเบรกดาวนซ์ได้นอกจากสาเหตุที่กล่าวแล้ว

ฟองแก๊สยังสามารถเกิดที่บริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเช่นปลายแหลมของอิเล็กโตรด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในเชิงพาณิชย์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากบริเวณนั้นจะมีความร้อนสูง ทำให้ฉนวนกลายเป็นไอ และเกิดการดิสชาร์จขึ้นและนำไปสู่การเบรกดาวน์ในที่สุด

3) การเกิดเบรกดาวน์จากหยดของเหลวเจือปน

ฉนวนเหลวที่มีหยดของเหลวต่างชนิดกันเจือปนอยู่สามารถทำให้เกิดการเบรกดาวน์ได้ เนื่องจากการเปลี่ยนรูปร่างของหยดของเหลวเจือปนโดยการมีการยึดออกตามสนามไฟฟ้า เมื่อของเหลวเกิดการยึดตัว ความเครียดสนามฟ้าในฉนวนเหลวที่ปลายทั้งสองของหยดของเหลวจะมีค่าสูงขึ้น ถ้ามีค่าสูงเกินค่าวิกฤติจะทำให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วน เกิดโพรงแก๊สและนำไปสู่การเบรกดาวน์ในที่สุด

4) การเกิดเบรกดาวน์จากความร้อน

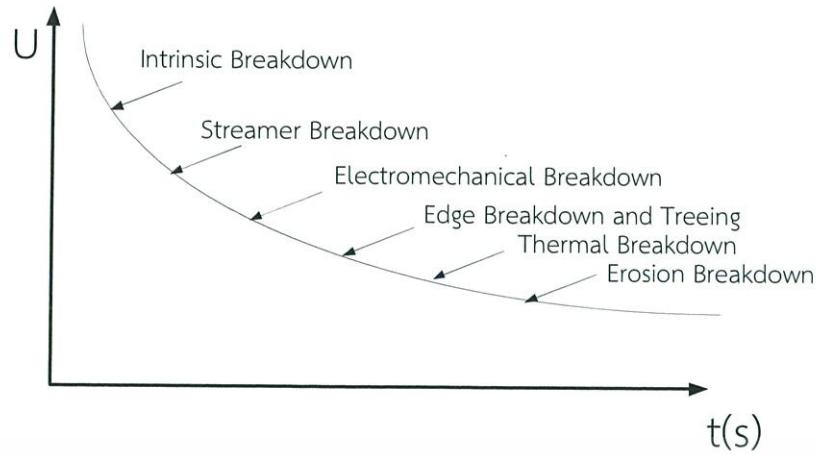
การเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากความร้อน เกิดขึ้นในกรณีที่มีการป้อนแรงดันชนิดพัลส์ จากการทดลองวัดพัลส์กระแสในฉนวนเหลวจะพบว่ากระแสมีค่าสูงก่อนเกิดเบรกดาวน์ โดยมีค่าความหนาแน่นกระแสประมาณ 1 A/cm^3 ซึ่งเชื่อว่ามีแหล่งกำเนิดจากปลายผิวอิเล็กโตรดขั้วลบหรือแคโทด ทำให้ ฉนวนเหลวบริเวณนั้นมีอุณหภูมิสูงและกลายเป็นไอหรือฟองแก๊ส เมื่อฟองแก๊สยึดตัวจนกระทั่งมีความยาวเกินความยาววิกฤติหรือเกิดโพรงตลอดแนวระยะแยกของอิเล็กโตรด จะเกิดเบรกดาวน์ตามมา

2.9 การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนแข็ง [10]

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์เมื่อป้อนแรงดันให้กับฉนวนแข็งที่ระยะเวลาต่างกัน

2.9.1 การเบรกดาวน์แบบแท้จริง (Intrinsic breakdown)

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

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

2.9.2 การเบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์ (Streamer breakdown)

การเบรกดาวน์นี้คล้ายกับการเบรกดาวน์ในแก๊ส อธิบายได้จากการเกิดไอออนไนเซชัน ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อมีอิเล็กตรอนจำนวนมากพอเรียงตัวทอดต่อเชื่อมระหว่างแคโทดกับแอโนดอิเล็กตรอนที่อยู่ในฉนวนของแข็งจะเคลื่อนที่โดยเริ่มจากขั้วอิเล็กโตรดที่เป็นแคโทดไปยังแอโนด และในระหว่างทางที่เคลื่อนที่ไปนั้น อิเล็กตรอนจะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า ในขณะที่เคลื่อนที่ไป เมื่ออิเล็กตรอนตัวนี้ได้ชนอะตอมอาจทำให้อิเล็กตรอนตัวใหม่หลุดจากวงโคจรของอะตอมตัวที่โดนชนได้ ถ้าพลังงานจากการชนมากกว่าค่าศักย์ไอออนไนซ์ภายในผลึกของแข็งของอะตอมที่ถูกชน กระบวนการนี้จะเกิดซ้ำๆ เป็นทวีคูณ(การเกิดอะวาลานซ์) ในระหว่างที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้นจนเกิดเบรกดาวน์เมื่อปริมาณอิเล็กตรอนในอะวาลานซ์มีจำนวนถึงค่าวิกฤติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติจริง การเกิดอะวาลานซ์จะเกิดเพียงครั้งเดียว แต่การเกิดเบรกดาวน์จะเกิดขึ้นหลายครั้ง การทดลองที่กระทำโดยจ่ายแรงดันอิมพัลส์ให้กับฉนวนแข็งประเภท Plexiglass ที่มีความหนาพอสมควรโดย ใช้อิเล็กโทรดแบบปลายแหลมและระนาบ(Point- plane electrode) และจะจ่ายแรงดันทีละครั้ง พบว่าเส้นทางในการเบรกดาวน์ของฉนวนจะค่อยๆ แดงกิ่งก้านไปในลักษณะของรากไม้

2.9.3 การเกิดเบรกดาวน์จากแรงทางกลที่เกิดจากไฟฟ้า (Electromechanical breakdown)

เมื่อจ่ายสนามไฟฟ้าในระดับสูงๆให้แก่ฉนวนของแข็ง จะทำให้เกิดแรงกดดันกระทำต่อฉนวนแรงกดที่เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างประจุผิว (Surface charge) ซึ่งเมื่อแรงนี้มีค่ามากเกิดค่าความคงทนทางกลของฉนวนจะทำให้ฉนวนเกิดการแตกร้าวได้

2.9.4 การเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากการดิสชาร์จภายใน (Cavity breakdown)

วัสดุฉนวนที่ใช้งานอยู่โดยทั่วไปจะมีโพรงหรือช่องว่างอยู่ภายในเนื้อฉนวนหรือตรงบริเวณรอยต่อระหว่างฉนวนกับอิเล็กโทรด โดยส่วนมากโพรงนี้จะมีแก๊สหรือของเหลวบรรจุอยู่ ซึ่งมีความคงทนต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์ได้น้อยกว่าของแข็ง นอกจากนี้ค่าความจุไฟฟ้าของสิ่งแปลกปลอมที่อยู่ภายในฉนวนแข็งส่วนมากแล้วจะมีค่าน้อยกว่าฉนวนแข็ง จึงเป็นผลให้ความเครียดสนามไฟฟ้าภายในโพรงมีค่าสูงกว่าเนื้อฉนวน ดังนั้นภายใต้การใช้งานที่ความเครียดสนามไฟฟ้าปกติของฉนวนแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโพรงนี้จะมีค่ามากกว่าแรงดันเบรกดาวน์ของโพรง ทำให้เกิดการเบรกดาวน์ภายในโพรงก่อนที่จะนำมาสู่การเบรกดาวน์ของเนื้อฉนวนต่อไป

การเกิดดิสชาร์จภายในหรือเรียกว่าอิชชาร์จบางส่วนจะทำให้เกิดปรากฏการณ์บางอย่างในลักษณะเดียวกับการเกิดการ treeing ในเนื้อฉนวน คือเมื่อเกิดการเบรกดาวน์ในโพรงอากาศที่อยู่ภายในเนื้อฉนวนจะมีอิเล็กตรอน และไอออนบวกเกิดขึ้น โดยอิเล็กตรอนและไอออนบวกเหล่านี้จะมีพลังงานอยู่ภายในตัว และเมื่ออิเล็กตรอนหรือไอออนบวกเคลื่อนที่ไปถึงผิวของโพรงช่องว่างก็อาจจะทำลายพันธะทางเคมีของฉนวนที่ผิว อีกทั้งการเกิดดิสชาร์จยังทำให้เกิดความร้อนในโพรงช่องว่าง และเกิดการคาร์บอนที่ผิวฉนวนในโพรง ทำให้ฉนวนมีการสึกกร่อนไปแนวร่องและหลุมที่เกิดที่ผิวฉนวนภายในโพรงจะทำให้มีการนำกระแสจ่ายขึ้น ดิสชาร์จที่เกิดขึ้นภายในโพรงช่องว่างอาจทำให้คุณสมบัติทางเคมีของฉนวนลดลง การดิสชาร์จภายในโพรงช่องว่างจะนำไปสู่การเบรกดาวน์ในที่สุด

2.10 ทฤษฎีการสร้างและการวัดแรงดันอิมพัลส์ [11]

แรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันที่มีรูปคลื่นเลียนแบบมาจากแรงดันเกินเสิร์จทรานเซียนต์ที่เกิดจากเหตุภายนอกที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ฟ้าผ่า เรียกว่า แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า และที่เกิดขึ้นจากสาเหตุภายในระบบส่งจ่ายเอง คือเกิดจากการทำงานของสวิตช์ หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ เมื่อมีความผิดพลาดเกิดขึ้นในระบบ เรียกว่าแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง

2.10.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน

แรงดันอิมพัลส์อาจกำหนดด้วยข้อกำหนดต่อไปนี้

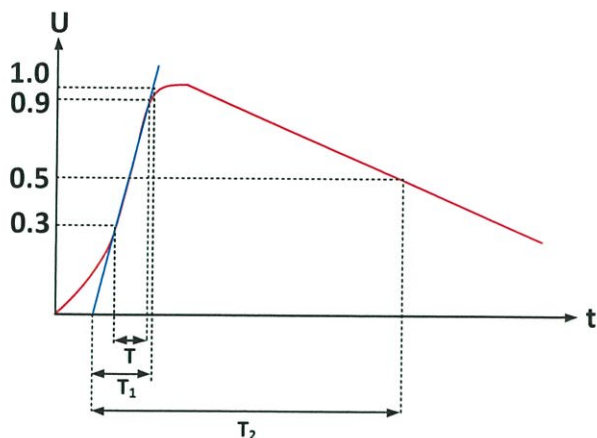
- 1) ขนาดของแรงดัน โดยปกติจะหมายถึงค่ายอดของรูปคลื่นแรงดัน ในกรณีที่มีระลอกซ้อนที่เกิดจากออสซิลเลชันใกล้ๆ ยอดรูปคลื่น ให้ถือเอาค่าเฉลี่ยจากค่ายอดรูปคลื่นระลอก
- 2) ขั้วของแรงดันอาจเป็นขั้วบวกหรือลบก็ได้ เมื่อเทียบกับดิน
- 3) เวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 หมายถึงช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากค่าศูนย์จนถึงค่ายอด
- 4) เวลาช่วงหลังคลื่น T_2 หมายถึงช่วงเวลาตั้งแต่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านค่ายอดจนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด

รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์อาจแบ่งเป็น

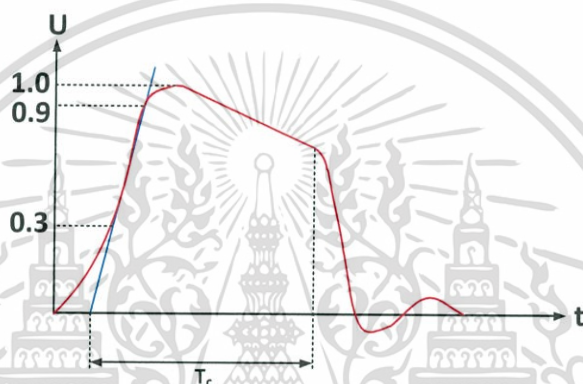
- 1) รูปคลื่นเต็ม (full wave) ซึ่งหมายถึงรูปคลื่นที่มีขนาดเพิ่มขึ้นถึงค่ายอด แล้วค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเป็นศูนย์
- 2) รูปคลื่นตัด (chopped wave) ซึ่งเกิดจากการบ่อนแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มเข้าไปที่วัสดุทดสอบ และการฉนวนของวัสดุทดสอบนั้นทนต่อแรงดันที่บ่อนเข้าไปไม่ได้ จึงเกิดการสปาร์กผ่านเกิดวาบไฟตามผิว หรือเกิดเบรกดาวนจ์จะทะเล่ ทำให้เกิดการลัดวงจร ณ จุดนั้น การเกิดคลื่นตัดนี้อาจจะเกิดขึ้นที่ส่วนหลังคลื่น หรือส่วนหน้าคลื่นก็ได้

ในรูปที่ 2.22 แสดงถึงแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม รูปที่ 2.23 แสดงถึงแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตัดหลังคลื่น และรูปที่ 2.24 แสดงถึงแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตัดหน้าคลื่นตามลำดับ

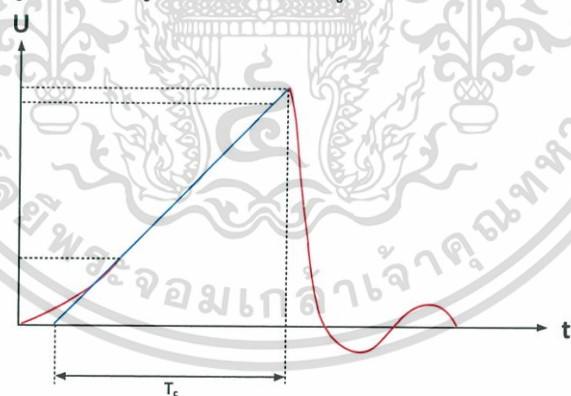
รูปคลื่นตัดมีส่วนกำหนดที่สำคัญ คือ เวลาช่วงคลื่นตัด (chopped time) T_c ถ้าเกิดตัดที่หลังคลื่น ขนาดของแรงดันคือ ค่ายอด (peak) ถ้าเกิดตัดที่หน้าคลื่นขนาดแรงดันก็คือ ค่าที่ได้ ณ จุดตัด ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของรูปคลื่นที่เหลือ



รูปที่ 2.22 รูปแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม



รูปที่ 2.23 รูปแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตัดหลังคลื่น



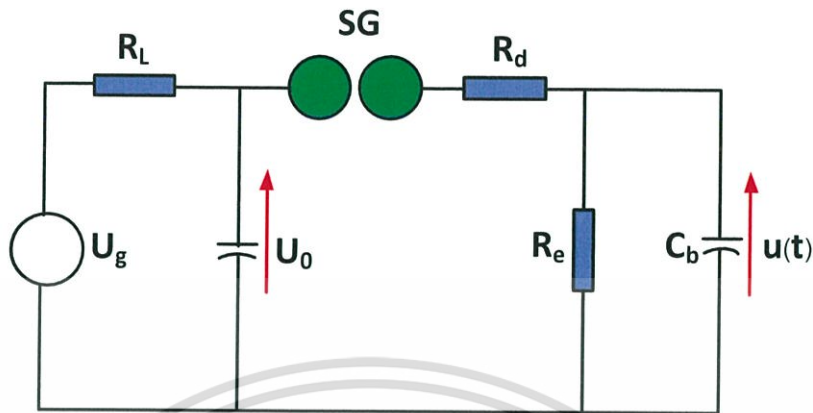
รูปที่ 2.24 แสดงถึงแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตัดหน้าคลื่น

ถ้าต้องการทราบว่าแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นมานั้นเป็นไปตามมาตรฐานกำหนดหรือไม่ ให้หาค่า T_1 , T_2 หรือ T_c โดยวิธีที่แสดงไว้ในรูป 2.20 ว่าอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดต่อไปหรือไม่ คือ เวลาช่วงหน้าคลื่น $T_1 = 1.2 \mu\text{S} \pm 30\%$ คือ จะต้องอยู่ในช่วง $0.84 - 1.56 \mu\text{S}$ เวลาช่วงหลังคลื่น $T_2 = 50 \mu\text{S} \pm 20\%$ คือ จะต้องอยู่ในช่วง $40 - 60 \mu\text{S}$

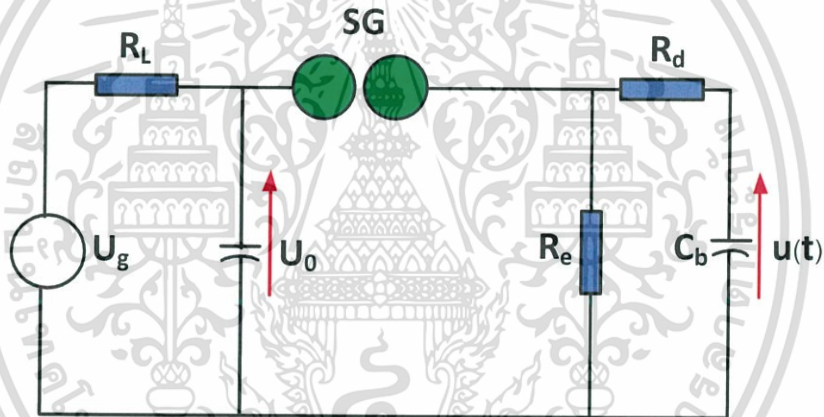
ค่ายอดแรงดัน U_m ยอมให้ผิดพลาดได้ $\pm 3\%$ ของค่าที่ระบุรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.2 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

วงจรพื้นฐานที่ใช้สร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ามี 2 แบบ ดังในรูปที่ 2.25 และ รูปที่ 2.26



รูปที่ 2.25 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ วงจร A



รูปที่ 2.26 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ วงจร B

ความหมายในรูปวงจร 2.21 และ 2.22

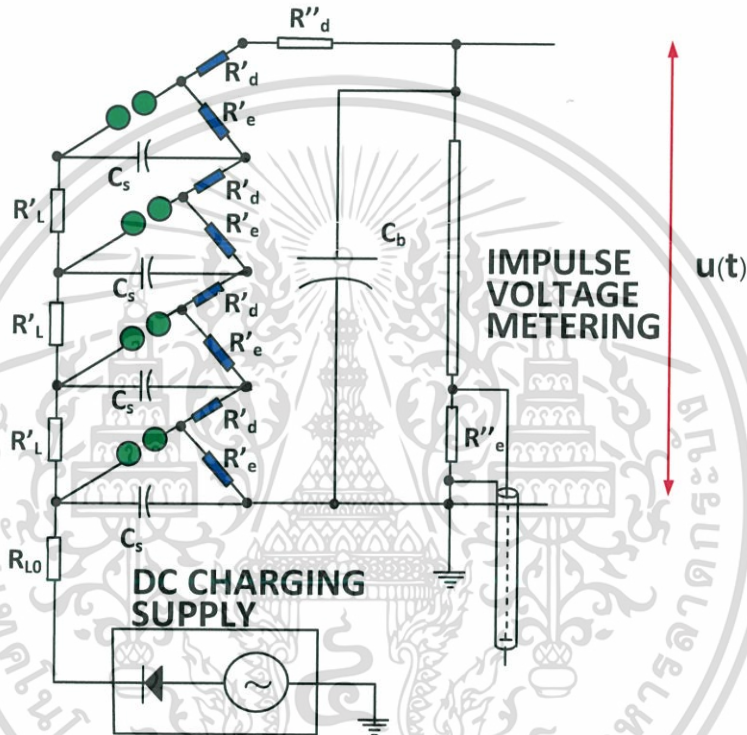
- U_g คือ แรงดันกระแสตรงของตัวจ่าย
- U_0 คือ แรงดันอัดประจุกระแสตรง
- C_s คือ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นตัวเก็บพลังงาน
- C_b คือ ตัวเก็บประจุโหลด (รวมทั้งความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์เครื่องวัดและอื่นๆ)
- R_L คือ ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ
- R_d คือ ความต้านทานหน่วง
- R_e คือ ความต้านทานปล่อยประจุ
- $U(t)$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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.3 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายชั้น

จากวงจรพื้นฐานของการสร้างแรงดันอิมพัลส์ ปกติจะออกแบบให้สร้างแรงดันได้ถึง 200 kV ซึ่งไม่เพียงพอสำหรับการทดสอบ BIL ของอุปกรณ์ที่ใช้กับแรงดันระบบ 52 kV หรือสูงกว่า ค่าแรงดันอิมพัลส์สูงๆ อาจสร้างได้ด้วยเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบหลายชั้น โดยใช้วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ ตามหลักการของมาร์กซ์ (Marx's circuit) ดังในรูปที่ 2.27

ความหมายของสัญลักษณ์ในวงจร จะเหมือนกับวงจรขั้นพื้นฐาน (เครื่องหมาย ' แสดงถึงเป็นค่าต่อชั้น และเครื่องหมาย " แสดงถึงองค์ประกอบภายนอกที่เพิ่มขึ้นเพื่อปรับรูปคลื่น)



รูปที่ 2.27 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบหลายชั้นตามวงจรมาร์กซ์ [12]

ค่าในองค์ประกอบในวงจร

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเกิดสปาร์กวงจรจะต่อกันแบบอนุกรมจะได้ค่ารวมเป็น

$$C_s = C'_s / n$$

$$R_d = nR'_d$$

$$R_e = nR'_e$$

2.11 การวัดค่าคุณสมบัติของฉนวน [13]

2.11.1 การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของฉนวน

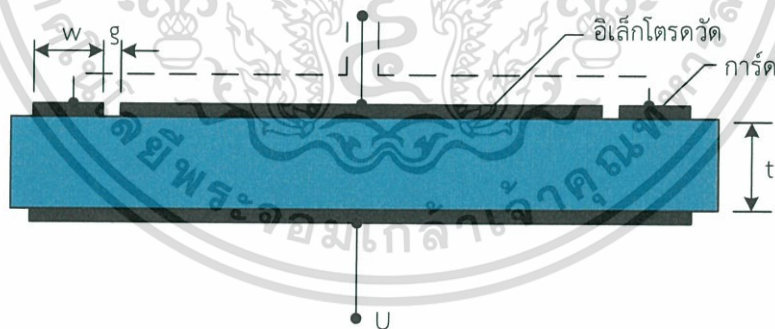
ความต้านทานจำเพาะ เป็นคุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของฉนวน อาจหาได้โดยการวัดความต้านทานของตัวอย่างฉนวนด้วยแรงดันกระแสตรง โดยวางอยู่ระหว่างอิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าง่าย ที่สะดวกแก่การคำนวณความต้านทานจำเพาะ ถ้าเป็นฉนวนแข็ง รูปร่างของตัวอย่างฉนวนจะเป็นแผ่นระนาบกลม ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5-10 cm และหนาประมาณ 3-12 mm วางอยู่ระหว่างอิเล็กโทรดผิวหน้าเรียบเป็นระนาบวางขนานกัน ปกติอิเล็กโทรดที่ใช้วัดความต้านทานประกอบด้วย 3 อิเล็กโทรด ดังรูปที่ 2.28 ความต้านทานจำเพาะ (ρ) คำนวณจากความต้านทาน (R) ที่วัดได้จากอิเล็กโทรดพื้นที่ (A) คือ

$$\rho = R \cdot A / t$$

t = ความหนาของฉนวน

g = แยกแคบๆ

w = ความกว้างของอิเล็กโทรดการ์ด $w > 2t$



รูปที่ 2.28 อิเล็กโทรดวัดความต้านทานจำเพาะของฉนวนแข็ง

เพื่อให้การวัดความต้านทานมีความถูกต้อง การสัมผัสระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวฉนวนตัวอย่างจะต้องดีพอ ซึ่งอาจใช้แผ่นโลหะเปลว เช่น แผ่นเปลวอะลูมิเนียมอัดติดกับผิวของฉนวนด้วยน้ำยาที่เป็นตัวนำไฟฟ้า เช่น ปีโตรเลียมชัน หรือไซลิโคน หรืออาจใช้สีที่เป็นตัวนำ เช่น เงินทาเป็นอิเล็กโทรดหรือใช้ปรอทเป็นอิเล็กโทรด วางฉนวนตัวอย่างบนผิวปรอทที่ล้อมรอบด้วยแหวนโลหะ

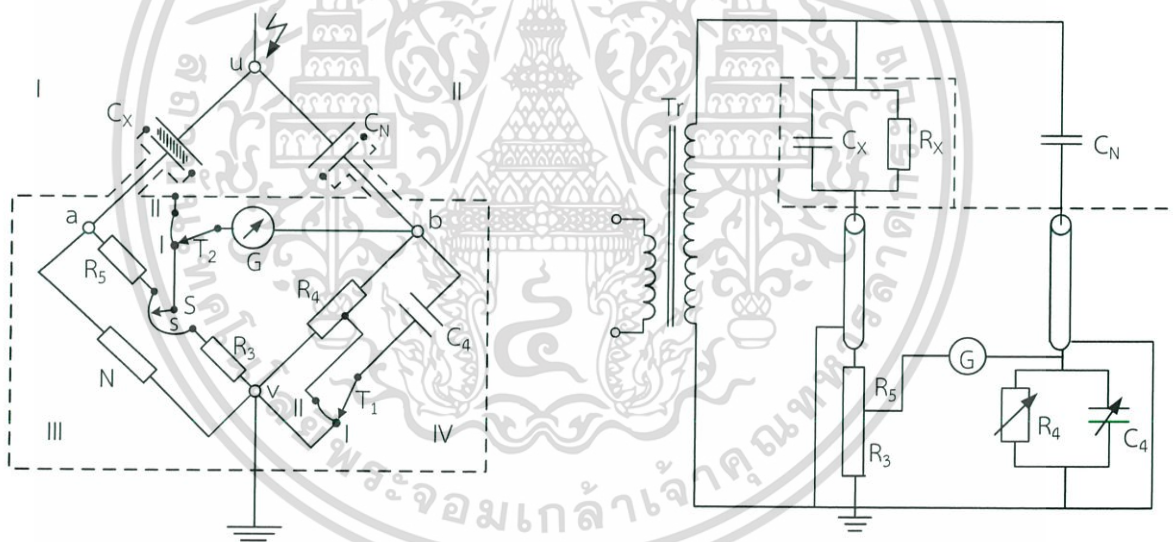
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11.2 การวัดค่าคาปาซิแตนซ์ และแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก

แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกในวัสดุฉนวนหรือในอุปกรณ์ที่หาได้จากสมการ $P_d = \omega C U^2 \tan \delta$ โดยการวัดค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก และค่าคาปาซิแตนซ์ วิธีวัดค่าทั้งสองนี้โดยทั่วไปที่ใช้กันมี 2 วิธี คือ วิธีวัดวัตต์มิเตอร์ และวิธีบริดจ์ ในที่นี้จะกล่าวแต่เฉพาะวิธีบริดจ์ ซึ่งเหมาะสมที่จะใช้กับความถี่ในย่านปานกลาง คือ 10 ถึง 10^6 Hz บริดจ์ที่นิยมใช้กัน คือ Schering bridge และ Glynne bridge (transformer ratio arm bridge) ที่ใช้กับความถี่พลังงานตั้งแต่ 50 Hz ถึง 100 kHz

1) Schering bridge

Schering bridge เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดค่าคาปาซิแตนซ์ และแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุ โดยการเปรียบเทียบกับค่าความเก็บประจุมาตรฐาน ซึ่งเป็นแบบอากาศหรือก๊าซอัดความดัน (compressed gas standard capacitor) มีกำลังสูญเสียต่ำที่ความถี่พลังงานหรือความถี่อื่นๆ วงจรของ Schering bridge ดังแสดงในรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 วงจร Schering bridge

C_x คือ ค่าเก็บประจุของวัสดุทดสอบหรือที่ต้องการวัด

R_x คือ ความต้านทานสมมูลกับแฟกเตอร์กำลังสูญเสียในไดอิเล็กตริก

C_N คือ ค่าเก็บประจุมาตรฐาน

R_3 คือ ความต้านทานไร้ความเหนียวนำและปรับค่าได้

R_4 คือ ความต้านทานไร้ความเหนียวนำ

C_4 คือ ค่าเก็บประจุปรับค่าได้

G คือ กัลป์วานอมิเตอร์ความไวสูงสำหรับดุลวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับวงจรบริดจ์ให้สมดุลโดยการปรับค่า R_3 และ R_4 จนกระทั่งเข็มกัลป์วานอมิเตอร์ชี้ศูนย์ เมื่อบริดจ์สมดุลแล้ว จึงเขียนสมการได้ว่า

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4} \quad (2.40)$$

เมื่อ Z_1 , Z_2 , Z_3 และ Z_4 เป็นอิมพีแดนซ์ของส่วนวงจรแขน I, II, III และ IV ตามลำดับ คือ

$$Z_1 = \frac{R_x}{1 + j\omega C_x R_x}, \quad Z_2 = \frac{-j}{\omega C_N} \quad (2.41)$$

$$Z_3 = R_3, \quad Z_4 = \frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4}$$

นั่นคือ
$$\frac{R_x}{R_3(1 + j\omega C_x R_x)} = \frac{-j}{\omega C_N R_4} (1 + j\omega C_4 R_4)$$

โดยการเทียบค่าจริงจะได้

$$\frac{R_x}{1 + \omega^2 C_x^2 R_x^2} = \frac{C_4 R_4}{C_N} \quad (2.42)$$

จากรูป 2.29 เมื่อ C_x และ R_x ต่อกันแบบขนาน

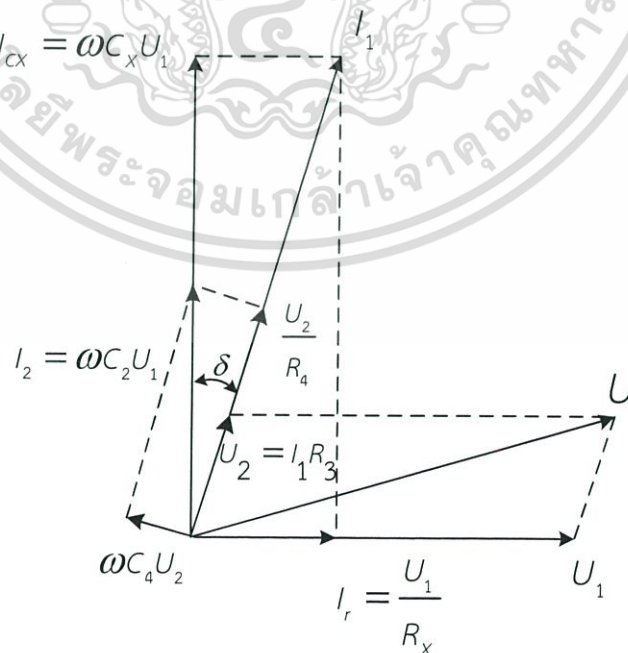
จะได้

$$\cos \delta = \frac{\omega C_x R_x}{\sqrt{1 + \omega^2 C_x^2 R_x^2}}$$

$$\cos^2 \delta = \frac{\omega^2 C_x^2 R_x^2}{1 + \omega^2 C_x^2 R_x^2}$$

แทนค่าในสมการ (2.42) จะได้

$$C_x = \frac{C_N \cos^2 \delta}{\omega C_4 R_x R_4} \quad (2.43)$$



รูปที่ 2.30 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของวงจร Schering bridge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{จากรูป 2.30 } \tan \delta = \frac{\omega C_4}{1/R_4}$$

$$\tan \delta = \frac{1/R_x}{\omega C_x} = \frac{1}{\omega C_x R_x}$$

$$\omega C_4 R_4 = \frac{1}{\omega C_x R_x}$$

$$\frac{1}{C_x R_x} = \omega^2 C_4 R_4 \quad (2.44)$$

แทนค่า $\frac{1}{C_x R_x}$ ในสมการ (2.44) จะได้

$$C_x = \frac{C_N R_4}{R_3} \quad (2.45)$$

นั่นคือ $C_x = \frac{C_N R_4}{R_3}$ โดยประมาณ

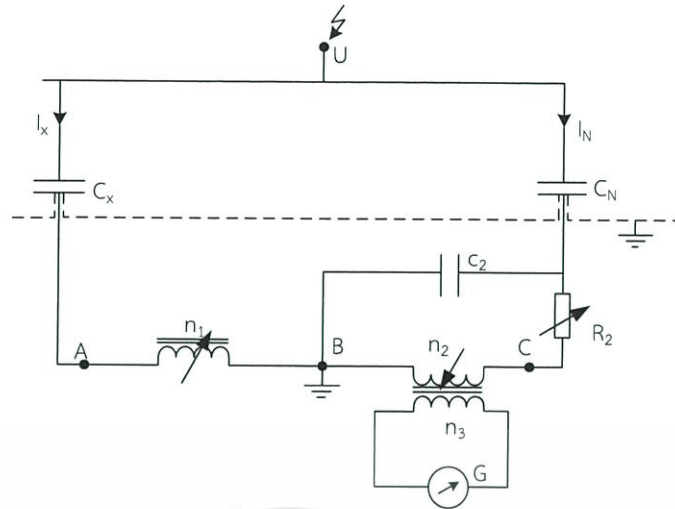
$$\tan \delta = \omega C_4 R_4 \quad (2.46)$$

ในทางปฏิบัติ R_4 มักจะจัดไว้เป็นค่าคงตัวเฉพาะ ที่มีสวิตช์เลือกให้เปลี่ยนได้หลายค่า เพื่อให้สามารถวัดได้ละเอียดถูกต้องในช่วงกว้างของค่า C ส่วน R_3 เป็นความต้านทานที่ปรับได้ละเอียด และ C_4 เป็นค่าเก็บประจุที่ปรับได้เป็นหลัก $\times 10$ และมีค่าสัมพันธ์โดยตรงกับค่าแพคเกจกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก

การวัดค่า C และ $\tan \delta$ ด้วย Schering bridge ดังกล่าวอาจมีการรบกวนจากภาคแรงสูงที่มีต่อวงจรภาคแรงต่ำ ซึ่งอาจจะคาบเกี่ยวผ่านค่าเก็บประจุสเตรย์ ฉะนั้น ตั้งแต่ภาคแรงต่ำของค่าเก็บประจุมาตรฐาน C_N และวัสดุทดสอบมาถึงอิมพีแดนซ์ของวงจร III, IV และกัลวานอมิเตอร์ จะมีชีลด์ป้องกันแบบ 2 ชั้น (double screen shielding) และป้องกันมิให้บริดจ์เสียหายจากแรงดันเกินเนื่องจากภาคแรงสูงเกิดผิดพร่องขึ้นใน I หรือ II จึงใส่กับดักแรงดันเกินหรือสปาร์กแก๊ปไว้ในวงจรภาคแรงต่ำ

2) Glynne bridge

Glynne bridge คือ บริดจ์ที่โดยทั่วไปเรียกกันว่า transformer ratio arm bridge เพื่อให้ง่ายต่อการเรียกชื่อจึงขอใช้เรียกว่า Glynne bridge เพื่อเป็นเกียรติแก่ผู้พัฒนาบริดจ์นี้ขึ้นซึ่ง Schwab ได้อธิบายไว้ถึง Glynne bridge นี้ว่าเป็นบริดจ์ที่ใช้อ่านค่า $\tan \delta$ ได้โดยตรง มีหลักการใช้การสมดุลของวงจรตามข้อเสนอแนะของ Blumlein ตั้งแต่ปี 1928 และออกแบบสร้างเป็นบริดจ์สมบูรณ์โดย Glynne เมื่อเริ่มแรกออกแบบเพื่อวัดค่าอิมพีแดนซ์ ดังรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 Glynne bridge

Glynne bridge ประกอบด้วยขดลวด 3 ชุด มีแกนเหล็กที่มีค่า μ สูง มีค่ารั่วต่ำ (low leakage) มีลักษณะเป็น current comparator มีการชั่งดี ขดลวดทั้งสอง n_1 และ n_2 สามารถปรับอัตราส่วนโดยการเปลี่ยนจุดต่อ (tapped turns) ส่วนขดลวดที่ 3 คือ n_3 เป็นตัวสือจับว่าวงจรสมดุลหรือไม่ โดยมีกัลวานอมิเตอร์ G เป็นตัวชี้สมดุล

การสมดุลวงจรทำได้โดยการปรับจำนวนรอบ n_1 และ n_2 จนกระทั่งได้ AT (Ampere turns) เท่ากัน ฟลักซ์แม่เหล็กจากขดลวดทั้งสองจะหักล้างกัน ได้ผลลัพธ์ฟลักซ์เป็นศูนย์ จึงไม่มีการเหนี่ยวนำในขดลวดที่ 3 คือ n_3 นั่นคือ

$$I_x n_1 - I_N n_2 = 0$$

แทนค่ากระแส

$$I_x = \omega C_x U$$

และ

$$I_N = \omega C_N U$$

จะได้

$$C_x = C_N \frac{n_1}{n_2} \quad (2.47)$$

ค่าความต้านทานของขดลวด n_1 และ n_2 มีค่าน้อย และ แพกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าได้อิเล็กทริกของ C_N น้อยมากละทิ้งได้ จะได้ค่าแพกเตอร์

$$\tan \delta_x = \omega R_4 C_4 \quad (2.48)$$

โดยการสมมติค่าความเก็บประจุของวัสดุทดสอบมีวงจรมูลเป็นแบบขนาน ทำนองเดียวกับที่พิสูจน์ทราบในวงจร Schering bridge ที่ปรับค่า R_4 ขนานกับ C_4 ได้ $\tan \delta = \omega R_4 C_4$ ในสถานะสมดุลจุด A, B และ C มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับดิน เนื่องจากละทิ้งความต้านทานในขดลวด n_1 และ n_2 ผลของค่าเก็บประจุเตรัยของขดลวด จึงไม่มีผลต่อการสมดุลวงจรสามารถใช้เคเบิลชิลด์ชั้นเดียวได้ เนื่องจากไม่มีผลของค่าเก็บประจุเตรัยลงดิน นับเป็นข้อดีเหนือกว่า Schering bridge และที่ความถี่พลังงาน วิธีของ Glynne bridge มีความไวสูงเป็นร้อยเท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบการทดสอบและการประกอบสร้างชุดทดสอบ

ฉนวนเหลวเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนจากขดลวดกับอากาศภายนอกตัวถังหม้อแปลง และแทรกซึมเข้าไปในรูพรุนของเนื้อฉนวนกระดาษเพื่อป้องกันการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในโพรงอากาศ เพื่อช่วยให้หม้อแปลงไฟฟ้ามีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น และมีอัตราการเสื่อมสภาพน้อยลง

การออกแบบสร้างชุดทดสอบ (Test vessel) เพื่อนำมาใช้ทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ซึ่งทำการออกแบบตามมาตรฐาน IEC 60243-1[14] และการออกแบบสร้างชุดทดสอบ เพื่อนำมาใช้ทดสอบค่าการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดโอดเล็กทรอนิกส์ของเพรสบอร์ด ซึ่งทำการออกแบบในรูปแบบ 3 มิติ โดยใช้โปรแกรม Solid Work เพื่อนำไปประกอบสร้างชุดทดสอบ

3.1 การออกแบบสร้างชุดทดสอบ

การออกแบบสร้างชุดทดสอบในปริภูมิจาน์ฉบับนี้ประกอบด้วย

3.1.1 ชุดทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด

การออกแบบสร้างชุดทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดประกอบไปด้วย

1. ทำการจำลองรูปแบบ 3 มิติด้วยโปรแกรม Solid Works

ชุดทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดมีองค์ประกอบดังต่อไปนี้

1.1) ภาชนะบรรจุน้ำมัน

ทำมาจากวัสดุที่เป็นอะคริลิก ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกกึ่งกลางที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 cm หนา 5 mm ขอบด้านบนและล่างของกระบอกประกบกับแผ่นอะคริลิกกลมแบนเจาะรูสำหรับยึดตัวฉนวนของอิเล็คโตรด และ ทำร่องใส่ยางกันซึมของรอยต่อ

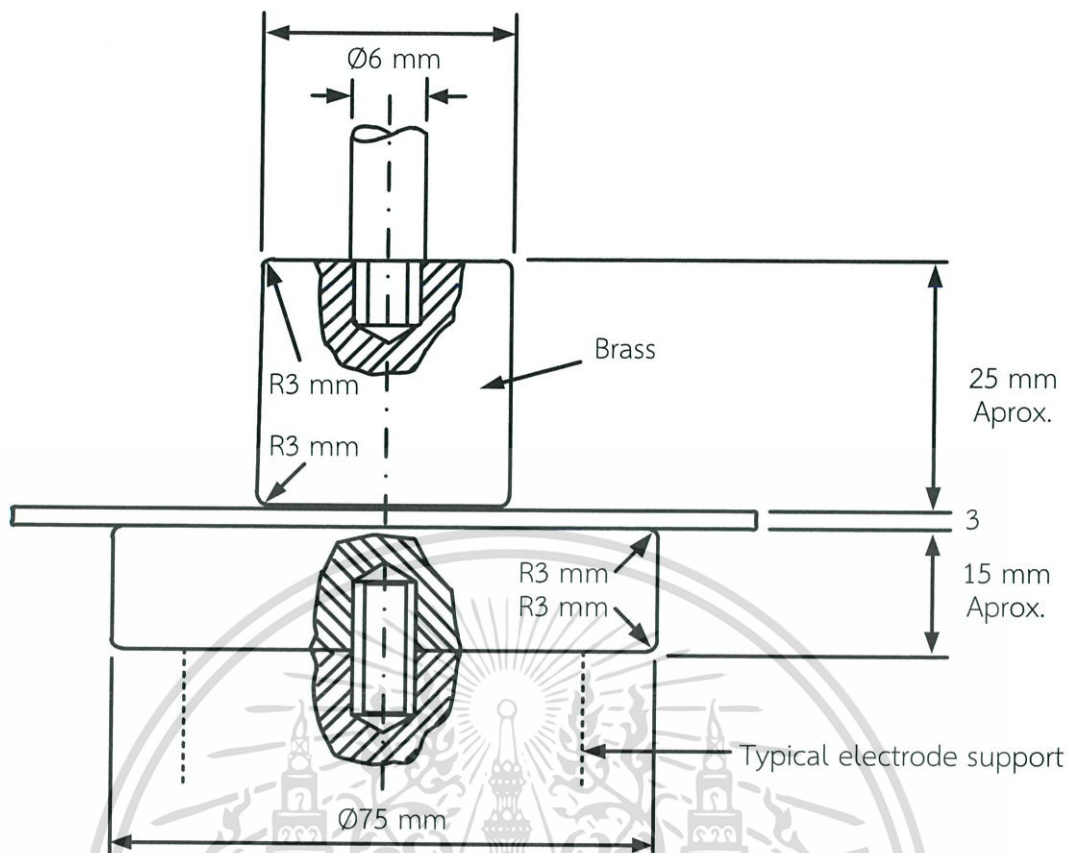
1.2) อิเล็กโตรด

หัวอิเล็กโตรดที่ใช้ในชุดทดสอบนั้นอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC 60243-1 [14] ทำมาจากวัสดุที่เป็นทองเหลือง

ตารางที่ 3.1 ขนาดของอิเล็กโตรดสำหรับการทดสอบ

ขนาด	อิเล็กโตรด	
	ส่วนบน	ส่วนล่าง
ขอบโค้งมนรัศมี	3±0.2 mm	3±0.2 mm
เส้นผ่านศูนย์กลาง	25 ± 1 mm	75 ± 1 mm
ความสูง	25 mm	15 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 หัวอิเล็กโทรดตรงตามมาตรฐาน IEC 60243-1[14]



รูปที่ 3.2 แบบจำลองอิเล็กโทรดชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าของเพรสบอร์ด



รูปที่ 3.3 อิเล็กโทรดชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าของเพรสบอร์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

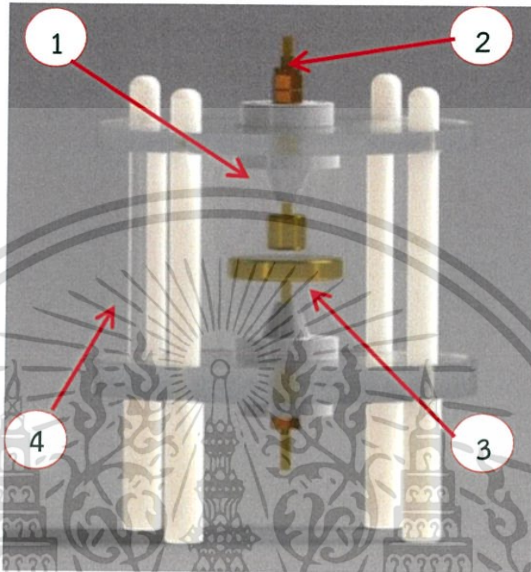
1.3) แกนตัวนำ

ทำจากวัสดุที่เป็นสแตนเลสกันยาว เพื่อยึดอิเล็กโทรดและเป็นจุดต่อสายต้านแรงสูงและกราวด์

1.4) ตัวฉนวนจับยึดแกนตัวนำ

ทำจากวัสดุซูเปอร์ลินสำหรับยึดแกนตัวนำกันยาวที่ยึดอิเล็กโทรดส่วนบนและส่วนล่าง

1.5) แบบจำลองชุดทดสอบ

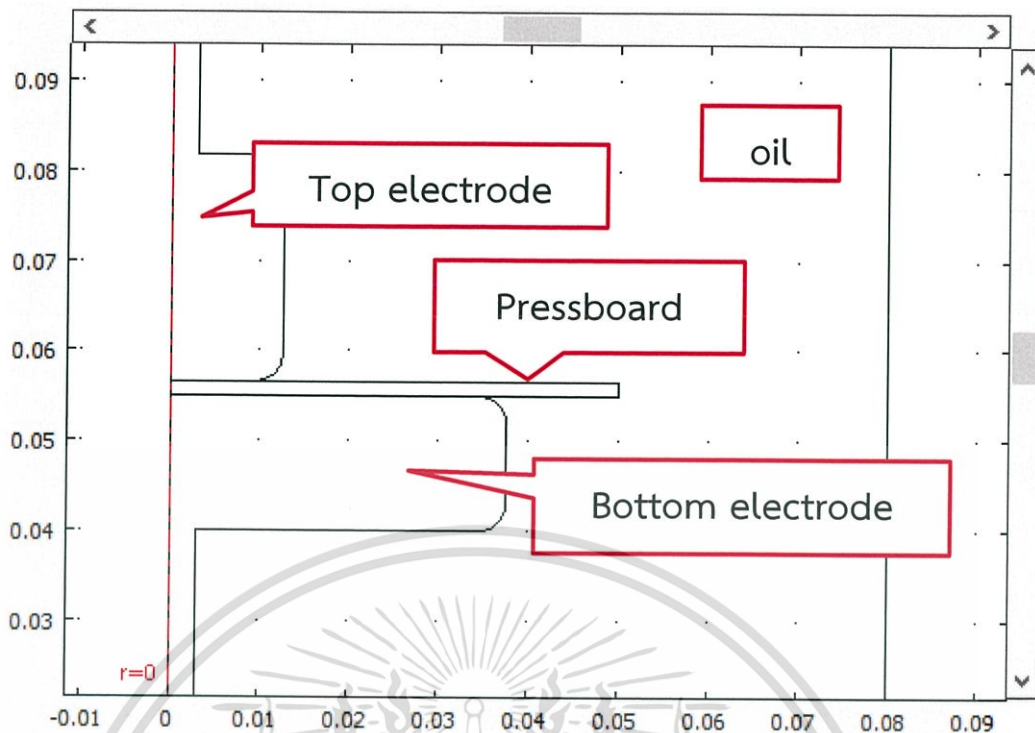


รูปที่ 3.4 แบบจำลองชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด

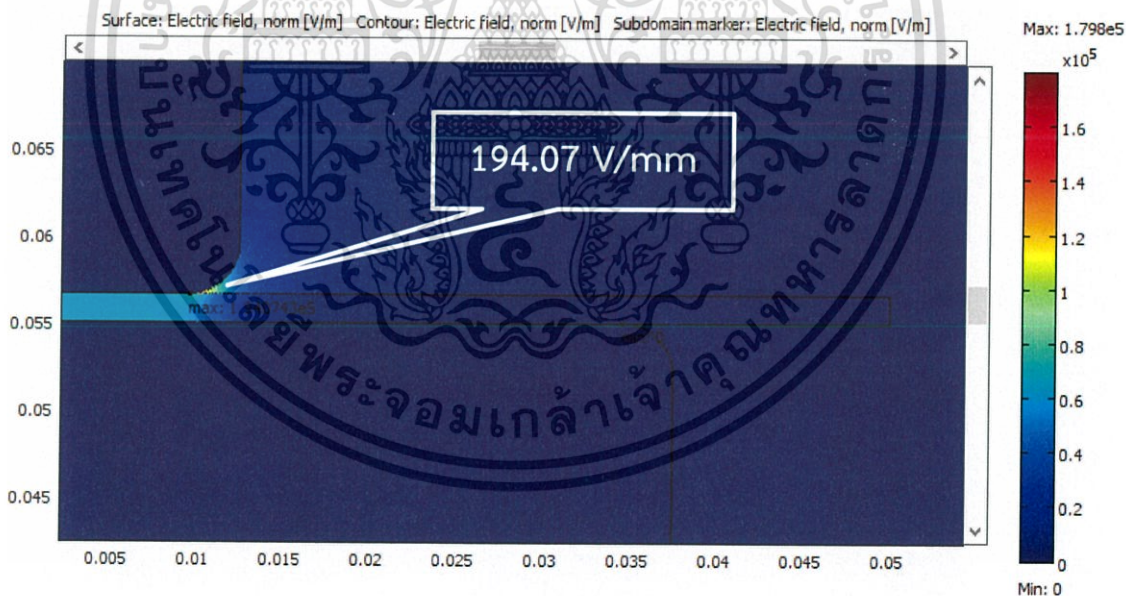
1.ตัวฉนวนจับยึดแกนตัวนำ 2.แกนตัวนำ 3.อิเล็กโทรด 4.ภาชนะบรรจุน้ำมัน

2) การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์

การจำลองรูปแบบสนามไฟฟ้าของเพรสบอร์ดโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์เพื่อช่วยออกแบบชุดทดสอบ โดยกำหนดขอบเขตการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าดังรูปที่ 3.5 และกำหนดค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ให้วัสดุ ได้แก่ อิเล็กโทรด ($\epsilon_r = \text{copper}$) น้ำมันแร่ ($\epsilon_r = 2.2$) และเพรสบอร์ดสมมติให้ค่า ($\epsilon_r = 5$) โดยกำหนดแรงดันให้กับอิเล็กโทรดบนเท่ากับ 100 V จะได้ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าดังรูปที่ 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ

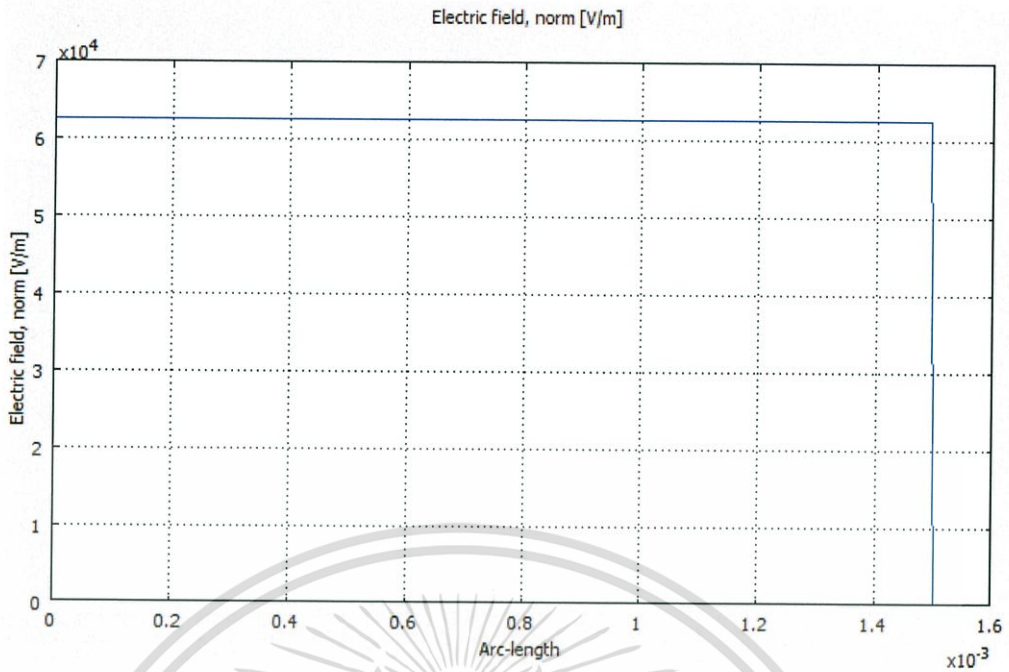


รูปที่ 3.5 ขอบเขตการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าของชุดทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด



รูปที่ 3.6 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของชุดทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดของชุดทดสอบ วัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด

3.1.2 ชุดทดสอบหาค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์ด

การออกแบบสร้างชุดทดสอบหาค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์ดประกอบไปด้วย

1. ออกแบบ 3 มิติด้วยโปรแกรม Solid Works

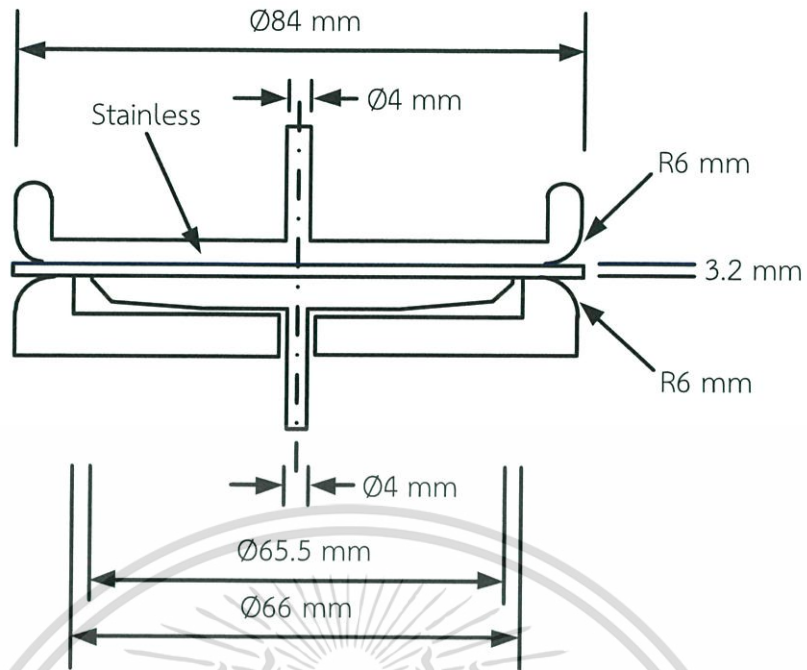
ชุดทดสอบหาค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์ดมีองค์ประกอบดังต่อไปนี้

1.1) ภาชนะบรรจุน้ำมัน

ทำมาจากวัสดุที่เป็นแก้ว ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 90 cm หนา 4 mm ขอบด้านบนและล่างของทรงกระบอกประกอบด้วยแผ่นสแตนเลสเจาะรูสำหรับยึดตัวตัวฉนวนของอิเล็กโทรด และใส่ยางกันซึมตามรอยต่อ

1.2) อิเล็กโทรด

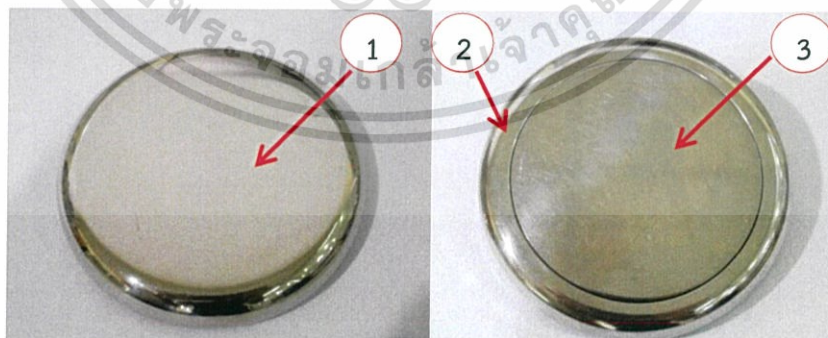
หัวอิเล็กโทรดที่ใช้ในชุดทดสอบมีลักษณะเป็นทรงกระบอก ทำจากวัสดุสแตนเลส โดยที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอิเล็กโทรดหลัก (Main electrode) 65.5 mm, การ์ดอิเล็กโทรด (Guard electrode) 66 mm และอิเล็กโทรดแรงสูง (High voltage electrode) 84 mm



รูปที่ 3.8 หัวอิเล็กโทรด



รูปที่ 3.9 แบบจำลองอิเล็กโทรดชุดทดสอบหาค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของเพอร์สโอบด์



รูปที่ 3.10 อิเล็กโทรดชุดทดสอบหาค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของเพอร์สโอบด์

1.อิเล็กโทรดแรงสูง 2.การ์ดอิเล็กโทรด 3.อิเล็กโทรดหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

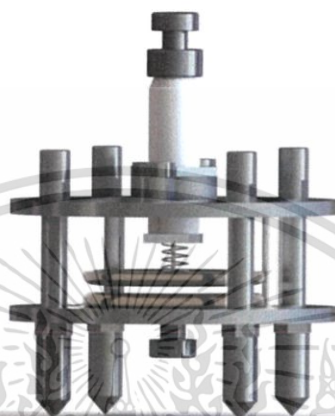
1.3) แกนตัวนำ

ทำจากวัสดุที่เป็นสแตนเลสเป็นก้านยาว สำหรับจับยึดอิเล็กทรอนิกส์และต่อสายจากด้านไฟฟ้าแรงสูงและกราวนด์

1.4) ตัวฉนวนจับยึดแกนตัวนำ

ทำจากวัสดุซูเปอร์สีนสำหรับยึดแกนตัวนำก้านยาวที่ยึดอิเล็กทรอนิกส์ส่วนบนและส่วนล่าง

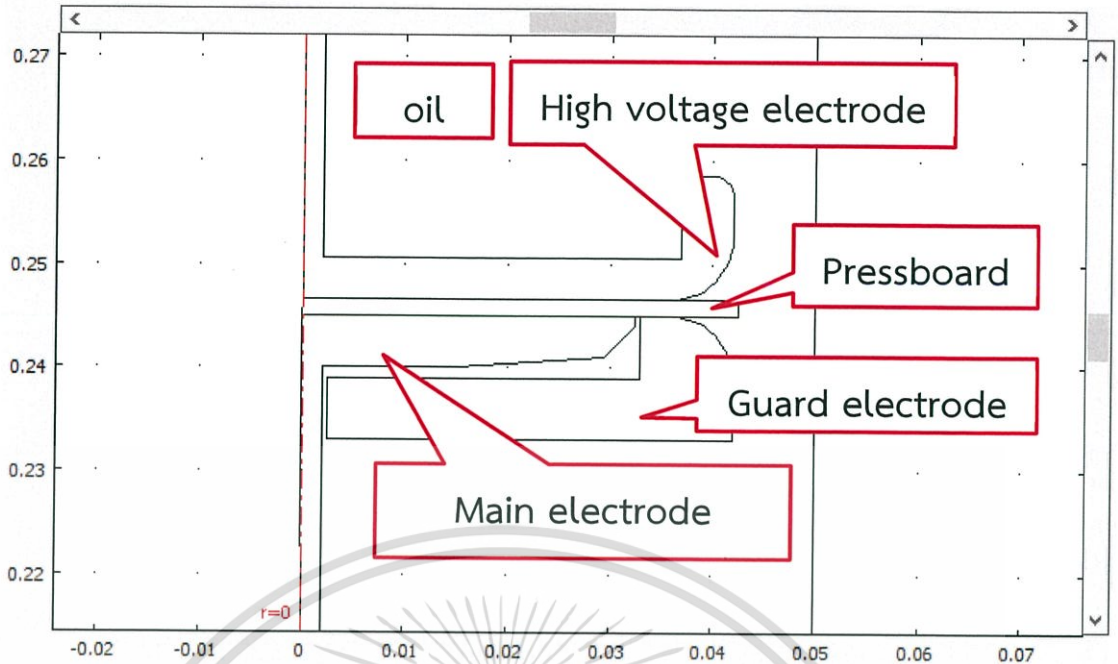
1.5) แบบจำลองชุดทดสอบ



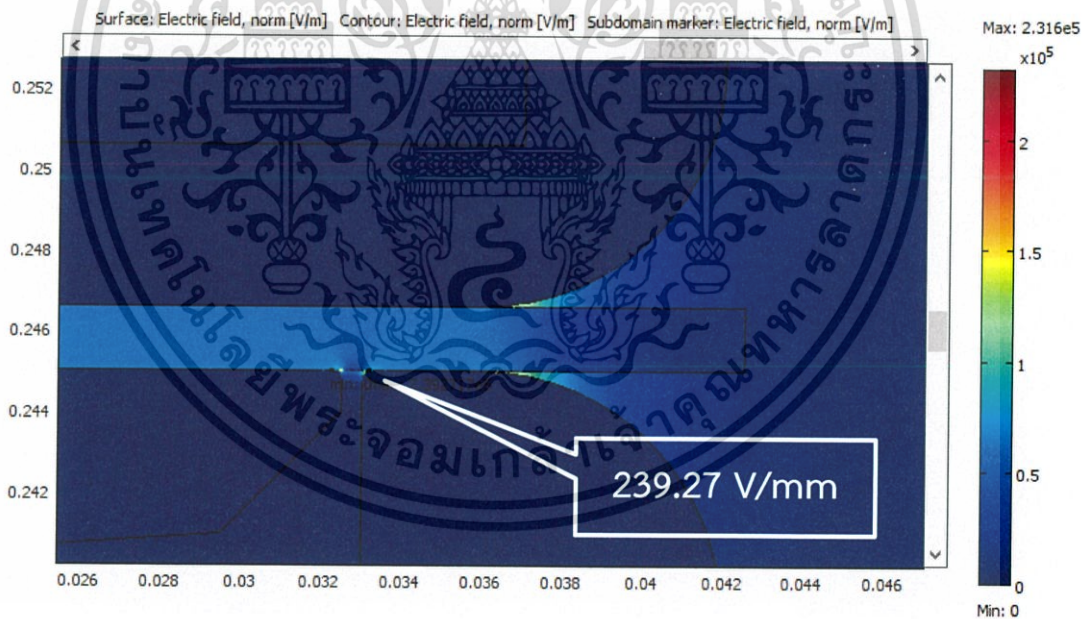
รูปที่ 3.11 แบบจำลองชุดทดสอบค่าคาปาซิเตอร์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์ด

2) การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์

การจำลองรูปแบบสนามไฟฟ้าของเพรสบอร์ดโดยใช้โปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์เพื่อช่วยออกแบบชุดทดสอบ โดยกำหนดขอบเขตการคำนวณค่าสนามไฟฟ้างดรูปที่ 3.12 และกำหนดค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ให้วัสดุ ได้แก่ อีเล็กโตรด ($\epsilon_r = \text{Stainless}$) น้ำมันแร่ ($\epsilon_r = 2.2$) และเพรสบอร์ดสมมติให้ค่า ($\epsilon_r = 5$) โดยกำหนดแรงดันให้กับอิเล็กทรอนิกส์แรงสูงเท่ากับ 100 V จะได้ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้างดรูปที่ 3.13 และ 3.14 ตามลำดับ

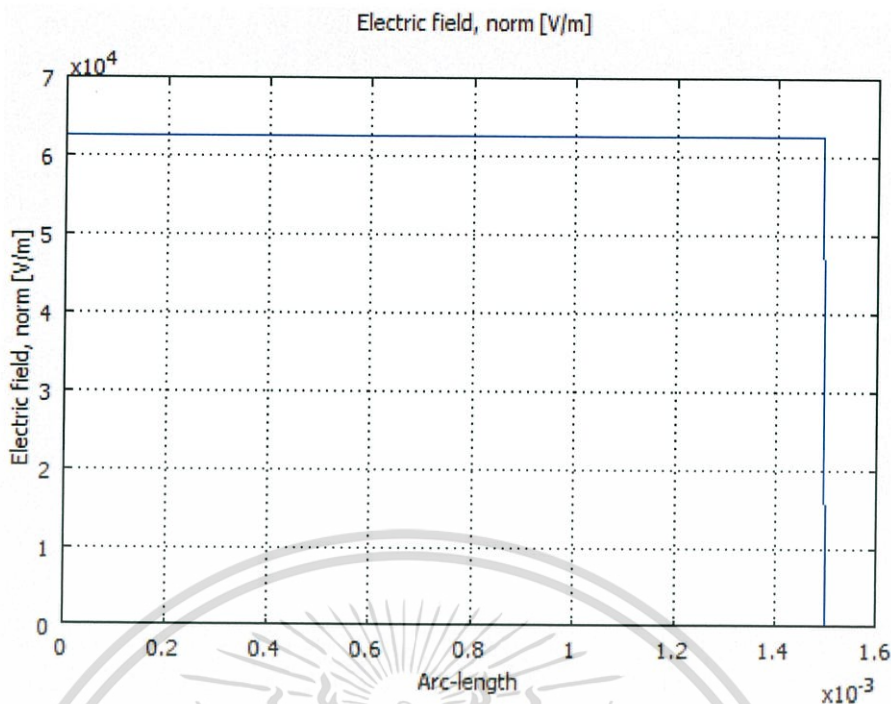


รูปที่ 3.12 ขอบเขตการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าของชุดทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์ด



รูปที่ 3.13 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของชุดทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ และ ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14. ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดของชุดทดสอบ วัดค่าคาปาซิแตนซ์ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของเพอร์สบอร์ด

3.2 การออกแบบการทดสอบ

การทดสอบในปริภูมิตฤษฎีฉบับนี้ประกอบด้วยขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้

1) การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพอร์สบอร์ดที่ไม่อิมเพกเน็ท และอิมเพกเน็ทด้วยฉนวนเหลวที่เวลา 3 - 24 ชั่วโมง โดยเพิ่มเวลาในการอิมเพกเน็ทครั้งละ 3 ชั่วโมง

2) การทดสอบค่าการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของเพอร์สบอร์ดด้วยฉนวนเหลว โดยเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิของฉนวนเหลวตั้งแต่ 25 - 100 °C โดยเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 5 °C

ฉนวนเหลวที่ใช้สำหรับการทดสอบประกอบด้วยฉนวนเหลวดังต่อไปนี้

- 1) น้ำมันหม้อแปลง ยี่ห้อ Electrol A
- 2) เอสเทอร์ธรรมชาติ ยี่ห้อ Biotemp

3.3 การเตรียมเพรสบอร์ดสำหรับการทดสอบ

การเตรียมเพรสบอร์ดที่ใช้ในการทดสอบทั้ง 2 การทดสอบมีขั้นตอนดังนี้

- 1) ตัดเพรสบอร์ดให้มีขนาด 10×10 cm สำหรับการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 85 mm สำหรับการทดสอบค่าการทดสอบวัตค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก



รูปที่ 3.15 เพรสบอร์ด 10×10 cm



รูปที่ 3.16 เพรสบอร์ดเส้นผ่านศูนย์กลาง 85 mm

- 2) อบเพรสบอร์ดที่อุณหภูมิ 80 °C ในตู้อบสูญญากาศเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง



รูปที่ 3.17 ตู้อบสูญญากาศ

- 3) อิมเพรกเนตเพรสบอร์ดด้วยฉนวนเหลวทั้ง 2 ชนิดที่อุณหภูมิ 60°C ในตู้อบสูญญากาศเป็นระยะเวลาเวลา 3 -24 ชั่วโมง โดยเพิ่มเวลาในการอิมเพรกเนตทีละ 3 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบ

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบในปริญญาโทฉบับนี้จะแสดงในหัวข้อที่ 3.4.1 – 3.4.3 ตามลำดับ

3.4.1 การทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดสำหรับแรงดันน้อยกว่า 150 kV

การทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดสำหรับแรงดันน้อยกว่า 150 kV มีอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

1) ชุดอัดประจุ

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



รูปที่ 3.18 ชุดอัดประจุ

2) ชุดกำเนิดอิมพัลส์

- Test set 200 kV, 7 kJ



รูปที่ 3.19 ชุดกำเนิดอิมพัลส์ขนาด พิกัดแรงดัน 200 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ชุดควบคุม Impulse voltage generator

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



รูปที่ 3.20 ชุดควบคุม Impulse voltage generator พิกัดกำลัง 7000 VA

4) 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 3.21 โวลเตจดีไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5) โวลเตจดีไวเดอร์ พิกัด 100 kV 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 3.22 โวลเตจดีไวเดอร์ พิกัดแรงดัน 100 kV

- 6) ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด



รูปที่ 3.23 ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) ดิจิตอลออสซิลโลสโคป

- YOKOGAWA DL 1640
- Frequency characteristic 200MHz
- Maximum sampling rate 200MS/s
- Maximum record length 32 MW
- Maximum power consumption 100 VA_{max}



รูปที่ 3.24 ดิจิตอลออสซิลโลสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดสำหรับแรงดันมากกว่า 150 kV

การทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดสำหรับแรงดันมากกว่า 150 kV มีอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

- 1) หม้อแปลงอัดประจุเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
 - Type HDV 75K
 - Input AC 220 V, Output ± 75 kV_{dc}
 - Capacity 5kVA, Output 25 mA



รูปที่ 3.25 หม้อแปลงอัดประจุเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ตัวเก็บประจุไหลด 2000 pF

- Type OHU – PM
- Test voltage IMP.1600kV S.IM. 1500 kV
- Rate capacitance 2000 pF
- Measured capacitance 1960 pF



รูปที่ 3.26 ตัวเก็บประจุไหลด 2000 pF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ชุดกำเนิดอิมพัลส์

- Type IVG 1500B
- Normal voltage 1500 kV
- Capacitance 0.025 μ F
- Charging voltage ± 75 kV
- Charging energy 28.1 kJ



รูปที่ 3.27 ชุดกำเนิดอิมพัลส์ พิกัดแรงดัน 1500 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 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
- 5) ชุดควบคุม Impulse voltage generator
- Test set 1200 kV, 22.5 kJ



รูปที่ 3.28 ชุดควบคุม Impulse voltage generator พิกัดแรงดัน 1200 kV

- 6) ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพอร์สบอร์ด
- 7) ดิจิตอลออสซิลโลสโคป
- YOKOGAWA DL 1640
 - Frequency characteristic 200MHz
 - Maximum sampling rate 200MS/s
 - Maximum record length 32 MW
 - Maximum power consumption 100 VA_{max}

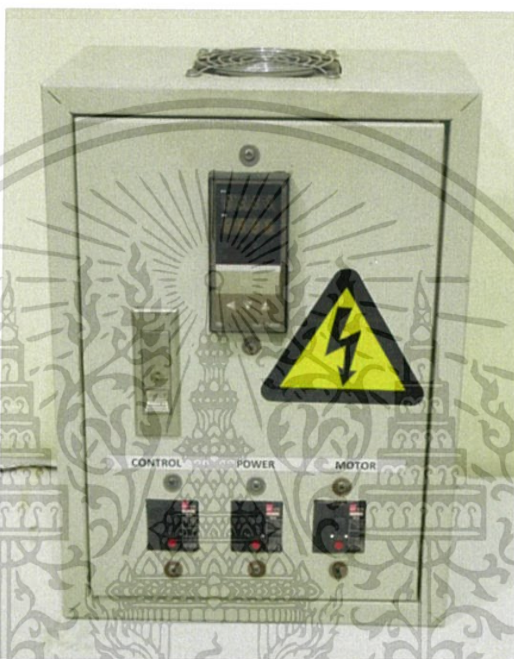
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การทดสอบค่าการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของเพอร์สบอร์ด

การทดสอบค่าการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของเพอร์สบอร์ด มีอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

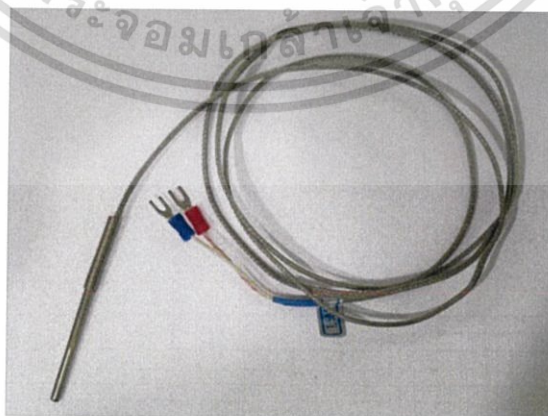
1) Temperature adjust

- Input voltage 220 V
- Rated power 1500 W
- Frequency 50/60 Hz



รูปที่ 3.29 Temperature adjust

2) Thermocouple



รูปที่ 3.30 Thermocouple

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) Heater type aluminium

- Input voltage 220 V
- Power 500 W



รูปที่ 3.31 Heater type aluminium

4) C and δ Meter for Insulation Material

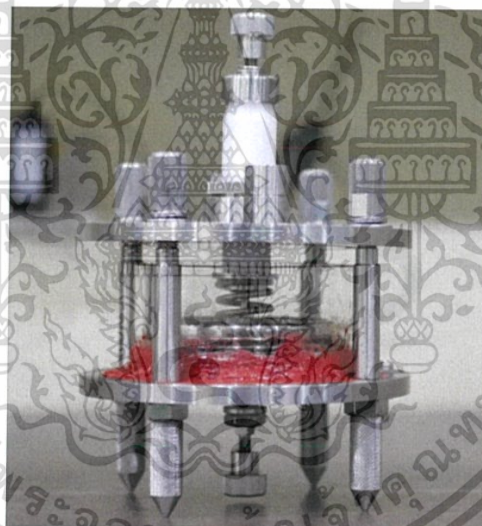
- Input voltage 100-240 V_{AC} $\pm 10\%$
- Frequency 50/60 Hz
- Measurement voltage
 - Measuring voltage 0-2000 V, 50/60 Hz
 - Capacitance 20-1000 pF
 - $\tan \delta$ 0-50 %
 - Relative permittivity 0.02-50.0
- Minimum resolution
 - Measuring voltage 1 V
 - Capacitance 0.1 pF
 - $\tan \delta$ 0.0001% (1 ppm)
 - Relative permittivity 0.01
- Measuring Accuracy
 - Measuring voltage $\pm 3\%$
 - Capacitance $\pm (0.5\% \text{ of reading} + 2 \text{ digits})$
 - $\tan \delta$ $\pm (0.001\% + 1\% \text{ of reading} + 2 \text{ digits})$
 - Relative permittivity $\pm (1\% \text{ of reading} + 2 \text{ digits})$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.32 C and tan δ meter for Insulation Material

5) ชุดทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของเพอร์สบอร์ด

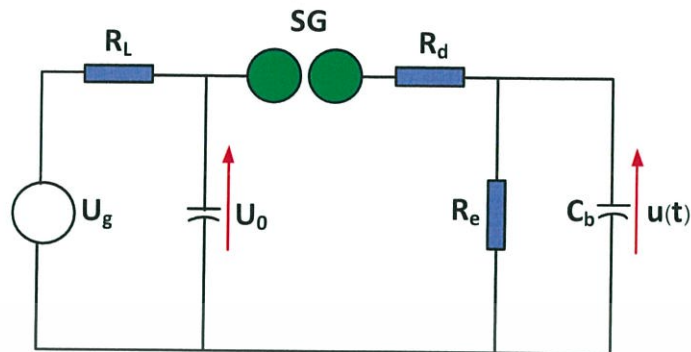


รูปที่ 3.33 ชุดทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของเพอร์สบอร์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

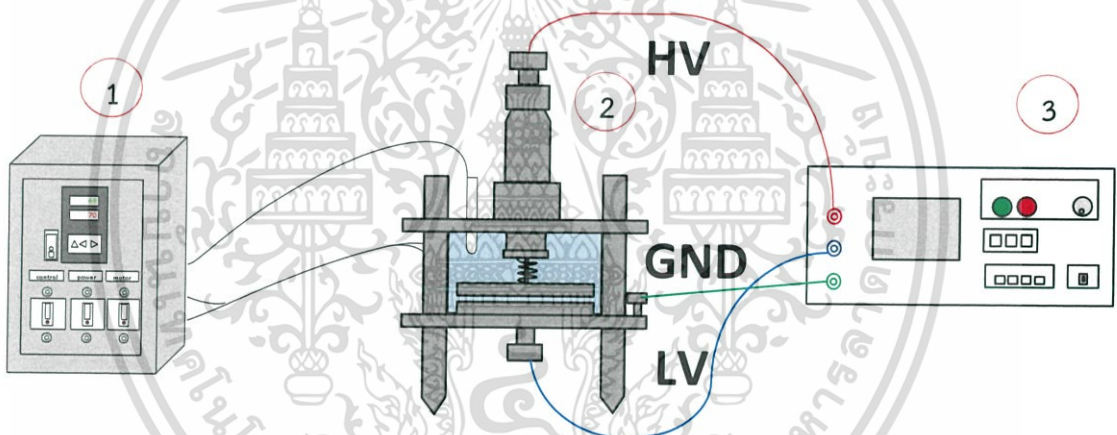
3.5 วงจรทดสอบ

3.5.1 วงจรทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด



รูปที่ 3.34 วงจรทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด

3.5.2 วงจรทดสอบค่าการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์ด



รูปที่ 3.35 การจำลองวงจรทดสอบค่าการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์ด

1. Temperature adjust 2. Test vessel. 3. C & tan δ meter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบและผลการทดสอบ

การทดสอบในปฏิญานิพนธ์นี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังต่อไปนี้

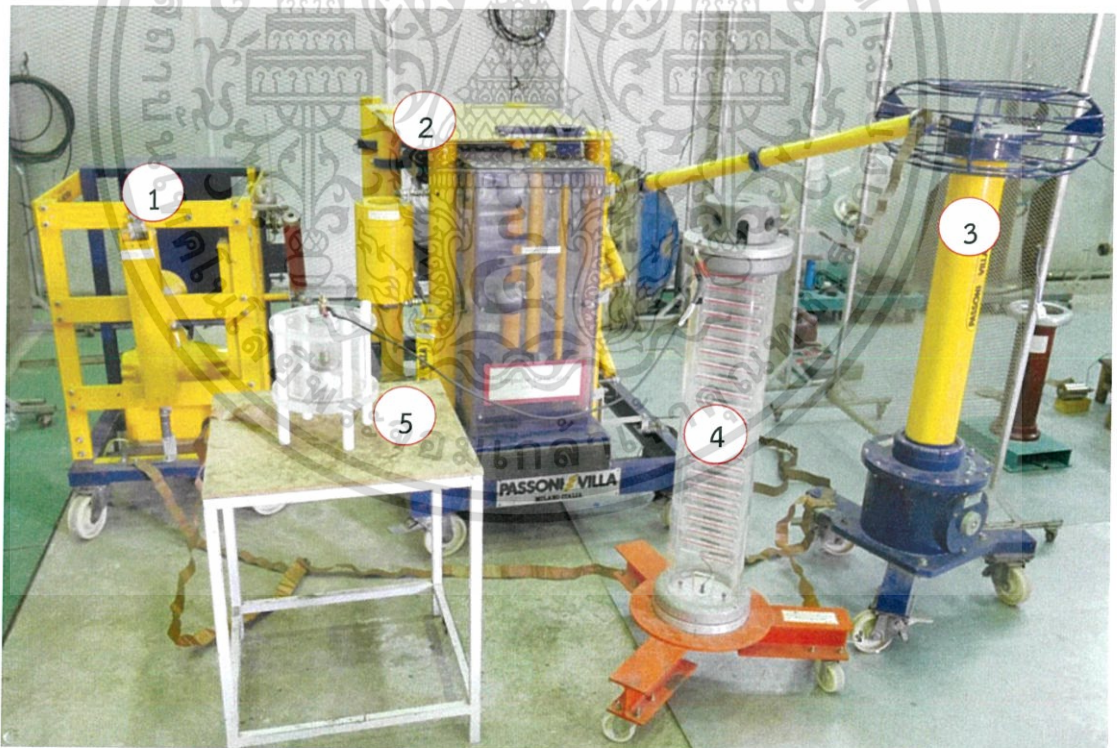
1. การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดที่ไม่อิมเพกเน็ทและอิมเพกเน็ทด้วยฉนวนเหลว
2. การทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียต่อไอเล็กทริกของเพรสบอร์ด

4.1 การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด

การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดที่มีความหนา 1.6 mm และ 3.2 mm ที่อิมเพกเน็ทด้วยน้ำมันแร่และเอสเทอร์ธรรมชาติ เพื่อเปรียบเทียบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทั้งชั่วคราวและชั่วคราว ที่เกิดจากความแตกต่างของจำนวนชั่วโมงในการอิมเพกเน็ท และความหนาของเพรสบอร์ด

4.1.1 วงจรทดสอบ

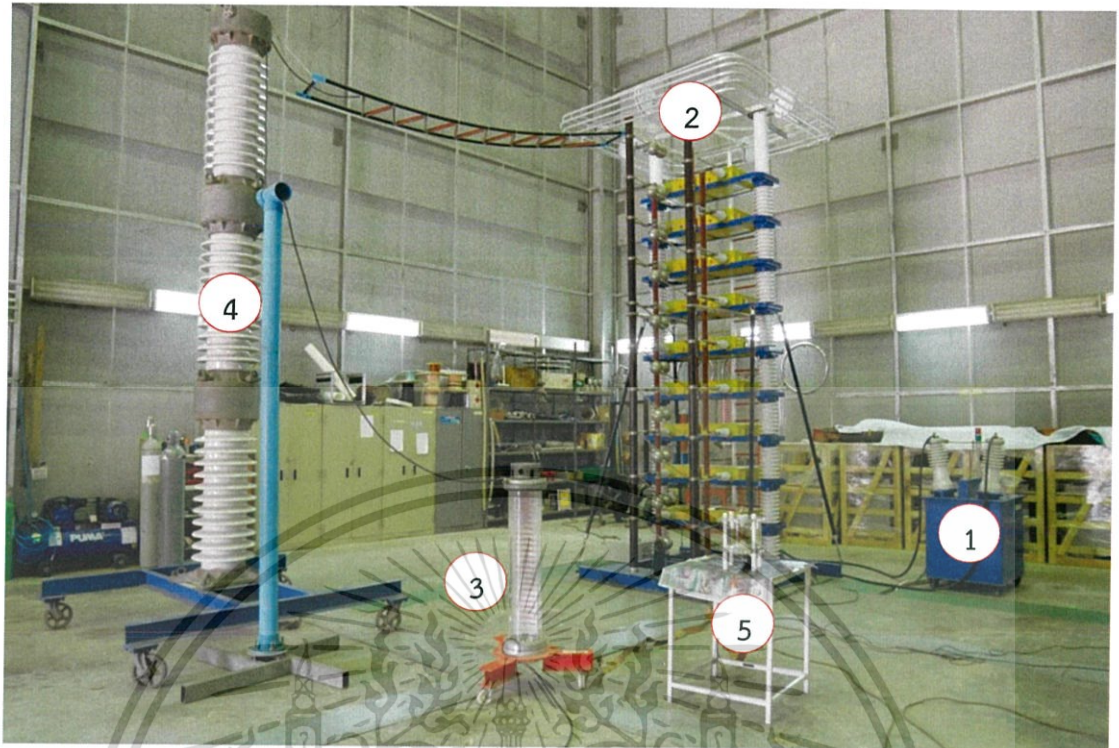
การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดสำหรับแรงดันที่น้อยกว่า 150 kV และ มากกว่า 150kV แสดงดังรูปที่ 4.1 และ รูปที่ 4.2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 วงจรทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด
สำหรับแรงดันน้อยกว่า 150 kV

1. ชุดอัดประจุ 2. เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 200 kV 3. โวลต์เจดีไวเตอร์ชนิดตัวเก็บประจุ
4. โวลต์เจดีไวเตอร์ 5. ชุดทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 วงจรทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพอร์สบอร์ด
สำหรับแรงดันมากกว่า 150 kV

1. หม้อแปลงอัดประจุเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
2. เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 1200 kV
3. โวลต์เตจดีไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุ
4. ตัวเก็บประจุโหลด 2000 pF
5. ชุดทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า



รูปที่ 4.3 ชุดทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดมีขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้

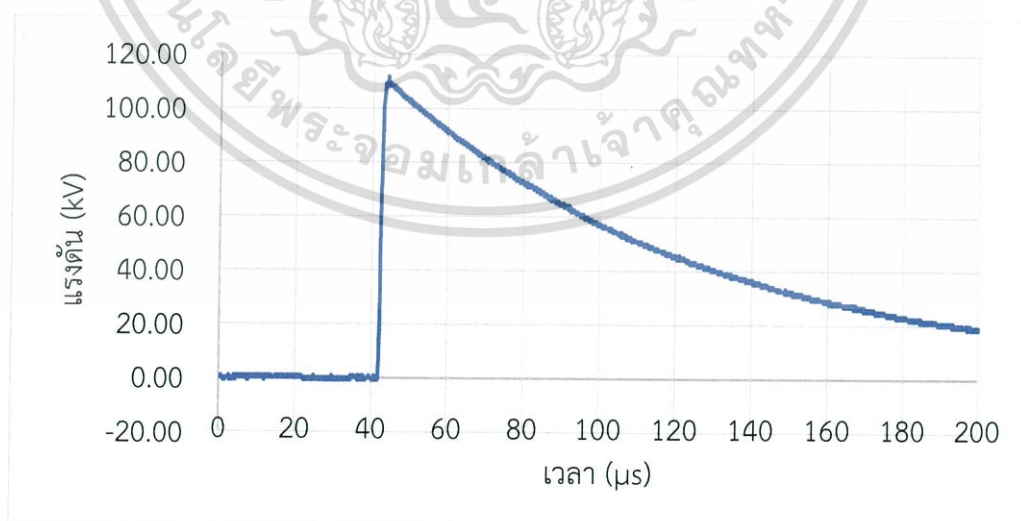
- 1) ทำการต่อวงจรทดสอบดังรูปที่ 4.1 และ 4.2
- 2) นำฉนวนเหลวที่ต้องการทดสอบเทลงในชุดทดสอบ โดยให้ฉนวนเหลวอยู่ในระดับที่ห่างจากขอบบนของชุดทดสอบ 1-2 cm
- 3) ตรวจสอบฉนวนเหลวที่ถูกเทลงในชุดทดสอบว่ามีฟองอากาศอยู่หรือไม่ ถ้ามีฟองอากาศใช้แท่งแก้วคนเบาๆ จนกว่าฟองอากาศที่มีจะหายไปจนหมด
- 4) จัดบันทึกค่าอุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันบรรยากาศ
- 5) ทำการขึ้นแรงดัน โดยให้อัตราการเพิ่มแรงดันคงที่อย่างช้าๆ จนกระทั่งเกิดการเบรกดาวน์
- 6) บันทึกกราฟค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่อ่านได้จากออสซิลโลสโคป
- 7) เมื่อฉนวนเหลวที่ใช้ทดสอบเกิดการเบรกดาวน์แล้วให้ทำการเทเปลี่ยนใหม่ทั้งหมด ทำความสะอาดอิเล็กโตรดที่มีเขม่าติด และเปลี่ยนอิเล็กโตรดที่ใช้ในการทดสอบ จากนั้นตั้งพักชุดทดสอบทิ้งไว้ระยะเวลา 5 นาที
- 8) ทำซ้ำขั้นตอนที่ 5-7 ไปเรื่อยๆ จนกว่าจะทดสอบครบจำนวน 6 ครั้ง

4.1.3 ผลการทดสอบ

ผลการการทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวและชั่วลบของเพรสบอร์ดที่มีดังต่อไปนี้

1. แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว

การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่อิมเพกเนตด้วยน้ำมันแร่และเอสเทอร์ธรรมชาติ มีรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวที่ใช้ในการอ้างอิงแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว 1.24/60 μs ที่ใช้ในการตรวจสอบเวลาหน้าคลื่น และหลังคลื่นโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60060-1 [15]

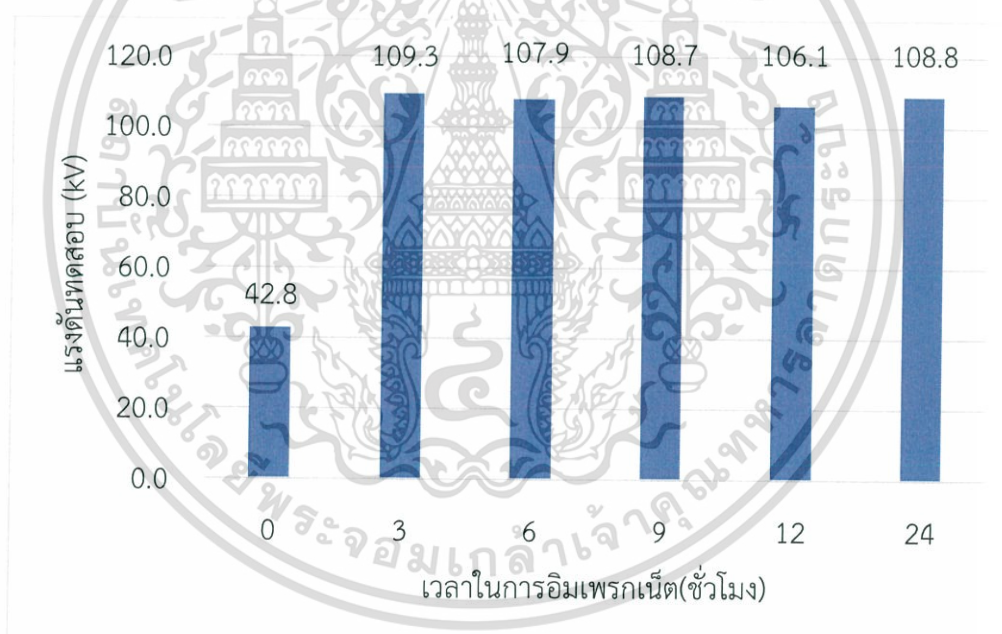
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1) น้ำมันแร่

การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเน็ตด้วยน้ำมันแร่โดยการเปลี่ยนแปลงเวลาในการอิมเพรกเน็ตและความหนาของเพรสบอร์ด ซึ่งแสดงตามตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่อิมเพรกเน็ตด้วยน้ำมันแร่

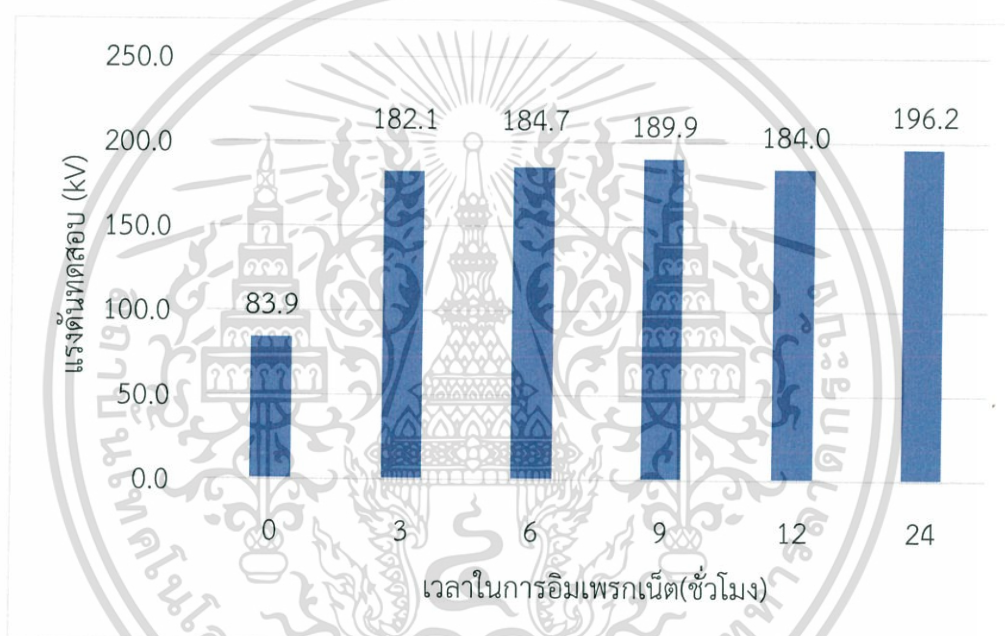
เวลาในการอิมเพรกเน็ต(ชม.)	ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของน้ำมันแร่ (kV)						
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ค่าเฉลี่ย
0	44.6	44.6	43.3	40.8	42.1	41.7	42.8
3	105.8	114.2	109.2	110.8	112.5	103.3	109.3
6	108.3	111.7	101.7	110.8	105.8	109.2	107.9
9	103.3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



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเน็ตด้วยน้ำมันแร่ขนาด 1.6 mm และ จำนวนชั่วโมงในการอิมเพรกเน็ต

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm ที่อิมเพกต์ด้วยน้ำมันแร่

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



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่อิมเพกต์ด้วยน้ำมันแร่ขนาด 3.2 mm และ จำนวนชั่วโมงในการอิมเพกต์

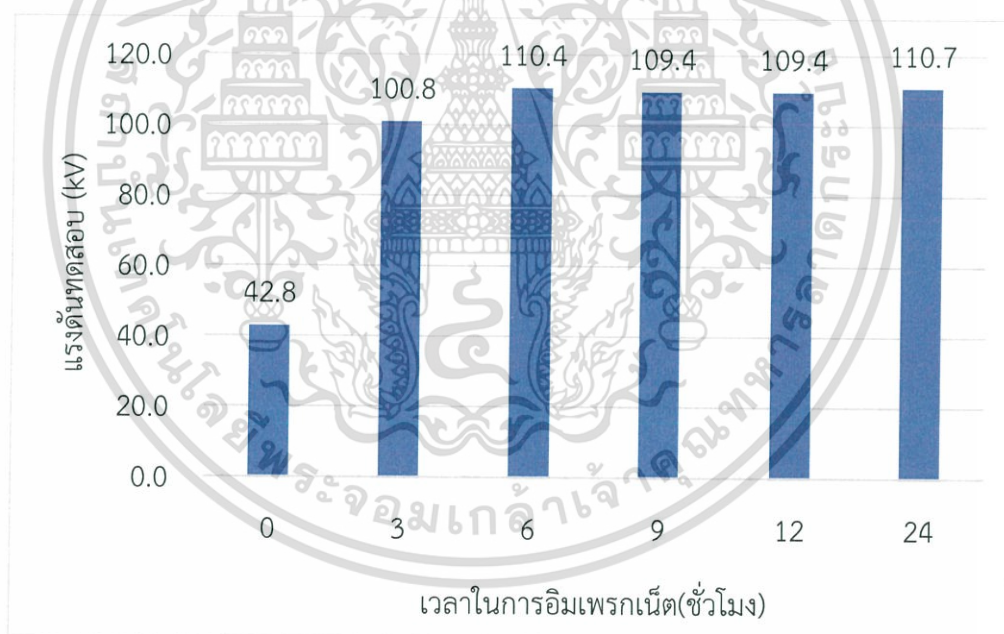
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2) เอสเทอร์ธรรมชาติ

การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่อิมเพกเน็ตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติโดยการเปลี่ยนแปลงเวลาในการอิมเพกเน็ตและความหนาของเพรสบอร์ด ซึ่งแสดงตามตารางที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่อิมเพกเน็ตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ

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

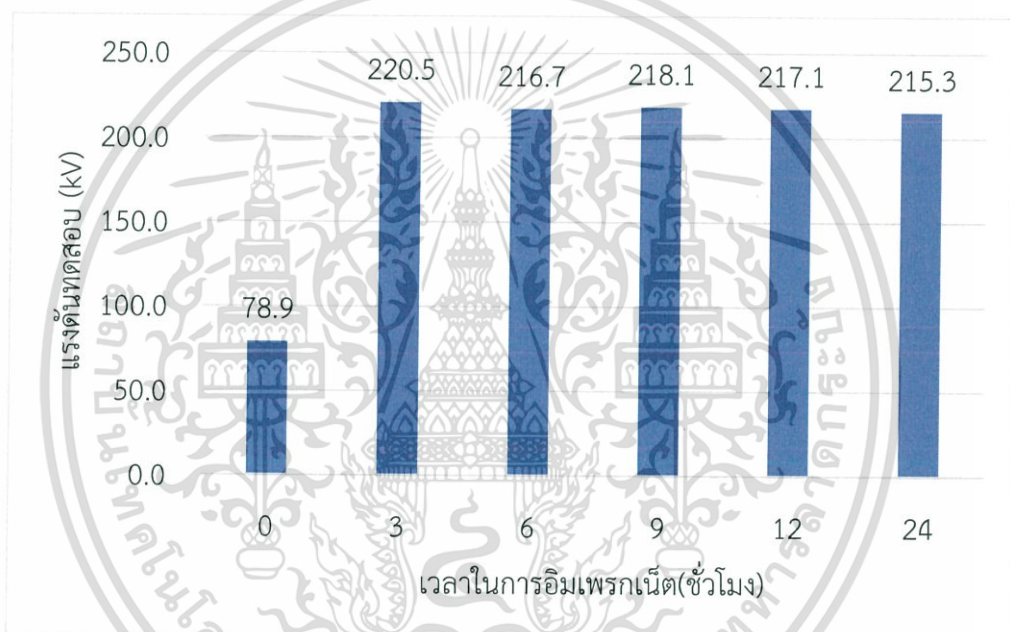


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่อิมเพกเน็ตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติขนาด 1.6 mm และ จำนวนชั่วโมงในการอิมเพกเน็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm ที่อิมเพรกเน็ทด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ

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

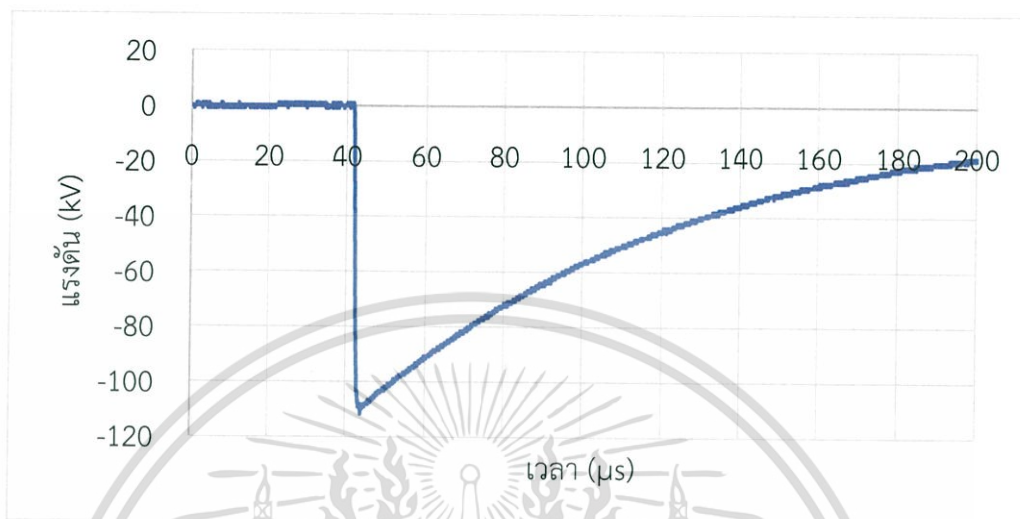


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเน็ทด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติขนาด 3.2 mm และ จำนวนชั่วโมงในการอิมเพรกเน็ท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วพลบ

การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วพลบของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเน็ตด้วยน้ำมันแร่และเอสเทอร์ธรรมชาติ มีรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วพลบที่ใช้ในการอ้างอิงแสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วพลบ 1.24/60 μs ที่ใช้ในการตรวจสอบเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60060-1 [15]

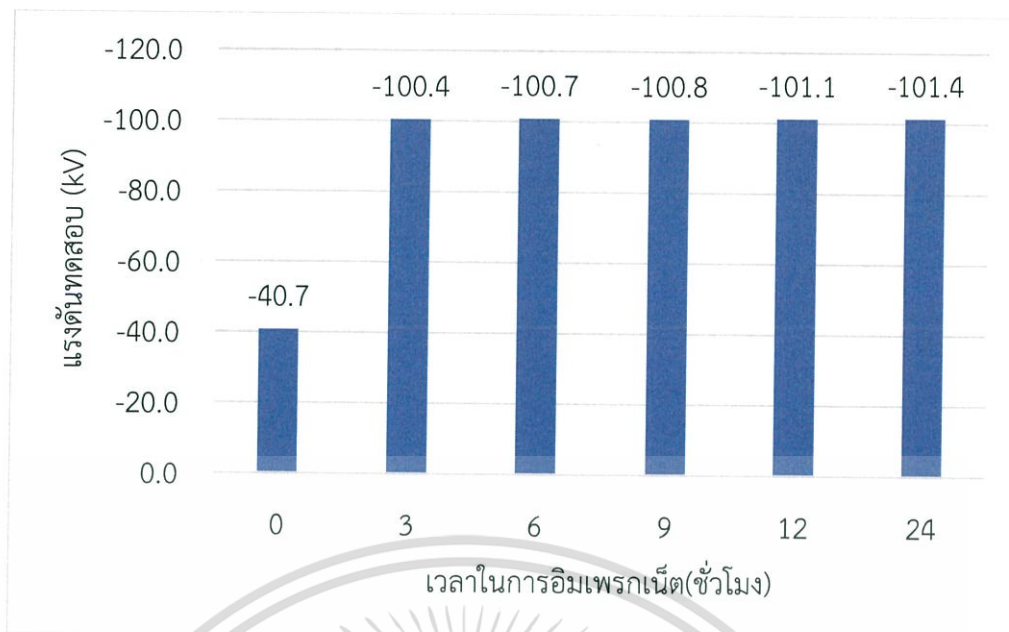
2.) น้ำมันแร่

การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วพลบของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเน็ตด้วยน้ำมันแร่โดยการเปลี่ยนแปลงเวลาในการอิมเพรกเน็ตและความหนาของเพรสบอร์ด ซึ่งแสดงตามตารางที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วพลบของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่อิมเพรกเน็ตด้วยน้ำมันแร่

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

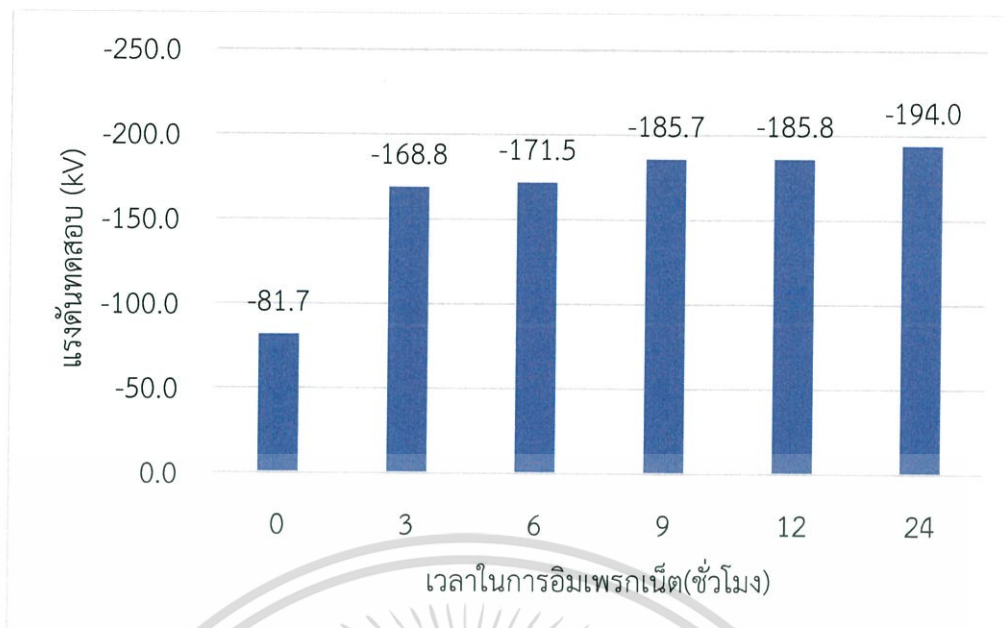


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบของเพรสบอร์ดที่อิมเมจด้วยน้ำมันแร่ขนาด 1.6 mm และ จำนวนชั่วโมงในการอิมเมจ

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบของเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm ที่อิมเมจด้วยน้ำมันแร่

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าขั้วลบของเพรสบอร์ดที่อิมเพกเนตด้วยน้ำมันแร่ขนาด 3.2 mm และ จำนวนชั่วโมงในการอิมเพกเนต

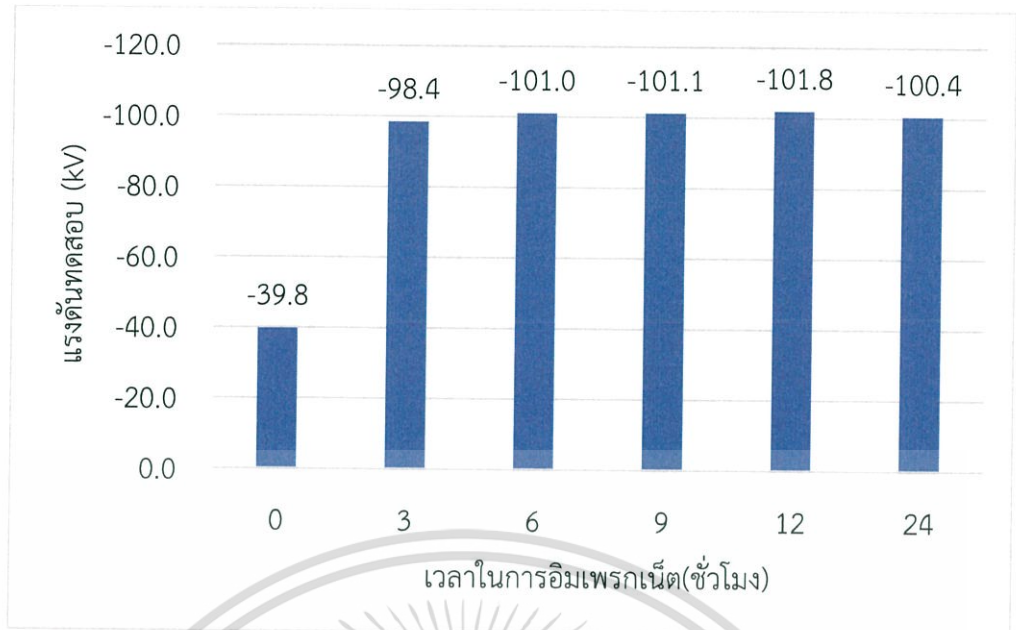
2.2) เอสเทอร์ธรรมชาติ

การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าขั้วลบของเพรสบอร์ดที่อิมเพกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติโดยการเปลี่ยนแปลงเวลาในการอิมเพกเนตและความหนาของเพรสบอร์ด ซึ่งแสดงตามตารางที่ 4.7 - 4.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าขั้วลบของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่อิมเพกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

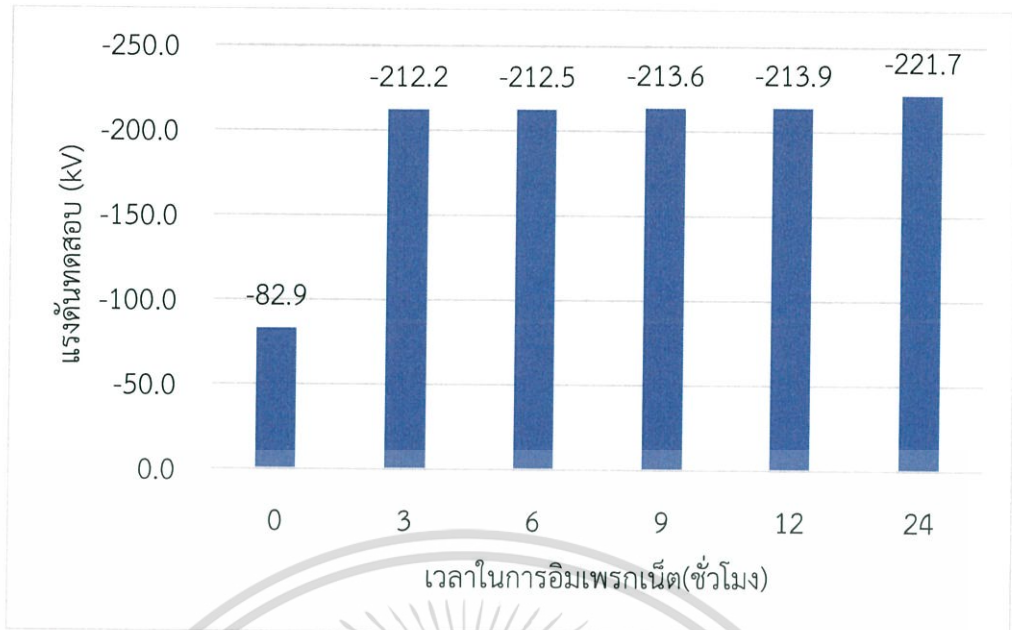


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบของเพรสบอร์ดที่อิมเพรเกนิตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติขนาด 1.6 mm และ จำนวนชั่วโมงในการอิมเพรเกนิต

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบของเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm ที่อิมเพรเกนิตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



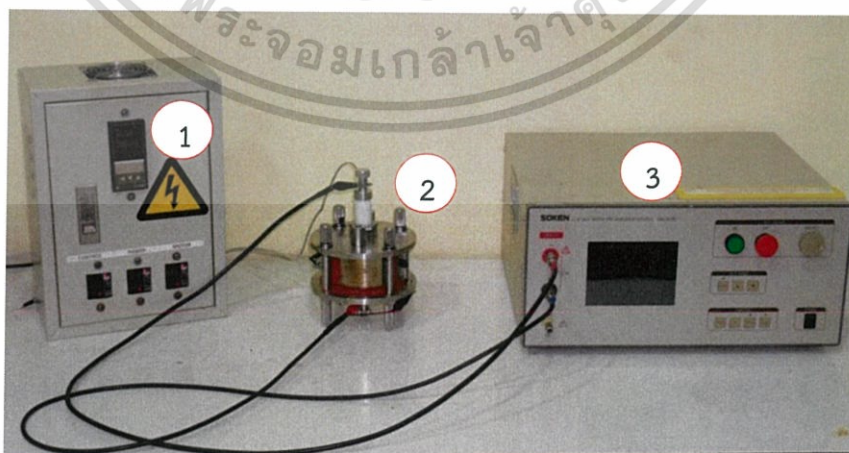
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่วลบของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติขนาด 3.2 mm และ จำนวนชั่วโมงในการอิมเพรกเนต

4.2 การทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์ด

การทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm และ 3.2 mm โดยการอิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่และเอสเทอร์ธรรมชาติ เพื่อดูผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และจำนวนชั่วโมงในการอิมเพรกเนต

4.2.1 วงจรทดสอบ

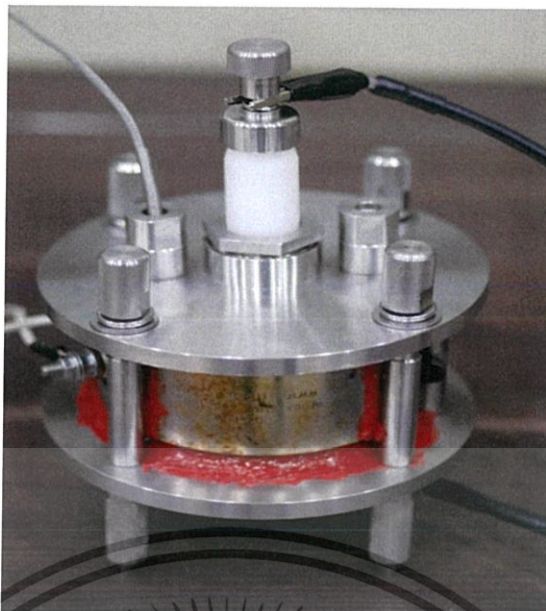
วงจรทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์ด ที่ตรวจจับด้วยเครื่อง C & tan δ meter และควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่อง Temperature adjust ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 วงจรทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์ด

1 Temperature adjust 2. Test vessel 3. C & tan δ meter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ชุดทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก

4.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของเพอร์สอร์ตมีขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้

1. ทำการต่อวงจรทดสอบตามรูปที่ 4.14
2. นำฉนวนเหลวที่ต้องการทดสอบเหลวใน Test vessel โดยให้ฉนวนเหลวอยู่ในระดับที่ห่างจากขอบบนของชุดทดสอบ 1-2 cm
3. เปิดเครื่อง Temperature adjust ปรับอุณหภูมิที่ต้องการที่ทดสอบ โดยทำการกำหนดให้วัดค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของฉนวนเหลวในช่วงอุณหภูมิ 25 – 100 °C โดยเพิ่มอุณหภูมิขึ้นทีละ 5 °C
5. เมื่ออุณหภูมิของ Test vessel ถึงค่าที่กำหนดไว้ ซึ่งสามารถดูได้จากเครื่อง Temperature adjust ให้ทำการจดบันทึกค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกจากเครื่อง C & tan δ meter
6. หลังจากจดบันทึกค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ณ อุณหภูมิที่ต้องการแล้วให้ปรับเพิ่มอุณหภูมิไปยังค่าใหม่ที่ต้องการ

4.2.3 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่และเอสเทอร์ธรรมชาติ ที่มีความหนาของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm และ 3.2 mm มีดังต่อไปนี้

1. น้ำมันแร่

ผลการทดสอบเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่ที่มีความหนาของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm และ 3.2 mm มีดังต่อไปนี้

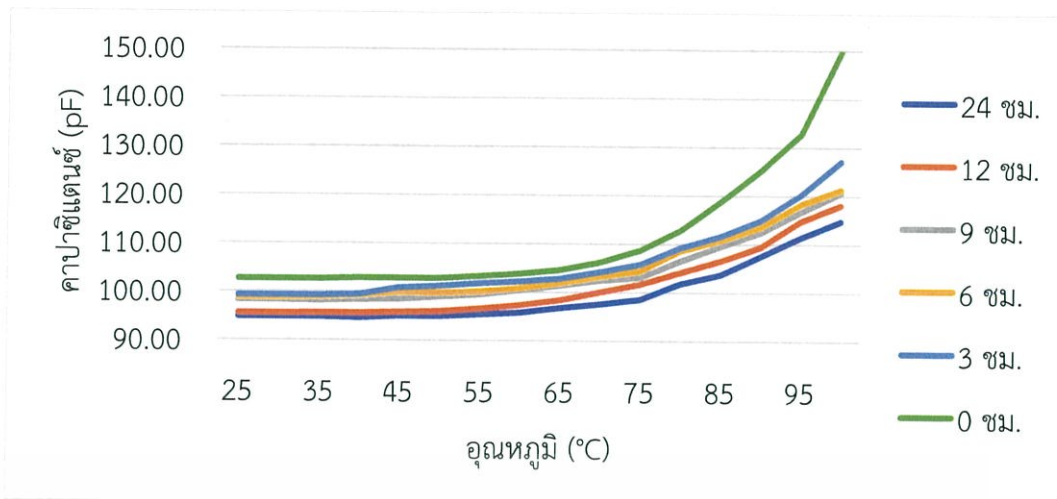
1.1) เพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่ขนาด 1.6 mm

ผลการทดสอบที่แสดงผลของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและจำนวนชั่วโมงในการอิมเพรกเนตเพื่อดูผลการเปลี่ยนแปลงของค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก แสดงตามตารางที่ 4.9 - 4.11 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ (pF) ของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่

เวลาอิมเพรกเนต (ชม.) อุณหภูมิ (°C)	เวลาอิมเพรกเนต (ชม.)					
	0 ชม.	3 ชม.	6 ชม.	9 ชม.	12 ชม.	24 ชม.
25	102.60	99.20	98.80	98.30	95.50	94.80
30	102.60	99.20	98.80	98.30	95.50	94.80
35	102.60	99.20	98.90	98.20	95.60	94.80
40	102.80	99.40	99.20	98.40	95.60	94.60
45	102.80	100.80	99.90	98.50	95.80	95.00
50	102.80	101.20	99.80	99.00	96.00	95.00
55	103.30	101.80	100.10	99.50	96.60	95.40
60	103.80	102.20	100.80	100.40	97.30	95.80
65	104.60	102.80	101.90	101.40	98.40	96.80
70	106.20	104.20	103.30	102.50	100.00	97.60
75	108.70	105.80	104.40	103.10	101.70	98.60
80	112.80	109.20	108.60	106.50	104.10	101.80
85	118.80	111.70	110.80	109.60	106.60	103.70
90	125.30	115.00	113.60	112.50	109.50	107.60
95	132.70	120.20	118.30	116.70	114.80	111.40
100	149.90	127.10	121.30	120.70	118.10	114.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

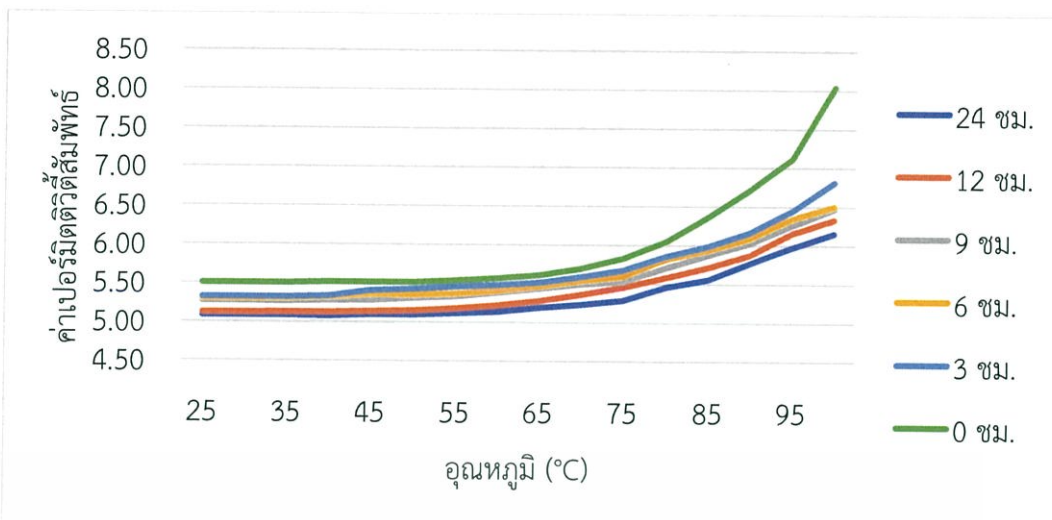


รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบค่าค่าปาดัชนีของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่ ณ อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบวัดค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่

เวลาอิมเพรกเนต (ชม.) อุณหภูมิ (°C)	เวลาอิมเพรกเนต (ชม.)					
	0 ชม.	3 ชม.	6 ชม.	9 ชม.	12 ชม.	24 ชม.
25	5.50	5.32	5.30	5.27	5.12	5.08
30	5.50	5.32	5.30	5.27	5.12	5.08
35	5.50	5.32	5.30	5.26	5.12	5.08
40	5.51	5.33	5.32	5.27	5.12	5.07
45	5.51	5.40	5.36	5.28	5.14	5.09
50	5.51	5.42	5.35	5.31	5.15	5.09
55	5.54	5.46	5.37	5.33	5.18	5.11
60	5.56	5.48	5.40	5.38	5.22	5.14
65	5.61	5.51	5.46	5.44	5.27	5.19
70	5.69	5.59	5.54	5.49	5.36	5.23
75	5.83	5.67	5.60	5.53	5.45	5.29
80	6.05	5.85	5.82	5.71	5.58	5.46
85	6.37	5.99	5.94	5.88	5.71	5.56
90	6.72	6.16	6.09	6.03	5.87	5.77
95	7.11	6.44	6.34	6.26	6.15	5.97
100	8.04	6.81	6.50	6.47	6.33	6.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

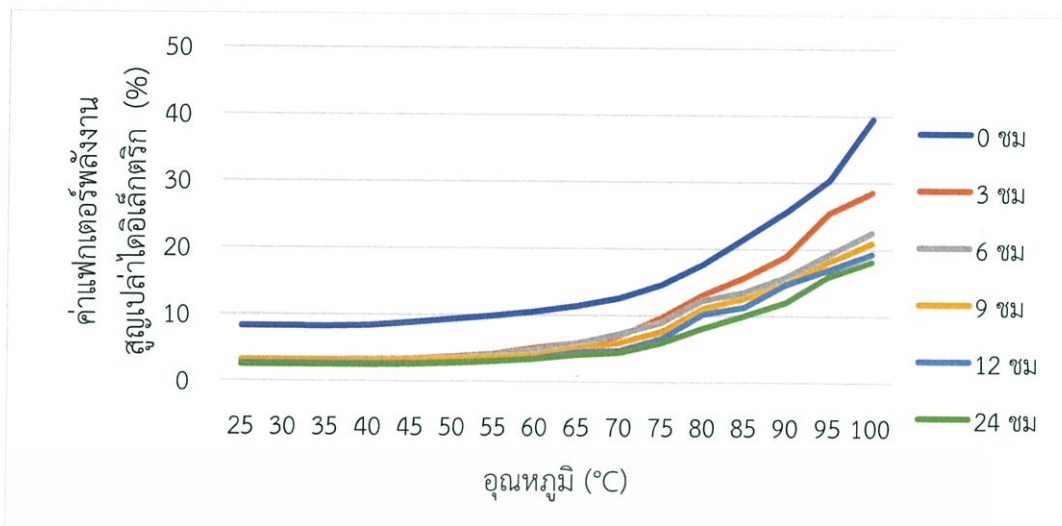


รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่ ณ อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบวัดค่าפקเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก (%) ของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่

เวลาอิมเพรกเนต (ชม.) \ อุณหภูมิ (°C)	0 ชม.	3 ชม.	6 ชม.	9 ชม.	12 ชม.	24 ชม.
25	8.25	3.18	3.13	3.11	2.60	2.46
30	8.25	3.18	3.13	3.11	2.60	2.46
35	8.23	3.22	3.13	3.11	2.60	2.46
40	8.34	3.27	3.16	3.11	2.62	2.49
45	8.82	3.40	3.33	3.27	2.68	2.59
50	9.38	3.71	3.60	3.45	2.84	2.79
55	9.88	4.16	4.05	3.72	3.11	3.06
60	10.50	5.06	4.76	3.98	3.51	3.45
65	11.40	5.79	5.74	5.11	4.43	4.05
70	12.60	6.91	7.20	5.86	4.70	4.40
75	14.60	9.67	8.91	7.60	6.54	5.88
80	17.70	13.10	12.30	11.10	10.24	8.09
85	21.60	15.70	13.50	12.60	11.30	10.00
90	25.60	18.90	15.80	14.80	14.70	12.00
95	30.30	25.40	19.20	18.10	16.90	15.90
100	39.50	28.50	22.50	20.90	19.30	18.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียค่าไดอิเล็กตริกของเพอร์สบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่ ณ อุณหภูมิต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

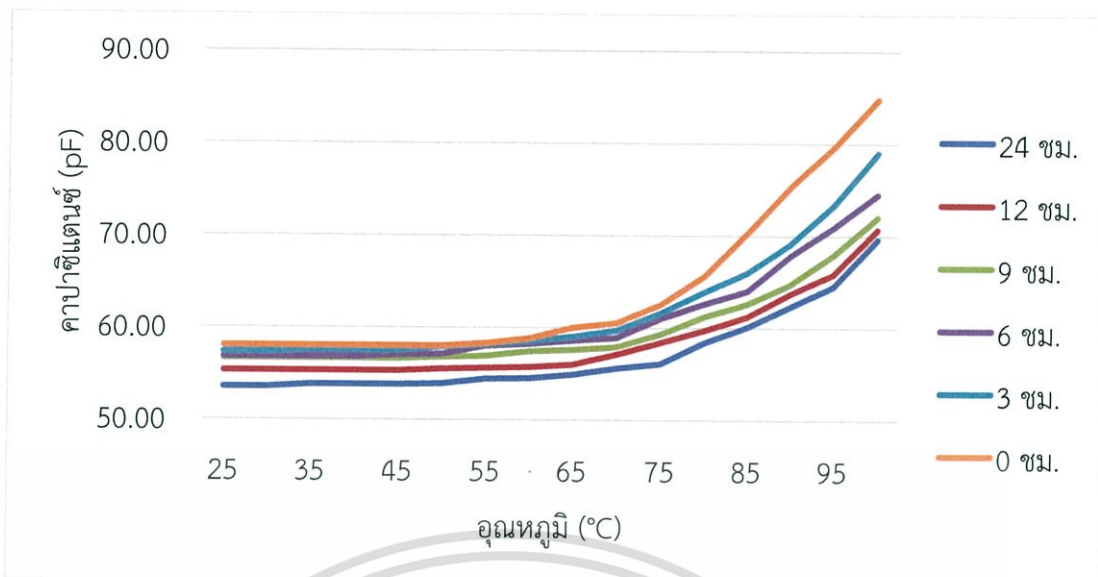
1.2) เพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่ขนาด 3.2 mm

ผลการทดสอบที่แสดงผลของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและจำนวนชั่วโมงในการอิมเพรกเนต เพื่อดูผลการเปลี่ยนแปลงของค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก แสดงตามตารางที่ 4.12 - 4.14 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ (pF) ของเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm ที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่

เวลาอิมเพรกเนต (ชม.) อุณหภูมิ (°C)	0 ชม.	3 ชม.	6 ชม.	9 ชม.	12 ชม.	24 ชม.
25	58.00	57.30	56.80	56.60	55.30	53.50
30	58.00	57.30	56.80	56.60	55.30	53.50
35	58.00	57.50	56.80	56.60	55.30	53.80
40	58.00	57.50	56.80	56.60	55.30	53.80
45	58.00	57.50	57.00	56.60	55.30	53.80
50	58.00	57.90	57.10	56.80	55.50	53.90
55	58.30	58.10	58.00	56.90	55.60	54.40
60	58.80	58.50	58.20	57.40	55.70	54.50
65	60.00	59.00	58.60	57.60	56.00	54.90
70	60.50	59.70	58.90	57.90	57.10	55.60
75	62.50	61.60	61.00	59.30	58.40	56.10
80	65.60	63.90	62.60	61.20	59.70	58.40
85	70.30	66.00	64.00	62.60	61.20	60.10
90	75.30	69.10	67.80	64.70	63.70	62.30
95	79.60	73.30	70.90	67.90	65.80	64.50
100	84.80	79.00	74.50	72.00	70.70	69.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

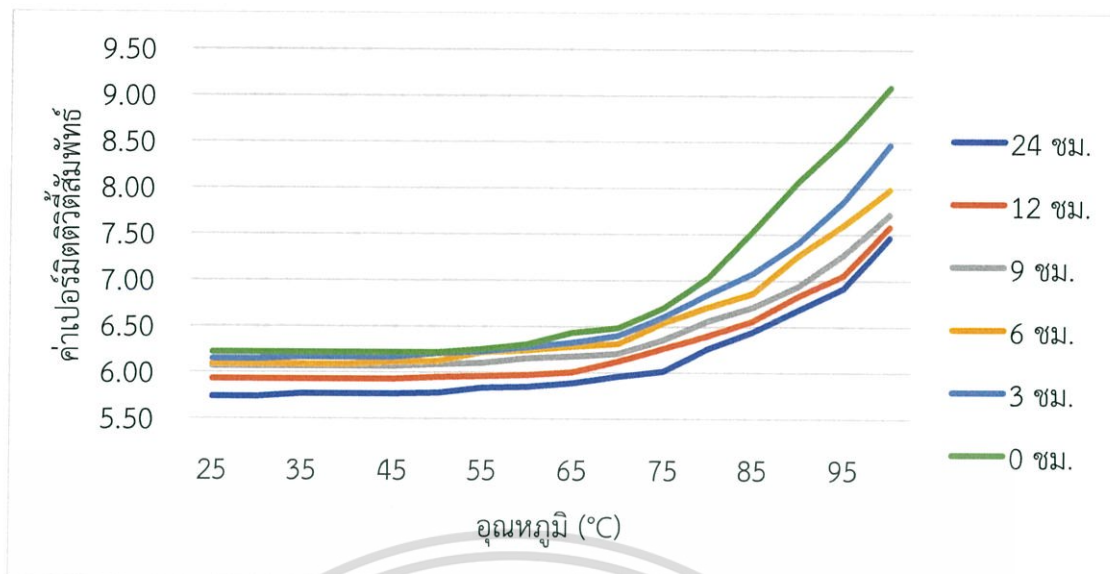


รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบค่าคาปาซิแตนซ์ของเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm ที่อิมเมจเรกเน็ตด้วยน้ำมันแร่ ณ อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบวัดค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm ที่อิมเมจเรกเน็ตด้วยน้ำมันแร่

เวลาอิมเมจเรกเน็ต (ชม.) \ อุณหภูมิ (°C)	0 ชม.	3 ชม.	6 ชม.	9 ชม.	12 ชม.	24 ชม.
25	6.22	6.14	6.09	6.07	5.93	5.74
30	6.22	6.14	6.09	6.07	5.93	5.74
35	6.22	6.16	6.09	6.07	5.93	5.77
40	6.22	6.16	6.09	6.07	5.93	5.77
45	6.22	6.16	6.11	6.07	5.93	5.77
50	6.22	6.21	6.12	6.09	5.95	5.78
55	6.25	6.23	6.22	6.10	5.96	5.83
60	6.30	6.27	6.24	6.15	5.97	5.84
65	6.43	6.33	6.28	6.18	6.00	5.89
70	6.49	6.40	6.31	6.21	6.12	5.96
75	6.70	6.60	6.54	6.36	6.26	6.01
80	7.03	6.85	6.71	6.56	6.40	6.26
85	7.54	7.08	6.86	6.71	6.56	6.44
90	8.07	7.41	7.27	6.94	6.83	6.68
95	8.53	7.86	7.60	7.28	7.05	6.92
100	9.09	8.47	7.99	7.72	7.58	7.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

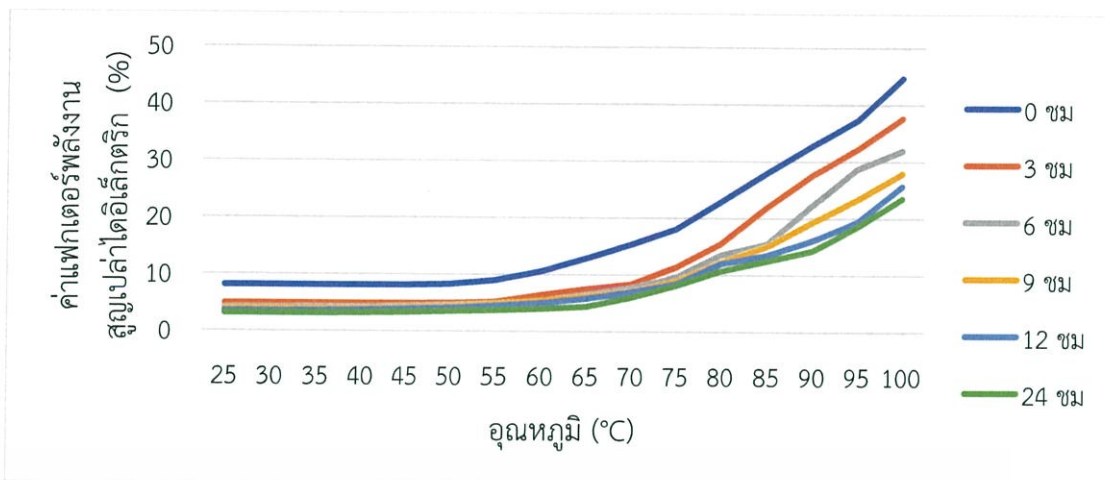


รูปที่ 4.20 ผลการทดสอบวัดค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm ที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่ ณ อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบวัดค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก (%) ของเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm ที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่

เวลาอิมเพรกเนต (ชม.) อุณหภูมิ (°C)	0 ชม.	3 ชม.	6 ชม.	9 ชม.	12 ชม.	24 ชม.
	25	8.07	4.87	4.09	3.84	3.50
30	8.07	4.87	4.09	3.84	3.50	3.09
35	8.07	4.87	4.11	3.84	3.56	3.09
40	8.07	4.87	4.15	3.91	3.66	3.18
45	8.10	4.88	4.28	4.07	3.82	3.30
50	8.25	4.91	4.53	4.37	4.08	3.48
55	8.92	5.15	4.84	4.81	4.44	3.65
60	10.50	6.38	5.37	5.43	4.97	3.98
65	12.80	7.48	6.36	6.10	5.78	4.32
70	15.30	8.32	7.55	7.04	6.92	6.00
75	18.00	11.30	9.53	8.83	8.36	8.06
80	22.90	15.50	13.50	12.20	12.00	10.70
85	28.00	22.00	15.50	15.00	13.50	12.50
90	32.80	27.60	22.30	19.30	16.10	14.30
95	37.30	32.20	28.70	23.30	19.40	18.50
100	44.70	37.60	31.90	27.90	25.70	23.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ผลการทดสอบวัดค่าแพกเตอร์พลังงานสูญเสียได้อิเล็กทรอนิกส์ของเพอร์สบอร์ดขนาด 3.2 mm ที่อิมเพรกเน็ตด้วยน้ำมันแร่ ณ อุณหภูมิต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เอสเทอร์ธรรมชาติ

ผลการทดสอบเพรสบอร์ดที่อิมเพกเน็ทด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติที่มีความหนาของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm และ 3.2 mm มีดังต่อไปนี้

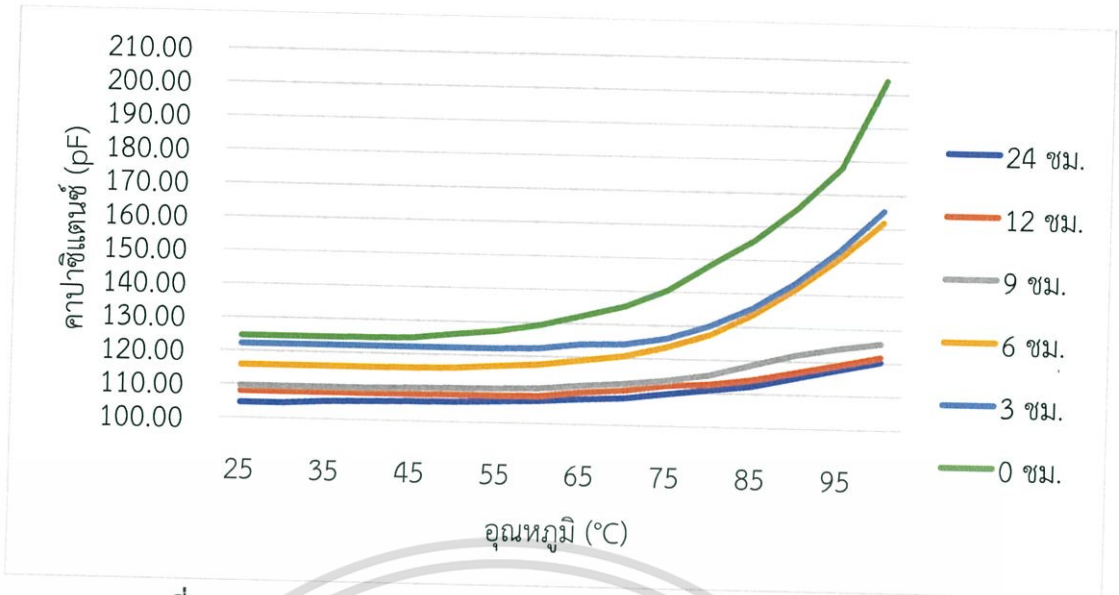
2.1) เพรสบอร์ดที่อิมเพกเน็ทด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติขนาด 1.6 mm

ผลการทดสอบที่แสดงผลของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและจำนวนชั่วโมงในการอิมเพกเน็ทเพื่อดูผลการเปลี่ยนแปลงของค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก แสดงตามตารางที่ 4.15 - 4.17 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ (pF) ของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่อิมเพกเน็ทด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ

เวลาอิมเพกเน็ท (ชม.) อุณหภูมิ (°C)	เวลาอิมเพกเน็ท (ชม.)					
	0 ชม.	3 ชม.	6 ชม.	9 ชม.	12 ชม.	24 ชม.
25	124.50	122.10	115.80	109.60	107.90	104.60
30	124.50	122.10	115.80	109.60	107.90	104.60
35	124.50	122.10	115.80	109.60	107.90	105.30
40	124.60	122.10	115.80	109.60	107.90	105.50
45	124.80	122.10	115.90	109.90	107.90	105.80
50	126.10	122.10	116.10	110.00	108.00	105.90
55	127.30	122.10	116.80	110.10	108.00	106.30
60	129.30	122.40	117.50	110.40	108.10	106.70
65	132.30	123.80	119.00	111.50	109.50	107.50
70	135.40	124.10	120.60	112.30	110.30	108.00
75	140.50	126.10	123.50	113.60	112.10	109.60
80	148.40	130.20	127.50	115.40	112.70	111.00
85	155.80	135.70	133.70	118.70	114.30	112.30
90	165.70	143.50	141.50	121.80	116.70	115.00
95	177.80	153.20	150.90	124.00	119.10	117.70
100	204.10	165.30	161.80	125.70	121.70	120.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

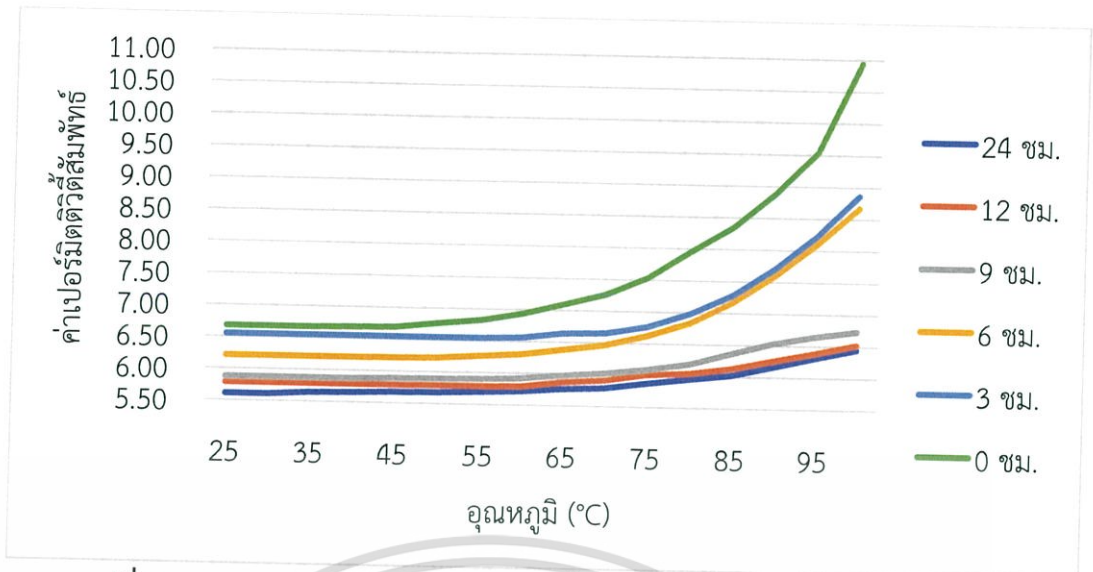


รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบวัดค่าค่าปาดซีแทนซ์ของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่อิมเพรกเน็ตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ ณ ที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบวัดค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่อิมเพรกเน็ตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ

เวลาอิมเพรกเน็ต (ชม.) \ อุณหภูมิ (°C)	0 ชม.	3 ชม.	6 ชม.	9 ชม.	12 ชม.	24 ชม.
25	6.67	6.55	6.21	5.88	5.78	5.61
30	6.67	6.55	6.21	5.88	5.78	5.61
35	6.67	6.55	6.21	5.88	5.78	5.64
40	6.68	6.55	6.21	5.88	5.78	5.66
45	6.69	6.55	6.21	5.89	5.78	5.67
50	6.76	6.55	6.22	5.90	5.79	5.68
55	6.82	6.55	6.26	5.90	5.79	5.70
60	6.93	6.56	6.30	5.92	5.79	5.72
65	7.09	6.64	6.38	5.98	5.87	5.76
70	7.26	6.65	6.46	6.02	5.91	5.79
75	7.53	6.76	6.62	6.09	6.01	5.88
80	7.96	6.98	6.83	6.19	6.04	5.95
85	8.35	7.27	7.17	6.36	6.13	6.02
90	8.88	7.69	7.59	6.53	6.26	6.16
95	9.53	8.21	8.09	6.65	6.38	6.31
100	10.94	8.86	8.67	6.74	6.52	6.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

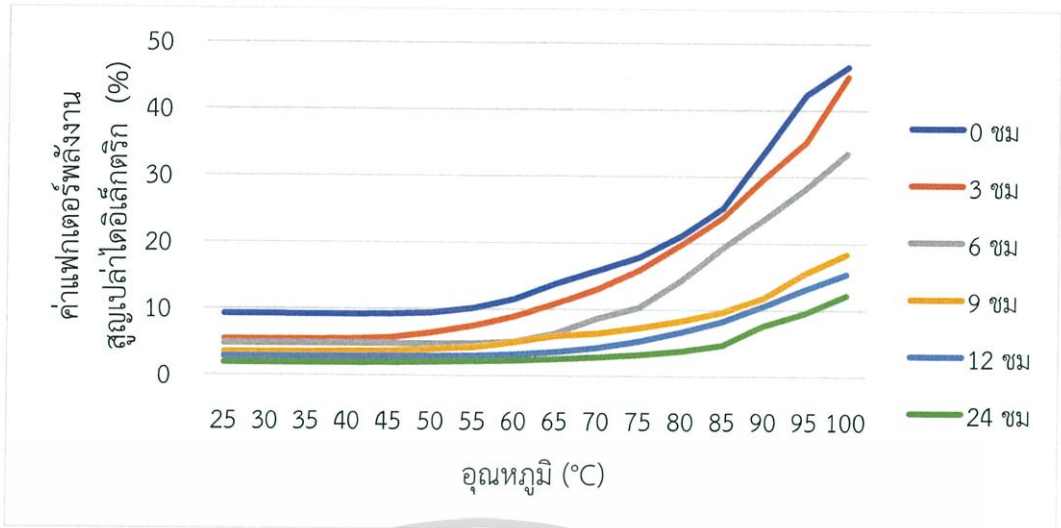


รูปที่ 4.23 ผลการทดสอบวัดค่าเปอร์มิตติวิตีที่สัมพันธ์ของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่อิมเพกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ ณ ที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบวัดค่าפקเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก (%) ของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่อิมเพกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ

เวลาอิมเพกเนต (ชม.) \ อุณหภูมิ (°C)	0 ชม.	3 ชม.	6 ชม.	9 ชม.	12 ชม.	24 ชม.
25	9.22	5.39	4.79	3.46	2.81	1.88
30	9.22	5.39	4.79	3.46	2.81	1.88
35	9.19	5.40	4.79	3.49	2.81	1.89
40	9.19	5.45	4.79	3.56	2.82	1.91
45	9.23	5.65	4.79	3.69	2.85	1.96
50	9.43	6.44	4.80	3.92	2.89	2.04
55	10.16	7.47	4.83	4.28	3.02	2.17
60	11.50	8.90	5.13	5.01	3.19	2.30
65	13.80	10.80	6.32	5.99	3.56	2.52
70	15.80	13.00	8.62	6.36	4.20	2.79
75	17.80	15.90	10.27	7.23	5.22	3.19
80	21.10	19.80	14.40	8.33	6.64	3.76
85	25.30	23.90	19.30	9.64	8.25	4.69
90	33.70	29.80	23.60	11.80	10.60	7.62
95	42.30	35.20	28.20	15.50	13.10	9.52
100	46.50	45.00	33.50	18.40	15.40	12.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 ผลการทดสอบวัดค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียค่าไดอิเล็กตริกของเพอร์สบอร์ดขนาด 1.6 มม. ที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ ณ อุณหภูมิต่างๆ



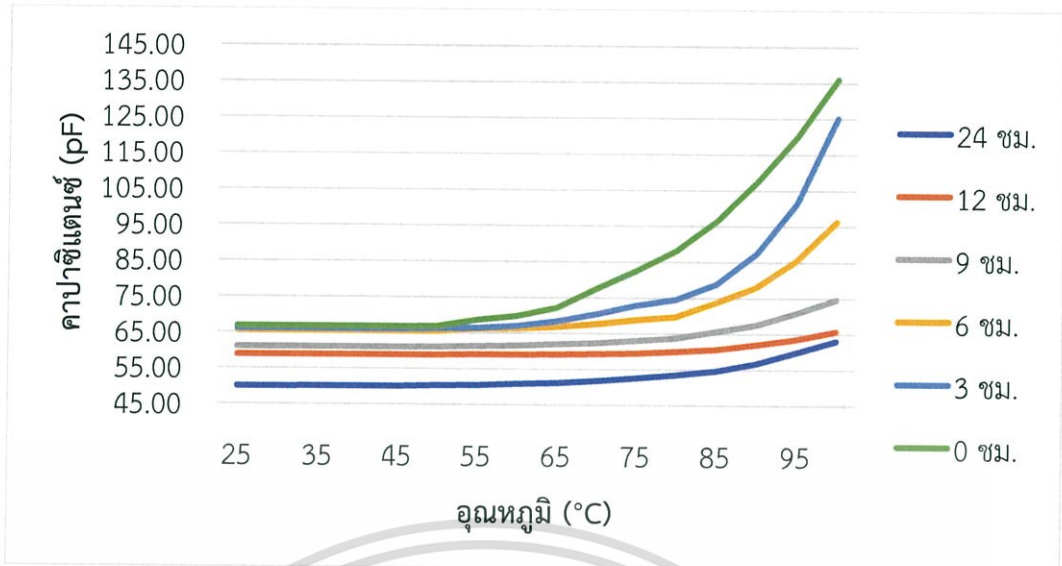
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2) เพรสบอร์ดที่อิมเพกต์ด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติขนาด 3.2 mm

ผลการทดสอบที่แสดงผลของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและจำนวนชั่วโมงในการอิมเพกต์ เพื่อดูผลการเปลี่ยนแปลงของค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก แสดงตามตารางที่ 4.18 - 4.20 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.18 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ (pF) ของเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm ที่อิมเพกต์ด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ

เวลาอิมเพกต์ (ชม.) อุณหภูมิ (°C)	0 ชม.	3 ชม.	6 ชม.	9 ชม.	12 ชม.	24 ชม.
25	66.70	66.00	65.50	61.00	58.80	50.00
30	66.70	66.00	65.50	61.00	58.80	50.00
35	66.70	66.00	65.50	61.00	58.80	50.10
40	66.70	66.00	65.50	61.00	58.80	50.10
45	66.70	66.00	65.50	61.00	58.80	50.10
50	66.80	66.20	65.50	61.10	58.80	50.30
55	68.60	66.40	66.10	61.30	59.00	50.40
60	69.80	67.00	66.30	61.50	59.00	50.90
65	72.10	68.30	66.80	62.00	59.10	51.10
70	77.50	70.40	67.60	62.30	59.30	51.80
75	82.50	72.80	68.80	63.00	59.50	52.60
80	88.00	74.50	69.70	63.80	60.00	53.50
85	96.40	78.80	73.70	65.60	60.60	54.60
90	107.30	87.30	78.00	67.50	62.00	56.70
95	120.00	101.40	85.40	70.80	63.50	59.80
100	136.00	125.10	96.30	74.60	65.70	63.00

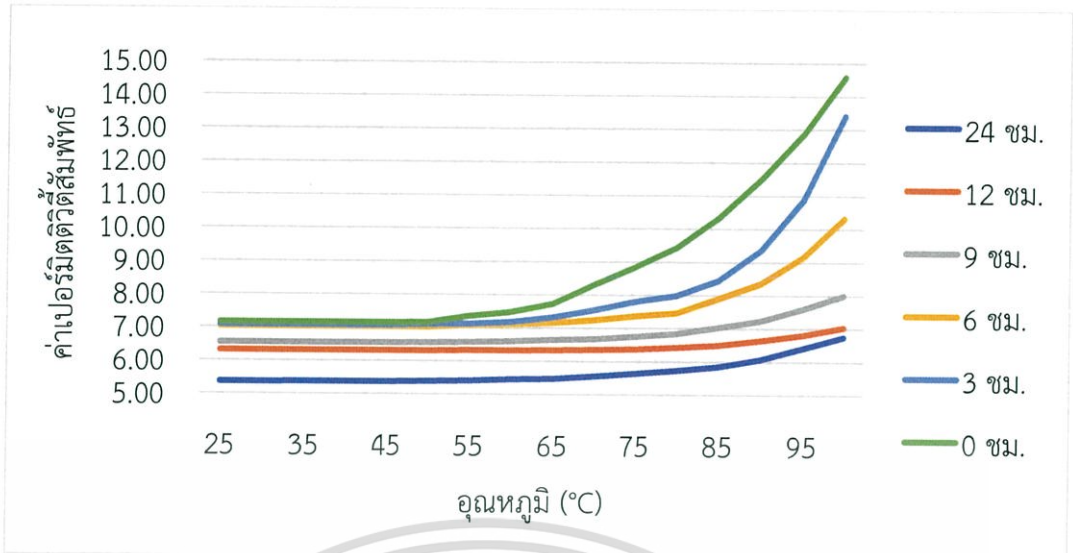


รูปที่ 4.25 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของเพอร์สโบริดขนาด 3.2 mm ที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ ณ อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 4.19 ผลการทดสอบวัดค่าเปอร์มิตทิวิตีสัมพัทธ์ของเพอร์สโบริดขนาด 3.2 mm ที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ

เวลาอิมเพรกเนต (ชม.) \ อุณหภูมิ (°C)	0 ชม.	3 ชม.	6 ชม.	9 ชม.	12 ชม.	24 ชม.
25	7.15	7.08	7.02	6.54	6.30	5.36
30	7.15	7.08	7.02	6.54	6.30	5.36
35	7.15	7.08	7.02	6.54	6.30	5.37
40	7.15	7.08	7.02	6.54	6.30	5.37
45	7.15	7.08	7.02	6.54	6.30	5.37
50	7.16	7.10	7.02	6.55	6.30	5.39
55	7.35	7.12	7.09	6.57	6.33	5.40
60	7.48	7.18	7.11	6.59	6.33	5.46
65	7.73	7.32	7.16	6.65	6.34	5.48
70	8.31	7.55	7.25	6.68	6.36	5.55
75	8.84	7.81	7.38	6.75	6.38	5.64
80	9.43	7.99	7.47	6.84	6.43	5.74
85	10.34	8.45	7.90	7.03	6.50	5.85
90	11.50	9.36	8.36	7.24	6.65	6.08
95	12.87	10.87	9.16	7.59	6.81	6.41
100	14.58	13.41	10.32	8.00	7.04	6.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

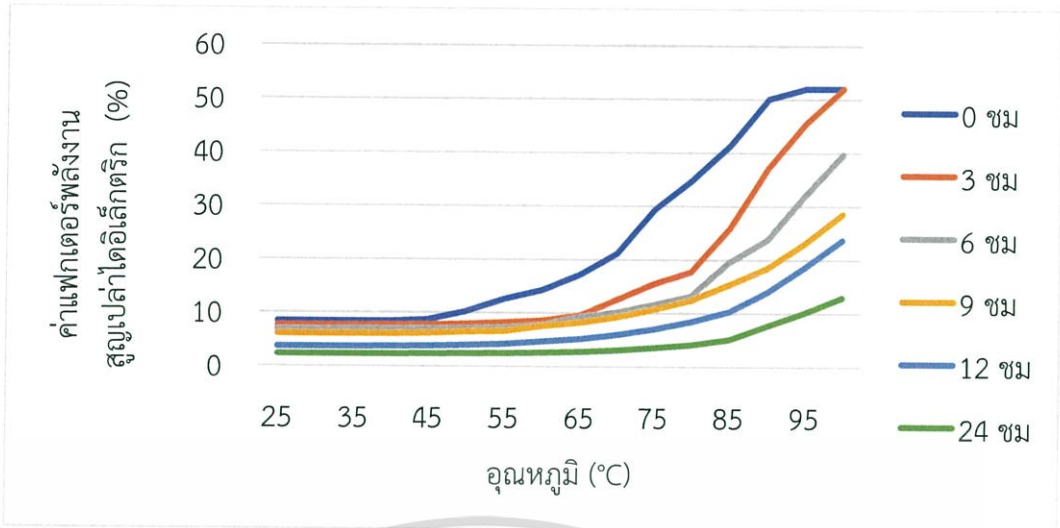


รูปที่ 4.26 ผลการทดสอบวัดค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพันธ์ของเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm ที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ ณ ที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 4.20 ผลการทดสอบวัดค่าแพกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก (%) ของเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm ที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ

เวลาอิมเพรกเนต (ชม.) \ อุณหภูมิ (°C)	0 ซม.	3 ซม.	6 ซม.	9 ซม.	12 ซม.	24 ซม.
25	8.39	7.62	6.83	6.09	3.68	2.29
30	8.39	7.62	6.83	6.09	3.68	2.29
35	8.39	7.65	6.92	6.09	3.68	2.29
40	8.41	7.68	6.93	6.09	3.70	2.30
45	8.73	7.76	6.95	6.16	3.77	2.33
50	10.28	7.94	7.01	6.50	3.95	2.37
55	12.60	8.20	7.19	6.63	4.22	2.45
60	14.30	8.57	7.74	7.55	4.66	2.59
65	17.20	9.57	9.26	8.20	5.16	2.76
70	21.10	12.50	10.15	9.27	5.93	3.07
75	29.30	15.50	11.60	10.70	7.04	3.52
80	34.80	17.70	13.20	12.40	8.43	4.09
85	41.40	25.90	19.60	15.40	10.30	5.12
90	50.10	37.20	23.80	18.50	14.00	7.71
95	52.00	45.50	32.10	23.10	18.60	10.15
100	52.00	52.00	39.70	28.60	23.70	13.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 ผลการทดสอบวัดค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของเพอร์สโอบอร์ขนาด 3.2 มม. ที่อิมเพรกเน็ตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ ณ อุณหภูมิต่างๆ

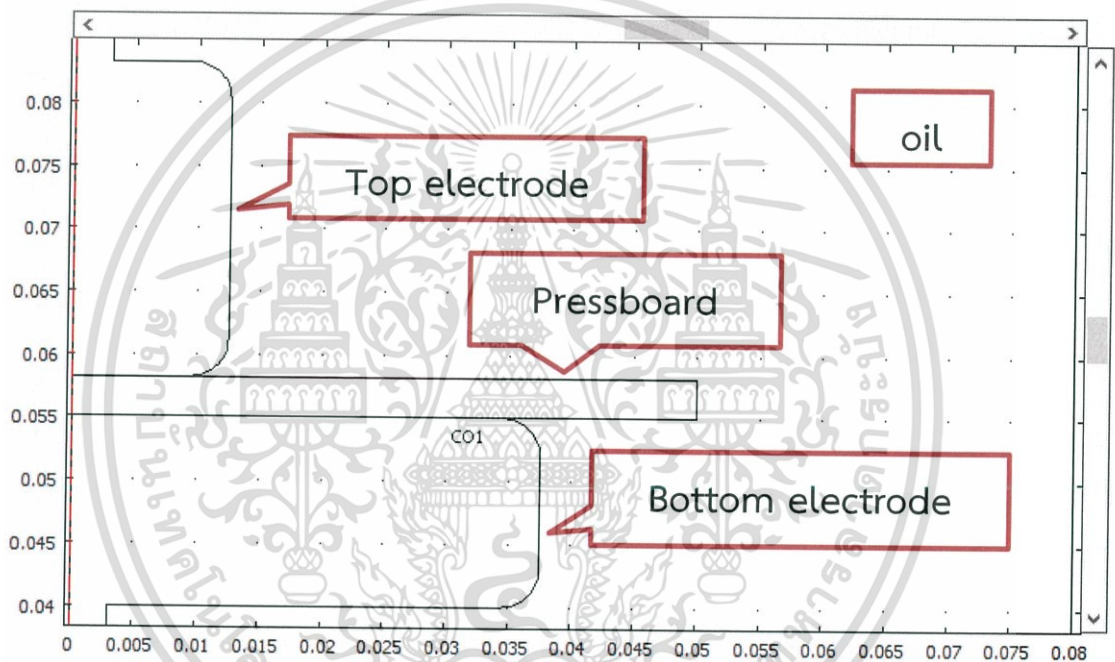


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การจำลองรูปแบบสนามไฟฟ้าของฉนวนเพรสบอร์ด

ในการจำลองรูปแบบสนามไฟฟ้าของเพรสบอร์ดนั้นใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการวิเคราะห์และ มีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

- 1) กำหนดลักษณะมิติของปัญหา และทำการจำลองรูปร่างของปัญหาลงในโปรแกรม
- 2) กำหนดค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ (ϵ_r) ให้แก่วัสดุ ได้แก่ เอสเทอร์ธรรมชาติ ($\epsilon_r = 3.2$) น้ำมันแร่ ($\epsilon_r = 2.2$) อีเล็กโตรด ($\epsilon_r = \text{Copper}$) และเพรสบอร์ดซึ่งได้มาจากการทดลองที่ 4.2
- 3) กำหนดขอบเขตจากรูปที่ 4.28 โดยป้อนแรงดันให้กับอีเล็กโตรดด้านบน 100 V และอีเล็กโตรดด้านล่างเป็นกราวด์
- 4) ทำการคำนวณค่าสนามไฟฟ้า
- 5) ทำตามลำดับขั้นตอนที่ 1 – 4 แต่เปลี่ยนค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของฉนวน



รูปที่ 4.28 ขอบเขตการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าของฉนวนเพรสบอร์ด

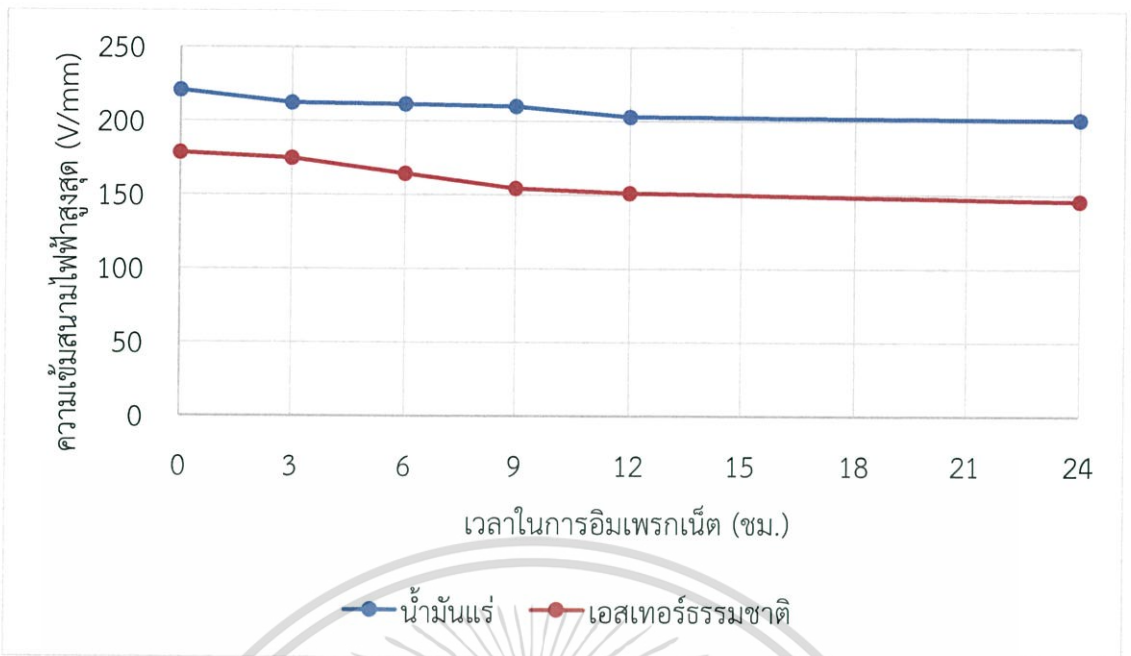
ตารางที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าสูงสุดและค่าเปอร์มิตติวิตีของเพรสบอร์ดที่มีความหนา 1.6 mm

เวลาในการอิมเพรกเนต (ชม.)	Mineral oil ($\epsilon_r = 2.2$)		Natural ester ($\epsilon_r = 3.2$)	
	ϵ_r (pressboard)	E_{max} (V/mm)	ϵ_r (pressboard)	E_{max} (V/mm)
0	5.5	220.69	6.67	178.44
3	5.32	212.24	6.55	174.71
6	5.3	211.31	6.21	164.23
9	5.27	209.91	5.88	154.19
12	5.12	202.93	5.78	151.17
24	5.08	201.07	5.61	146.05

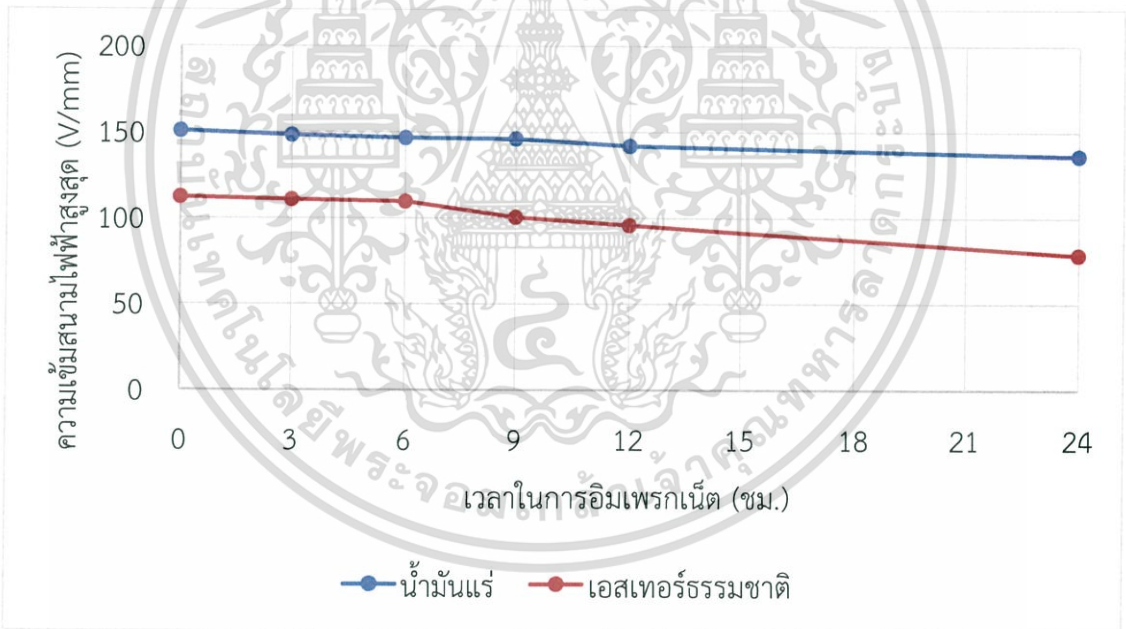
ตารางที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าสูงสุดและค่าเปอร์มิตติวิตีของเพรสบอร์ดที่มีความหนา 3.2 mm

เวลาในการอิมเพรกเนต (ชม.)	Mineral oil ($\epsilon_r = 2.2$)		Natural ester ($\epsilon_r = 3.2$)	
	ϵ_r (pressboard)	E_{max} (V/mm)	ϵ_r (pressboard)	E_{max} (V/mm)
0	6.22	150.64	7.15	112.17
3	6.14	148.2	7.08	110.81
6	6.09	146.68	7.02	109.64
9	6.07	146.08	6.54	100.42
12	5.93	141.85	6.3	95.89
24	5.74	136.16	5.36	78.65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

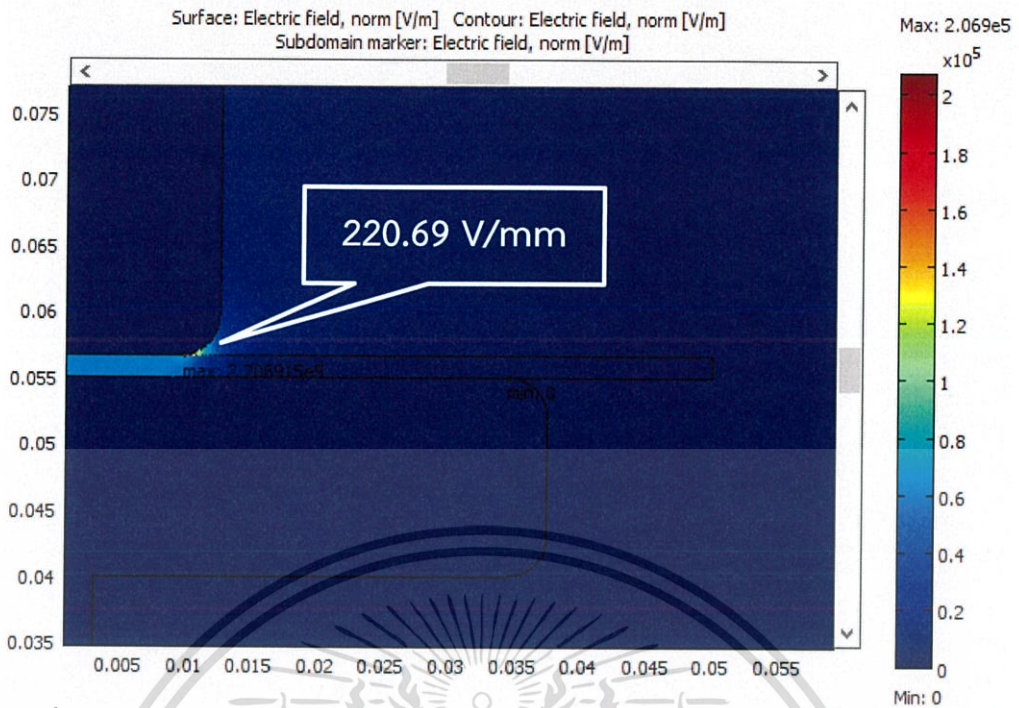


รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดและเวลาในการอิมเพรกเน็ตที่ความหนาของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm

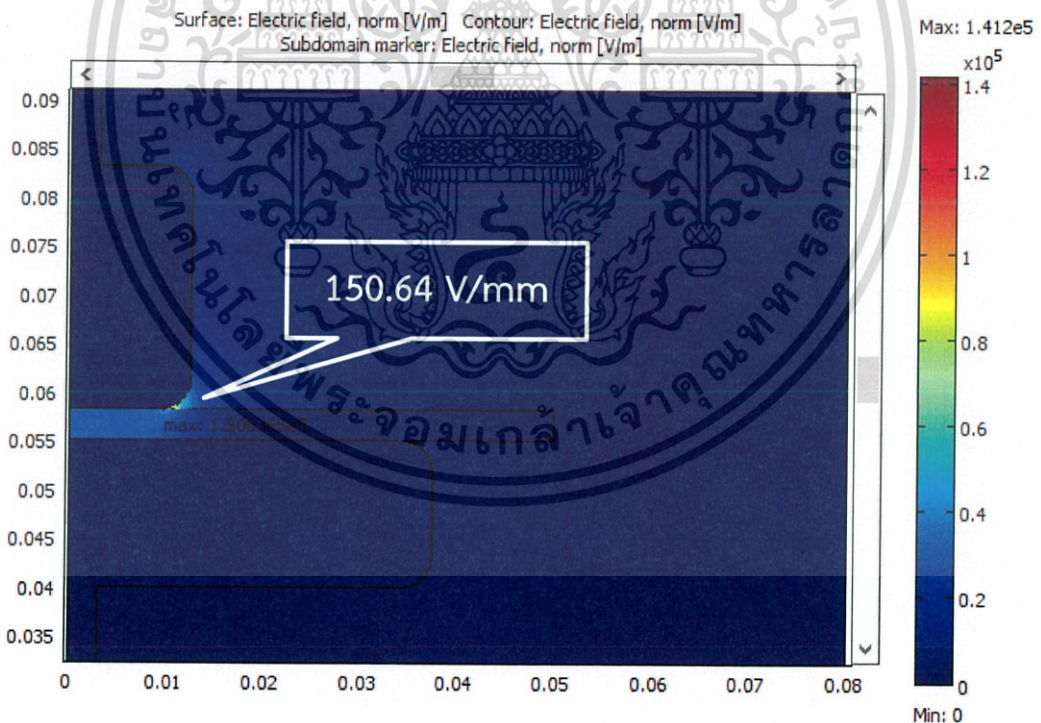


รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดและเวลาในการอิมเพรกเน็ตที่ความหนาของเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 รูปแบบสนามไฟฟ้าที่ความหนาของเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่ไม่อิมเพรกเนต ($\epsilon_r = 5.50$) กับน้ำมันแร่ ($\epsilon_r = 2.2$)



รูปที่ 4.32 รูปแบบสนามไฟฟ้าที่ความหนาของเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm ที่ไม่อิมเพรกเนต ($\epsilon_r = 6.22$) กับน้ำมันแร่ ($\epsilon_r = 2.2$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

จากการทดสอบคุณสมบัติของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยฉนวนเหลวชนิดต่างๆ สามารถสรุปออกมาได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.1.1 การทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด

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

1) จากการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทั้งชั่วบวกและชั่วลบ พบว่า ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทั้งชั่วบวกและชั่วลบบมีค่าใกล้เคียงกัน

2) ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดที่มีความหนา 1.6 mm โดยอิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่มีค่าอยู่ในช่วง 100-110 kV และเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติมีค่าอยู่ในช่วง 98-111 kV ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่ทั้งชั่วบวกและชั่วลบ ส่วนเพรสบอร์ดที่ไม่อิมเพรกเนตมีค่าอยู่ในช่วง 39 – 43 kV ทั้งชั่วบวกและชั่วลบ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่และเอสเทอร์ธรรมชาติประมาณ 2.5 เท่า

3) ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดที่มีความหนา 3.2 mm โดยอิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่มีค่าอยู่ในช่วง 168 – 197 kV และเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติมีค่าอยู่ในช่วง 212 – 222 kV ซึ่งมีค่าสูงกว่าเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่ประมาณ 16 เปอร์เซ็นต์ทั้งชั่วบวกและชั่วลบ สำหรับเพรสบอร์ดที่ไม่อิมเพรกเนตมีค่าอยู่ในช่วง 78 - 84 kV ทั้งชั่วบวกและชั่วลบ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่และเอสเทอร์ธรรมชาติประมาณ 2 - 3 เท่า

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

5.1.2 การทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ เปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไปไดอิเล็กตริกของเพรสบอร์ด

1) ค่าคาปาซิแตนซ์ และเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์

จากการทดสอบเพรสบอร์ดที่ไม่อิมเพรกเนต และอิมเพรกเนตด้วยฉนวนเหลวชนิดน้ำมันแร่และเอสเทอร์ธรรมชาติที่เวลาแตกต่างกัน พบว่า ค่าคาปาซิแตนซ์ และเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของเพรสบอร์ดที่ใช้เวลาในการอิมเพรกเนต 24 ชั่วโมง มีค่าต่ำที่สุด ในขณะที่เพรสบอร์ดที่ไม่อิมเพรกเนตมีค่าสูงที่สุดในทุกช่วงอุณหภูมิ นอกจากนั้นค่าของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติยังมีค่าสูงกว่าเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่เล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดโอดีเล็กตริก

จากการทดสอบเพรสบอร์ดที่ไม่อิมเพรกเนต และอิมเพรกเนตด้วยฉนวนเหลวชนิดน้ำมันแร่ และเอสเทอร์ธรรมชาติที่เวลาแตกต่างกัน พบว่า ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดโอดีเล็กตริกของเพรสบอร์ดที่ไม่อิมเพรกเนตมีค่าสูงที่สุด ในขณะที่เพรสบอร์ดที่ใช้เวลาในการอิมเพรกเนต 24 ชั่วโมง มีค่าต่ำที่สุดในทุกช่วงอุณหภูมิ

3) ค่าคาปาซิแตนซ์ เปรอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดโอดีเล็กตริกของเพรสบอร์ดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

5.1.3 การจำลองรูปแบบสนามไฟฟ้าของฉนวนเพรสบอร์ด

จากการใช้โปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์ (FEM) เพื่อจำลองหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้าผลการจำลอง พบว่า เมื่อค่าเปรอร์มิตติวิตีเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สนามไฟฟ้าสูงสุดตรงบริเวณผิวของอิเล็กโตรดกับรอยต่อของเพรสบอร์ดมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย

1) จากการนำค่าเปรอร์มิตติวิตีจากการทดลองในหัวข้อ 4.2 มาจำลองหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้า พบว่า เพรสบอร์ดที่ไม่อิมเพรกเนตมีค่าเปรอร์มิตติวิตีสูงที่สุดส่งผลให้มีค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงที่สุดด้วย และเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่และเอสเทอร์ธรรมชาติเป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีค่าเปรอร์มิตติวิตีต่ำที่สุดส่งผลให้มีค่าความเข้มสนามไฟฟ้าต่ำที่สุดด้วย

2) ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดของน้ำมันแร่มีค่าสูงกว่าเอสเทอร์ธรรมชาติ เช่น เพรสบอร์ดหนา 1.6 mm ที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่เป็นเวลา 12 ชั่วโมง มีค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด 141.85 V/mm ส่วนเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติมีค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด 95.89 V/mm

3) ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดของเพรสบอร์ดที่มีความหนา 1.6 mm มีค่ามากกว่าเพรสบอร์ดที่มีความหนา 3.2 mm

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรมีการควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นของระบบ เพราะอุณหภูมิ และความชื้นอาจมีค่าไม่คงที่ในแต่ละการทดสอบ ซึ่งจะส่งผลให้การทดสอบที่ได้มีความผิดพลาด

2) ควรทำการอบไล่ความชื้นและอิมเพรกเนตด้วยฉนวนเหลว ณ เวลาและสภาพแวดล้อมเดียวกัน เพื่อให้เพรสบอร์ดเป็นตัวแปรคงที่ของระบบ

3) ควรทำการทดสอบในวัน เวลาและสถานที่ที่ใกล้เคียงกัน เพื่อลดผลของความแตกต่างของสภาพแวดล้อมภายนอก

4) ในการทดสอบแต่ละครั้งควรให้ฉนวนทั้งสองชนิดมีตะกอนหรือสิ่งปนเปื้อนน้อยที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- [1] รศ.พิชิต ล้ายอง, “เครื่องจักรกลไฟฟ้า Electrical Machines”, พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพมหานคร: ห้างหุ้นส่วนจำกัด มินเซอร์วิส ซัพพลาย, 2556.
- [2] บริษัท ธีรไทย จำกัด(มหาชน), “Tirathai journal ฉบับที่ 8”, สมุทรปราการ, บริษัท โพรฮัน เดรท จำกัด, 2556.
- [3] นายภัทริน กิจเจริญ และคณะ, “การวินิจฉัยฉนวนเหลวสำหรับหม้อแปลง”, ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2558.
- [4] CIGRE, “Experiences in Service with New Insulating Liquids”, CIGRE WORKING Group A2.35, UK, 2010.
- [5] IEC 60296, Edition 4.0 -2012, Fluids for electrotechnical applications - Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear.
- [6] ASTM D3487 –09, Standard Specification for Mineral Insulating Oil Used in Electrical Apparatus.
- [7] IEC 60422, Edition 4.0 -2013, Mineral insulating oils in electrical equipment Supervision and maintenance guidance.
- [8] IEEE C57.147 -2008, Guide for Acceptance and Maintenance of Natural Ester Fluids in Transformers.
- [9] ASTM D6871 -03, Standard Specification for Natural (Vegetable Oil) Ester Fluids Used in Electrical Apparatus.
- [10] รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช, “วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า(เล่ม 1) ฉนวนและวัสดุฉนวนไฟฟ้า Electrical Engineering Materials”, พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพมหานคร: ห้างหุ้นส่วนจำกัด มินเซอร์วิส ซัพพลาย, 2557.
- [11] สำรวย สังข์สะอาด, “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง”, พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์, 2549.
- [12] Jame H. Harlow, “Electric power transformer engineering”, The Electric Power Engineering Series 9, CRC Press LLC, 2004, p. 321.
- [13] ผศ.ดร.เชาว์ ชมภูอินไหว, เอกสารประกอบการสอน “พื้นฐานวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง (The Fundamental of High Voltage Engineering)”, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพ, 2011.
- [14] IEC 60243-1, Edition 3.0 – 2013, Electric strength of insulating materials - Test methods – Part 1: Tests at power frequencies.
- [15] IEC 60060-1, Edition 3.0 – 2010, High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการใช้เอสเทอร์เป็นฉนวนในหม้อแปลง

THE STUDY OF USING NATURAL ESTER FOR TRANSFORMER DIELECTRIC

ธนัชชา จันทร์ปิยวงศ์, ธนากร จุ้ยศรีแก้ว, ธนากร สิงห์เส, ธีระวิชญ์ กาบแก้ว

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ลอดกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-Mail: thanakorn.fair@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดที่อิมเพกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติและน้ำมันแร่ โดยได้สร้างชุดทดสอบเพรสบอร์ดด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามมาตรฐาน IEC 60243-1 ในการทดสอบหาค่าแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจะทดสอบทั้งขั้วบวกและขั้วลบของเพรสบอร์ดที่อิมเพกเนตด้วยเวลาและฉนวนเหลวที่แตกต่างกัน แล้วเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่เกิดขึ้น จากการทดสอบ พบว่า ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดที่อิมเพกเนตด้วยน้ำมันแร่และเอสเทอร์ธรรมชาติมีค่าใกล้เคียงกันทั้งขั้วบวกและขั้วลบและสูงกว่าเพรสบอร์ดที่ไม่อิมเพกเนตประมาณ 2.5 เท่า

คำสำคัญ: น้ำมันแร่, เอสเทอร์ธรรมชาติ, เพรสบอร์ด, แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

Abstract

This project presents the study of lightning impulse withstand voltage test of the pressboards impregnated with mineral oil and natural ester respectively. The test vessel for the lightning impulse withstand voltage test of the impregnated pressboards was designed and constructed according to IEC standard 60243-1. The experiments were performed to investigate the positive and negative lightning impulse voltages of the pressboards impregnated with different liquid insulations namely, mineral oil and natural ester including various impregnation time from 3 -24 hours. The test results showed the lightning impulse withstand voltages both positive and negative polarities of the mineral oil impregnated pressboards were nearly the same as these of the natural ester impregnated pressboards. Moreover, the lightning impulse withstand voltages both positive and negative polarities of the liquid impregnated pressboards were higher than these of the non-impregnated pressboards about 2.5 times.

Keyword: mineral oil, natural ester, pressboard, lightning impulse voltage

1. บทนำ

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายทอดพลังงานไฟฟ้าจากวงจรหนึ่งไปยังอีกวงจรหนึ่ง โดยทั่วไปจะเชื่อมโยงระบบไฟฟ้าที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกัน จึงนับเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในระบบไฟฟ้า ในปัจจุบันน้ำมันแร่นิยมใช้เป็นฉนวนเหลวภายในหม้อแปลงไฟฟ้า แต่น้ำมันแร่มีข้อเสียอยู่หลายประการ เช่น ความคงทนต่อแรงดันเบรคความถี่ลดลงมากเมื่อมีความชื้นปะปนมา และใช้เวลาในการย่อยสลายนานซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้เกิดการสึกกร่อน และวิเคราะห์หาคุณสมบัติของเอสเทอร์ธรรมชาติ ที่มีข้อดีคือสามารถย่อยสลายนได้ในธรรมชาติ มีจุดวาบไฟและจุดติดไฟที่สูง เป็นต้น แต่เอสเทอร์ธรรมชาติก็มีข้อจำกัดอยู่บางประการ ทำให้การศึกษาคุณสมบัติของเอสเทอร์ธรรมชาติจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก และเป็นทางเลือกในการใช้งานต่อไปในอนาคต

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เพรสบอร์ด [1]

เป็นวัสดุประเภทเซลลูโลสหลายชั้นที่ทำมาจากกระดาษซึ่งเป็นพอลิเมอร์อินทรีย์ที่ถูกบีบอัดด้วยแรงดันและความร้อน ขึ้นรูปเป็นวัสดุแข็งที่มีความหนาแน่นสูง ที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางกลที่ดี แต่เนื่องจากเซลลูโลสเป็นเส้นใยธรรมชาติที่ซ้อนทับกันทำให้มีลักษณะเป็นรูพรุน จึงทำให้มีความไวต่อความชื้น และอุณหภูมิ

2.2 น้ำมันแร่ [2]

น้ำมันแร่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกิดจากการกลั่นน้ำมันดิบ นิยมใช้มากที่สุดภายในหม้อแปลง เพราะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและการระบายความร้อนที่ดี น้ำมันแร่ที่ใช้ในหม้อแปลงส่วนใหญ่มี 2 ประเภท คือ น้ำมันพาราฟิน และ น้ำมันเนฟทา

2.3 เอสเทอร์ธรรมชาติ [2]

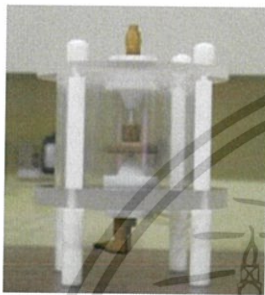
ประกอบด้วยพันธะของกลีเซอรอลซึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติ และ 3 กลุ่มกรดไขมันซึ่งเป็นพันธะต่อกัน ส่วนใหญ่ที่นำมาใช้งานด้านไฟฟ้ามาจากน้ำมันถั่วเหลืองและดอกทานตะวัน เอสเทอร์ธรรมชาติมีข้อดีคือมีจุดวาบไฟและจุดติดไฟสูง มีการย่อยสลายน้อย และทนความชื้นสูง แต่มีความหนืดสูงกว่าน้ำมันแร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การออกแบบการทดสอบและการประกอบสร้างชุดทดสอบ

3.1 การออกแบบชุดทดสอบค่าความทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

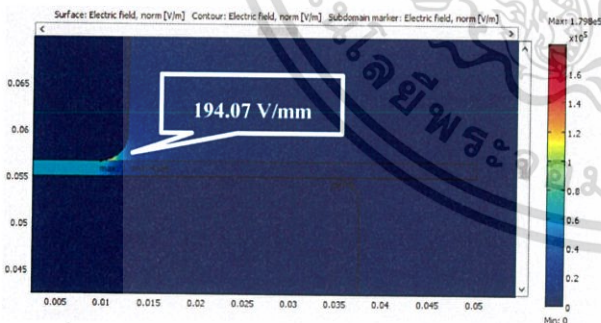
ภาชนะบรรจุน้ำมัน ทำจากอะคริลิกมีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลางที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 cm และอิเล็กโตรด ที่ใช้ในชุดทดสอบนั้นอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC 60243-1 [3] โดยทำจากวัสดุทองเหลืองซึ่งประกอบไปด้วยสองอิเล็กโตรดทรงกระบอกที่มีขอบโค้งมนรัศมี 3 ± 0.2 mm เท่ากัน แต่อิเล็กโตรดส่วนบนมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 ± 1 mm และมีความสูง 25 mm อิเล็กโตรดส่วนล่างมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 ± 1 mm และมีความสูง 15 mm



รูปที่ 1 ชุดทดสอบค่าความทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด

3.2 การวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าเพื่อช่วยออกแบบชุดทดสอบ โดยกำหนดค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ให้วัสดุ ได้แก่ อิเล็กโตรด ($\epsilon_r = \text{copper}$) น้ำมันแร่ ($\epsilon_r = 2.2$) และเพรสบอร์ดสมมติให้ค่า ($\epsilon_r = 5$) และป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรดส่วนบน 100 V จะได้ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของชุดทดสอบวัดค่าความทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด

3.3 การเตรียมเพรสบอร์ดสำหรับการทดสอบ

1) ตัดเพรสบอร์ดให้มีขนาด 10x10 cm



รูปที่ 3 เพรสบอร์ดที่ใช้ในการทดสอบ

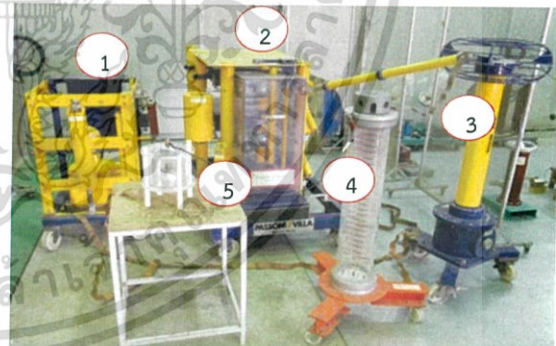
2) อบเพรสบอร์ดที่อุณหภูมิ 80°C ในตู้อบสุญญากาศ 12 ชม.

3) อิมเพกเนตเพรสบอร์ดด้วยน้ำมันแร่หรือเอสเทอร์ธรรมชาติที่อุณหภูมิ 60°C ในตู้อบสุญญากาศ ที่เวลา 0, 3, 6, 9, 12 และ 24 ชม.

4. การทดสอบและผลการทดสอบวัดค่าความทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด

4.1 การทดสอบ

การทดสอบวัดค่าความทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดเพรสบอร์ดที่มีความหนา 1.6 mm และ 3.2 mm ที่อิมเพกเนตด้วยน้ำมันแร่และเอสเทอร์ธรรมชาติโดยใช้เวลาในการอิมเพกเนตแตกต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบค่าความทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทั้งชั่วคราวและชั่วคราว โดยใช้อุปกรณ์ในการทดสอบดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5



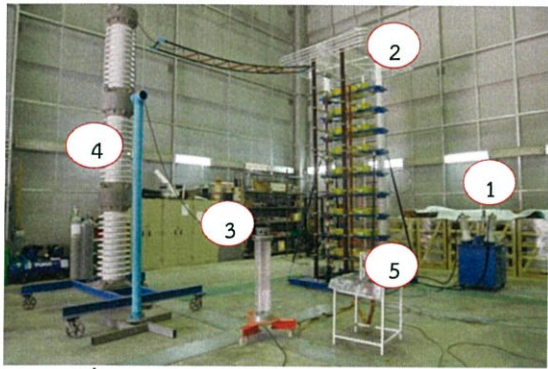
รูปที่ 4 วงจรทดสอบสำหรับแรงดันน้อยกว่า 150 kV

1) ชุดอัดประจุ 2) เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 200 kV

3) โวลเตจดิไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุ

4) โวลเตจดิไวเดอร์ 5) ชุดทดสอบความทนต่อแรงดันอิมพัลส์

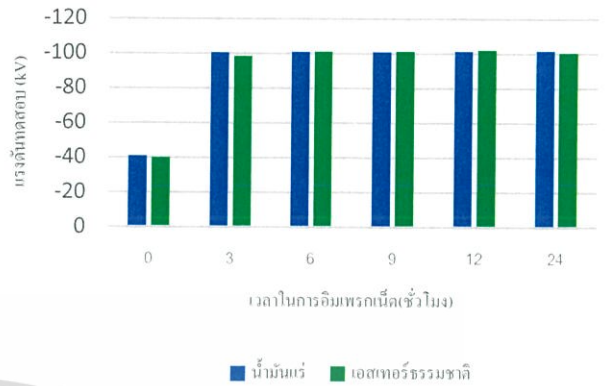
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 วงจรทดสอบสำหรับแรงดันมากกว่า 150 kV

- 1) หม้อแปลงอัดประจุเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
- 2) เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 1200 kV
- 3) โวลต์เจดีไวเวอร์ชนิดตัวเก็บประจุ 4) ตัวเก็บประจุไหลด 2000 pF
- 5) ชุดทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์

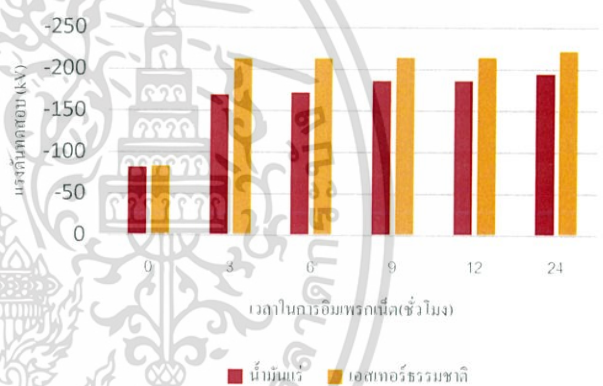
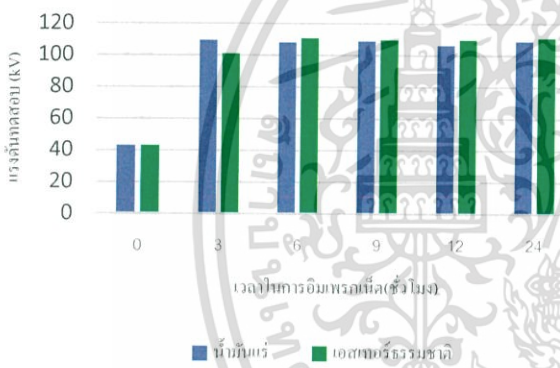
4.2.1 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวกับเพรสเซอร์ดที่อิมเพกต์ด้วยน้ำมันแร่และเอสเทอร์ธรรมชาติขนาด 1.6 mm

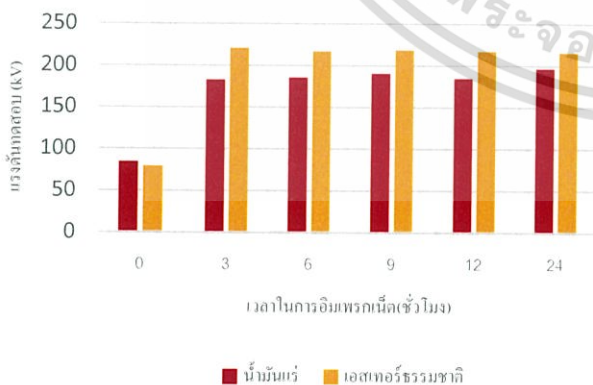
4.2 ผลการทดสอบ

4.2.1 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวกับเพรสเซอร์ดที่อิมเพกต์ด้วยน้ำมันแร่และเอสเทอร์ธรรมชาติขนาด 1.6 mm

รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวกับเพรสเซอร์ดที่อิมเพกต์ด้วยน้ำมันแร่และเอสเทอร์ธรรมชาติขนาด 3.2 mm



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวกับเพรสเซอร์ดที่อิมเพกต์ด้วยน้ำมันแร่และเอสเทอร์ธรรมชาติขนาด 3.2 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สรุปผลการทดสอบ

จากผลทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอินพัลส์ฟ้าผ่าของ เพรสบอร์ด ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ สามารถสรุปได้ว่า ค่าความคงทนต่อแรงดันอินพัลส์ฟ้าผ่าทั้งขั้วบวกและขั้วลบมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับ เพรสบอร์ดหนา 1.6 mm ที่อิมเพกเน็ทด้วยน้ำมันแร่มีค่าอยู่ในช่วง 100-110 kV และเพรสบอร์ดที่อิมเพกเน็ทด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติมีค่าอยู่ในช่วง 98-111 kV ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนเพรสบอร์ดที่ไม่อิมเพกเน็ทมีค่าอยู่ในช่วง 39 – 43 kV ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเพรสบอร์ดที่อิมเพกเน็ทด้วยฉนวนเหลวทั้ง 2 ชนิดประมาณ 2.5 เท่า สำหรับเพรสบอร์ดหนา 3.2 mm ที่อิมเพกเน็ทด้วยน้ำมันแร่มีค่าอยู่ในช่วง 168 - 197 kV และเพรสบอร์ดที่อิมเพกเน็ทด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติมีค่าอยู่ในช่วง 212 – 222 kV ซึ่งมีค่าสูงกว่าเพรสบอร์ดที่อิมเพกเน็ทด้วยน้ำมันแร่ประมาณ 16 เปอร์เซ็นต์ สำหรับเพรสบอร์ดที่ไม่อิมเพกเน็ทมีค่าอยู่ในช่วง 78 - 84 kV ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเพรสบอร์ดที่อิมเพกเน็ทด้วยฉนวนเหลวทั้ง 2 ชนิดประมาณ 2 - 3 เท่า

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำหรับความช่วยเหลือและคำแนะนำจาก รศ. ดร.นเรศรชฎ พัฒนเดช และ รศ.ดร.มณฑล ตีลาจินดาไกรฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา รวมไปถึงคุณบุญวีร์ ฉายศิริและคุณกิตติพิศ จรรย์นุรัตน์ ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษาในด้านการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณบริษัท เมคเนชา จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เรื่องทุนทรัพย์

ขอขอบคุณบริษัท โฟกัสแลป จำกัด, บริษัท ดันแอนด์ซันส์ จำกัด, บริษัท โกลว์ พลังงาน จำกัด (มหาชน) และการไฟฟ้านครหลวง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเข้าร่วมเพื่อศึกษาผลงาน

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] นายภัทริน กิจเจริญ และคณะ, “การวินิจฉัยฉนวนเหลวสำหรับหม้อแปลง”, ปฏิญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2558
- [2] CIGRE, “Experiences in Service with New Insulating Liquids”, CIGRE WORKING Group A2.35, UK, 2010.
- [3] IEC 60243-1, Edition 3.0 – 2013, Electric strength of insulating materials – Test methods – Part 1: Tests at power frequencies.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

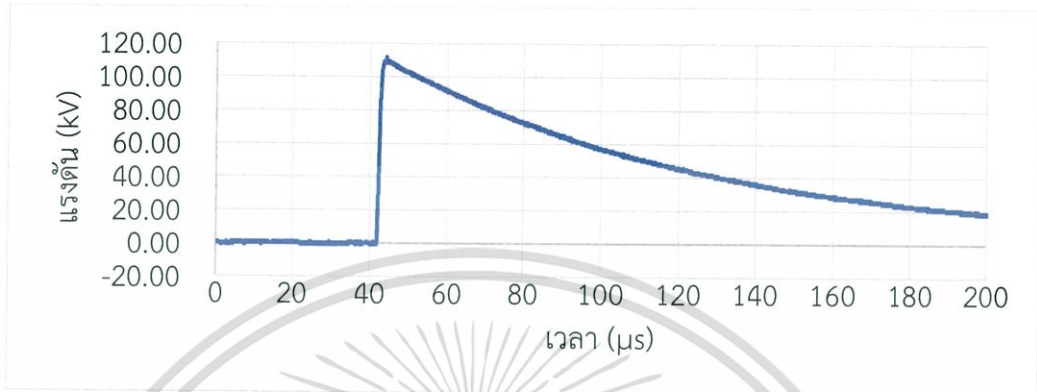


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ตัวอย่างกราฟของการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด

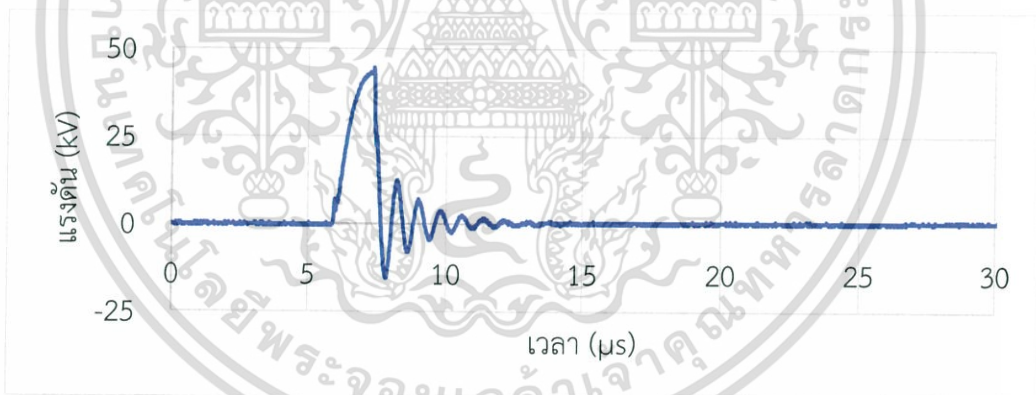
ข.1. แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว



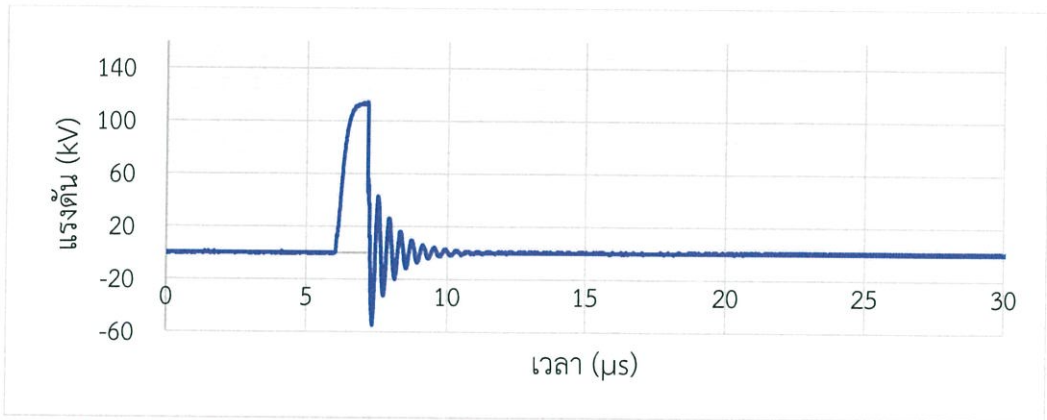
รูปที่ ข.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว 1.2/50 μs ที่ใช้ในการทดสอบ

ข.1.1. น้ำมันแร่

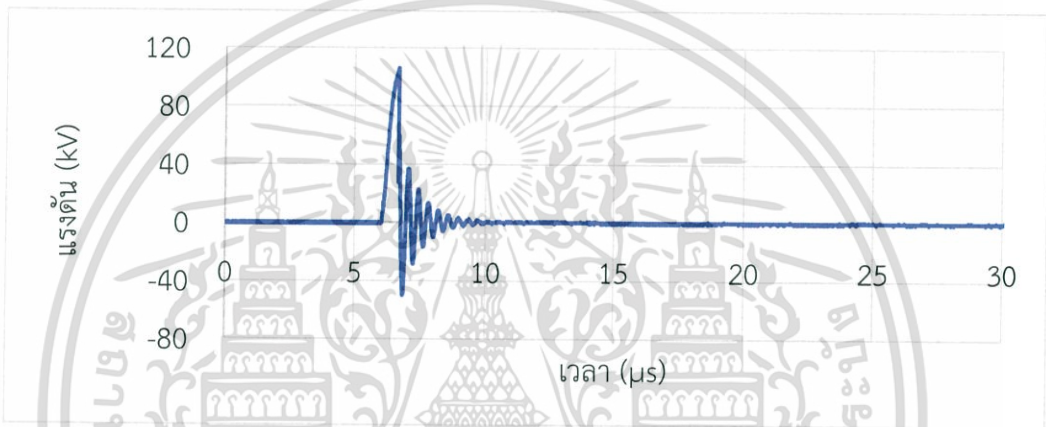
1) ความหนาของเพรสบอร์ดที่อิมแพกเน็ตด้วยน้ำมันแร่ขนาด 1.6 mm



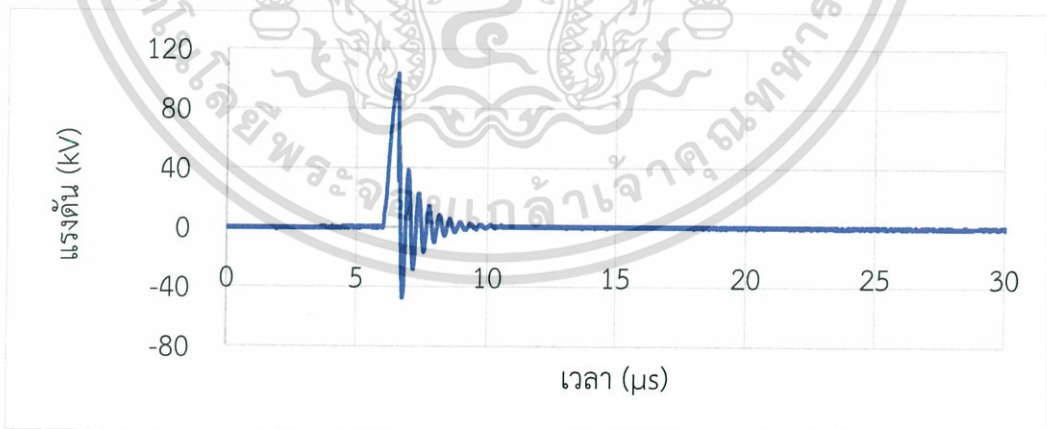
รูปที่ ข.2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวที่เวลาในการอิมแพกเน็ตเพรสบอร์ด 0 มม.



รูปที่ ข.3 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวที่เวลาในการอิมแพกเน็ตเพรสบอร์ด 3 ซม.

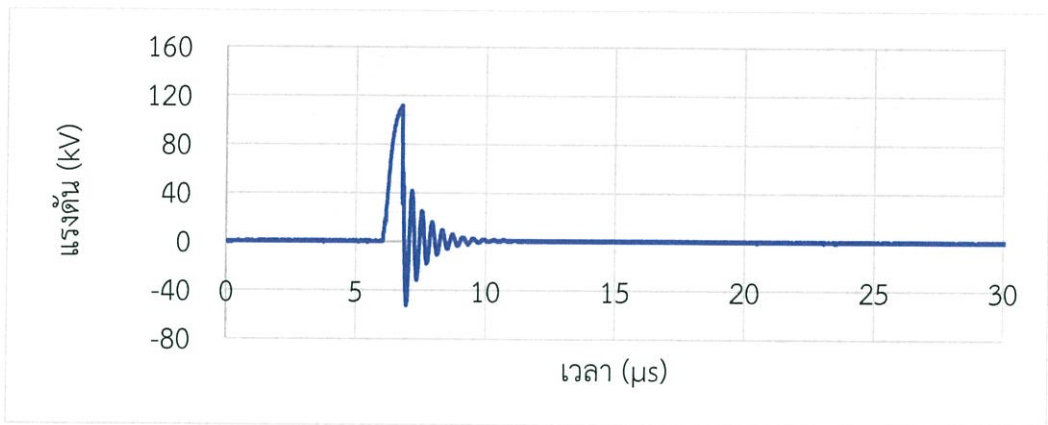


รูปที่ ข.4 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวที่เวลาในการอิมแพกเน็ตเพรสบอร์ด 6 ซม.

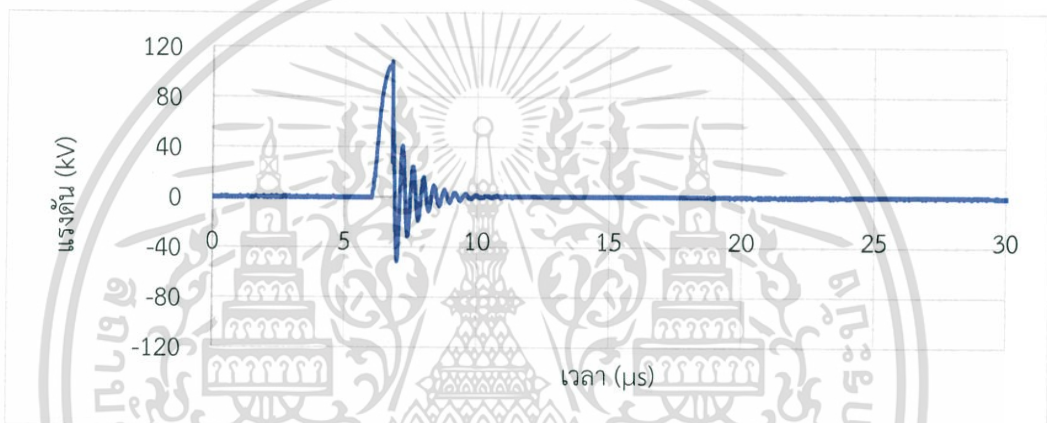


รูปที่ ข.5 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวที่เวลาในการอิมแพกเน็ตเพรสบอร์ด 9 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

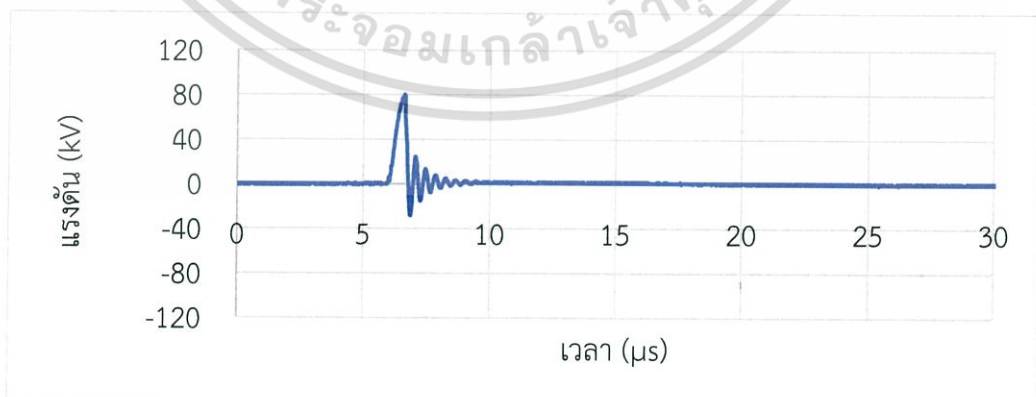


รูปที่ ข.6 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวที่เวลาในการอิมแพกเน็ตเพรสบอร์ด 12 ซม.



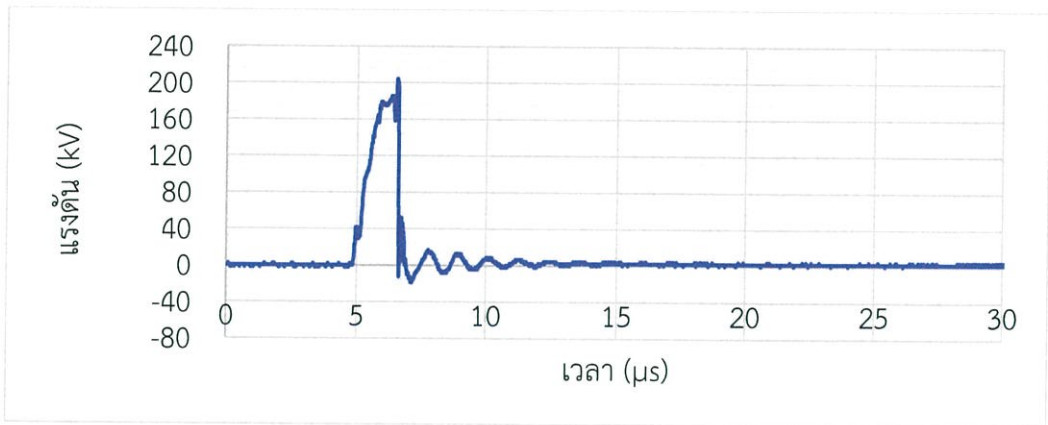
รูปที่ ข.7 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวที่เวลาในการอิมแพกเน็ตเพรสบอร์ด 24 ซม.

2) ความหนาของเพรสบอร์ดที่อิมแพกเน็ตด้วยน้ำมันแร่ขนาด 3.2 mm

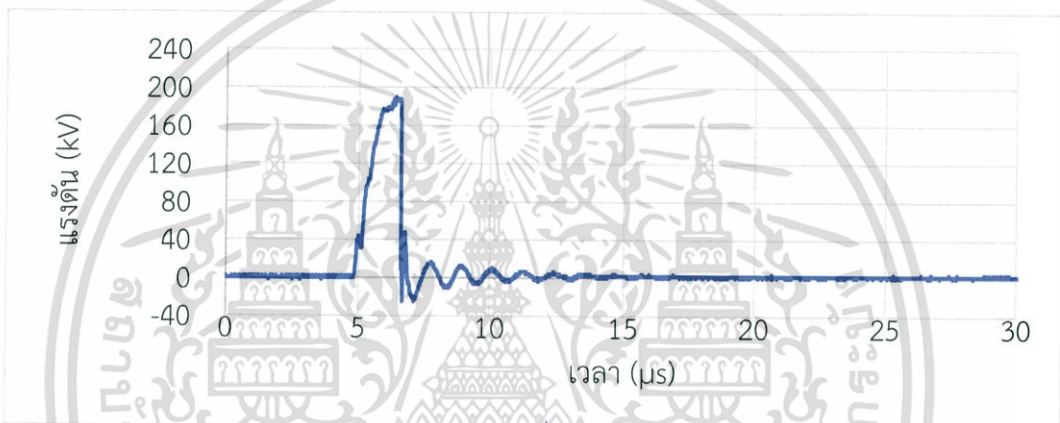


รูปที่ ข.8 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวที่เวลาในการอิมแพกเน็ตเพรสบอร์ด 0 ซม.

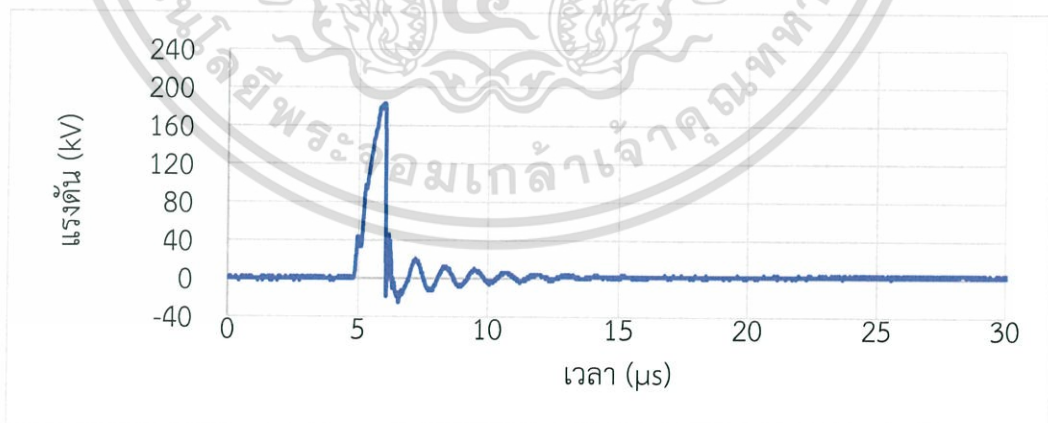
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.9 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวที่เวลาในการอิมแพกเน็ตเพรสบอร์ด 3 ซม.

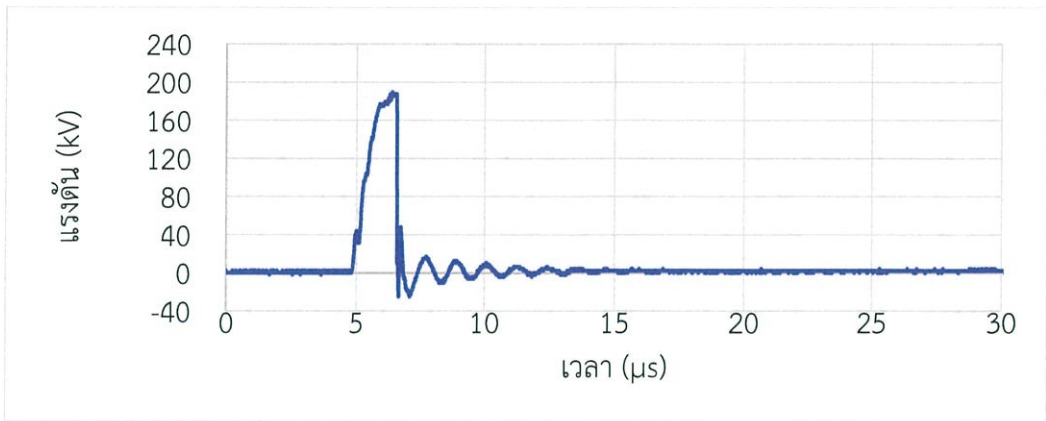


รูปที่ ข.10 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวที่เวลาในการอิมแพกเน็ตเพรสบอร์ด 6 ซม.

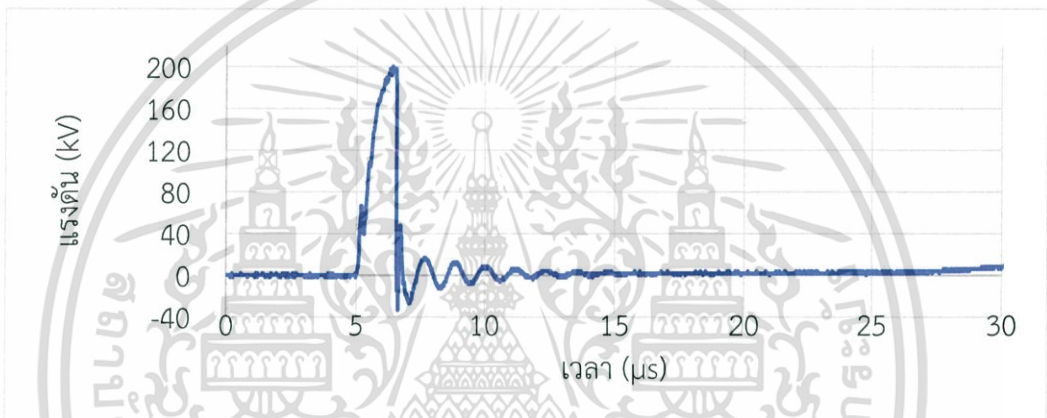


รูปที่ ข.11 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวที่เวลาในการอิมแพกเน็ตเพรสบอร์ด 9 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



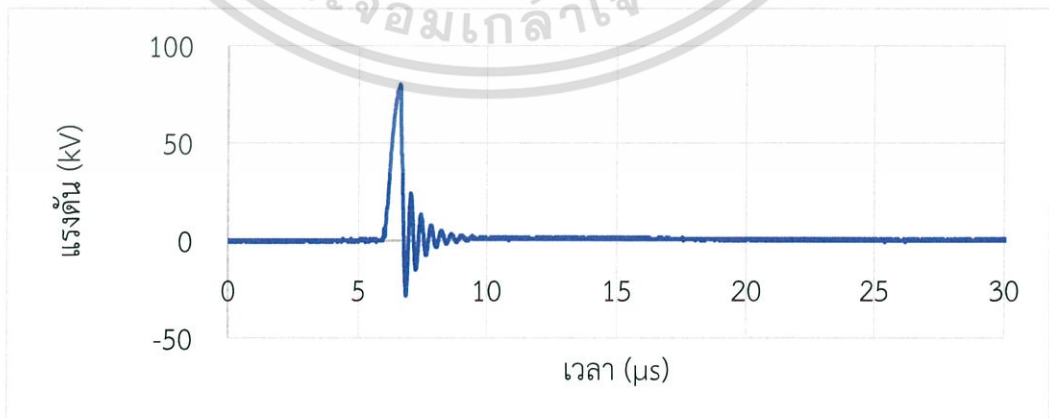
รูปที่ ข.12 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวที่เวลาในการอิมเพกต์เพรสบอร์ด 12 ซม.



รูปที่ ข.13 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวที่เวลาในการอิมเพกต์เพรสบอร์ด 24 ซม.

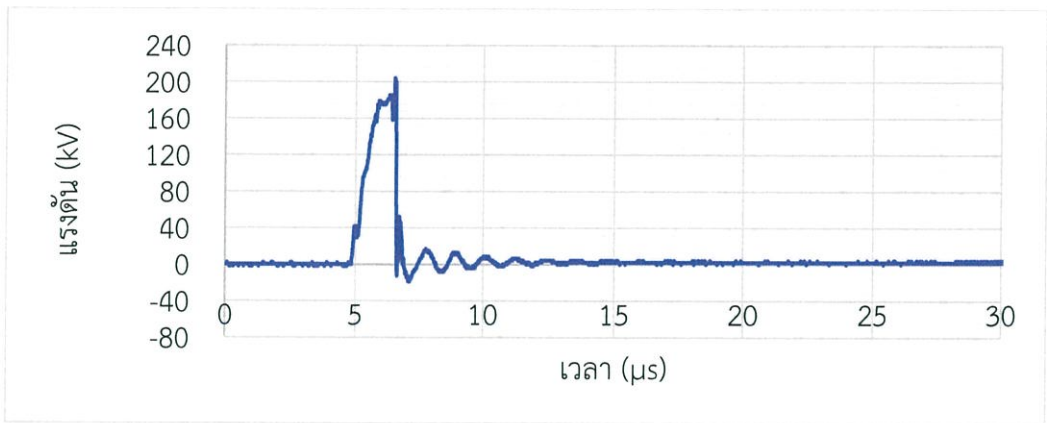
ข.1.2. เอสเทอร์ธรรมชาติ

- 1) ความหนาของเพรสบอร์ดที่อิมเพกต์ด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติขนาด 1.6 mm

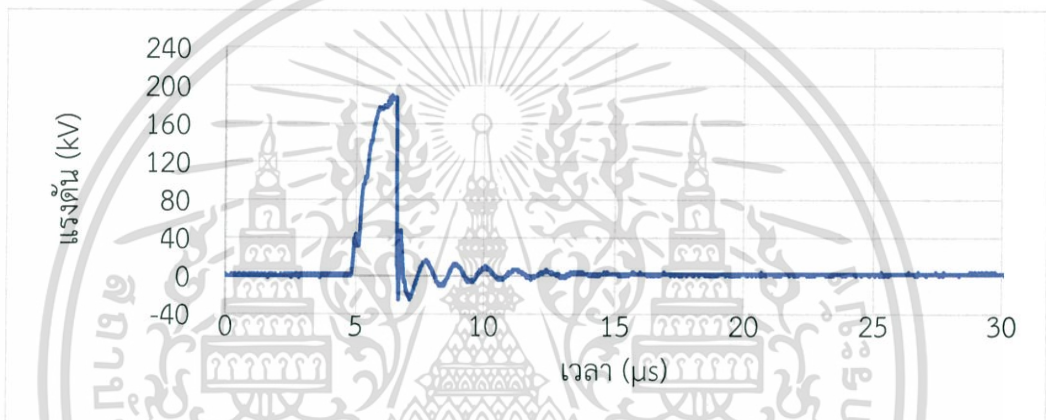


รูปที่ ข.14 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวที่เวลาในการอิมเพกต์เพรสบอร์ด 0 ซม.

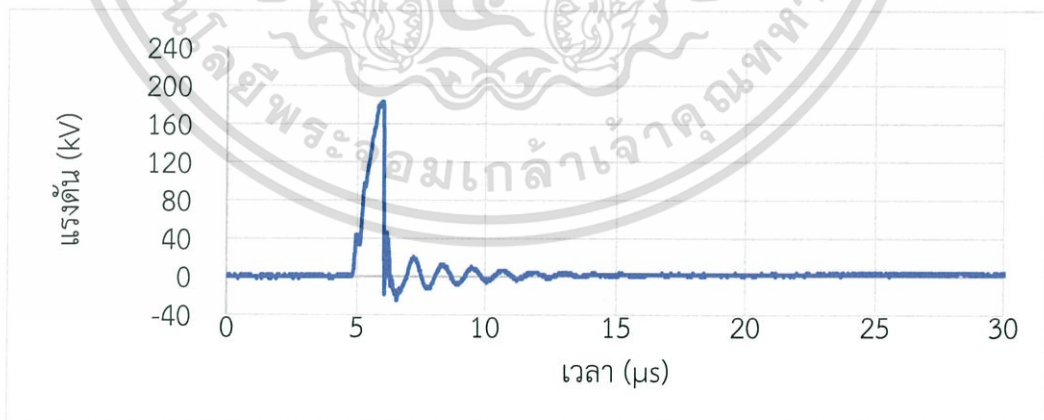
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.15 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวที่เวลาในการอิมเพรกเนตเพรสบอร์ด 3 ซม.

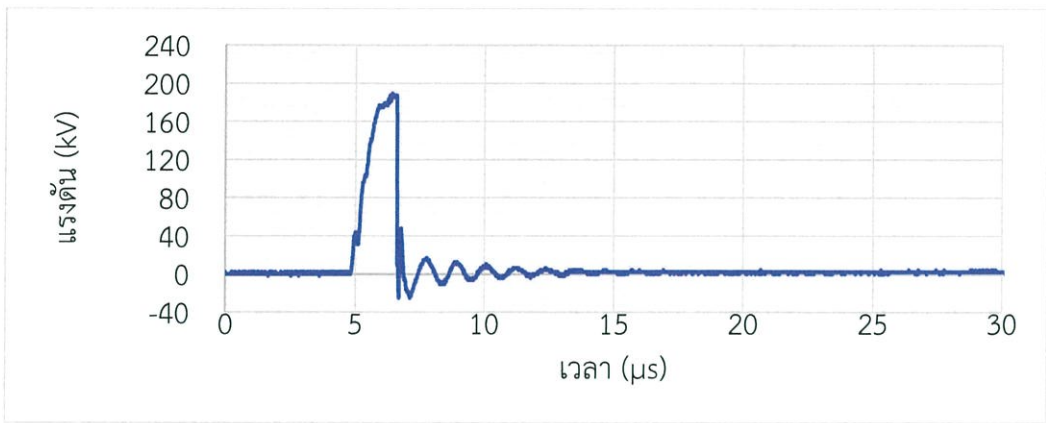


รูปที่ ข.16 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวที่เวลาในการอิมเพรกเนตเพรสบอร์ด 6 ซม.

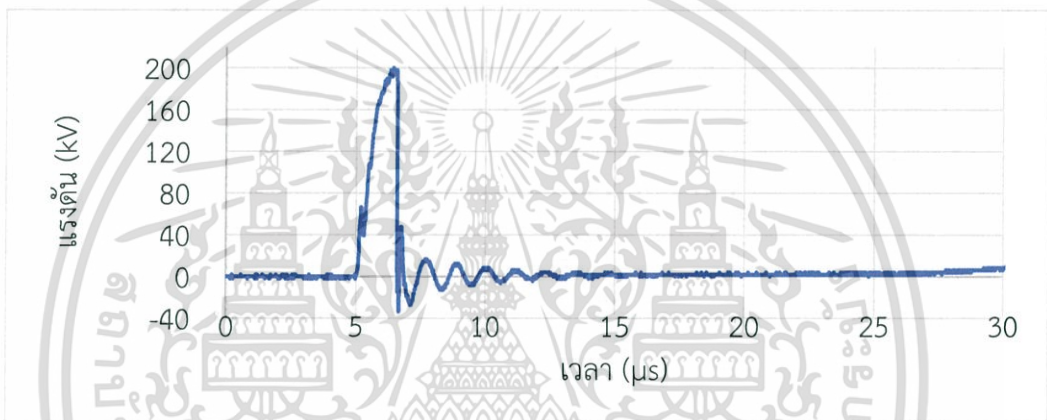


รูปที่ ข.17 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวที่เวลาในการอิมเพรกเนตเพรสบอร์ด 9 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

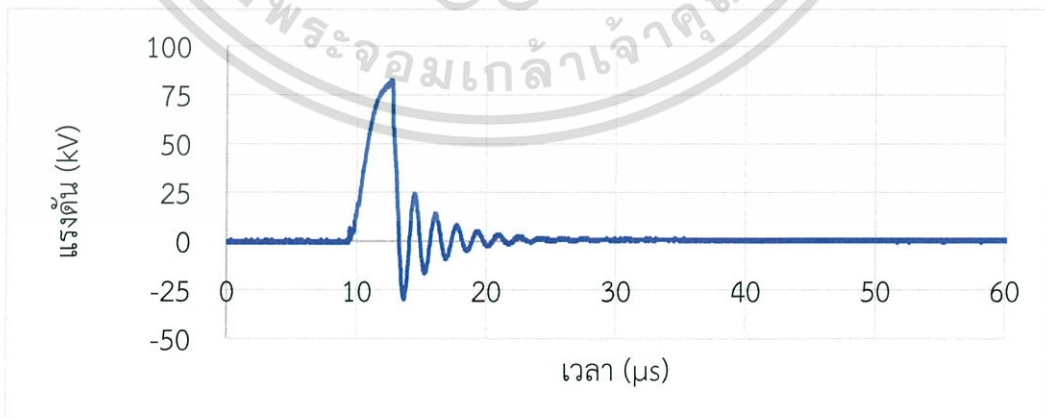


รูปที่ ข.18 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวที่เวลาในการอิมเพกต์เพรสบอร์ด 12 ซม.



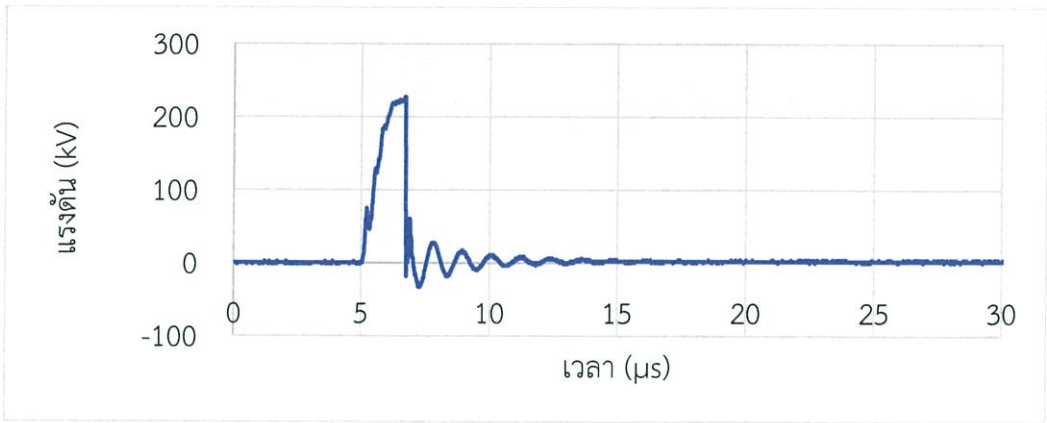
รูปที่ ข.19 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวที่เวลาในการอิมเพกต์เพรสบอร์ด 24 ซม.

2) ความหนาของเพรสบอร์ดที่อิมเพกต์ด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติขนาด 3.2 mm

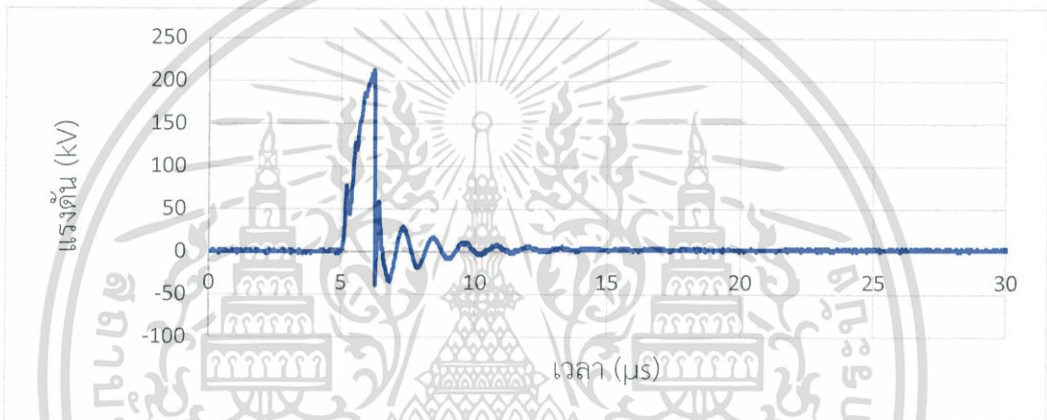


รูปที่ ข.20 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวที่เวลาในการอิมเพกต์เพรสบอร์ด 0 ซม.

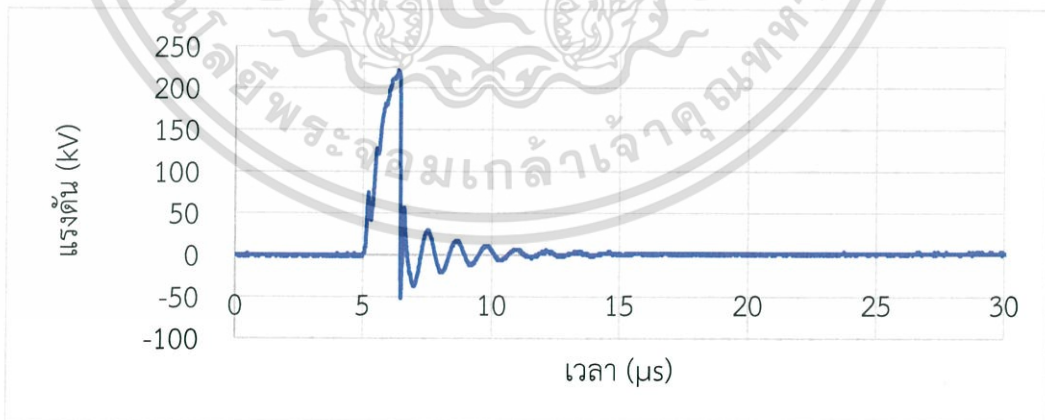
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.21 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวที่เวลาในการอิมเพรเกนต์เพรสบอร์ด 3 ซม.

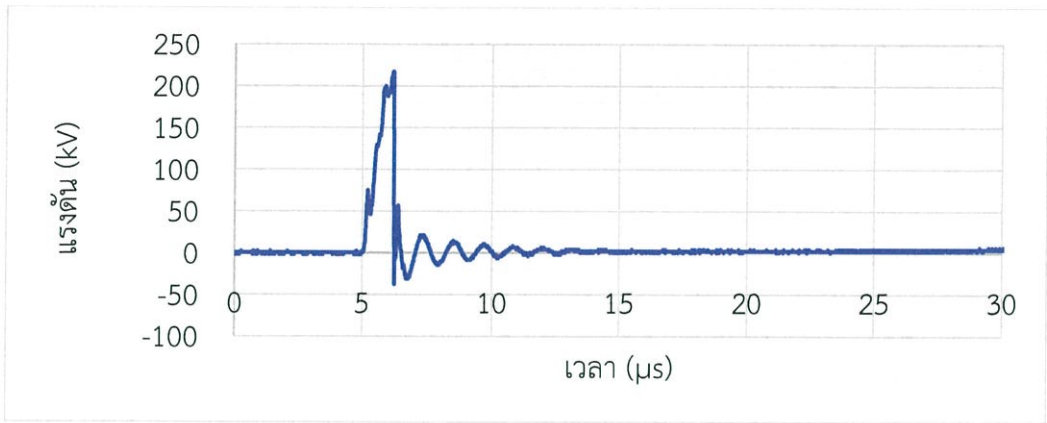


รูปที่ ข.22 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวที่เวลาในการอิมเพรเกนต์เพรสบอร์ด 6 ซม.

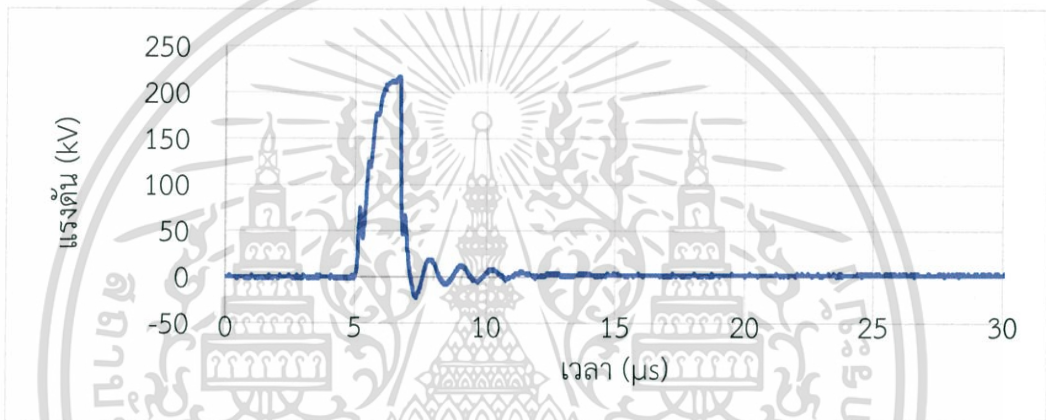


รูปที่ ข.23 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวที่เวลาในการอิมเพรเกนต์เพรสบอร์ด 9 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

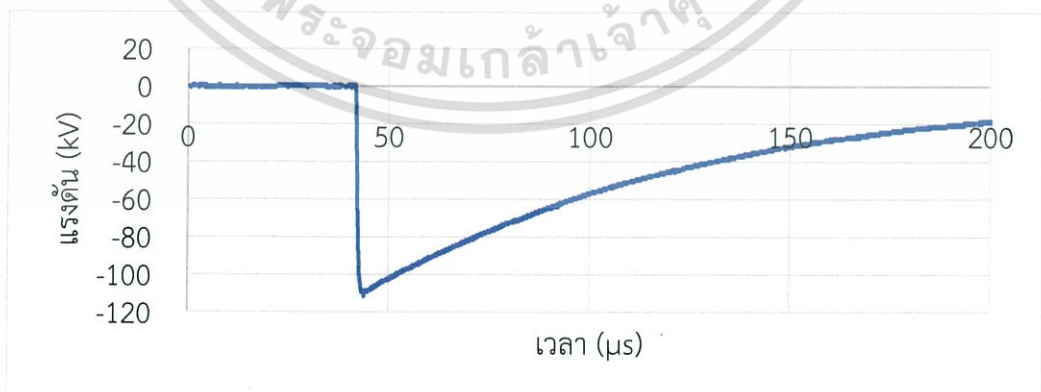


รูปที่ ข.24 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวที่เวลาในการอิมเพกต์เพรสบอร์ด 12 ซม.



รูปที่ ข.25 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวที่เวลาในการอิมเพกต์เพรสบอร์ด 24 ซม.

ข.2. แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว

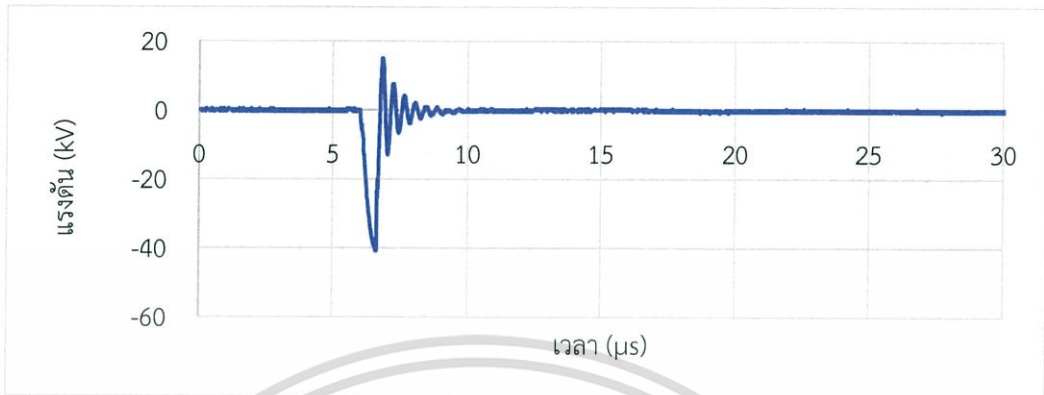


รูปที่ ข.26 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว 1.2/50 μS ที่ใช้ในการทดสอบ

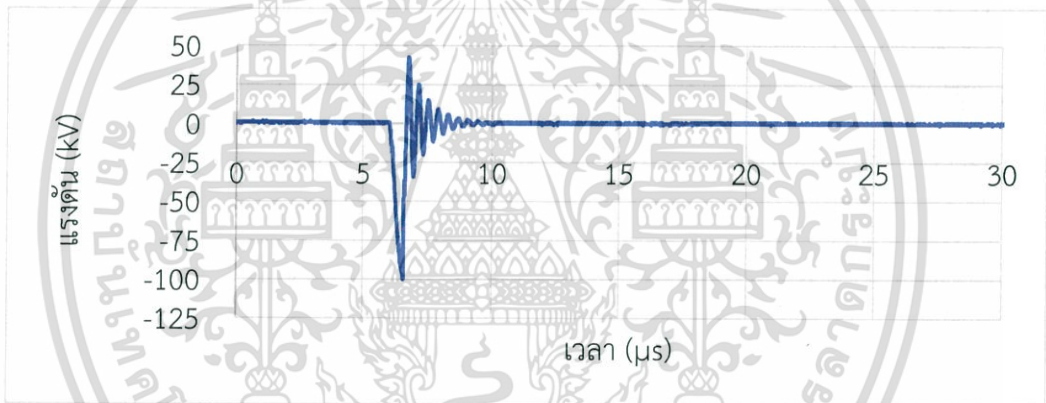
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.2.1. น้ำมันแร่

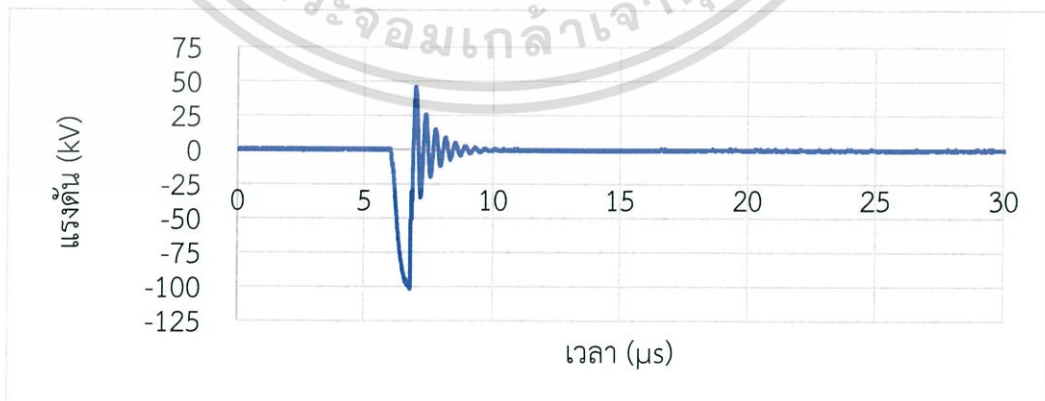
1) ความหนาของเพอร์สบอร์ดที่อิมเพรกเน็ตด้วยน้ำมันแร่ขนาด 1.6 mm



รูปที่ ข.27 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วพลบที่เวลาในการอิมเพรกเน็ตเพอร์สบอร์ด 0 ซม.

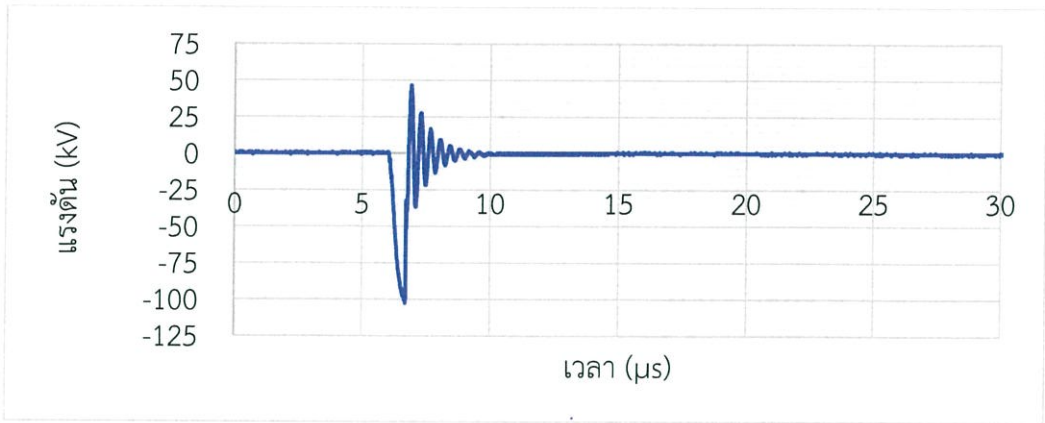


รูปที่ ข.28 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วพลบที่เวลาในการอิมเพรกเน็ตเพอร์สบอร์ด 3 ซม.

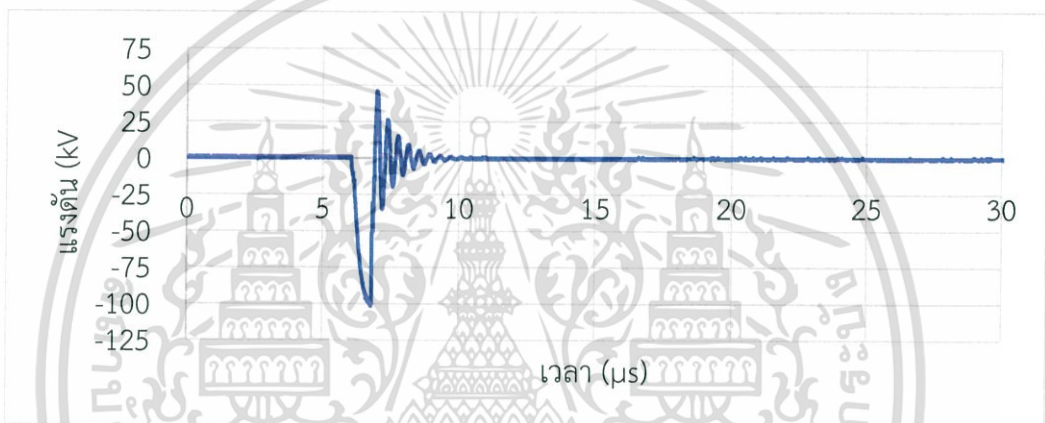


รูปที่ ข.29 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วพลบที่เวลาในการอิมเพรกเน็ตเพอร์สบอร์ด 6 ซม.

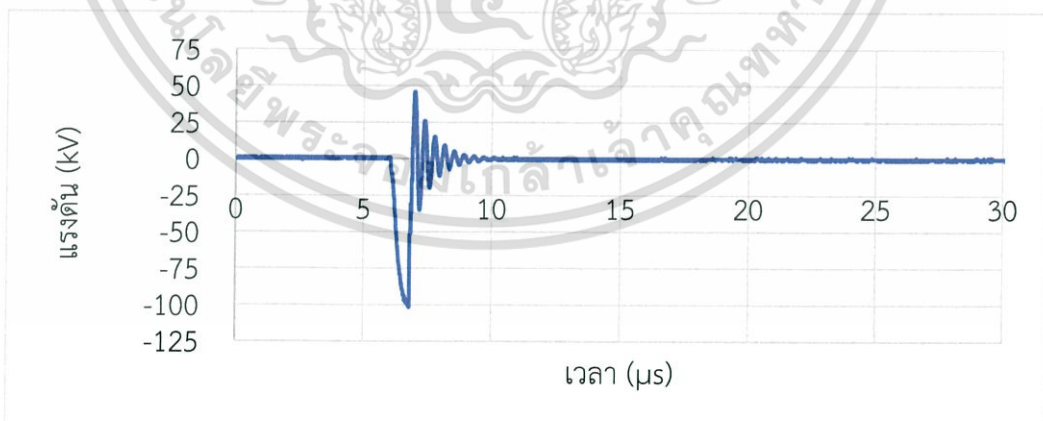
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.30 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจำลองที่เวลาในการอิมแพกเน็ตเพรสบอร์ด 9 ซม.



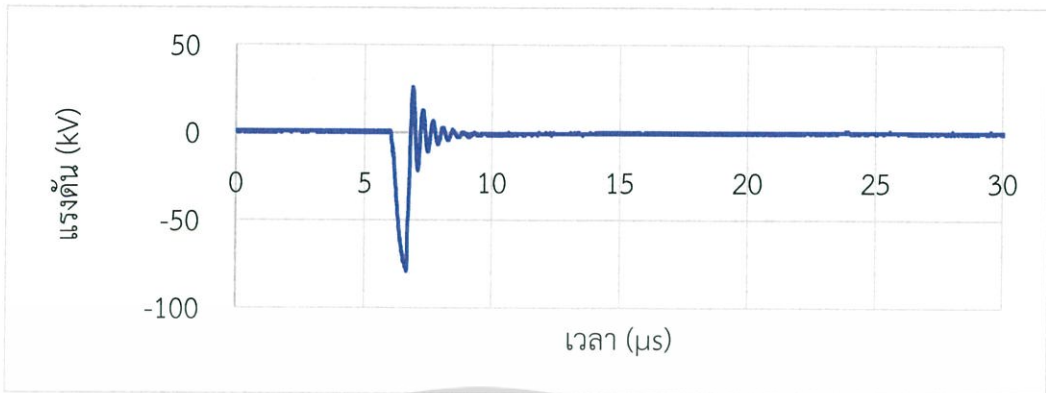
รูปที่ ข.31 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจำลองที่เวลาในการอิมแพกเน็ตเพรสบอร์ด 12 ซม.



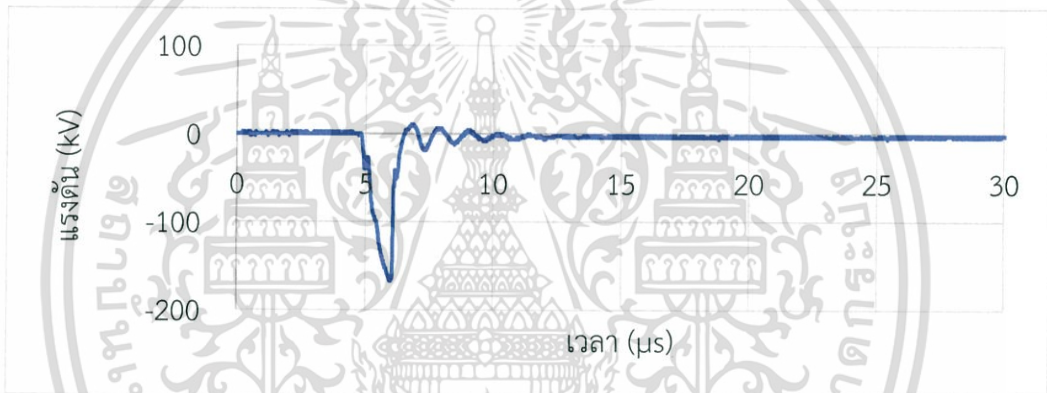
รูปที่ ข.32 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจำลองที่เวลาในการอิมแพกเน็ตเพรสบอร์ด 24 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

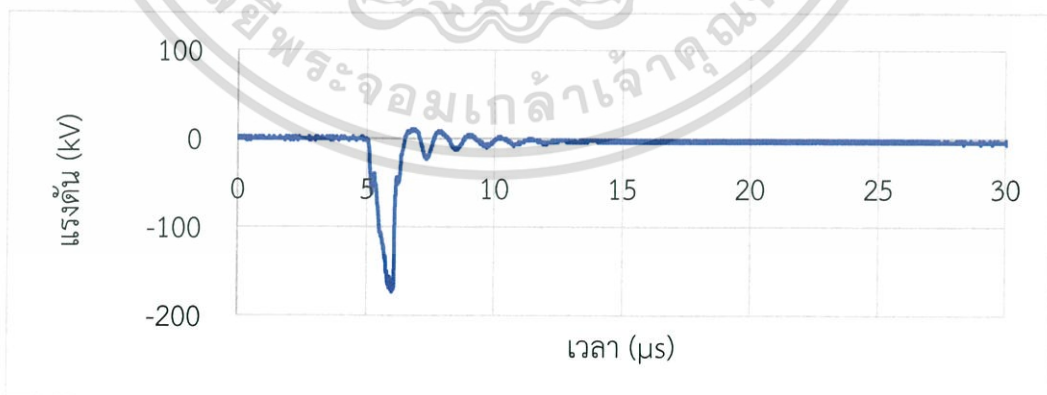
2) ความหนาของเพอร์สบอร์ดที่อิมเพกเน็ตด้วยน้ำมันแร่ขนาด 3.2 mm



รูปที่ ข.33 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจำลองที่เวลาในการอิมเพกเน็ตเพอร์สบอร์ด 0 ซม.

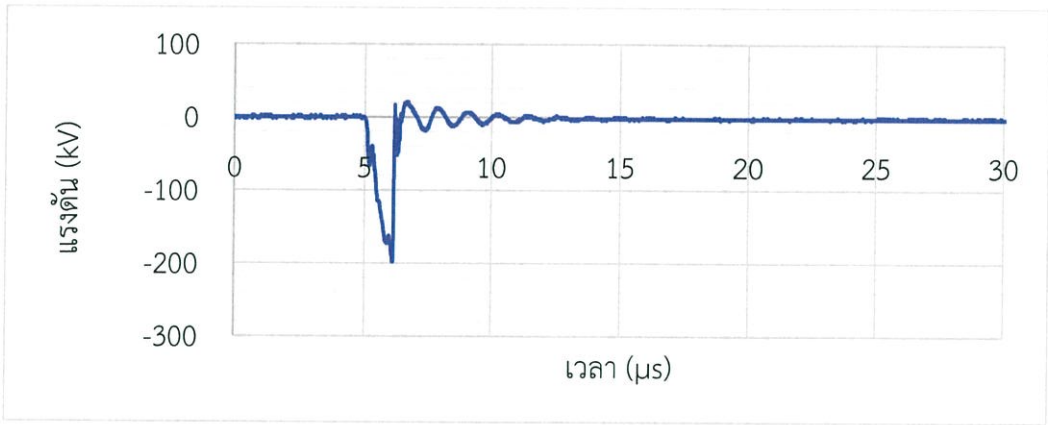


รูปที่ ข.34 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจำลองที่เวลาในการอิมเพกเน็ตเพอร์สบอร์ด 3 ซม.

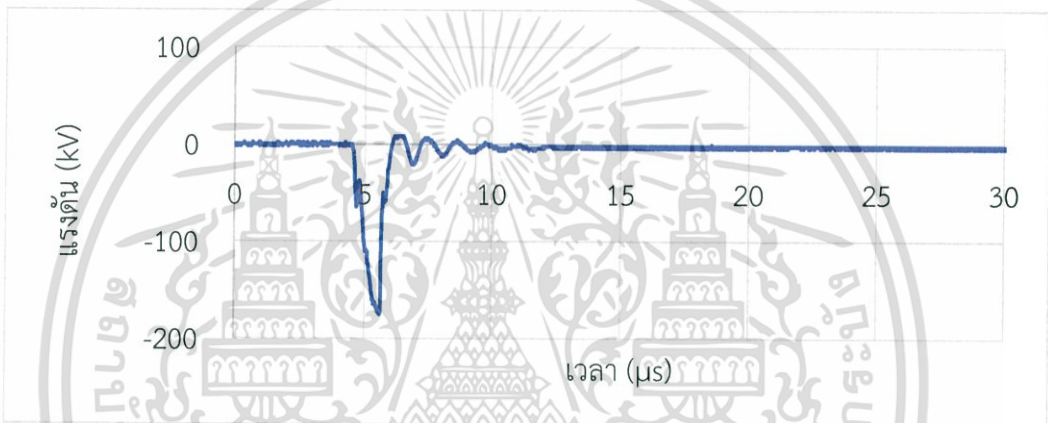


รูปที่ ข.35 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจำลองที่เวลาในการอิมเพกเน็ตเพอร์สบอร์ด 6 ซม.

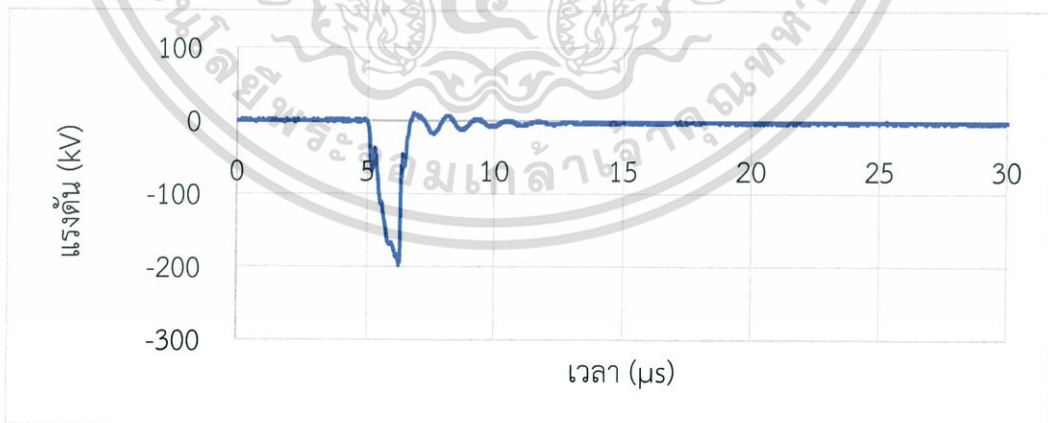
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.36 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจำลองที่เวลาในการอิมแพกเน็ตเพรสบอร์ด 9 ซม.



รูปที่ ข.37 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจำลองที่เวลาในการอิมแพกเน็ตเพรสบอร์ด 12 ซม.

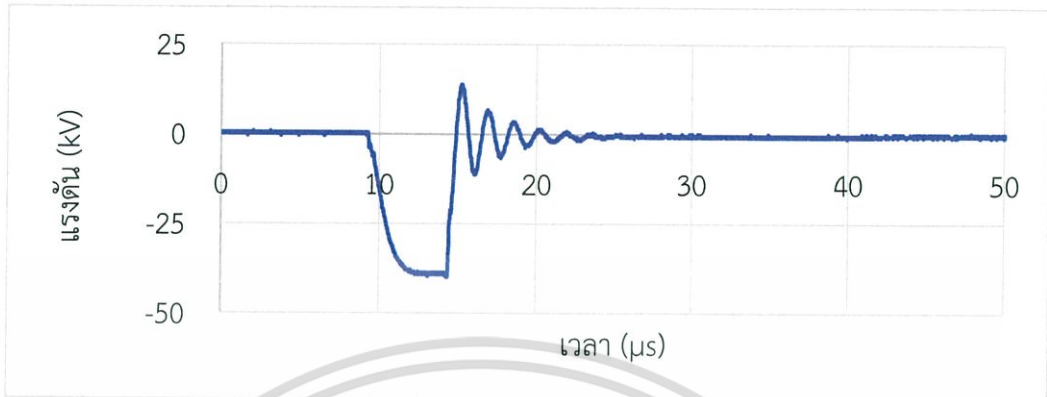


รูปที่ ข.38 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจำลองที่เวลาในการอิมแพกเน็ตเพรสบอร์ด 24 ซม.

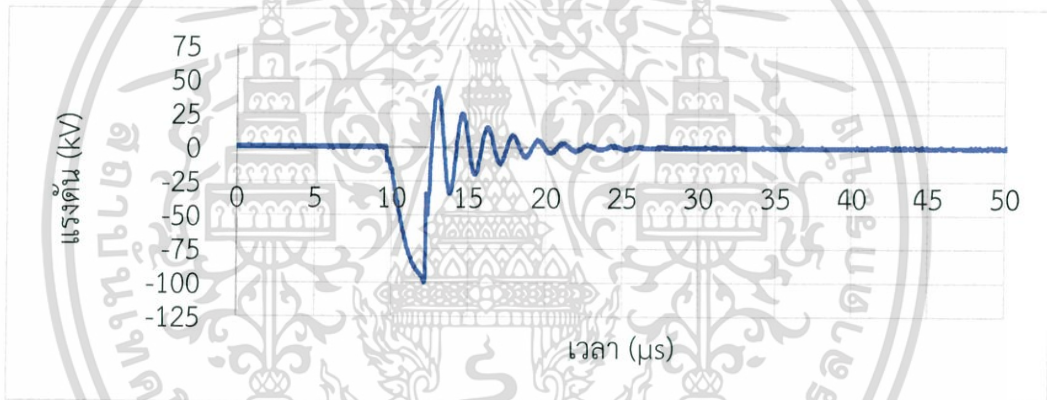
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.2.2. เอสเทอร์ธรรมชาติ

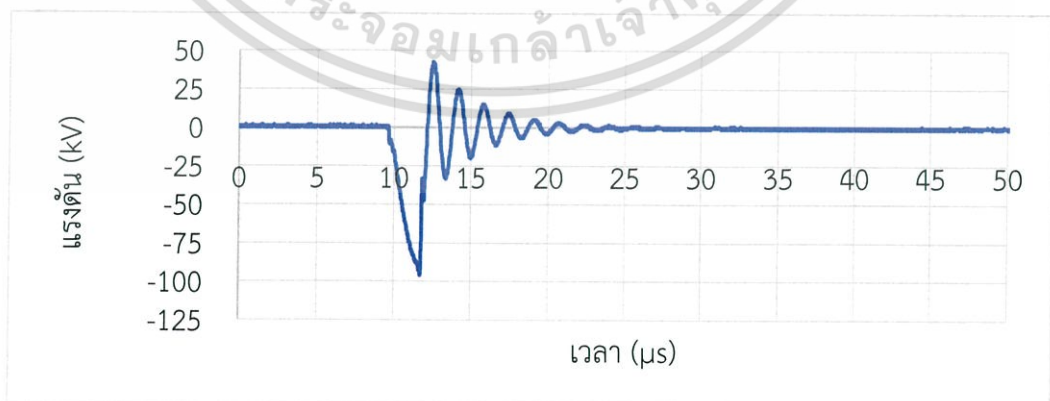
1) ความหนาของเพรสบอร์ดที่อิมเพกเน็ตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติขนาด 1.6 mm



รูปที่ ข.39 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วพลที่เวลาในการอิมเพกเน็ตเพรสบอร์ด 0 ซม.

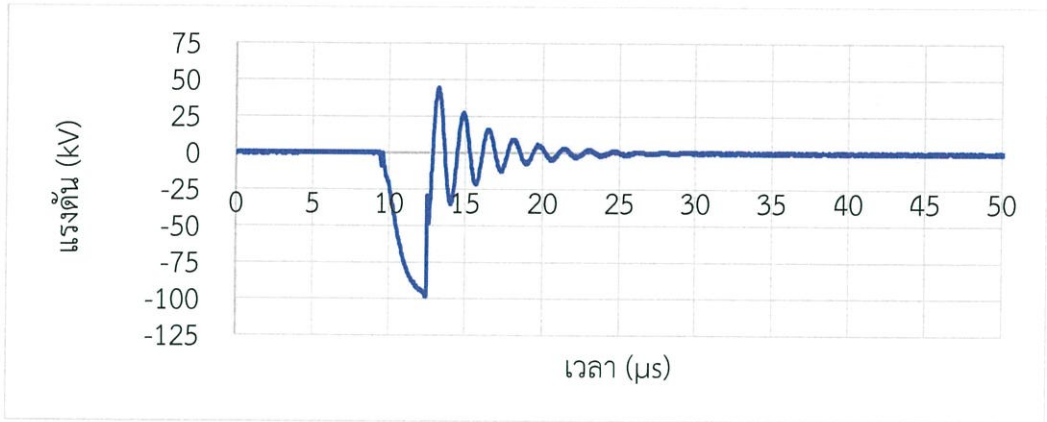


รูปที่ ข.40 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วพลที่เวลาในการอิมเพกเน็ตเพรสบอร์ด 3 ซม.

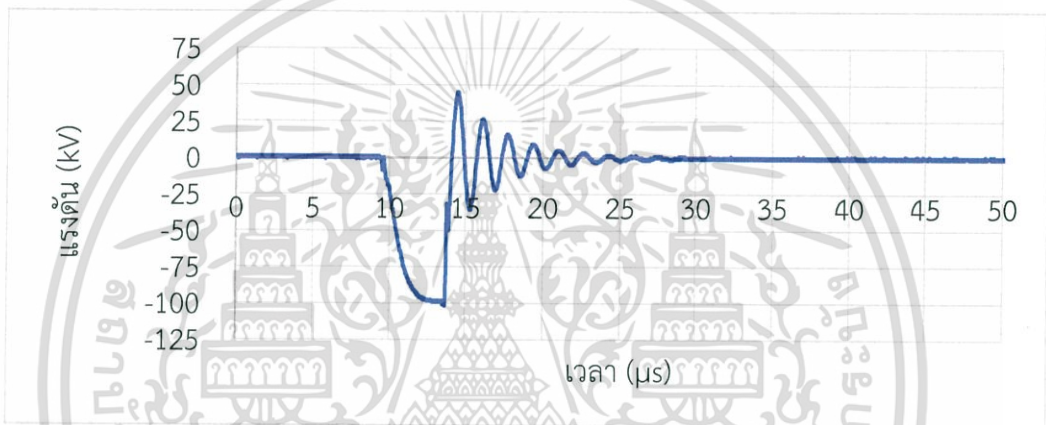


รูปที่ ข.41 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วพลที่เวลาในการอิมเพกเน็ตเพรสบอร์ด 6 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.42 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบที่เวลาในการอิมแพกเน็ตเพรสบอร์ด 9 ซม.



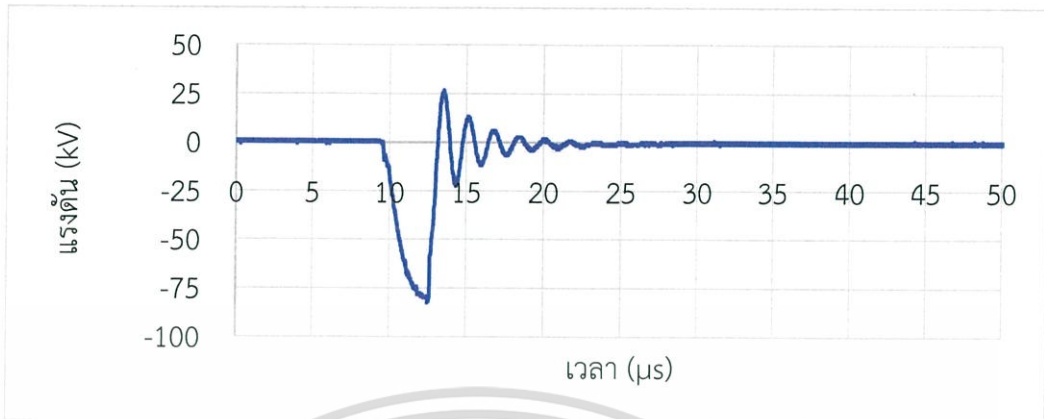
รูปที่ ข.43 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบที่เวลาในการอิมแพกเน็ตเพรสบอร์ด 12 ซม.



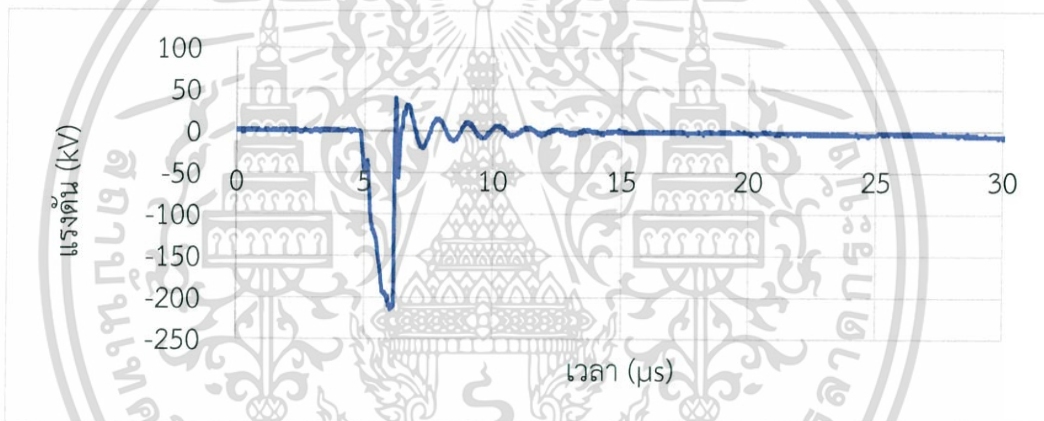
รูปที่ ข.44 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบที่เวลาในการอิมแพกเน็ตเพรสบอร์ด 24 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

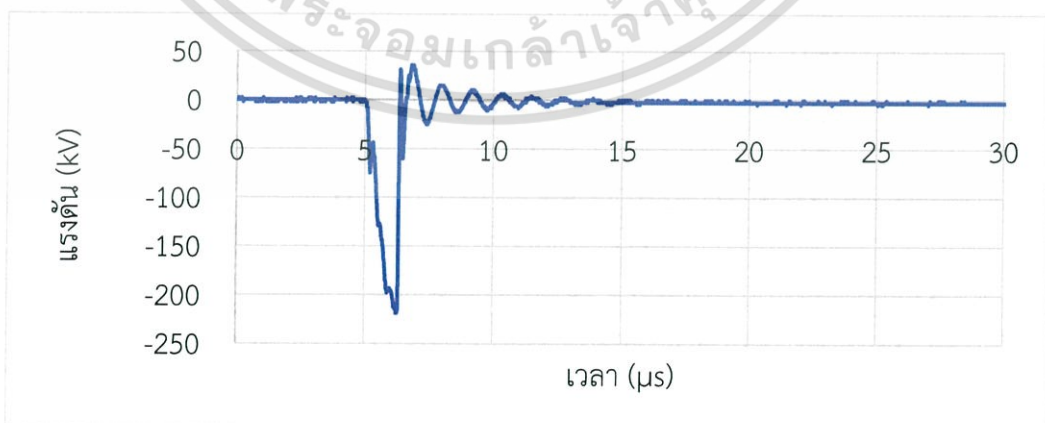
2) ความหนาของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเน็ตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติขนาด 3.2 mm



รูปที่ ข.45 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วพลบที่เวลาในการอิมเพรกเน็ตเพรสบอร์ด 0 ซม.

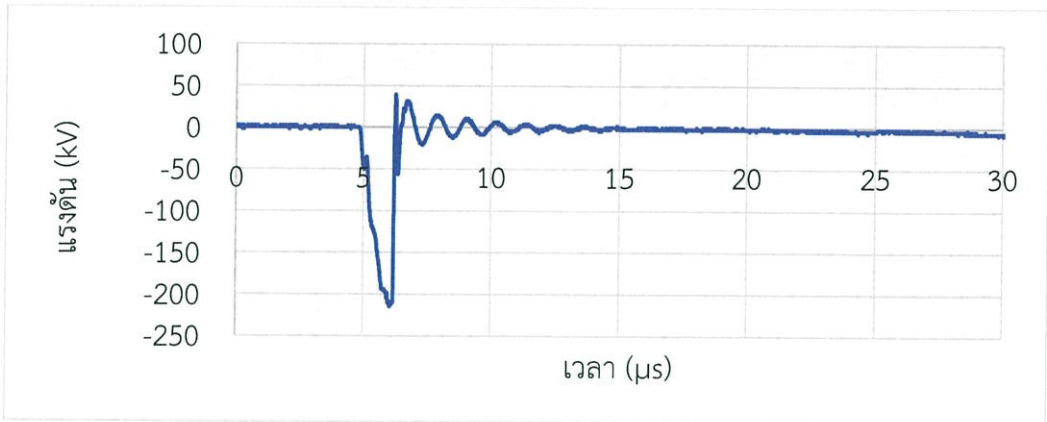


รูปที่ ข.46 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วพลบที่เวลาในการอิมเพรกเน็ตเพรสบอร์ด 3 ซม.

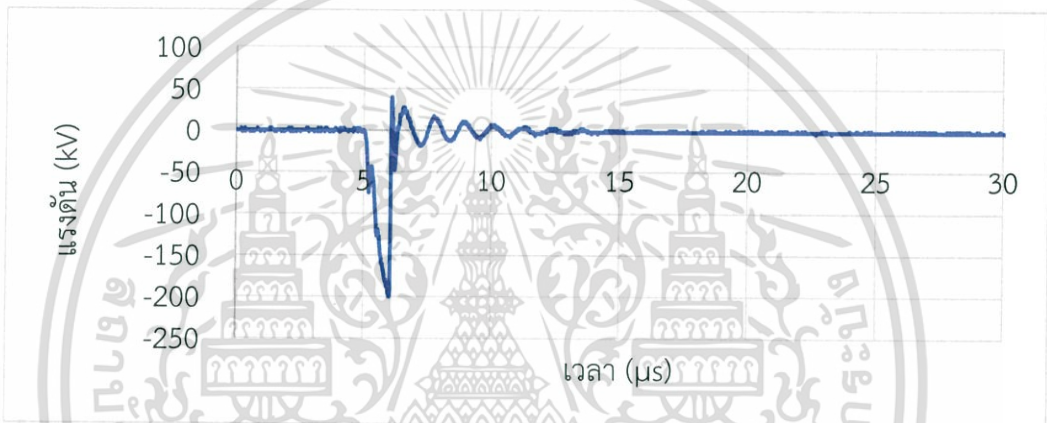


รูปที่ ข.47 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วพลบที่เวลาในการอิมเพรกเน็ตเพรสบอร์ด 6 ซม.

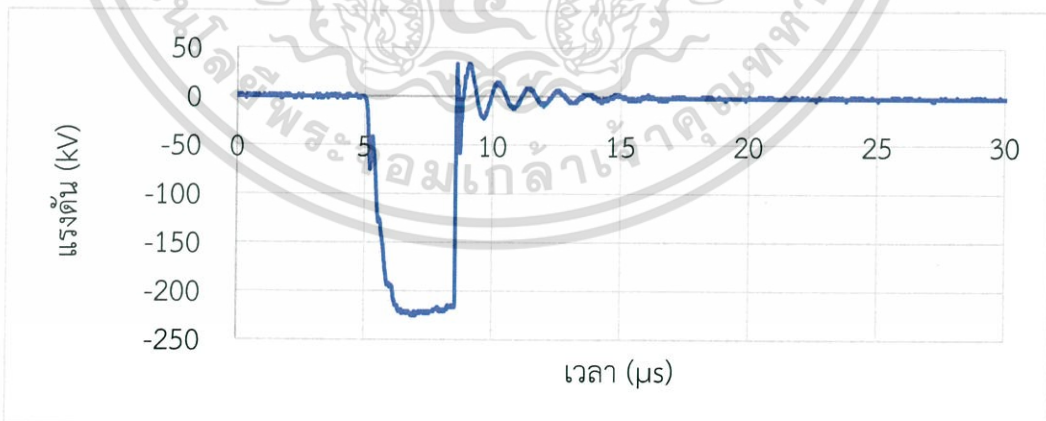
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.48 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจำลองที่เวลาในการอิมแพกเน็ตเพรสบอร์ด 9 ซม.



รูปที่ ข.49 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจำลองที่เวลาในการอิมแพกเน็ตเพรสบอร์ด 12 ซม.



รูปที่ ข.50 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจำลองที่เวลาในการอิมแพกเน็ตเพรสบอร์ด 24 ซม.

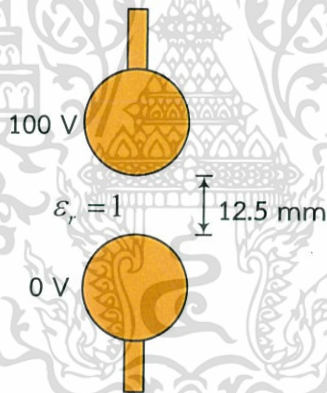
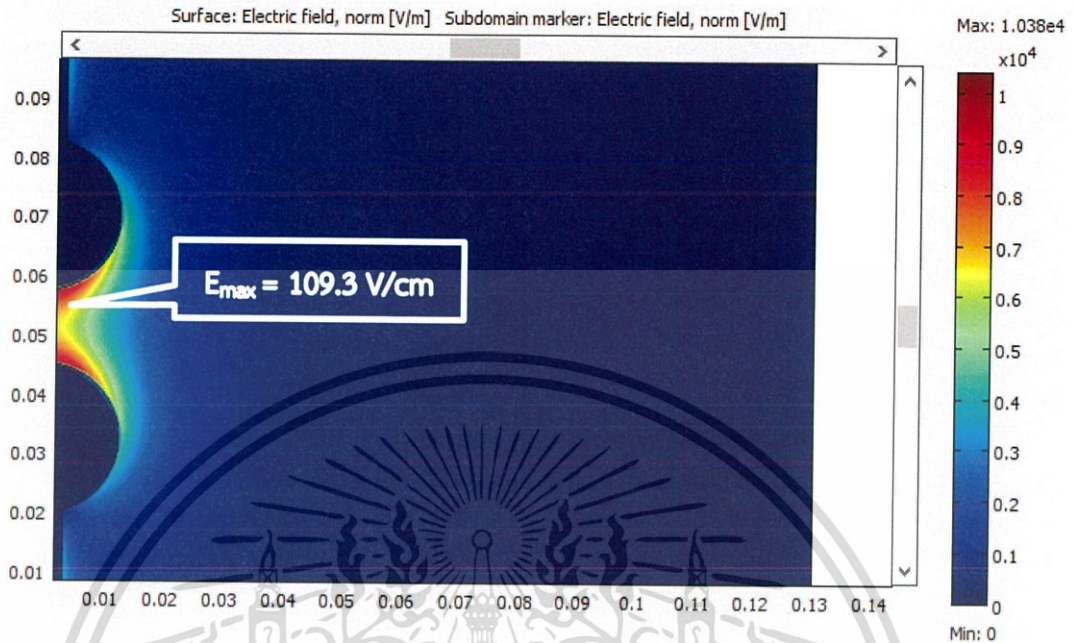
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

การเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าที่ได้ระหว่างตัวโปรแกรมกับค่าที่คำนวณ



การคำนวณค่าความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด

กำหนดให้ แรงดันไฟฟ้า 100 V รัศมีของอิเล็กโทรด 12.5 mm และช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด 12.5 mm โดยมีฉนวนคืออากาศ ($\epsilon_r = 1$) เมื่อนำแทนในสมการที่ 2.37 จะได้

$$p = \frac{d+r}{r} = \frac{12.5+12.5}{12.5} = 2$$

$$q = \frac{R}{r} = \frac{12.5}{12.5} = 1$$

จากตารางที่ 2.6 จะได้ค่า η^* เท่ากับ 0.732

แทนค่าในสมการ 2.36 จะได้

$$E_{\max} = \frac{V}{d\eta^*} = \frac{100V}{1.25cm \times 0.732} = 109.29 \frac{V}{cm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



IEC 60243-1

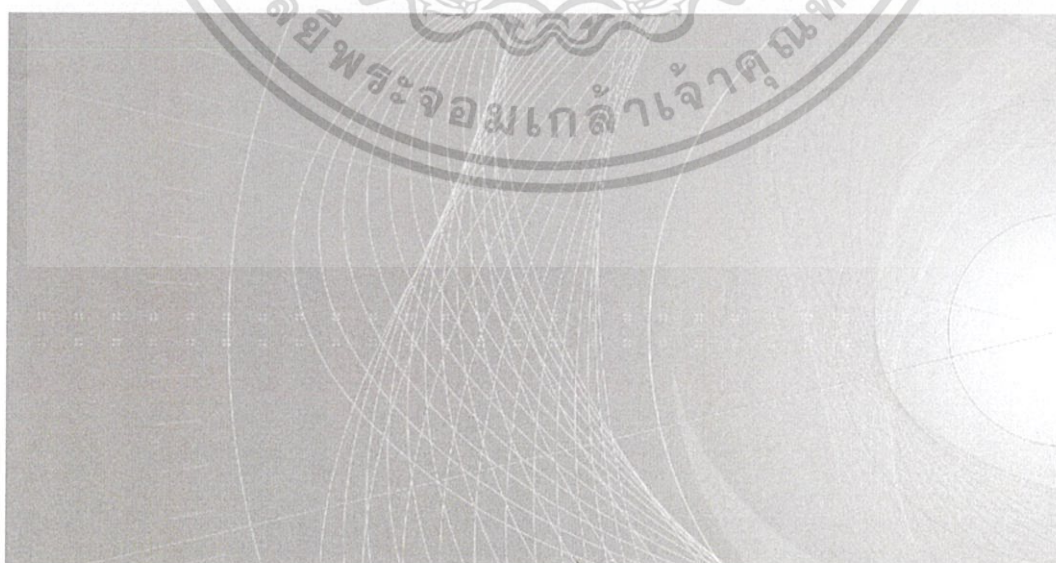
Edition 3.0 2013-03

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

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

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



IEC 60243-1:2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 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 <math>< 5 \mu\text{m}</math> 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

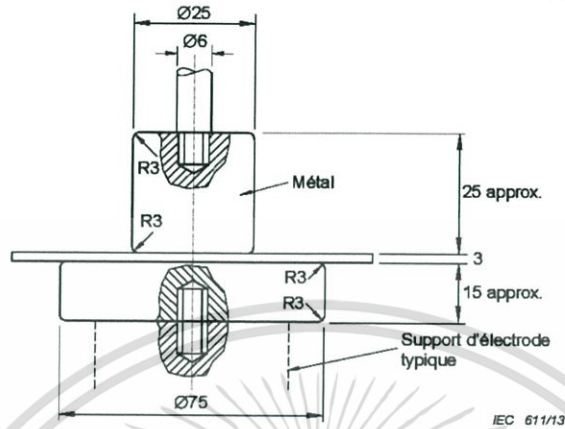


Figure 1a – Électrodes de dimensions inégales

Dimensions en millimètres

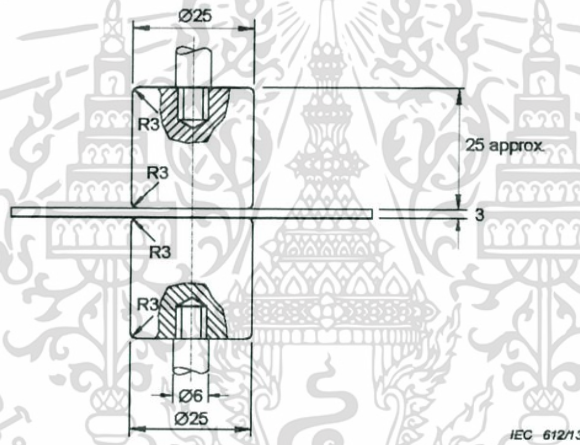


Figure 1b – Électrodes de même diamètre

Dimensions en millimètres

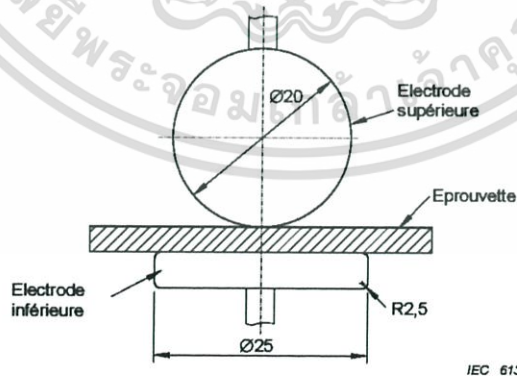


Figure 1c – Électrodes à bille et plaque

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

Figure 1 – Disposition des électrodes pour les essais des plaques et feuilles perpendiculairement à la surface

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD

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 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2 Electrode spacing

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

7.3 Earth the spherical electrode; the connection shall be as short as possible. The impulse generator output shall be applied to the point electrode and care must be taken to avoid too large a connection loop.

7.4 The temperature of the sample when tested should be the same as the temperature of the test-room; a room temperature between 15 °C and 30 °C is appropriate. Record the test temperature.

8. Test procedures

8.1 Method A—Step test

8.1.1 Principle

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

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

8.1.2 Procedure

- a) Prepare the test-cell as described in Clause 7.
- b) From Table I, select the appropriate initial value of the test voltage (U_0) voltage step and gap spacing, based on the expected breakdown (U_0) 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_0 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 (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 (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).



ภาคผนวก ฉ
การใช้กระตาดขนานสำหรับหม้อแปลง
อ้างอิงจากหนังสือ “Weidmann Electrical Technology Compendium Version 1.1”
จัดทำโดย Weidmann Electrical Technology Ag

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

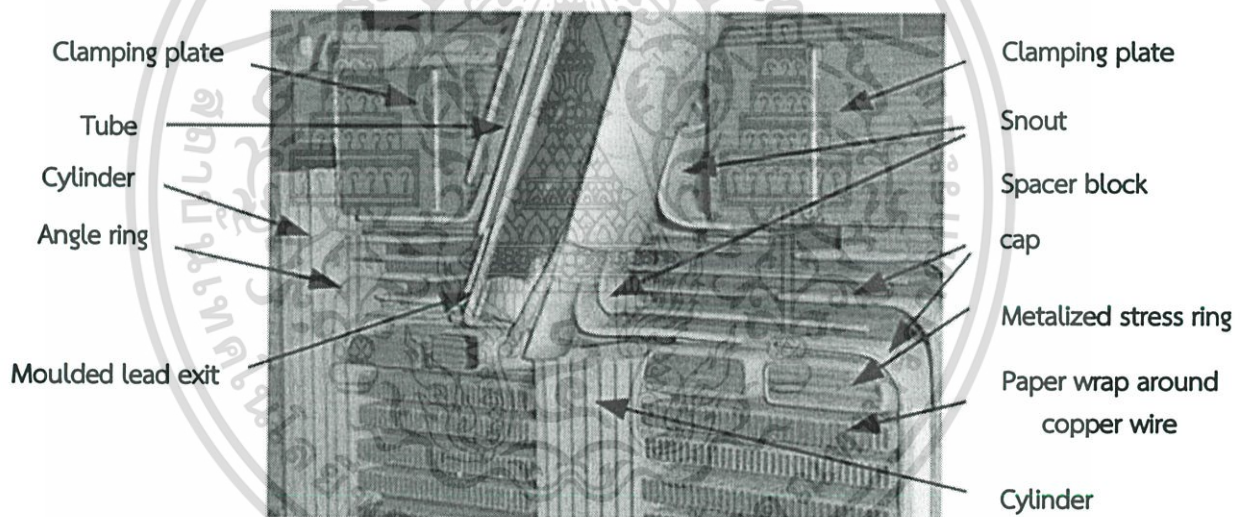
ภาคผนวก ฉ.

การใช้กระดาษฉนวนสำหรับหม้อแปลง

กระดาษฉนวนสำหรับหม้อแปลง (Transformerboard) ถูกใช้เป็นหลักในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยใช้ร่วมกับฉนวนเหลวเช่น น้ำมันแร่, ซิลิโคนสังเคราะห์, เอสเทอร์ธรรมชาติ หรือน้ำมันพืช เป็นต้น

เส้นใยเซลลูโลสของกระดาษฉนวนสำหรับหม้อแปลงจะมีเปอร์เซ็นต์ของความชื้นและช่องอากาศขนาดเล็กที่อยู่ในโครงสร้างเส้นใยเนื่องจากกระดาษมีความพรุน จึงจำเป็นต้องมีการอบแห้งกระดาษฉนวนที่ใช้ในหม้อแปลง และจะต้องถูกทำให้เสถียรก่อนอิมเพกเนตด้วยน้ำมัน

ความคงทนทางไฟฟ้าที่ดีของกระดาษฉนวนสำหรับหม้อแปลงเป็นผลมาจากความคงทนเบรกดาวนของชั้นบางๆ ของเซลลูโลสและน้ำมัน เนื่องจากส่วนประกอบกระดาษฉนวนสำหรับหม้อแปลงมีรูปร่างที่เสถียรเมื่อเทียบกับกระดาษฉนวนอ่อน (Soft paper insulation) ทำให้ความปลอดภัยในการใช้งานแตกต่างกันอย่างมาก



รูปที่ ฉ.1 แสดงตัวอย่างการใช้งานกระดาษฉนวนสำหรับหม้อแปลง
ที่มา : http://www.tbeaindia.com/images/trading/img_plate.jpg

ฉ.1. แกนทรงกระบอกของกระดาษฉนวนหม้อแปลง (Cylinders)

เนื่องจากความแข็งแรงเชิงกลของแกนทรงกระบอกสูงจึงเป็นไปได้ที่จะใช้การพันเป็นวงกลมโดยตรงกับแกนหมุนที่รองรับขดลวด แม้สำหรับหม้อแปลงที่มีขีดจำกัด กระดาษฉนวนเหล่านี้สามารถอิมเพกเนตได้อย่างสมบูรณ์โดยไม่ยาก รวมถึงการป้องกันการเกิดความเสียหายเนื่องจากอากาศและความชื้นในกรณีที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ แม้ว่าแกนทรงกระบอกของกระดาษฉนวนสำหรับหม้อแปลงจะทำหน้าที่คล้ายคลึงกับกระดาษฉนวนอ่อนที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวน ดังนั้นจึงมีเสถียรภาพและสามารถรับโหลดได้โดยไม่เกิดปัญหาทางกล นอกจากนั้นการปนเปื้อนที่ไม่พึงประสงค์ของแผ่นกระดาษแต่ละแผ่นจะถูกจำกัดไว้โดยความกว้างของช่องระบายความร้อน ซึ่งจะให้ความฉนวนมีความปลอดภัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้แกนทรงกระบอกกระดาษฉนวนสำหรับหม้อแปลงช่วยลดความกว้างโดยรวมของฉนวนหลักโดยเฉพาะอย่างยิ่ง กรณีที่ส่วนท้ายที่อยู่ใต้แกนจะถูกรวมเข้ากับวงแหวนและฝาครอบของกระดาษฉนวนสำหรับหม้อแปลงที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก รูปร่างนี้สามารถเข้ากันได้และไม่มีผลต่อสนามไฟฟ้า

เนื่องจากมีความต้านทานเชิงกลที่ต่ำมากจึงสามารถใช้แรงกดทับโครงสร้างที่สมบูรณ์ในทิศทางตามแนวแกนได้โดยไม่ทำให้เกิดช่องว่างในกระดาษฉนวน การหุ้มด้วยทรงกระบอกและวงแหวนช่วยให้ประหยัดพื้นที่และช่วยลดต้นทุนการเก็บรักษา

ฉ.2. วงแหวนและฝาครอบ (Angle rings and caps)



รูปที่ ฉ.2 รูปแสดงวงแหวนกระดาษฉนวนสำหรับหม้อแปลง

ที่มา : <http://image.made-in-china.com/43f34j00gvSQkZMWSwqe/110kv-750kv-Angle-Ring-and-Cap-Ring-Segments-for-Power-Transformer.jpg>

การใช้วงแหวนและฝาครอบกระดาษฉนวนสำหรับหม้อแปลงช่วยลดความเครียดสนามไฟฟ้าในช่องจ่ายน้ำมันที่อยู่ติดกันและเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่ก่อให้เกิดการดีสชาร์จบางส่วน มีเสถียรภาพจึงสามารถติดตั้งได้อย่างรวดเร็วและปลอดภัย รัศมีสามารถเลือกได้เพื่อให้สอดคล้องกับรูปแบบสนามไฟฟ้าให้ได้มากที่สุด

ฉ.2.1. วงแหวนที่ป้องกันขอบของขดลวด

วงแหวนเหล่านี้เพิ่มความคงทนทางไฟฟ้าแนวแกนของขดลวด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเกี่ยวกับความเครียดอิมพัลส์ ช่วยเพิ่มการถ่ายเทประจุผ่านตัวนำระหว่างแต่ละขดลวดและการระบายความร้อน เนื่องจากความเสถียรภาพ เมื่อมีแรงยึดเข้ากับขดลวดช่องน้ำมันยังคงเปิดอยู่และไม่ถูกปิดเมื่อเกิดการฉีกขาดของฉนวน

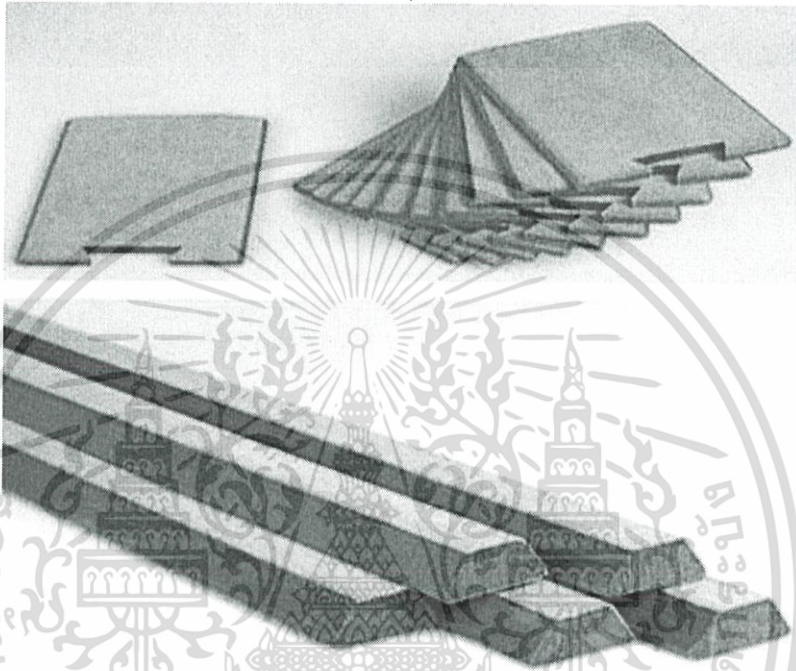
ฉ.3. กระดาษฉนวนหุ้มอิเล็กทรอนิกส์โทรตองแดงที่เชื่อมต่อระหว่างปลายขดลวดไฟฟ้าแรงสูงและบุชชิ่ง

กระดาษฉนวนสำหรับหม้อแปลงจะห่อตัวขดอิเล็กทรอนิกส์โทรตองแดง ส่งผลให้เกิดคุณสมบัติทางฉนวนที่ดี รูปร่างของอิเล็กทรอนิกส์โทรตองแดงสามารถเข้ากันได้กับสนามไฟฟ้าทุกรูปแบบ ช่วยให้สามารถจัดวางได้ง่ายและมีขนาดกะทัดรัด

ฉ.4. แถบกระดาษฉนวนสำหรับหม้อแปลง (Strips)

แถบสีเหลี่ยมผืนผ้าจะติดตั้งไว้ในช่องน้ำมันตามแนวขวางเป็นตัวกั้นสำหรับทรงกระบอก แถบพิเศษที่ใช้พันระหว่างกระบอกและขดลวด ซึ่งนอกเหนือจากการทำหน้าที่เป็นตัวกั้นระหว่างกระบอกและขดลวด (สำหรับใช้ในการระบายความร้อน) ยังช่วยให้สเปเซอร์ถูกยึดด้วยกลไก เนื่องจากแถบอยู่ในความเข้มสนามไฟฟ้าสูง พื้นผิวจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำให้ปราศจากเส้นใยและถูกทำให้มีขอบโค้งมนไม่มีขอบคม

ฉ.4.1. กระดาษคั่นขดลวดในหม้อแปลง (Spacers)

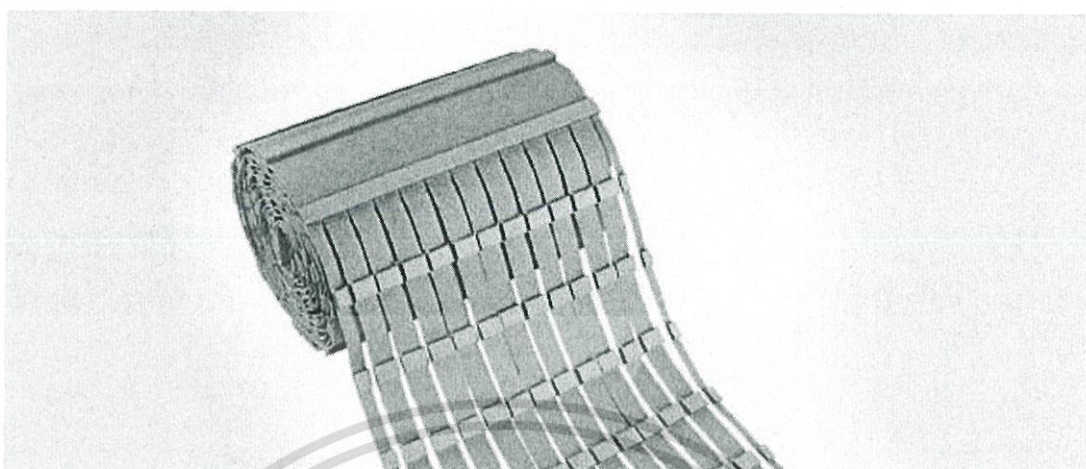


รูปที่ ฉ.3 รูปแสดง Strips (ด้านล่าง) และ Spacers (ด้านบน)

ที่มา : <http://www.ramanboards.com/Images/machinedComponents.jpg>

ขดลวดจะต้องใช้พื้นที่ว่างเพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการลัดวงจรจึงต้องมีตัวที่คอยกั้นระหว่างขดลวดเพื่อให้เกิดพื้นที่ระหว่างขดลวด โดยแผ่นที่ใช้วางคั่นระหว่างขดลวดแต่ละแผ่นจะต้องไม่มีขอบคมเพื่อป้องกันไม่ให้ฉนวนเสียหาย

ฉ.4.2. Clackband และแถบวางขดลวด (Duct strip)



รูปที่ ฉ.4 รูปแสดง Clackband

ที่มา : http://www.pucaro.com/img/content/Produkte/prod_formteile-aus-presspan_noppenband_head.png

ในหลายกรณี การใช้ Clackband, Zahnband, Thermoform หรือ ladders ทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพความแข็งแรงของโครงสร้างขดลวดได้ และสามารถผลิตได้เร็วในทุกรูปแบบหรือทุกมิติ

ฉ.5. วงแหวนแคลมป์ปึงของกระดาศนวน (Clamping rings)



รูปที่ ฉ.5 รูปแสดงวงแหวนแคลมป์ปึงของกระดาศนวน

ที่มา : <http://www.transvick.com/images/18.jpg>

วงแหวนแคลมป์ปึงถูกนำมาใช้ในโครงสร้างของหม้อแปลงใหญ่ ประกอบกันด้วยวงแหวนที่ติดกันหลายๆชั้น โดยกดทับด้วยความดันสูง โดยไม่มีอากาศแทรกระหว่างวงแหวน และวงแหวนจะไม่มีข้อต่อตลอดแนววงแหวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉ.6. วงแหวนป้องกันโลหะ (Metallized shield rings)

วงแหวนโลหะที่ป้องกันฉนวนจะถูกแทรกด้วยกระดาษฉนวนในแต่ละชั้นหลังจากที่ใช้โลหะพิเศษเคลือบไว้ และคุณสมบัติพิเศษอีกประการคือช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการหดตัวของวงแหวน

ฉ.6.1. ตัวรองรับวงแหวน (Supporting rings)

ที่รองรับวงแหวนจะช่วยให้ความปลอดภัยกับวงแหวนให้ไม่ได้รับการกระทบกระเทือนสำหรับการพันขดลวดปกติ สามารถใช้ได้กับแบบปกติ หรือแบบโลหะก็ได้

ฉ.7. กระดาษฉนวนกั้นระหว่างส่วนประกอบของหม้อแปลง (Barrierboard)

ใช้แยกอุปกรณ์ระหว่าง tap changer และขดลวด วัสดุสามารถเป็นได้ทั้งแบบสี่เหลี่ยมหรือวงกลมก็ได้โดยสามารถใช้วิธีการผลิตแบบ multi-contact technology หรือ conventional screwed-terminal ก็ได้

ฉ.8. จมูกของกระดาษหม้อแปลง (Snouts)

ในส่วนของจมูกของกระดาษฉนวนนั้น เป็นสิ่งสำคัญในการพันขดลวดสำหรับหม้อแปลงแรงดันสูงเพื่อเป็นฉนวนให้กับหัวสาย(ทั้งส่วนกลางและส่วนบน) จมูกของกระดาษฉนวนสามารถผลิตได้ทุกรูปแบบและทุกขนาดโดย ประกอบไปด้วยวงแหวน และหมวกครอบ



รูปที่ ฉ.6 รูปแสดงจมูกของกระดาษหม้อแปลง

ที่มา : <http://images1.hellotrader.com/data2/MK/NE/MY-2936649/insulation-snout-used-for-power-transformer-500x500.jpg>

ฉ.8.1. สำหรับหุ้มหรือป้องกันอุปกรณ์ต่างๆ

วัสดุที่คลุมอุปกรณ์ซิลต์จะใช้เพื่อที่จะปกคลุมอุปกรณ์ซิลต์อื่นๆ ในแบบต่างๆ เช่น ใช้สำหรับคลุมฉนวนตัวถังของหม้อแปลง เพื่อที่จะทำให้เด่นชัดสำหรับอุปกรณ์แรงดันสูง และช่วยลดพื้นที่การจัดเก็บลงอย่างมาก นอกจากนี้ยังช่วยให้ราคาในการสร้างตัวถังหม้อแปลงลดลง และช่วยให้เป็นระเบียบมากยิ่งขึ้นและยังสามารถขนส่งได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉ.9. ระบบเชื่อมต่อตัวนำโดยสมบูรณ์ (Complete terminal lead systems)

ฉ.9.1. Faltenbalg

เครื่องป้องกันหยดของเหลวถูกแยกไว้โดย faltenbalg ทำหน้าที่กั้นน้ำมันจากพื้นที่ว่างระหว่างแกนและขดลวดของหม้อแปลง และจากพื้นที่ว่างบุชชิ่ง มีข้อดีดังนี้

- 1) หม้อแปลงที่ถูกเติมด้วยน้ำมันแล้วจะสามารถทำการขนส่งได้โดยไม่เกิดความเสียหายหรือรั่วซึมเพราะน้ำมันจะไม่สามารถซึมออกมาจากตัวถังของหม้อแปลงได้
- 2) หัวจ่ายแรงดันจะยังคงถูกจุ่มอยู่ในฉนวนน้ำมัน และเป็นวิธีที่ดีที่สุดในการป้องกันความชื้น หรือสิ่งปนเปื้อนต่างๆ





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

แนวโน้มการก่อตัวของแก๊ส (Gassing tendency)

ข.1. วิธีการทดสอบ

วิธีการทดสอบการก่อตัวของแก๊สของฉนวนเหลวภายใต้ความเครียดสนามไฟฟ้าและไอออนไนเซชัน ซึ่งการทดสอบนี้จะวัดอัตราการคายและดูดซึมของแก๊สในฉนวนเหลวเมื่ออยู่ภายใต้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เพียงพอที่จะก่อให้เกิดไอออนไนเซชัน ในเซลล์ที่มีรูปทรงเฉพาะ ซึ่งไม่ต้องพิจารณาฟองอากาศที่เกิดจากการอิมมิดีเอชันของฉนวนเหลว และในการทดสอบนี้ไม่ได้แก้ไขปัญหาด้านความปลอดภัยทั้งหมด ถ้ามีความเกี่ยวข้องกับการใช้งานจะอยู่ภายใต้มาตรฐาน ASTM D924 ในการพิจารณาและสร้างความปลอดภัย

ฉนวนเหลวภายใต้รัศมีมีความเครียดสนามไฟฟ้าหลังจากอิมมิดีเอชันด้วยแก๊สซึ่งปกติมักจะเป็นแก๊สไฮโดรเจน พื้นที่ของแก๊สเหนือฉนวนฟิล์มเหลวจะแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากความเครียดสนามไฟฟ้าและพื้นผิวของของเหลวที่ผิวหน้าระหว่างฉนวนเหลวกับแก๊สจะเกิดการการระดมไอออนไนส์ (Ion bombardment) ซึ่งการคายและดูดซึมของแก๊สจะคำนวณจากปริมาตรต่อหน่วยของเวลาจากการเปลี่ยนแปลงของความดันซึ่งพิจารณาจากเวลาที่ตัวอย่างทั้งสองที่แก๊สเกิดการก่อตัวบนตัวอย่างเดียวกัน วิธีการทดสอบนี้จะระบุค่าของเหลวฉนวนจะดูดซับแก๊สหรือคายแก๊สภายใต้สภาวะทดสอบเดียวกัน

ข.2. การนำไปใช้งาน

1) สำหรับบางการประยุกต์ใช้งานเมื่อฉนวนเหลวภายใต้ความเครียดที่การแผ่กระจายสนามแรงดันสูงจะสามารถพิจารณาการคายและการดูดซึมแก๊สภายใต้เงื่อนไขเฉพาะแต่ในปัจจุบันความสัมพันธ์ของผลทดสอบกับอุปกรณ์ยังมีข้อจำกัดอยู่

2) ในการทดสอบนี้ไฮโดรเจนรวมไปถึงไฮโดรคาร์บอนน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะถูกสร้างขึ้นโดยเกิดการการระดมไอออนไนส์ของบางโมเลกุลของฉนวนเหลวและถูกดูดซึมโดยปฏิกิริยาเคมีของโมเลกุลของฉนวนเหลวอื่น โดยผลที่ได้คือผลสุทธิของปฏิกิริยาทั้งสองแบบนี้ โมเลกุลอะโรมาติกหรือส่วนที่ไม่อิมมิดีเอชันของโมเลกุลในฉนวนเหลวเป็นปัญหาในปฏิกิริยาการดูดซึมของไฮโดรเจน ซึ่งทั้งลักษณะและความเข้มข้นของโมเลกุลจะส่งผลต่อผลของการเกิดแก๊ส นอกจากนี้โมเลกุลที่อิมมิดีเอชันจะมีแนวโน้มที่จะเกิดการคายแก๊สเกิดขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างส่วนอะโรมาติกและส่วนที่ไม่อิมมิดีเอชันของฉนวนเหลวและการก่อตัวของแก๊สไม่สามารถใช้สำหรับการประเมินเชิงปริมาณของทั้งสองในของเหลวฉนวนได้

3) การทดสอบนี้จะวัดแนวโน้มของฉนวนเหลวที่เกิดการคายและดูดซึมแก๊สภายใต้เงื่อนไขของความเครียดสนามไฟฟ้าและการเกิดไอออนไนเซชันโดยมีพื้นฐานบนปฏิกิริยาของไฮโดรเจนซึ่งเป็นแก๊สหลักในการเกิดการคายประจุบางส่วน สำหรับเงื่อนไขของการกระตุ้นไฮโดรเจนแก๊สเปรียบเทียบกับแก๊สอื่น เช่น ไนโตรเจน เพื่อเพิ่มการแบ่งแยกความแตกต่างในรูปแบบการคายและการดูดซึมของแก๊ส ลักษณะการดูดซึมของไฮโดรเจนในการทดสอบจะถูกนำมาใช้เพื่อประโยชน์ในการลดความล้มเหลวของอุปกรณ์ เคเบิลพิเศษ และ ตัวเก็บประจุ อย่างไรก็ตามข้อได้เปรียบดังกล่าวของเหลวฉนวนของหม้อแปลงไม่ได้ถูกกำหนดไว้อย่างชัดเจนและไม่มีความสัมพันธ์เชิงปริมาณที่เกิดขึ้นระหว่างแนวโน้มการก่อตัวของแก๊สตามที่ระบุในวิธีการทดสอบและประสิทธิภาพของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งการทดสอบนี้ไม่เกี่ยวข้องกับการเกิดฟองอากาศซึ่งอาจเกิดขึ้นจากกระบวนการทางกายภาพที่เกี่ยวข้องกับการอิมมัลชันของแก๊สในน้ำมันหรือการเกิดฟองอากาศไอน้ำจากฉนวนที่ขึ้น

ข.3. การนำไปใช้งาน

อุปกรณ์สำหรับการทดสอบแก๊สที่ซึ่งฉนวนเหลวอิมมัลชันหลังจากให้ความเครียดสนามไฟฟ้าแก่ฉนวนเหลวแสดงในรูปที่ 1

ข.3.1. อุปกรณ์สำหรับบรรจุแก๊สและบิวเรตต์แสดงในรูปที่ 1 และขนาดแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งอุปกรณ์สำหรับบรรจุแก๊สประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

1) อุปกรณ์สำหรับบรรจุแก๊สทำจากแก้วบอโรซิลิเกต (Borosilicate glass) ซึ่งส่วนจุดต่อที่เกิดความเครียดมีท่อเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 16 mm. และ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 18 mm. ซึ่งอุปกรณ์นี้มีอิเล็กโทรดนอก (กราวด์) จะทาหรือชุบเงินที่มีร่องแนวตั้งสำหรับสังเกตระดับของฉนวนเหลว และ แถบนำไฟฟ้า (Conduction band) เป็นโลหะสำหรับต่อกราวด์

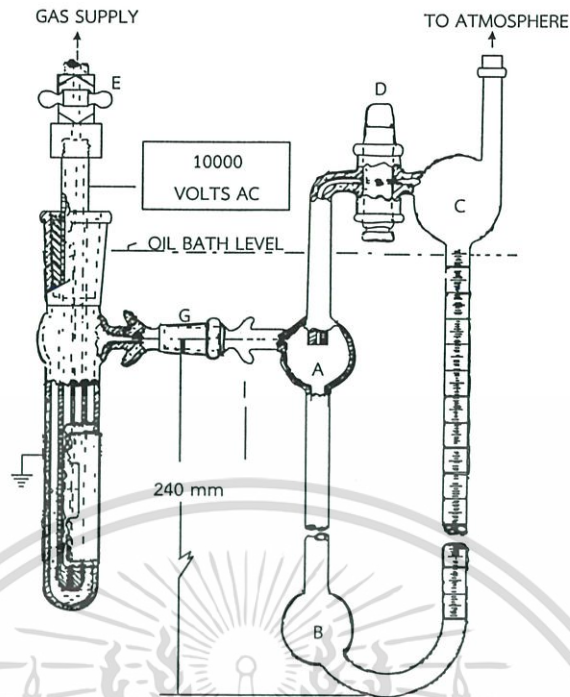
2) อิเล็กโทรดแรงสูงแบบกลวง (Hollow high voltage electrode) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 10 ± 0.1 mm. และทำมาจากท่อตะปูสเตนเลสไร้ตะเข็บ (No.304 stainless steel) และประกอบด้วยหลอดคาปิลลารีสเตนเลสขนาด 18 gage (18-gage stainless steel) เป็นช่องทางเดินสำหรับแก๊ส อิเล็กโทรดจะถูกรองรับและแกนกลางมีกลไกปลั๊กแบบทีเอฟอี-ฟลูออโรคาร์บอน (TFE-fluorocarbon) ขนาด 24/40 ที่มีความแม่นยำ นอกจากนี้มีแท่งวาล์ว (E) ขนาด 1/8 นิ้วที่มีช่องทางเข้าแก๊สอยู่ด้านบนของอิเล็กโทรด

ข.3.2. บิวเรตต์สำหรับบรรจุแก๊ส (รูปที่ 1) ทำจากแก้วบอโรซิลิเกตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 7 mm. ที่มีสเกลติดอยู่, ข้อต่อเรียวที่เป็นกระจกเทมเปอร์ (G) สำหรับเชื่อมกับอุปกรณ์สำหรับบรรจุแก๊ส, วาล์วปิด-เปิดช่องทางเดินแก๊ส (D) และ กระเปาะแก้ว (A, B, C)

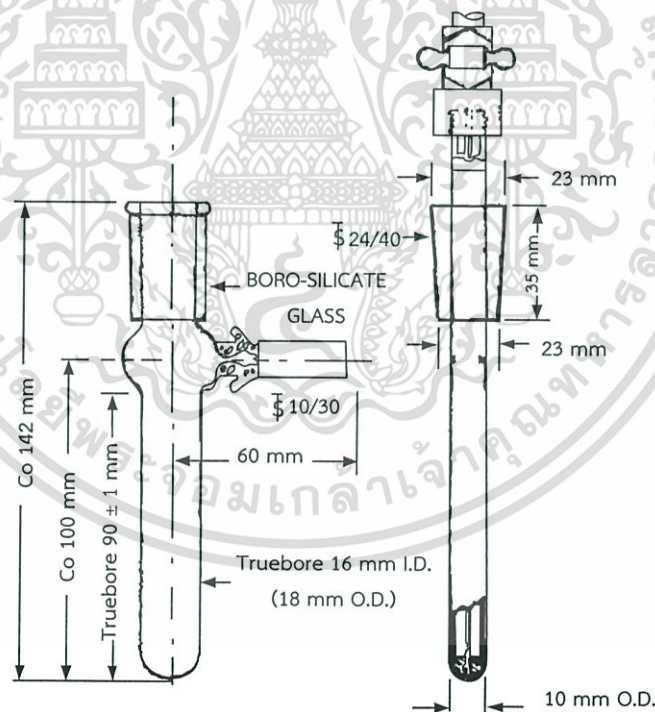
ข.3.3. อ่างน้ำมันควบคุมอุณหภูมิเพื่อคงอุณหภูมิห้องทดสอบที่ ± 0.5 °C ในอ่างจะมีเครื่องกวนสารใส่อยู่ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิได้เพื่อรักษาความร้อนให้คงที่ สำหรับอุปกรณ์สำหรับบรรจุแก๊สและเทอร์โมมิเตอร์จะมีการเก็กลูกกันอย่างเหมาะสมให้มีอุณหภูมิ 0.1 °C ซึ่งในการทดสอบอุณหภูมิจะมีไวต่อสิ่งกระตุ้นมาก ทำให้มันสำคัญมากที่ต้องมีการสอบเทียบเครื่องมือวัดตามมาตรฐาน เช่น NIST

ข.3.4. ซิลด์แบบโปร่งใส สำหรับป้องกันการสัมผัสกับแรงดันสูง

ข.3.5. หม้อแปลงแรงดันสูง ที่แรงดันทดสอบมีความถี่ในช่วง 45 – 65 Hz หม้อแปลงและอุปกรณ์ควบคุมจะถูกออกแบบต้องมีขนาดและการออกแบบเช่นเดียวกับชิ้นทดสอบที่อยู่ในวงจร ซึ่งรูปร่างของแรงดันจะรูปไซน์คล้ายกันทั้งสองครึ่งไซเคิล อัตราส่วนค่า Peak-to-rms จะเท่ากับ $\sqrt{2} \pm 0.5$ % ขณะที่ตั้ง 10 RV ± 2 %



รูปที่ ข.1 ชุดทดสอบและมาโนมิเตอร์



รูปที่ ข.2 รายละเอียดขนาดอุปกรณ์สำหรับบรรจุแก๊สและอิเล็กโตรดภายใน(อิเล็กโตรดแรงสูง)

ข.4. ตัวทำปฏิกิริยา

1) ไฮโดรเจน (เป็นแก๊สที่อิมตัว ซึ่งอาจใช้ในไนโตรเจน, คาร์บอนไดออกไซด์, อาร์กอน หรืออากาศ แทนได้), ออกซิเจนอิสระ

2) ไดเอทิลฟทาเลต (Diethyl phthalate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) 2 - โพรพานอล (2-Propanol)
- 4) จาระบีความดันไอต่ำ เช่น จาระบีซิลิโคนแบบ High vacuum
- 5) ยกเว้นที่ระบุไว้เป็นตัวทำปฏิกิริยาอย่างอื่น มีวัตถุประสงค์เพื่อให้สารละลายทั้งหมด สอดคล้องกับเกรดวิเคราะห์ของสมาคมเคมีของอเมริกา

ข.5. ขั้นตอนการเตรียมอุปกรณ์สำหรับทดสอบ

1) ทำความสะอาดอุปกรณ์สำหรับบรรจุแก๊สโดยขั้นแรกทำการล้างภายในและภายนอก ด้วยตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนที่เหมาะสม เช่น เฮปเทน เพื่อที่จะทดสอบความเป็นไดอิเล็กตริกของของเหลว ต่อมาเติมสารละลายไฮโดรคาร์บอนลงไปและขัดเพื่อกำจัดขจัดคราบมันจากการทดสอบ ก่อนหน้านี้ ทำความสะอาดข้อต่อเรียวโดยระวังอย่าให้มีไขมันจากจาระบีเข้ามา จากนั้นล้างออกอีกครั้งด้วยตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนและทำการเป่าแห้งด้วยระบบอัดอากาศ ขั้นสุดท้ายทำการตรวจสอบอิเล็กทรอนิกส์ที่ตรงและซ่อมแซมถ้าจำเป็น

2) ทำความสะอาดอิเล็กทรอนิกส์แรงสูงแบบกึ่งวงโดยการเป่าด้วยตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนที่เหมาะสมผ่านหลอดคอปิลลารีด้วยการอัดอากาศ ทำการล้างฉนวนเหลวออกจากอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด ด้วยตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนที่เหมาะสม เช่น เฮปเทน และเช็ดคราบมันออกให้หมดด้วยกระดาษทิชชู จากนั้นขัดผิวด้วยผ้าชุบ 2-โพรพานอล ถ้ามีเครื่องหมายบนก้อนอิเล็กทรอนิกส์เตนเลสต้องทำการเช็ดด้วยอุปกรณ์ที่เหมาะสม เช่น Buffing wheel โดยทำการเช็ดทำความสะอาดสารเคมีอย่างระมัดระวังด้วยกระดาษทิชชูชุบด้วยตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนที่เหมาะสม เช่น เฮปเทน

3) ใช้การเคลือบจาระบีความดันไอต่ำทำบริเวณข้อต่อเรียวที่เป็นกระจกเทมเปอร์ (G) , วาล์วปิด-เปิดช่องทางเดินแก๊ส (D) รวมทั้งอุปกรณ์สำหรับบรรจุแก๊สและบิวเรต แต่ห้ามสอดเข้าอิเล็กทรอนิกส์ภายในอุปกรณ์สำหรับบรรจุแก๊ส และ ห้ามจาระบีซิลิโคนในบิวเรต, อุปกรณ์สำหรับบรรจุแก๊ส, อิเล็กทรอนิกส์ และ น้ำมัน

4) ใส่บิวเรตให้เต็มครึ่งหนึ่งด้วยไดเอทิลพทาเลท

ข.6. ขั้นตอนการทดลอง

1) เทฉนวนเหลวตัวอย่างปริมาณ 5 ± 0.5 mL ลงในอุปกรณ์สำหรับบรรจุแก๊สโดยใช้เข็มฉีดยาแก้ว (Hypodermic syringe)

2) เคลือบปลั๊กแบบทีเอฟอี-ฟลูออโรคาร์บอนของอิเล็กทรอนิกส์ด้วยฉนวนเหลวทดสอบหรือจาระบีความดันไอต่ำและ ใส่อิเล็กทรอนิกส์ลงในอุปกรณ์สำหรับบรรจุแก๊ส ซึ่งพบว่าฉนวนเหลวทดสอบ 2-3หยดที่ด้านบนปลั๊กแบบทีเอฟอี-ฟลูออโรคาร์บอนทำหน้าที่เป็นตัวปิดผนึกแก๊ส ถ้าพบแก๊สรั่วใช้น้ำมันอาจจะช่วยตรวจสอบผ่านฟองแก๊สที่ปรากฏออกมาบนยอดของปลั๊กแบบเทฟลอน (Teflon plug)

3) นำอ่างน้ำมันที่มีอุณหภูมิ 80°C ซึ่งสำหรับบางการใช้งานอาจใช้ที่อุณหภูมิ 60°C ใดๆ ก็ตามต้องใช้อุณหภูมิทดสอบในข้อ 7.4 จากนั้นทำการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับบรรจุแก๊สและบิวเรตตามรูปที่ 1 และต่ออิเล็กทรอนิกส์ภายนอกกับกราวด์

4) ติดตั้งช่องทางเดินแก๊สและเชื่อมต่อจากภายนอก เมื่อใช้ไฮโดรเจนนั้น การติดตั้งช่องแก๊สควรใส่มาจากด้านนอกอาคารโดยตรงหรือผ่านตู้ดูดควัน

5) ปิดวาล์วช่องทางเดินแก๊ส (D) และ เปิดวาล์ว (E) เพื่อให้แก๊สเกิดการอึดตัวและมีเกิดฟองอากาศเกิดขึ้น จนกระทั่งฉนวนเหลวทดสอบและของเหลวในบิวเรตอยู่ในอัตราคงที่ (ประมาณ 3 ฟองอากาศ/วินาที) เป็นระยะเวลา 10 นาที

6) เปิดวาล์วช่องทางเดินแก๊ส (D) และ ให้ฟองอากาศทำให้แก๊สเกิดการอึดตัวในของเหลวทดสอบเป็นระยะเวลา 5 นาที

7) หลังจากเกิดฟองแก๊สเป็นระยะเวลารวม 15 นาที ปิดวาล์ว (E) และ วาล์วช่องทางเดินแก๊ส (D) ทำให้ระดับของเหลวในสองข้างของบิวเรต มีค่าเท่ากัน

8) ต่อแรงดันสูงไปยังตรงกลางอิเล็กโตรด

9) วางซิลด์แบบโปร่งใสให้ตรงตำแหน่งและอ่านค่าจากบิวเรตหลังจากตรวจสอบอุณหภูมิของอ่างน้ำมัน (เพื่ออำนวยความสะดวกในการอ่านบิวเรต พบว่าต้องทำให้สเลชัดเจนและใช้แว่นขยายหรืออุปกรณ์ขยายขนาดเล็ก)

10) ปรับเพิ่มแรงดันสูง 10 kV ทำการบันทึกเวลา, แรงดัน และระดับบิวเรต จากนั้นสังเกตช่องของอิเล็กโตรดภายนอกเพื่อสังเกตการเริ่มต้นของปฏิกิริยาการก่อตัวของแก๊ส

11) หลังจาก 10 นาที ทำการบันทึกระดับบิวเรต, แรงดัน และ อุณหภูมิของอ่าง

12) หลังจากเพิ่มอีก 50 นาที ทำการบันทึกระดับบิวเรต, แรงดัน และ อุณหภูมิของอ่างอีกครั้ง จากนั้นปรับลดแรงดัน และปิดเครื่องจ่ายแรงดัน

13) เพื่อให้แน่ใจว่าอุปกรณ์ทำงานได้อย่างปกติต้องตรวจสอบระดับบิวเรตทุกๆ 10 นาที จนกระทั่งการทดสอบสิ้นสุด พล็อตกราฟค่าที่อ่านได้กับเวลาควรให้มีลักษณะเป็นเส้นตรงที่สมเหตุสมผล ถ้ามีช่วงกว้างและกระจายตัว ควรตรวจสอบอุปกรณ์และทำการทดสอบใหม่

14) สำหรับน้ำมันที่มีแนวโน้มการก่อตัวของแก๊สต่ำมาก อาจจำเป็นต้องหยุดการทดสอบเพื่อระบายอากาศไปยังมาโนมิเตอร์ ผลรวมของการดูดซึมของแก๊ส คือ การดูดซึมของแก๊สก่อนและหลังจากการระบาย

15) ทำขั้นตอนข้อ 6.1 -6.13 ซ้ำ เพื่อทดลองตัวอย่างทดสอบใหม่

ข.7. การคำนวณ

1) แนวโน้มการก่อตัวของแก๊สหาได้จาก

$$G = \frac{(B_{60} - B_{10})K}{T}$$

(ข.1)

โดยที่

G = ค่าแนวโน้มการก่อตัวของแก๊ส, $\mu L / \text{min}$

B_{60} = ค่าที่อ่านจากบิวเรตที่เวลาทดสอบ 60 นาที

B_{10} = ค่าที่อ่านจากบิวเรตที่เวลาทดสอบ 10 นาที

K = ค่าคงที่ของบิวเรต = $\mu L / \text{min}$ ซึ่งคำนวณจาก (*หมายเหตุ 1)

T = เวลาทดสอบของอัตราการก่อตัวของแก๊ส, $\text{min} = 60 - 10 = 50 \text{ min}$

ค่าแนวโน้มการก่อตัวของแก๊สเป็นบวกจะแสดงให้เห็นว่ามีการคายแก๊ส และถ้าค่าแนวโน้ม

การก่อตัวของแก๊สเป็นลบจะแสดงให้เห็นว่ามีแก๊สถูกดูดซึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ทำการเฉลี่ยค่า G ทั้งสองค่า ถ้าค่าเฉลี่ยแตกต่างกันมากกว่า $0.3 \pm 0.26|X|$ จะต้องทำการทดสอบซ้ำ ซึ่ง $|X|$ เป็นค่าการดูดซึมของการกำหนดซ้ำในหน่วย $\mu\text{L} / \text{min}$ การวิเคราะห์ซ้ำยากที่จะตรวจจับเมื่อมีปัญหาเกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ สมการที่เป็นตัวกำหนดว่าการวิเคราะห์ซ้ำได้รับการยอมรับแล้วจะอยู่บนพื้นฐานการทดลองทั่วไปและมันไม่ได้มาจากการทำงานแบบเวียนเทียน (Round-Robin)

3) ใช้ (**หมายเหตุ 2) ในการพิจารณาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์และฉนวนเหลว

4) สิ่งที่ต้องบันทึกในการทดลอง คือ อุณหภูมิทดสอบ, แรงดันทดสอบและความถี่, แก๊สที่อิ่มตัว, ระยะเวลา, ค่าเฉลี่ยอัตราค่าของแก๊ส

(*หมายเหตุ 1) การคำนวณค่าคงที่ของบิวเรต (K) สำหรับมาโนมิเตอร์

1) ทำความสะอาดมาโนมิเตอร์ด้วยเฮปแทนหรือตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนระเหยที่เหมาะสม และอบแห้งในตู้ดับที่ประมาณ 100°C เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 2 ชั่วโมง

2) ถูมาโนมิเตอร์ในตำแหน่งตั้งตรงโดยที่สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก จากเตรียมใส่น้ำกลั่นโดยใช้กระบอกฉีดยาและเข็มแนบกับหลอดพลาสติกให้พอดีกับเข็ม เส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดควรจะใส่ให้พอดีในมาโนมิเตอร์ที่ 1/32 ของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในกับ 3/32 ของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกควรที่จะเหมาะสมกัน จากนั้นกดหลอดพลาสติกลงไป 7 cm แล้วทำเครื่องหมายไว้ และทำการเทน้ำกลั่นลงไปถึงบริเวณที่ทำเครื่องหมาย ควรระวังไม่ให้ด้านข้างของแก้วเป็ยกขณะที่หลอดพลาสติกถูกดันเข้าไปและขณะที่นำออกจากหลอดแก้วของมาโนมิเตอร์

3) W_1 เป็นน้ำหนักของมาโนมิเตอร์และน้ำ ต้องระวังให้มาโนมิเตอร์อยู่ในตำแหน่งตั้งตรงตลอดเวลาเพื่อหลีกเลี่ยงการเป็ยกน้ำของด้านข้าง

4) ใส่เฮปแทนเพิ่ม 3 cm โดยใช้กระบอกฉีดยา, เข็ม และหลอดอีกครั้ง โดยต้องระวังไม่ให้ด้านข้างของหลอดแก้วเป็ยก

5) W_2 เป็นน้ำหนักมาโนมิเตอร์และสารที่ใส่ตั้งแต่ข้อ 1-4, S_H เป็นจุดสูงสุดของเฮปแทน และ S_L เป็นจุดต่ำสุดของเฮปแทน

6) คำนวณค่าคงที่ K ในหน่วย $\mu\text{L} / \text{min}$ จาก

$$K = \frac{(W_1 - W_2)10^3 / G}{S_H - S_L} \quad (\text{ข.2})$$

โดยที่

G = ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของตัวทำละลายใช้ที่อุณหภูมิสอบเทียบ)

7) ทำข้อ 4-5 ซ้ำเป็นจำนวน 2 ครั้ง

8) ทำการเฉลี่ยค่า K ทั้ง 3 ค่า ซึ่งค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของ K ห้ามห่างกันเกิน 5% ถ้าเกิน

ต้องทำการทดสอบใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(**หมายเหตุ 2) การคำนวณค่าความเครียดสนามไฟฟ้าคำนวณได้จาก

$$G_x = \frac{1}{XK_1} \frac{V}{\frac{\ln d_2/d_1}{K_1} + \frac{\ln d_3/d_2}{K_2}} \quad (\text{ข.3})$$

โดยที่

G_x = ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า, kV/cm ที่ระยะห่าง X จากแกนภายในของอิเล็กโตรด

V = แรงดันที่ป้อน, kV

K_1 = ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฉนวนเหลว = 2.2 (สำหรับน้ำมันแร่)

K_2 = ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของท่อแก๊ส = 5.3

d_1 = เส้นผ่านศูนย์กลางอิเล็กโตรดภายใน

d_2 = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อแก๊สภายนอก

d_3 = เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อแก๊สภายนอก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ซ.

ความสามารถในการย่อยสลายโดยกระบวนการทางชีวภาพ (Biotic degradability)

ซ.1. ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย (Ready biodegradability)

ซ.1.1. การทดสอบที่ได้มาตรฐานเพื่อหาความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายของสารอินทรีย์ได้พัฒนาขึ้นโดยหลายองค์กรประกอบด้วย OECD (OECD Test Guideline 301A-F) , EU (C.4Tests), OPPTS (835.3110) และ ISO (9408,9439,10707)

ซ.1.2. การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายเป็นการทดสอบที่เคร่งครัดซึ่งจำกัดโอกาสที่จะเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพและการปรับตัวตามอากาศ

เงื่อนไขการทดสอบขั้นพื้นฐานคือ

- 1) ความเข้มข้นของสารทดสอบสูง (2-100 มก./ล)
- 2) สารทดสอบเป็นแหล่งของคาร์บอนและพลังงานเท่านั้น
- 3) ความเข้มข้นของสารเพาะเชื้อ (inoculum) ระดับต่ำถึงปานกลาง (104-108 เซลล์/มล.)

ไม่อนุญาตให้ปรับสารเพาะเชื้อมาก่อน

4) ระยะเวลาการทดสอบ 28 วันโดยมีกรอบเวลา 10 วัน สำหรับการเกิดการย่อยสลาย (ยกเว้นสำหรับวิธีการ MITII (OECD Test Guidelines 301C))

5) อุณหภูมิทดสอบน้อยกว่า 25 องศาเซลเซียส และระดับผ่านอยู่ที่ร้อยละ 70 (DOC removal) หรือร้อยละ 60 (O₂ demand or CO₂ evolution) ที่แสดงการเปลี่ยนแปลงเป็นแร่โดยสมบูรณ์ (คาร์บอนที่เหลืออยู่ของสารทดสอบคาดว่าจะถูกสร้างขึ้นเป็นชีวมวลที่กำลังเติบโต)

ซ.1.3. ผลเชิงบวกในการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายจะแสดงให้เห็นว่าสารจะย่อยสลายอย่างรวดเร็วในสิ่งแวดล้อม (OECD Test Guidelines)

ซ.1.4. การทดสอบ BODs (เช่น การทดสอบ EU C.5) อาจจะแสดงให้เห็นว่าสารสามารถย่อยสลายได้ง่ายหรือไม่ ในการทดสอบนี้จะใช้ความต้องการออกซิเจนเคมีชีวภาพในระยะเวลา 5 วัน เปรียบเทียบกับความต้องการออกซิเจนโดยทฤษฎี (Theoretical Oxygen Demands หรือ ThOD) หรือหากไม่มีค่านี้ก็เปรียบเทียบกับความต้องการออกซิเจนเคมี (Chemical Oxygen Demand หรือ COD) เนื่องจากการทดสอบนี้จะสมบูรณ์ภายใน 5 วัน ดังนั้นระดับผ่านที่ระบุในเกณฑ์การจำแนกประเภทความเป็นอันตรายที่ร้อยละ 50 จะต่ำกว่าการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย

ซ.1.5. การทดสอบการคัดเลือก (Screening test) สำหรับความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพในน้ำทะเล (OECD Test Guideline 306) อาจทำการทดสอบขนานไปกับการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย สารที่ถึงระดับผ่านใน OECD Test Guideline 306 (เช่น มากกว่าร้อยละ 70 DOC removal หรือมากกว่าร้อยละ 60 ของความต้องการออกซิเจนโดยทฤษฎี) อาจถือได้ว่าสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย เนื่องจากศักยภาพของการย่อยสลายในน้ำทะเลโดยปกติจะต่ำกว่าการทดสอบการย่อยสลายในน้ำจืด

ช.2. ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพโดยธรรมชาติ (Inherent biodegradability)

ช.2.1. การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพโดยธรรมชาติ ออกแบบมาเพื่อประเมินว่าสารมีศักยภาพในการย่อยสลายทางชีวภาพหรือไม่ ตัวอย่างของการทดสอบดังกล่าวคือ OECD Test Guidelines 302A-C tests, การทดสอบ EU C.9 และ C.12 และ ASTM E 1625-94 Test

ช.2.2. เงื่อนไขของการทดสอบขั้นพื้นฐานที่เอื้อต่อการประเมินศักยภาพของการย่อยสลายทางชีวภาพโดยธรรมชาติ คือ

- 1) การได้รับสัมผัสของสารทดสอบต่อสารเพาะเชื้อ (inoculum) เป็นเวลานานขึ้นเพื่อยอมให้มีการปรับตัวภายในช่วงระยะเวลาทดสอบ
- 2) ความเข้มข้นของจุลินทรีย์สูง
- 3) อัตราส่วนสาร / ชีวมวลที่เหมาะสม

ช.2.3. ผลในเชิงบวกของการทดสอบบ่งชี้ว่าสารทดสอบจะไม่คงอยู่ในสิ่งแวดล้อมตลอดไป อย่างไรก็ตามการย่อยสลายทางชีวภาพที่รวดเร็วและสมบูรณ์ไม่สามารถคาดหวังได้ว่าจะเกิดขึ้นจริง ผลการทดสอบที่แสดงค่าการเปลี่ยนเป็นแรมมากกว่าร้อยละ 70 บ่งชี้ถึงศักยภาพของการย่อยสลายทางชีวภาพที่ดีมาก (Ultimate biodegradability) การย่อยสลายที่มากกว่าร้อยละ 20 บ่งชี้ว่าเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพโดยธรรมชาติในขั้นแรก และผลการทดสอบที่น้อยกว่าร้อยละ 20 บ่งชี้ว่าสารนั้นยังคงอยู่ต่อไป ดังนั้นผลการทดสอบในเชิงลบจึงหมายความว่า สารไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (OECD Test Guidelines)

ช.2.4. ในหลายๆการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพโดยธรรมชาติ จะสามารถวัดการหายไปของสารทดสอบได้เท่านั้น ผลการทดสอบเหล่านี้จะแสดงถึงความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพขั้นแรกเท่านั้น ดังนั้นผลผลิตที่เกิดจากการย่อยสลายที่ยังคงมีอยู่อาจจะเกิดขึ้นไม่มากก็น้อย การย่อยสลายทางชีวภาพขั้นแรกของสารไม่ใช่การบ่งชี้ถึงความสามารถในการย่อยสลายขั้นสุดท้ายในสิ่งแวดล้อม

ช.2.5. การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพโดยธรรมชาติของ OECD มีวิธีการที่แตกต่างกันมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งการทดสอบ MITI II (OECD Test Guideline 302(C) ใช้ความเข้มข้นของสารเพาะเชื้อ (Inoculum) ที่สูงกว่าในการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายที่สอดคล้องกันของ MITI (OECD Test Guideline 301 C) ถึง 3 เท่า การทดสอบของ Zahn-Wellens (OECD Test Guideline 302 B) ก็เป็นการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพโดยธรรมชาติที่ไม่ดีเช่นกัน อย่างไรก็ตามแม้ว่าศักยภาพของการย่อยสลายในการทดสอบเหล่านี้จะไม่แย่กว่าการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายมากนัก แต่ผลการทดสอบก็ไม่สามารถใช้กับเงื่อนไขในการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายและในสิ่งแวดล้อมได้

ข.3. ผลที่ขัดแย้งกันจากการทดสอบแบบคัดกรองเบื้องต้น

ข.3.1. ในสถานการณ์ที่มีข้อมูลการย่อยสลายมากขึ้นสำหรับสารเดียวกัน มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดผลการทดสอบที่ขัดแย้งกัน โดยทั่วไปผลที่ขัดแย้งกันของสารที่ทำการทดสอบหลายๆ ครั้ง โดยการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพที่เหมาะสมสามารถแปลข้อมูลได้โดย “วิธีการใช้น้ำหนักของหลักฐาน” ซึ่งอาจให้ความหมายว่าหากได้รับผลการทดสอบที่เป็นทั้งบวกและลบสำหรับสารในการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายได้โดยง่าย ควรใช้ข้อมูลที่มีคุณภาพสูงที่สุดและเป็นเอกสารข้อมูลที่ดีที่สุด เพื่อบ่งชี้ความสามารถในการย่อยสลายได้โดยง่ายของสาร อย่างไรก็ตามสามารถพิจารณาให้ผลลัพธ์ในทางบวกของการทดสอบของความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายนี้เป็นข้อมูลที่ใช้ได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงผลในทางลบเมื่อมีคุณภาพทางวิทยาศาสตร์ที่ดี และเงื่อนไขในการทดสอบกำหนดไว้อย่างดี เช่น เป็นไปตามเกณฑ์ที่เป็นแนวทางการรวมถึงการใช้การเพาะเลี้ยงเชื้อที่ไม่ได้สัมผัสสารก่อน ไม่มีการทดสอบแบบคัดกรองเบื้องต้นใดๆ ที่เหมาะสมสำหรับทดสอบสารได้ทุกชนิด และควรประเมินผลที่ได้จากการใช้ขั้นตอนการทดสอบที่ไม่เหมาะสมสำหรับสารเฉพาะอย่างระมัดระวังก่อนที่จะตัดสินใจนำไปใช้

ข.3.2. มีปัจจัยมากมายที่อาจจะอธิบายข้อมูลความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพที่ขัดแย้งกันจากการทดสอบแบบคัดกรองเบื้องต้น

- 1) การเพาะเลี้ยงเชื้อ
- 2) ความเป็นพิษของการทดสอบ
- 3) เงื่อนไขของการทดสอบ
- 4) ความสามารถในการละลายของการทดสอบ และ
- 5) การระเหยของสารทดสอบ

ข.3.3. ความเหมาะสมของ การเพาะเลี้ยงเชื้อ เพื่อย่อยสลายสารทดสอบขึ้นอยู่กับ การมีและปริมาณของตัวที่ทำให้ย่อยสลาย เมื่อได้รับ การเพาะเลี้ยงเชื้อจากสิ่งแวดล้อมที่ได้รับสัมผัสสารทดสอบมาก่อน การเพาะเลี้ยงเชื้อ อาจจะถูกปรับให้มีมากกว่า การเพาะเลี้ยงเชื้อ จากสิ่งแวดล้อมที่ไม่ได้รับสัมผัส เท้าที่เป็นไปได้ต้องสุ่มตัวอย่างของ การเพาะเลี้ยงเชื้อ จากสิ่งแวดล้อมที่ไม่ได้รับสัมผัสสาร แต่สำหรับสารที่ใช้ในปริมาณมากในทุกหนทุกแห่งและแพร่กระจายทั่วไปหรือแพร่กระจายอย่างต่อเนื่อง เรื่องนี้อาจจะยากหรือเป็นไปได้เลย เมื่อเกิดผลที่ขัดแย้งกัน ควรตรวจสอบต้นกำเนิดของการเพาะเลี้ยงเชื้อ เพื่อให้กระจ่างว่าความแตกต่างในการปรับของกลุ่มจุลินทรีย์ อาจเป็นผลหรือไม่

ข.3.4. ตามที่กล่าวไว้ข้างต้น สารหลายชนิดอาจเป็นพิษ หรือยับยั้ง การเพาะเลี้ยงเชื้อที่ระดับความเข้มข้นสูงที่ทดสอบในการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในการทดสอบ Modified MITI (I) (OECD Test Guideline 301C) และการทดสอบเครื่องมือที่ใช้วัดความดันของการหายใจ (OECD Test Guideline 301F) จะกำหนดความเข้มข้นไว้สูงถึง 100 มิลลิกรัม/ลิตร ความเข้มข้นของสารทดสอบที่ต่ำที่สุดถูกกำหนดไว้ในการทดสอบในขวดปิด (OECD Test Guideline 301D) ที่ใช้ 2-10 มิลลิกรัม/ลิตร อาจประเมินความเป็นไปได้ของผลกระทบเป็นพิษโดยเพิ่มการควบคุมความเป็นพิษในการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ หรือโดยเปรียบเทียบความเข้มข้นของการทดสอบกับข้อมูลการทดสอบความเป็นพิษกับจุลินทรีย์ เช่น การทดสอบการปิดกั้นการหายใจ (OECD Test Guideline 209) การทดสอบ Nitrification inhibition (ISO 9509) หรือการทดสอบการปิดกั้นแสงทางชีวภาพ (มาตรฐานสากล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISO 11348) หากไม่มีการทดสอบความเป็นพิษของจุลินทรีย์อื่นๆ เมื่อได้ผลที่ขัดแย้งกันอาจเป็นเพราะความเป็นพิษของสาร หากสารไม่ยับยั้งความเข้มข้นที่เป็นจริงทางสิ่งแวดล้อม การย่อยสลายมากที่สุดที่วัดได้ในการทดสอบแบบคัดกรองเบื้องต้น อาจใช้เป็นพื้นฐานของการจำแนกประเภท หากมีข้อมูลการทดสอบแบบจำลองในกรณีเช่นนี้ การพิจารณาข้อมูลเหล่านี้อาจมีความสำคัญเป็นการเฉพาะเนื่องจากน่าจะใช้ความเข้มข้นของสารที่ต่ำและไม่ยับยั้ง ดังนั้นจึงเป็นตัวบ่งชี้ที่น่าเชื่อถือของการย่อยสลายทางชีวภาพครึ่งชีวิตของสารภายใต้เงื่อนไขที่เป็นจริงทางสิ่งแวดล้อม

ซ.3.5. หากความสามารถในการละลายของสารทดสอบต่ำกว่าความเข้มข้นที่ใช้ในการทดสอบ พารามิเตอร์นี้อาจเป็นปัจจัยจำกัดสำหรับการย่อยสลายจริงที่วัดได้ ในกรณีนี้ผลจากการทดสอบที่ใช้เข้มข้นที่ต่ำที่สุดของสารทดสอบควรเป็นที่ยอมรับ เช่น การทดสอบในขวดปิด (OECD Test Guideline 310D) โดยทั่วไปการทดสอบ DOC Die-Away (OECD Test Guideline 301A) และการทดสอบแบบคัดกรองเบื้องต้นของ OECD ฉบับปรับปรุง (OECD Test Guideline 301E) ไม่เหมาะสมสำหรับทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของสารที่ละลายได้ต่ำ (เช่น (OECD Test Guideline 301)

ซ.3.6. ควรทำการทดสอบสารระเหยในระบบปิดเท่านั้น เช่น การทดสอบในขวดปิด (OECD Test Guideline 301D) การทดสอบ MITI (I) (OECD Test Guideline 301C) และการทดสอบเครื่องมือที่ใช้วัดความดันของการหายใจ (OECD Test Guideline 301F) ควรทำการประเมินผลที่ได้จากการทดสอบอื่นๆ อย่างระมัดระวัง และควรพิจารณาเฉพาะเมื่อสามารถแสดงให้เห็นได้ เช่น โดยค่าประมาณคงเหลือของมวลที่การเคลื่อนตัวออกของสารทดสอบไม่ได้เป็นผลของการระเหย

ซ.3.7. ความแปรปรวนของข้อมูลการทดสอบแบบจำลอง อาจจะมีข้อมูลการทดสอบแบบจำลองจำนวนมากสำหรับสารเคมีที่มีความสำคัญอยู่ในระดับสูงบางตัว ข้อมูลเหล่านี้มักจะให้ช่วงของครึ่งชีวิตในสื่อทางสิ่งแวดล้อม เช่น ดิน ตะกอน และ / หรือผิวน้ำ ความแตกต่างในครึ่งชีวิตที่สังเกตได้จากการทดสอบแบบจำลอง ที่ทดสอบสารชนิดเดียวกันอาจสะท้อนให้เห็นถึงความแตกต่างในเงื่อนไขของการทดสอบซึ่งทั้งหมดนี้อาจจะเกี่ยวข้องทางสิ่งแวดล้อม ควรเลือกครึ่งชีวิตที่เหมาะสมในช่วงของครึ่งชีวิตที่สังเกตได้ที่จุดปลายที่สูงกว่าจากการทดสอบดังกล่าวเพื่อการจำแนกประเภท โดยการใช้วิธีชั่งน้ำหนักของหลักฐาน โดยการพิจารณาถึงความเป็นจริงและความเกี่ยวข้องของการทดสอบที่ใช้โดยสัมพันธ์กับเงื่อนไขทางสิ่งแวดล้อม โดยทั่วไปข้อมูลการทดสอบแบบจำลองของผิวน้ำเป็นที่ยอมรับมากกว่าเมื่อเทียบข้อมูลการทดสอบแบบจำลองของตะกอนน้ำหรือดินในลักษณะที่เกี่ยวข้องกับการประเมินความสามารถในการย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วในสิ่งแวดล้อมทางน้ำ

ซ.4. กระบวนการตัดสินใจที่อิงเหตุและผล

กระบวนการตัดสินใจที่อิงเหตุและผลต่อไปนี้อาจใช้เป็นแนวทางทั่วไปที่เอื้อประโยชน์ต่อการตัดสินใจในส่วนที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วในสิ่งแวดล้อมทางน้ำ และการจำแนกประเภทสารเคมีที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมทางน้ำ

สารจะได้รับการพิจารณาว่าเป็นสารที่ไม่สามารถย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วยกเว้นว่าเป็นไปตามข้อกำหนดใดข้อหนึ่งดังต่อไปนี้อย่างน้อยที่สุด

1) สารสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายในการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพแบบ 28 วัน หากเป็นไปได้ที่จะทำการประเมินตามข้อมูลการทดสอบที่หาได้ต้องให้ผ่านถึงระดับผ่านของการทดสอบ (ร้อยละ 70 ของ DOC removal หรือ ร้อยละ 60 ของ ความต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่อนุญาดเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ออกซิเจนทางทฤษฎี) ภายในเวลา 10 วันนับจากเริ่มการย่อยสลายทางชีวภาพหากเป็นไปได้ ควรประเมินระดับผ่านภายในกรอบเวลา 14 วันหรือหลังจากสิ้นสุดการทดสอบ หรือ

2) สามารถย่อยสลายได้ขั้นสุดท้ายในการทดสอบแบบจำลองบนผิวน้ำ* โดยมีครึ่งชีวิตน้อยกว่า 16 วัน (สอดคล้องกับการย่อยสลายที่มากกว่าร้อยละ 70 ภายใน 28 วัน) หรือ

3) สารสามารถย่อยสลายได้ในระดับต้น (ทางชีวภาพหรือไม่ใช่ทางชีวภาพ) ในสิ่งแวดล้อมทางน้ำ โดยมีครึ่งชีวิตน้อยกว่า 16 วัน (สอดคล้องกับการย่อยสลายที่มากกว่าร้อยละ 70 ภายในเวลา 28 วัน) และสามารถแสดงให้เห็นว่าผลผลิตของการย่อยสลายไม่เป็นไปตามเกณฑ์ของการจำแนกว่าเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมทางน้ำ

หากไม่มีข้อมูลเหล่านี้ การย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วอาจแสดงให้เห็นได้หากมีการพิสูจน์เกณฑ์ใดเกณฑ์หนึ่งดังต่อไปนี้

4) สารสามารถย่อยสลายได้ขั้นสุดท้ายในการทดสอบแบบจำลองในตะกอนน้ำหรือดิน โดยมีครึ่งชีวิตน้อยกว่า 16 วัน (สอดคล้องกับการย่อยสลายที่มากกว่าร้อยละ 70 ภายใน 28 วัน)

5) ในกรณีที่มีข้อมูล BOD5 และ COD เท่านั้น อัตราส่วน BOD5 ต่อ COD จะมากกว่าหรือเท่ากับ 0.5 เกณฑ์เดียวกันใช้ได้กับการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย ในระยะเวลาที่สั้นกว่า 28 วัน หากค่าครึ่งชีวิตน้อยกว่า 7 วัน

หากไม่มีข้อมูลดังกล่าวข้างต้น ต้องพิจารณาให้เป็นสารที่ไม่สามารถย่อยสลายได้อย่างรวดเร็ว การตัดสินใจเช่นนี้อาจต้องสนับสนุนด้วยเกณฑ์ข้อใดข้อหนึ่งดังต่อไปนี้

1) สารไม่สามารถย่อยสลายได้โดยธรรมชาติในการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพโดยธรรมชาติหรือ

2) ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและการออกฤทธิ์เชิงปริมาณของสาร ทำนายว่าสารสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้อย่างช้าๆ เช่น สำหรับโปรแกรมความเป็นไปได้ที่จะย่อยสลายทางชีวภาพ คะแนนของการย่อยสลายได้อย่างรวดเร็ว (เป็นแบบที่เป็นเส้นตรง) น้อยกว่า 0.5 หรือ

3) สารได้รับการพิจารณาว่าไม่สามารถย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วโดยยึดหลักฐานทางอ้อม เช่น ความรู้จากสารที่มีโครงสร้างที่เหมือนกัน หรือ

4) ไม่มีข้อมูลอื่นใดเลยที่เกี่ยวกับความสามารถในการย่อยสลาย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ.
การบำรุงรักษาเชิงป้องกันสำหรับหม้อแปลง

จากการสำรวจสามารถสรุปเป็นตารางสำหรับการดูแลรักษาหม้อแปลงได้โดยขึ้นอยู่กับระดับผลกระทบและสถานการณ์ สามารถแบ่งตามระดับความรุนแรงได้ 3 ระดับ

ตาราง ฉ.1 แสดงรายการและความถี่ในการวางแผนบำรุงรักษาหม้อแปลง

หัวข้อการทดสอบ	ระยะเวลา			ข้อสังเกต
	เบา	ทั่วไป	เร่งรัด	
เยี่ยมชม (Visit)	6 m	1 m	1 d	ขณะทำงาน
ตรวจสอบด้วยภาพถ่าย (Detailed visual inspection)	1 y	3 m	2 w	ขณะทำงาน
DGA	2 y	1 y	3 m	ระยะเวลาอาจจะแตกต่างกันตามการตรวจสอบ
ทดสอบน้ำมัน (Oil test)	6 y	2 y	1 y	
ทำความสะอาดระบบระบายความร้อน (Cooling system cleaning)	ตามเงื่อนไข	ตามเงื่อนไข	ตามเงื่อนไข	อาจจะต้องหยุดทำงาน
ตรวจสอบอุปกรณ์ประกอบ (Accessories verification)	12 y หรือตามเงื่อนไข	6-8 y	1-2 y	จะต้องหยุดทำงาน
ทดสอบทางไฟฟ้าขั้นพื้นฐาน (Electrical basic test)	ตามเงื่อนไข	ตามเงื่อนไข	ตามเงื่อนไข	จะต้องหยุดทำงาน
ทดสอบฉนวน (Insulation tests DF or PF)	ตามเงื่อนไข	6-8 y	2-4 y	จะต้องหยุดทำงาน
ตรวจสอบภายใน OLTC (OLTC internal inspection)	12 y	6-8 y	4 y	พิจารณาจากจำนวนครั้งการทำงาน เทคโนโลยี และคำแนะนำของผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับของระยะเวลาการบำรุงรักษาสามารถแบ่งออกเป็น 3 ระดับ ดังนี้

- ระดับเบา
- หม้อแปลงมีความพร้อมใช้งานโดยส่วนประกอบต่างๆ มีความเชื่อถือได้
 - รับโหลดไม่มากและจำนวนการเปลี่ยนแทปไม่มาก
 - หม้อแปลงทำงานในสภาพแวดล้อมที่ไม่รุนแรง
 - ใช้เทคโนโลยีขั้นสูงทำให้ความต้องการการบำรุงรักษาน้อย
 - มีผลกระทบน้อยในกรณีที่เกิดความล้มเหลวที่ไม่คาดคิด
- ระดับเร่งรัด
- ส่วนประกอบทั่วไปที่รู้ว่าจะต้องให้ความสำคัญ
 - รับโหลดมาก และจำนวนการเปลี่ยนแทปมาก
 - หม้อแปลงที่ทำงานในสภาพแวดล้อมที่รุนแรง
 - หม้อแปลงที่ใช้เทคโนโลยีเก่า
 - มีผลกระทบมากในกรณีที่เกิดความล้มเหลวที่ไม่คาดคิด
- ระดับทั่วไป
- บางสถานการณ์ที่อยู่ระหว่าง 2 ระดับแรก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อและรายละเอียดการบำรุงรักษาหม้อแปลง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดในการบำรุงรักษาหม้อแปลง วิธีการวิเคราะห์ รวมไปถึงวิธีการทดสอบในแต่ละหัวข้อ ดังต่อไปนี้

ณ.1. การทดสอบทางไฟฟ้าพื้นฐาน

มีการทดสอบดังต่อไปนี้

ณ.1.1. Winding ratio

ตรวจสอบความล้มเหลว : การลัดวงจรของขดลวดระหว่างชั้นหรือรอบ

วิธีการทดสอบ : เชื่อมต่อแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับแต่ละเฟสของขดลวดด้านแรงสูง โดยให้ขดลวดอื่นเปิดวงจร จ่ายไฟด้านแรงสูง ทำการวัดด้านแรงต่ำ

การตีความ : ค่าที่ได้ควรค่าเคลื่อนไม่เกิน $\pm 0.5\%$ ของค่าที่ระบุ

ณ.1.2. Winding Resistance

ตรวจสอบความล้มเหลว : ปัญหาของหน้าสัมผัสใน tap selector หรือ diverter switch ความเสียหายของตัวนำ การลัดวงจรของขดลวดประเภทแผ่นหรือชั้น และการเชื่อมต่อขั้วซึ่งที่ไม่ดี

วิธีการทดสอบ : ป้อนกระแสและแรงดันกระแสตรงเข้าไปในขดลวดแล้วคำนวณหาค่าความต้านทานของขดลวด โดยความถูกต้องของเครื่องมือวัดต้องแตกต่างกันไม่เกิน 1% และแนะนำให้วัดค่าความต้านทานทุกแทปของ OLTC ค่าความต้านทานที่วัดได้จะถูกแก้ไขเป็นค่าที่อุณหภูมิ 75°C ตามมาตรฐาน IEC 60076 Part 1

การตีความ : ค่าความต้านทานของขดลวดควรต่างกันไม่เกิน 1% เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากโรงงาน เมื่ออุณหภูมิของขดลวดขณะทดสอบถูกแก้ไขให้ตรงตามโรงงานแล้ว ความแตกต่างระหว่างเฟสปกติจะไม่เกิน 2-3%

ณ.1.3. Magnetising Current

ตรวจสอบความล้มเหลว : ความผิดปกติของแกนเหล็ก การลัดวงจรระหว่างรอบหรือส่วนของขดลวด

วิธีการทดสอบ : เชื่อมต่อแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับแต่ละเฟสของขดลวดด้านแรงสูง โดยให้ขดลวดอื่นเปิดวงจร จ่ายไฟด้านแรงสูง ทำการวัดด้านแรงต่ำ ถ้าเป็นไปได้ควรวัดมุมเฟสด้วย

การตีความ : โดยปกติเฟสที่อยู่ด้านนอกจะมีค่าใกล้เคียงกัน แตกต่างกันไม่เกิน 5% และกระแสในเฟสที่อยู่ตรงกลางจะมีค่าต่ำกว่าได้ถึง 30%

ณ.1.4. capacitance และ Dielectric Dissipation Factor (Power Factor)

ตรวจสอบความล้มเหลว :

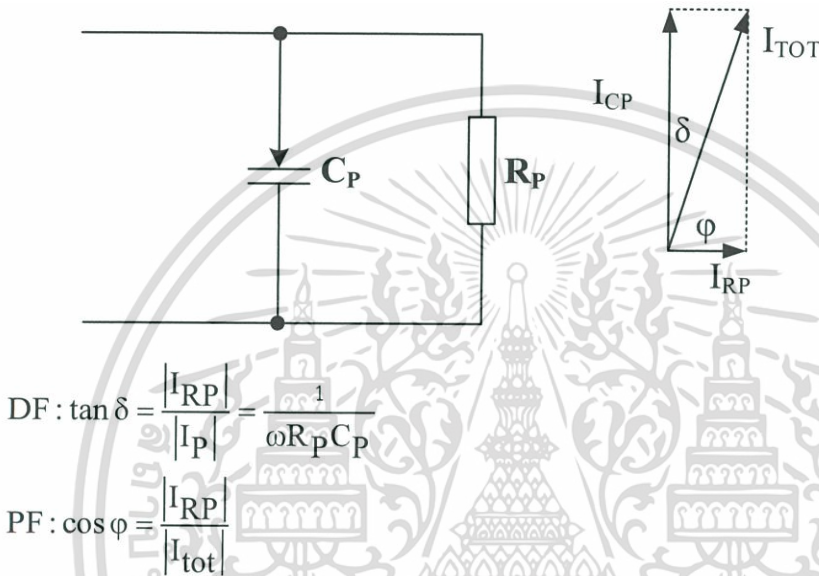
- capacitance : ขดลวดถึงขดลวด แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพระหว่างขดลวดเนื่องจากกระแสสูง และความเสียหายเชิงกล ขดลวดถึงกราวด์ แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพระหว่างขดลวดถึงกราวด์เนื่องจากกระแสสูงและความเสียหายเชิงกล จากแกนเหล็กถึงกราวด์ แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งของแกนเหล็กถึงตัวถังเนื่องจากความเสียหายเชิงกล คอนเดนเซอร์บุชชิ่ง แสดงถึงการเสียดสภาพระหว่างชั้นกราด

- Dielectric Dissipation Factor หรือ Power Factor : ความล้มเหลวของฉนวน การปนเปื้อนในฉนวนเหลว ความเป็นกรด น้ำในฉนวนแข็งและฉนวนเหลว ดิสชาร์จบางส่วนเนื่องจากหน้าสัมผัสไม่ดับนแทปสำหรับทดสอบบุชชิ่ง การเสียดสภาพในชั้นของคอนเดนเซอร์บุชชิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการทดสอบ : ป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับให้กับวัตถุที่ต้องการทดสอบ ขนานกับตัวเก็บประจุมาตรฐาน แล้ววัดกระแสที่ไหลผ่านวัตถุทดสอบ กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุมาตรฐาน และความแตกต่างของเวลา โดยมุมเดลต้าสามารถหาได้จากมุมของเวลาที่แตกต่างกัน ปกติการทดสอบจะทำได้ถึง 10 kV ทำหรับการทดสอบที่หน้างาน

จากรูปแสดงวงจรสมมูลของฉนวน (ตัวเก็บประจุ) กับความสูญเสีย (ตัวต้านทาน) และนิยามของค่า Dissipation Factor (DF) และ Power Factor (PF) โดยแสดงเป็นอัตราส่วนของกระแสในวงจรสมมูล ซึ่งในแถบยุโรปนิยมใช้ DF ในขณะที่อเมริกาเหนือใช้ PF โดยค่าสูงสุดได้ถึง 10%



รูปที่ ฌ.1 แสดงวงจรสมมูลของฉนวน และนิยามของ DF และ PF

การตีความ : สำหรับการวัดขดลวด ค่าปกติประมาณ 0.5% ถ้าค่าเกิน 1% แสดงว่าผิดปกติสำหรับบุขซึ่งสามารถเปรียบเทียบค่าตามมาตรฐาน IEC และ IEEE ได้ดังตาราง

ตาราง ฌ.2 แสดงค่า Dielectric Dissipation Factor หรือ Power Factor ที่ความถี่ 50/60 HZ และอุณหภูมิ 20°C

Type	RIP	OIP	RBP
Insulation	Resin Impregnated Paper	Oil Impregnated Paper	Resin Bonded Paper
DF tan δ (RT) (IEC 60137)	< 0.7%	< 0.7%	< 1.5%
PF cos φ (RT) (IEEE C57.19.01)	< 0.85%	< 0.5%	< 2%
Typical new values	0.3-0.4%	0.2-0.4%	0.5-0.6%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ณ.1.5. Leakage Reactance (Short Circuit Impedance)

ตรวจสอบความล้มเหลว : การเสีรูปร่างของขดลวด

วิธีการทดสอบ : เชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับกับขดลวดแรงดันสูงแต่ละเฟส และลัดวงจรด้านแรงดันต่ำ แล้วป้อนแรงดันและกระแสด้านแรงดันสูง คำนวณหาค่า Leakage Impedance และ Leakage Reactance ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้วิธีการ Complex Impedance หรือวัตต์มิเตอร์เพื่อหาส่วนจริงของ Complex Impedance ค่าของ Reactance สามารถหาได้จากผลของการคำนวณนี้

การตีความ : ค่าอิมพีแดนซ์ควรแตกต่างกันไม่เกิน 2% เมื่อเปรียบเทียบค่าการทดสอบจากโรงงาน ความแตกต่างระหว่างเฟสควรน้อยกว่า 2% ถ้าค่าเกิน 1% ควรตรวจสอบด้วยวิธีอื่นเพิ่มเติมเช่น FRA ข้อควรระวังคือจะต้องเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่าง 3 เฟสและ 1 เฟส

ณ.1.6. Insulation Resistance

ตรวจสอบความล้มเหลว : การเสื่อมสภาพของฉนวน ความล้มเหลวในขดลวด หรือระบบต่อลงดินของแกนเหล็ก

วิธีการทดสอบ : ป้อนแรงดันสูงกระแสตรง (ปกติป้อนที่ 1-5 kV) ให้กับขดลวด ความเป็นฉนวนระหว่างแกนเหล็กและตัวถังสามารถยืนยันได้ด้วยการทดสอบนี้ ค่ากระแสรั่วไหล ความต้านทานฉนวนจะถูกวัด เนื่องจากการทดสอบให้แรงดันกระแสตรงในการวัดจึงไม่สามารถเทียบกับการวัดโดยใช้แรงดันกระแสสลับได้ นอกจากนี้อุณหภูมิยังมีผลต่อผลการทดสอบ ดังนั้นจึงต้องบันทึกแรงดันและอุณหภูมิขณะทดสอบด้วย

การตีความ : หม้อแปลงที่มีพิกัดแรงดัน >69 kV ควรมีค่า >1 G Ω ที่อุณหภูมิ 20°C

หม้อแปลงที่มีพิกัดแรงดัน ≤ 69 kV ควรมีค่า >500 M Ω ที่อุณหภูมิ 20°C

ณ.1.7. Core Grounding

ตรวจสอบความล้มเหลว : ระบบการกราวด์ของแกนเหล็ก

วิธีการทดสอบ : การทดสอบสามารถทำได้ถ้าสามารถทำให้ระบบกราวด์ของแกนเหล็กไม่เชื่อมต่อกับด้านนอกของตัวถัง แล้ววัดค่าความต้านทานฉนวนของแกนเหล็กถึงกราวด์

การตีความ : ค่าความต้านทานฉนวนของแกนเหล็กถึงกราวด์ประมาณ 10 M Ω หรือมากกว่า ถ้าค่าน้อยกว่า 100 k Ω สามารถบ่งชี้ได้ว่ามีปัญหาในระบบกราวด์ของแกนเหล็ก ถ้าค่าอยู่ในระดับ k Ω บางกรณีอาจเกิดจากกราวด์ถูกแยกออกจากแกนเหล็ก

ณ.2. Dissolved Gas Analysis

Dissolved Gas Analysis (DGA) เป็นวิธีการที่เป็นประโยชน์ในการวินิจฉัยหม้อแปลงเป็นอย่างมาก โดยแก๊สที่ตรวจวัดโดยปกติ คือ ไฮโดรเจน (H₂) มีเทน (CH₄) อีเทน (C₂H₆) เอทิลีน (C₂H₄) อะเซทิลีน (C₂H₂) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ออกซิเจน (O₂) และไนโตรเจน (N₂)

การตีความด้วยวิธีนี้นั้นไม่เพียงแต่วิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของแก๊สแต่ละตัวเท่านั้นแต่ต้องวิเคราะห์อัตราการเพิ่มขึ้นภายใต้เงื่อนไขของเวลาด้วย ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเป็นเงื่อนไขขึ้นมา

- แยกแยะระดับแก๊สที่ให้ความสนใจออกมาโดยวิเคราะห์จากแก๊สที่มีความเข้มข้นเกินค่าที่กำหนดในแต่ละแก๊ส

- ประเมินอัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊สโดยเทียบกับความเข้มข้นที่วัดได้จากครั้งก่อนหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

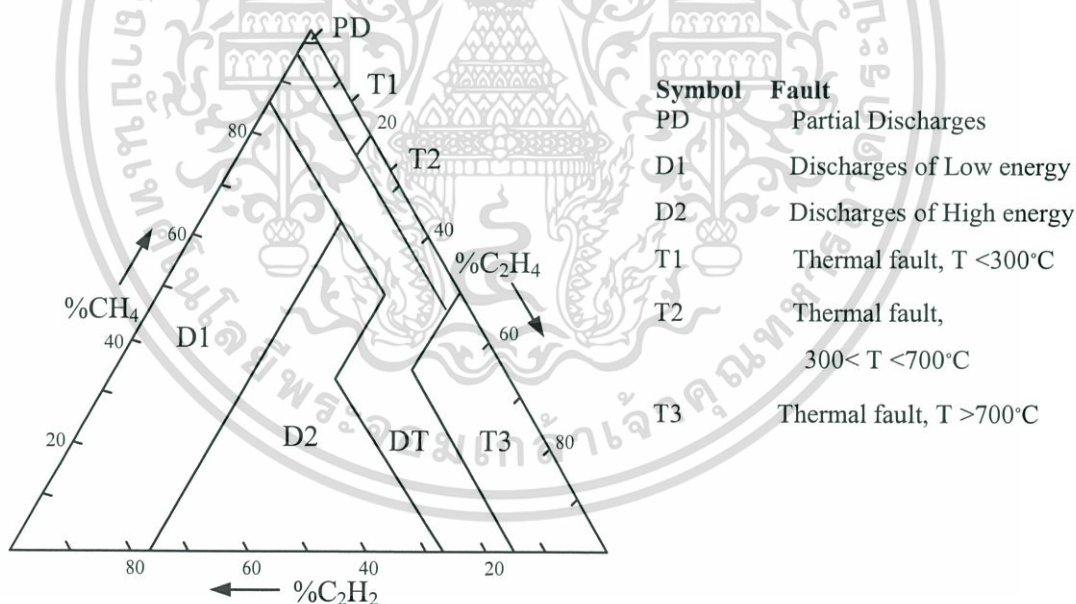
- กำหนดน้ำหนักของแก๊สแต่ละตัวตามพลังงานที่ใช้ในการสร้างแก๊สนั้นขึ้นมา เช่น ไฮโดรเจนจะมีน้ำหนักน้อยที่สุด ส่วนอะเซทิลีนจะมีน้ำหนักมากที่สุด

ยิ่งไปกว่านั้น เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ยังถูกสร้างขึ้นมาอย่างหลากหลาย เช่น การวิเคราะห์ด้วยวิธี Roger และ Doernenberg ซึ่งจะใช้อัตราส่วนของความเข้มข้นแก๊สในการวิเคราะห์แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่ได้กำหนดไว้ ทำให้อัตราส่วนสามารถแยกแยะปัญหาที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

- ความผิดพลาดเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ
- ความผิดพลาดเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิปานกลาง
- ความผิดพลาดเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิสูง
- ดิสชาร์จที่พลังงานต่ำ
- ดิสชาร์จที่พลังงานสูง
- ดิสชาร์จบางส่วน

วิธีเทียบอัตราส่วนนั้นถูกนำมาใช้เป็นมาตรฐาน IEC 60599 “Guide to Interpretation of Dissolved and Free Gas Analysis”

นอกจากนี้ยังมีวิธี Duval Triangle ซึ่งถูกใช้อย่างแพร่หลาย โดยมีวิธีการวิเคราะห์ดังแสดงดังรูป



รูปที่ ๓.2 แสดงการวิเคราะห์โดยใช้วิธี Duval Triangle

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ณ.3. การทดสอบฉนวนน้ำมันหม้อแปลง

การทดสอบน้ำมันหม้อแปลงจะถูกแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม

กลุ่ม 1 การทดสอบขั้นต้นเพื่อตรวจสอบให้แน่ใจว่าน้ำมันหม้อแปลงมีความเหมาะสมในการใช้งาน

กลุ่ม 2 การทดสอบเพิ่มเติมเพื่อเก็บข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับคุณภาพของน้ำมันหม้อแปลง

กลุ่ม 3 การทดสอบมีวัตถุประสงค์ในการหาความเหมาะสมของน้ำมันหม้อแปลงเพื่อใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ โดยพิจารณาถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และการดำเนินการ

ในการทดสอบแต่ละกลุ่มนั้นจะกล่าวต่อไป โดยถ้าผลการทดสอบในกลุ่มที่ 1 ไม่เกินค่าที่แนะนำไว้ การทดสอบในกลุ่มที่ 2 โดยปกติจะรองจนกว่าเก็บตัวอย่างรอบถัดไปจึงจะทดสอบ

ณ.3.1. การทดสอบในกลุ่มที่ 1

1) การทดสอบความเป็นกรด

การเกิดออกซิเดชันของน้ำมันจะค่อยๆ ความเป็นกรด และผลิตภัณฑ์อื่นๆ ซึ่งเมื่อรวมกับน้ำและสารปนเปื้อนต่างๆ ก็จะส่งผลต่อความเป็นฉนวนของน้ำมันและคุณสมบัติอื่นๆ โดยกรดนั้นส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของเซลล์ลอสและจะไปกัดกร่อนส่วนที่เป็นโลหะของหม้อแปลง นอกจากนี้ระดับความเป็นกรดยังช่วยในการหาเวลาในการเปลี่ยนน้ำมัน อย่างไรก็ตามเมื่อความเป็นกรดมีค่าถึง 0.1 mg/g แล้วจะเป็นอันตรายโดยจะส่งผลกระทบต่อค่า DP ของฉนวนกระดาษ จึงต้องทดสอบด้วยวิธี Interfacial Tension เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป การเกิดออกซิเดชันของน้ำมันแร่นอกจากจะมีผลต่อเซลล์ลอสและส่วนที่เป็นโลหะแล้วยังสร้างตะกอนขึ้นมาด้วย

2) สีของน้ำมัน

สีที่เปลี่ยนไปบ่งชี้ถึงสารปนเปื้อนในน้ำมันและการเกิดออกซิเดชัน โดยสารปนเปื้อนที่เป็นคาร์บอนจะทำให้เกิดสีดำซึ่งอาจเกิดจากการเกิดอาร์คภายในหม้อแปลงรวมถึงการทำงานของ Diverter Switch เมื่อใช้ตัวถังร่วมกัน

3) ปริมาณน้ำ

น้ำในหม้อแปลงจะอยู่ในฉนวนกระดาษและฉนวนน้ำมันโดยส่วนใหญ่แล้วจะถูกดูดซับด้วยฉนวนกระดาษ ส่วนน้ำมันที่อยู่ในน้ำมันนั้นจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือหยดน้ำ(น้ำที่แยกออกจากน้ำมัน เป็นชั้น) และส่วนที่ละลายอยู่ในน้ำมัน(ส่วนที่ไม่สามารถแยกออกจากน้ำมันได้ และไม่สามารถมองเห็นได้) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยส่งผลกระทบต่อความละลายน้ำในน้ำมันและกระดาษ การเก็บตัวอย่างน้ำมันจะต้องบันทึกอุณหภูมิเพื่อใช้แก้ไขเป็นค่าตามมาตรฐาน แต่ในความเป็นจริงนั้นจะต้องเก็บน้ำมันที่ 20°C ถ้าเก็บที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้จะมีผลเรื่องการกระจายตัวของน้ำมัน อย่างไรก็ตามค่าที่ได้จากการเก็บตัวอย่างนั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของน้ำมันใหม่และคุณสมบัติอื่นๆ ด้วย ดังนั้นในการวิเคราะห์อายุของหม้อแปลงจึงให้ความสำคัญกับความเป็นกรดมากกว่า

4) แรงดันเบรกดาว์น

น้ำมันที่ไม่มีขี้ผึ้งและสะอาดจะมีค่าแรงดันเบรกดาว์นสูง ส่วนน้ำมันที่มีสารปนเปื้อนหรือมีความชื้นจะส่งผลกระทบต่อแรงดันเบรกดาว์นอย่างมากซึ่งทำให้แรงดันเบรกดาว์นลดลง แต่อย่างไรก็ตามค่าแรงดันเบรกดาว์นที่สูงนั้นไม่ได้บ่งบอกถึงสารปนเปื้อนที่มีทั้งหมด ซึ่งการทดสอบนั้นอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC60156 ASTM D877 หรือ D1816

5) Dissipation/Power Factor และความต้านทาน

ตัวแปรเหล่านี้อ่อนไหวต่อสารปนเปื้อนที่มีขี้ผึ้ง ผลิตภัณฑ์ที่ส่งผลกระทบต่ออายุ หรือสารคอลลอยด์ ในน้ำมัน ค่า Dissipation/Power Factor บ่งชี้ความสูญเสียความเป็นฉนวนในน้ำมัน ถ้าค่าเพิ่มขึ้นสูง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเป็นตัวบ่งชี้สารปนเปื้อนจากการเกิดออกซิเดชัน น้ำ หรือวัตถุที่เป็นตัวนำ ซึ่งค่า Dissipation/Power Factor ที่สูงและค่าความต้านทานที่ต่ำของน้ำมันนั้นจะส่งผลต่อค่าเหล่านี้ เมื่อวัดที่ตัวหม้อแปลงด้วย ซึ่งจากการศึกษาพบว่าค่าความต้านทานเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงช้าและ เป็นค่าสุดท้ายที่ใช้พิจารณาเมื่อเปรียบเทียบกับ IFT ความเป็นกรด และ Dissipation/Power Factor

6) Interfacial Tension

Interfacial Tension หรือ IFT ระหว่างน้ำมันและน้ำจะบ่งชี้ถึงการละลายของสารปนเปื้อน มีขี้ผึ้งและผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเสื่อมสภาพของน้ำมัน ค่าของ IFT นั้นจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ในช่วงเริ่มต้นซึ่งเป็นข้อดีในการวิเคราะห์หยาบ ส่วนค่าความเป็นกรดจะเปลี่ยนแปลงช้าช่วงเริ่มต้นแต่ จะเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดในช่วงต่อไป จึงได้มีการนำสองค่านี้มาวิเคราะห์หยาบของน้ำมัน เรียกว่า Oxidation Index

นอกจากนี้การลดลงอย่างรวดเร็วของ IFT ยังบ่งชี้ความเข้ากันได้ของน้ำมันและส่วนต่างๆ ของหม้อแปลงอีกด้วย ถ้าเป็นไปได้ควรจะทดสอบหลายๆด้านเพื่อบ่งชี้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้ถูกต้อง

หม้อแปลงที่รับโหลดเกินทำให้เกิดการเสียดสีของวัสดุก็ทำให้ค่า IFT เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เช่นกัน

ณ.3.2. การทดสอบในกลุ่มที่ 2

1) Oxidation Stability

ความสามารถในการชะลอการเกิดออกซิเดชันของน้ำมันแร่เมื่ออยู่ภายใต้ความเครียด ทางความร้อน เรียกว่า Oxidation Stability ซึ่งออกซิเจนและทองแดงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การทดสอบนี้จะเป็นข้อมูลในการทำนายอนาคตของน้ำมันเมื่ออยู่ภายใต้สถานการณ์ที่แตกต่างกัน คุณสมบัตินี้จะเป็นตัวกำหนดความต้านทานในการก่อตัวของกรด ตะกอน และสารประกอบต่างๆ ซึ่งมีอิทธิพลต่อค่า Dissipation/Power Factor คุณสมบัตินี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการกลั่นของน้ำมันและ แหล่งที่มาของน้ำมันซึ่งจะทำให้ปริมาณของสารยับยั้งการเกิดออกซิเดชันแตกต่างกัน

สารยับยั้งการเกิดออกซิเดชันสังเคราะห์สามารถเพิ่มเสถียรภาพการเกิดออกซิเดชันได้ ในหม้อแปลงส่วนใหญ่จะใช้ Phenolic inhibitors ใช้สารประกอบ คือ 2,6-di-tert-butyl-paracresol (DBPC) และ 2,6-di-tert-butyl-phenol (DBP) ซึ่งประสิทธิภาพจะแตกต่างกันตาม โครงสร้างของน้ำมัน โดยสารยับยั้งการเกิดออกซิเดชันสังเคราะห์นั้นจะบริโภคผลิตภัณฑ์ที่เกิดจาก ออกซิเดชัน หลังจากสารยับยั้งหมดแล้วก็จะขึ้นอยู่กับเสถียรภาพของสารยับยั้งการเกิดออกซิเดชัน ของน้ำมันแต่ละชนิด การวัดความเข้มข้นของสารยับยั้งการเกิดออกซิเดชันอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60666

2) ตะกอนและตะกรัน (Sediment and Sludge)

ตะกอนคือวัตถุที่ไม่ละลายในน้ำมัน เช่น เส้นใย สิ่งแปลกปลอม วัตถุของแข็ง วัตถุที่เกิดจาก การเสื่อมสภาพของฉนวนแข็งและฉนวนเหลว เป็นต้น

ตะกรันคือสารประกอบพอลิเมอร์ที่ถูกสร้างจากการเสื่อมสภาพของฉนวนแข็งและ ฉนวนเหลว โดยตะกรันละลายได้ในน้ำมันซึ่งมีขีดจำกัดขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการละลายของน้ำมันและ อุณหภูมิ เมื่อถึงขีดจำกัดตะกรันจะตกตะกอน ซึ่งตะกรันและตะกอนจะส่งผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า ของน้ำมันและประสิทธิภาพในการระบายความร้อนส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพของฉนวนเร็วขึ้น

การวัดตะกอนและตะกรันอ้างอิงตามวิธี C ในมาตรฐาน IEC 61125

3) Particle Count

ในน้ำมันหม้อแปลงจะมีอนุภาคอยู่มากมายทั้งเกิดขึ้นจากโรงงานและที่เกิดขึ้นจากการใช้งาน ซึ่งถ้าหม้อแปลงมีความร้อนเกิน 500°C ก็จะทำให้เกิดอนุภาคของคาร์บอนขึ้นมาสาเหตุอาจมาจากการทำงานของ Diverter Switch เมื่อใช้ตัวถังร่วมกัน ซึ่งอนุภาคเหล่านี้ส่งผลต่อความเป็นฉนวนและการทำงานของหม้อแปลง

4) Flash Point

อุณหภูมิจุดวาบไฟที่ลดลงอาจเกิดจากการเกิดดิสชาร์จทางไฟฟ้าซึ่งทำให้เกิดโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนระหว่างการเกิดเบรกดาว์นของน้ำมัน

5) Pour Point

Pour Point คือการวัดความสามารถไหลของน้ำมันที่อุณหภูมิต่ำ ไม่มีหลักฐานที่แสดงว่าค่า Pour Point ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของน้ำมัน การเปลี่ยนแปลงของค่านี้บ่งชี้ถึงน้ำมันแตกต่างกัน

6) ความหนาแน่น

ความหนาแน่นใช้ในการแยกชนิดของน้ำมันได้ ในภูมิภาคที่หนาวเย็นความหนาแน่นจะเป็นตัวบ่งชี้ว่าน้ำมันเหมาะสมที่จะใช้หรือไม่ ยกตัวอย่างเช่น เกล็ดน้ำแข็งอาจเกิดขึ้นจากการแยกตัวของน้ำกับน้ำมันที่มีความหนาแน่นสูงซึ่งอาจทำให้เกิดการวาบไฟในภายหลังได้ และไม่มีหลักฐานที่แสดงว่าค่าความหนาแน่นส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของน้ำมัน

7) ความหนืด

ความหนืดส่งผลกระทบต่ออัตราการระบายความร้อน โดยความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อเกิดการออกซิเดชันและการใช้งานน้ำมันเป็นระยะเวลานาน โดยความหนืดยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

ณ.3.3. การทดสอบในกลุ่มที่ 3

1) Polychlorinated Biphenyls (PCBs)

เป็นสารที่อยู่ในกลุ่มของ synthetic chlorinated aromatic hydrocarbons ซึ่งมีคุณสมบัติทางความร้อนและไฟฟ้าที่ดี รวมไปถึงคุณสมบัติทางเคมีที่ดัดแปลงนำมาใช้อย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตามเสถียรภาพทางเคมีและความต้านทานการย่อยสลายตามธรรมชาติทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมความกังวลเหล่านี้ทำให้ต้องระงับใช้ในปี 1986 การวัดค่า PCB ในน้ำมันหม้อแปลงนั้นเป็นการวัดเพื่อให้แน่ใจว่าน้ำมันใหม่ไม่มีสาร PCB

2) Corrosive Sulphur

กำมะถันเกิดขึ้นจากการกลั่นน้ำมันโดยขึ้นอยู่กับพันธะและกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ สารประกอบกำมะถันนั้นบางตัวก็เป็นสารแอนต็อกซิแดนที่ซึ่งเป็นประโยชน์ ที่อุณหภูมิสูง กำมะถันจะสลายตัวเป็นซัลไฟท์แล้วไปเกาะส่วนที่เป็นโลหะร้อนทำให้ส่งผลกระทบต่อความนำไฟฟ้าในอุปกรณ์สวิตชิง แม้ว่าจะเป็นไปได้ยากที่จะเกิดสารซัลไฟท์ในอุณหภูมิต่ำ โดยเฉพาะพื้นผิวของเงิน ทำให้การทดสอบนี้ไม่ค่อยจำเป็น การทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน DIN 51353 (เงิน) และ ASTM D1275 (ทองแดง) เพื่อให้แน่ใจว่าไม่เกิดผลกระทบจากการสึกกร่อนของโลหะเปลือยภายใต้สถานการณ์ปกติ เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการศึกษาตัวชี้วัดภายใต้สถานการณ์พิเศษ เช่น ทำงานที่อุณหภูมิสูง รับโหลดมาก และปริมาณออกซิเจนน้อย (ชนิด sealed/nitrogen blanket) สาร copper sulphide (Cu_2S) เกิดขึ้นบนฉนวนแข็งทำให้อาจเกิดความล้มเหลวของฉนวนได้จึงมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำหนดมาตรฐาน IEC62535 “Test method for detection of potentially corrosive Sulphur in use and unused insulating oil”

ณ.3.4. การจัดการผลการทดสอบน้ำมัน

1) การประเมินผลของน้ำมัน

ฉนวนน้ำมันนั้นเป็นเรื่องของความร้อน ออกซิเจน น้ำและตัวเร่งอื่นๆ ทั้งหมดนี้ส่งผลร้ายต่อคุณสมบัติน้ำมัน โดยจุดสังเกตเบื้องต้นคือการสังเกตด้วยสายตาจากสีหรือความใสของน้ำมัน จากอุปกรณ์วัดระดับน้ำมัน ในมุมมองด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมการตรวจสอบขั้นพื้นฐานคือตรวจสอบจากรอยเปื้อนของน้ำมันบนพื้น หรือส่วนต่างๆ ส่วนการตีความในด้านของการเสื่อมสภาพของน้ำมัน จะต้องใช้ประสบการณ์ของแต่ละบุคคลโดยมีพื้นฐานจากองค์ประกอบด้านการจัดการความเสี่ยงและวัฏจักรชีวิต เช่น การวิเคราะห์ทางสถิติเกี่ยวกับคุณสมบัติต่างๆ ของน้ำมันแต่ละกลุ่มหรือแต่ละชนิด หรือการประเมินอัตราการเพิ่มขึ้นของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของหม้อแปลง

2) การจำแนกประเภทเพื่อบำรุงรักษาน้ำมัน

น้ำมันจะถูกจำแนกออกเป็น good fair หรือ poor เพื่อใช้ในการวางแผนบำรุงรักษา

Good : น้ำมันอยู่ในเงื่อนไขปกติ หรือมีการเก็บตัวอย่างตามปกติ

Fair : ตรวจพบความเสื่อมสภาพของน้ำมัน หรือได้รับคำแนะนำให้เก็บตัวอย่างสม่ำเสมอ

Poor : น้ำมันที่มีการเสื่อมสภาพแบบผิดปกติ หรือจะต้องมีการดำเนินการทันที

ตาราง ณ.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวอย่างของปัญหาในหม้อแปลงและส่งผลต่อน้ำมัน

OIL PARAMETER	TRANSFORMER PROBLEM								
	OVERHEATING			PARTIAL DISCHARGE			DAMAGE TO HERMETIC SEAL		
	In Core	Connection	Winding / Cooling Problem	Oil	Paper	Oil / Paper Surface	Membrane Break	Oil Leakage	Water Ingress
Acidity / IFT	H 1,2	H 1,2	H 1,2	L	L	L	L 2	L	H 2
Colour	H 1,2	H 1,2	H 1,2	L	L	L	L 2	L	L
Water Content	L	L	H 5,6	L	H 5,6	H 5,6	L-M 6	M	H 8
Breakdown Voltage	L	M 3,12	H 4,6,12	H 11	M	H 5,6,12	M 6	M 7	H 8
Dissipation Factor	H 1,2	H 1,2	H 1,2	L	L	L	L 2	L	H 9
Gas Content	H 1,10	H 1,10	H 1,10	H 1,10	H 1,4,10	H 1,4,10	H 7	M 10	L 7

LEGEND			
Influence of Problem on Oil Parameter	Transformer Problem		
H = High influence	1- Oil Destruction	5- Paper Ageing	9- Water, Sediment, Emulsion
M = Medium influence	2- Oil Ageing	6- Water Production	10- Gas Production
L = Low influence	3- Oil Carbonization	7- Dissolved Air	11- Bubble
	4- Paper Destruction	8- Free Water	12- Particles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ณ.4. ทดสอบกระดาษฉนวน

ฉนวนกระดาษนั้นต้องมีคุณสมบัติทางไฟฟ้า และทางกลที่ดี โดยมีการทดสอบเพื่อบำรุงรักษา ดังต่อไปนี้

ณ.4.1. Tensile Strength of Paper

เป็นการทดสอบคุณสมบัติทางกลของกระดาษเพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของกระดาษซึ่งส่งผลโดยตรงต่ออายุของหม้อแปลง โดยถ้าค่า Tensile Strength มีค่าน้อยกว่า 50% ของค่าเริ่มต้นก็ถือว่ากระดาษนั้นหมดอายุการใช้งานแล้ว สิ่งสำคัญคือการลดลงของค่า Tensile Strength นั้นแปรผันตรงกับค่า degree of polymerization ดังนั้นค่า Tensile Strength ลดลงมาครึ่งหนึ่งเมื่อค่า DP มีค่าประมาณ 200-250 ด้วย

ณ.4.2. Degree of Polymerisation

เป็นวิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางกลของกระดาษอีกวิธีหนึ่งที่ได้มาจากการวิเคราะห์เส้นใยเซลลูโลสของกระดาษ โดยกระดาษจะมีค่า DP เริ่มต้นประมาณ 1000 ซึ่งคาดหวังว่าจะมอายุการใช้งานตลอดอายุการใช้งานของหม้อแปลง(25-40 ปี) และค่า DP ประมาณ 150-250 คือค่าที่แสดงว่ากระดาษได้สิ้นสุดอายุการใช้งานแล้ว ซึ่งการเสถียรภาพของกระดาษนั้นส่งผลทำให้เกิดความล้าเมลลวทางกลของหม้อแปลง

- กระดาษที่เปราะทำให้เกิดการแยกตัวระหว่างขดลวดและท่อ
- น้ำที่ถูกสร้างขึ้นจากการเสื่อมสภาพของกระดาษส่งผลต่อค่าความต้านทาน
- คาร์บอนที่เพิ่มขึ้นของกระดาษทำให้เกิดความนำไฟฟ้าและอาจทำให้เกิด

การดีสชาร์จและเบรคดาวนในที่สุด

การวัดค่า DP อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60450 และ ASTM D4243 แต่ข้อสังเกตคือการเก็บตัวอย่างกระดาษเพื่อนำมาวัดค่านั้นทำได้ยากจึงจะต้องมีวิธีวัดค่าทางอ้อมเพื่อใช้ในการประเมินคุณสมบัติของฉนวนกระดาษ

ณ.4.3. Furans and Other Ageing Products

การวัดด้วยวิธีนี้จะวัดจากน้ำมันโดยใช้วิธี High Performance Liquid Chromatography (HPLC) เพื่อช่วยในการแยกและวิเคราะห์ปริมาณของผลิตภัณฑ์ของ Furan ซึ่งได้แก่ 2-Furaldehyde เป็นตัวหลักในการวิเคราะห์อายุของกระดาษ นอกจากนี้ยังมี 2-furfuryl alcohol (2FOL) 2-methyl-furfural และ 5-hydroxy-2-methyl-furfural (5-HMF) การวัดจะวัดที่ 140°C โดยค่าของ Furan นั้นจะเพิ่มขึ้นเป็นเอ็กโพเนนเชียลเมื่ออายุการใช้งานเพิ่มขึ้น

ณ.5. การทดสอบ On-load Tap Changer

เมื่อไม่นานมานี้จำนวนของระบบการตรวจสอบแบบออนไลน์ได้เข้ามามีบทบาทกับ On-load Tap Changer(OLTC) ดังตารางแสดงเครื่องมือการวินิจฉัยปัญหาของหม้อแปลง

ตาราง ฅ.4 แสดงความสามารถในการวินิจฉัยของแต่ละการทดสอบสำหรับ OLTC

DIAGNOSTIC METHOD	OLTC TYPE
VIBRO-ACOUSTIC	Vacuum
	Reactor
	Resistor
MOTOR TORQUE	All
DISSOLVED GAS ANALYSIS	Vacuum
	Reactor
	Resistor
IR THERMOGRAPHY	In-Tank
	Compartment
DYNAMIC RESISTANCE	All

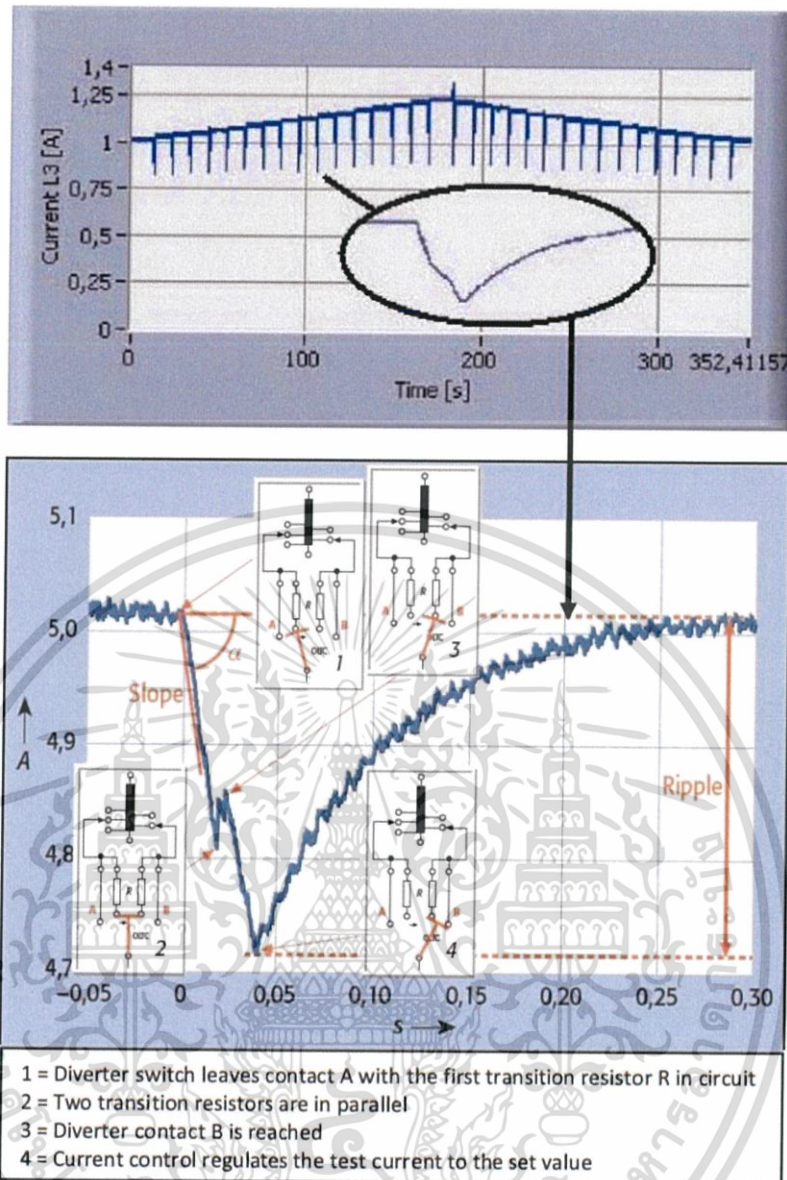
PROBLEMS									
Linkage/Gears								G	G G G G
Timing/Sequence	G								E E E E
Control/Relays								E	
Motor								G	
Brake								E	
Lubrication								E	
Contacts alignment								G	G G G G
Arcing				M	G	E			E E E E
Overheating/Coking		G	L	M	E	E			L M L
Contact wear	M								E M L
Transition	E								E E E

L-Low
M-Moderate
G-Good
E-Excellent

ตั้งตารางสรุปจะเห็นได้ว่าการทดสอบที่มากกว่าหนึ่งเทคนิคจะมีความน่าเชื่อถือและครอบคลุมถึงปัญหาที่เกิดขึ้นมากกว่า โดยที่เทคนิค DGA Motor Torque Measurement และ Vibro-Acoustic ขึ้นอยู่กับชนิดของ OLTC

ฅ.5.1. Dynamic Resistance Measurement

Dynamic Resistance Measurement เป็นการทดสอบเพิ่มเติมจากการทดสอบ winding resistance โดยการทดสอบจะต้องรู้ค่าความต้านทานภายในวงจร แล้วจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไปที่ขดลวดแทป แล้ววัดกระแสช่วงที่ OLTC ทำการสวิตชิง การบันทึกค่าจะออกสซีโลสโคปจะบันทึกทั้งในหน่วยของเวลาและค่าความต้านทานเพื่อนำมาคำนวณและเทียบกับคุณสมบัติของ OLTC



รูปที่ ๓.3 แสดงผลการตอบสนอง Dynamic Resistance Measurement สำหรับ 33 ตำแหน่ง OLTC โดย Change-Over Selector

การตีความจะต้องใช้ทั้งทักษะและประสบการณ์ โดยพื้นฐานคือการเทียบค่ารีปเปอร์และความชันของกราฟกระแสในแต่ละเฟส หรือเทียบกับ fingerprint measurements

Dynamic Resistance Measurement สามารถวินิจฉัย diverter switch ได้หลายปัญหา เช่น ปัญหาหน้าคอนเทคใน diverter switch สปริงเสียหาย และการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทาน เป็นต้น

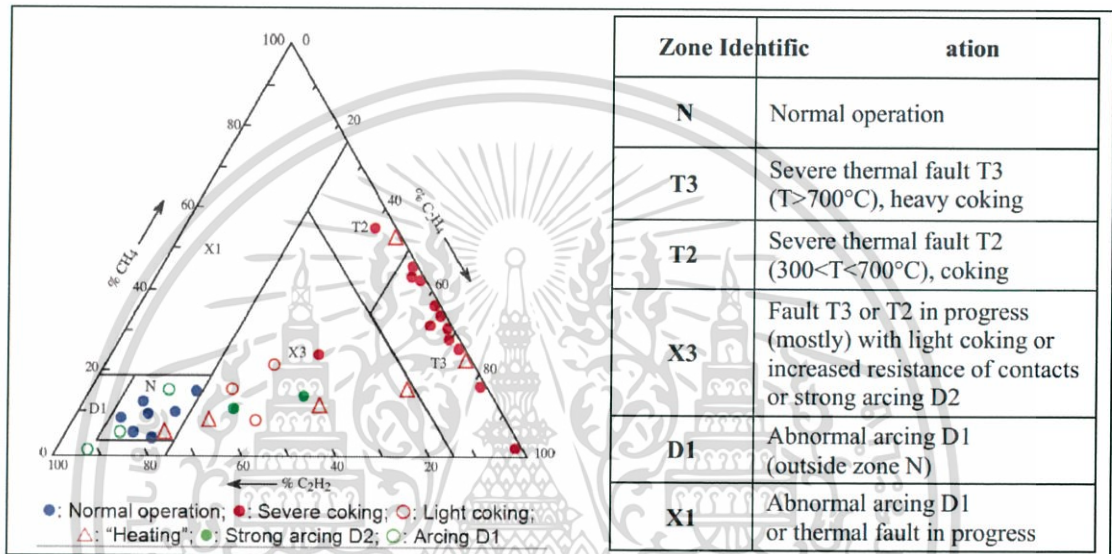
Dynamic Measurement อาจตรวจสอบปัญหาหน้าคอนเทคของ selector switch หรือเรื่องการซิงโครไนส์ของ selector switch ได้หลังจากทำการเปิดวงจรระหว่างลำดับการเปลี่ยนแทปแล้ว เพราะ Dynamic Resistance Measurement นั้นสามารถใช้ได้กับระบบออฟไลน์และจะต้องปลดสายส่งออกก่อนเท่านั้น การทดสอบด้วยวิธีนี้จึงมีข้อจำกัดในการควบคุมคุณภาพของการทดสอบก่อนใช้งานหลังจากแก้ไขเสร็จ หรือความเหมาะสมในการใช้งานของ OLTC หลังจากที่มีข้อผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ณ.5.2. Dissolved Gas Analysis of Tap Changer Oil

การวินิจฉัยหลายๆ ปัญหาของ OLTC จะใช้วิธีนี้ในการทดสอบ โดยวิธี Dissolved Gas Analysis(DGA) จะตรวจจับคาร์บอนและคาร์บอนโค้ก(carbon coking) ใน OLTC ชนิด Reactor ใน OLTC ที่ติดตั้งด้านแรงต่ำนั้นจะต้องรับกระแสสูงทำให้หน้าคอนแทกมีความร้อนสูงจึงเกิดคาร์บอนโค้กเป็นปัญหาปกติ

CIGRE Task Force D1-01-15(TF15) ได้เริ่มการวินิจฉัยโดยใช้วิธี DGA ใน OLTC ในปี 2005 และบริษัท ABB ได้ทำการสร้าง Modified Duval Triangle ขึ้น เพื่อใช้วิเคราะห์ปัญหาของ OLTC ดังตัวอย่างการวินิจฉัยโดย TF15 ของ OLTC ชนิด Reactor เป็นส่วนใหญ่



รูปที่ ณ.4 Modified Duval Triangle สำหรับ OLTC

ใน OLTC ชนิด High-speed resistor ปกติจะติดตั้งที่ด้านแรงสูง ใน diverter switches ของ OLTC ชนิดนี้จะไม่ค่อยเกิดปัญหาคาร์บอนโค้กที่หน้าคอนแทก อย่างไรก็ตามการตีความปัญหาที่เกิดจาก OLTC นั้นจะต้องคำนึงถึงชนิดและเทคโนโลยีที่ใช้ด้วย เช่น การตีความ OLTC ที่ใช้เทคโนโลยี Vacuum bottle switching สามารถค้นหาได้จากมาตรฐาน IEEE C57.139

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นที่จะต้องนำมาวิเคราะห์ คือ

- จำนวนการทำงานตั้งแต่การเก็บตัวอย่างครั้งสุดท้าย หรือเปลี่ยนน้ำมัน
- จำนวนการทำงานเฉลี่ยต่อชั่วโมงสำหรับชนิด Resistor
- โหลดเฉลี่ยและโหลดสูงสุด
- ตัวถังชนิด sealed หรือ free-breathing

ความเข้มข้นต่ำสุดสำหรับการตรวจจับแก๊สถูกกำหนดโดย TF15 โดยเฉพาะหลังจากที่เปลี่ยนน้ำมันใน OLTC โดยช่วงเวลาในการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี DGA ใน OLTC คือ

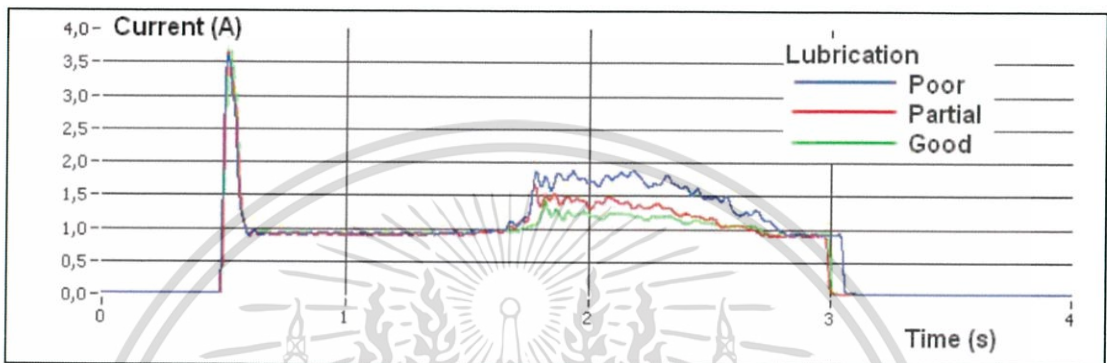
- 6 เดือนถึงหนึ่งปีสำหรับการทำงานปกติและปริมาณแก๊สปกติ
- 1-2 เดือน ในกรณีที่เกิดความผิดปกติของปริมาณแก๊ส
- ทุกสัปดาห์หรือทุกวันในกรณีที่มีความกังวลเรื่องความล้มเหลว จนกระทั่งถึงขั้น

ต้องเข้าไปตรวจสอบภายในหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ณ.5.3. Motor Torque Measurement

Motor Torque Measurement สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับระบบขับเคลื่อนได้ (การเชื่อมต่อ เกียร์ น้ำมันหล่อลื่น) รวมไปถึงการจัดวางของ diverter และ selector switch ได้ การวัดวิธีนี้จะไม่ได้วัดทอร์คของมอเตอร์โดยตรงแต่จะวัดตัวแปรที่ง่ายให้กับตัวมอเตอร์ (กระแส และ แรงดัน) เพื่อคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ที่ใช้ในการควบคุม OLTC โดยแนวโน้มและการเปรียบเทียบสามารถตรวจสอบได้ง่าย ดังตัวอย่างที่แสดงการตรวจพบปัญหาของน้ำมันหล่อลื่น ดังรูป

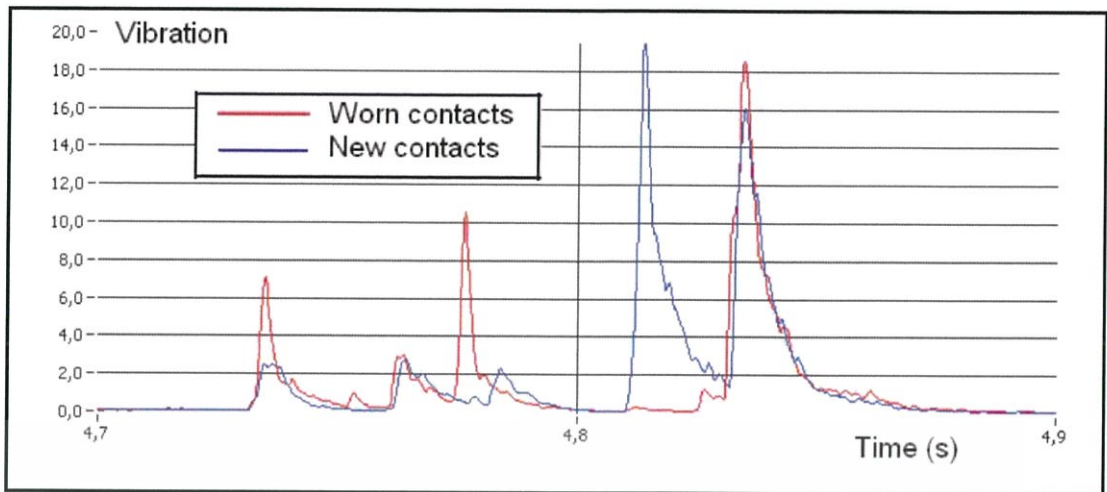


รูปที่ ณ.5 แสดงปัญหาเกี่ยวกับ OLTC Drive Lubrication โดยตรวจสอบด้วยวิธี Motor Current Measurement

ณ.5.4. Vibro-Acoustic Signature

Vibro-Acoustic Signature จะตรวจจับโดยใช้อุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือน หรือ ใช้ accelerometer ในช่วงความถี่กว้างในการตรวจจับ โดยจะติดตั้งที่ผนังของหม้อแปลงตรวจจับ คลื่นเสียงที่ปล่อยออกมาจากการทำงานทางกล การทดสอบด้วยวิธีนี้จะไม่เหมือนกับการวัด PD ด้วยวิธี acoustic เพราะการทดสอบด้วยวิธีนี้จะใช้งานร่วมกับวิธี motor current measurement ในการตรวจจับ OLTC ขณะกำลังทำงาน

ในแต่ละขั้นตอนการทำงานของ OLTC จะให้รูปแบบของความดันและคลื่นการสั่นสะเทือน โดยส่งผ่านน้ำมันและตัวถังของหม้อแปลง ทำให้วิธีนี้สามารถตรวจสอบการเสื่อมสภาพของ OLTC ได้จากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะเสียง ดังรูปด้านล่าง แสดงอิทธิพลของหน้าคอนแทคบน Diverter Switch แสดงในรูปของลักษณะการสั่นสะเทือน



รูปที่ ๖.6 รูปแบบของหน้าคอนแทคบน Diverter Switch ตรวจจับด้วยวิธี Vibro-Acoustic Signature

๖.5.5. OLTC Oil Test

ค่าแรงดันเบรคความถี่และปริมาณน้ำเป็นสองตัวแปรที่มีผลกระทบต่อ OLTC โดยมีเกณฑ์การตรวจสอบดังนี้

ตาราง ๖.5 แสดง OLTC Oil Test

		U_a [kV]	H_2O [ppm]
		VDE 0370 / IEC 60156	ASTM D1533-88
New Mineral Oil prior to Energization		>60	<12
After end of Maintenance	New oil	>50	<15
Service-Aged Mineral Oil	Service oil	>30	<30

๖.6. การตรวจสอบด้วยสายตา

แม้ว่าจะมีวิธีที่หลากหลายในการประเมินเงื่อนไขของหม้อแปลง แต่จากประสบการณ์พบว่าการตรวจดูด้วยสายตาก็มีประสิทธิภาพมากเช่นกัน และบางปัญหาวิธีนี้ก็เป็วิธีเดียวที่จะสามารถตรวจสอบปัญหานั้นได้ โดยจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

๖.6.1. Thermography

Infrared Thermography คือเทคนิคที่ให้ภาพที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าได้โดยแสดงในรูปแบบของความร้อนของแต่ละวัตถุ เทคนิคนี้สามารถตรวจสอบของข้อบกพร่องของจุดต่อต่างๆบนหม้อแปลงได้ รวมไปถึงจุดร้อนบนชาร์กอเรสเตอร์ (Surge Arresters) หรือกระแสที่ทำให้ตัวถังร้อน เป็นต้น

สำหรับ OLTC เทคนิคนี้บางครั้งสามารถตรวจสอบความผิดปกติทางความร้อนจากปัญหาหน้าสัมผัสที่เสื่อมสภาพได้ หรือในส่วนอื่นๆ ที่มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นได้ เพราะโดยปกติแล้ว OLTC จะมีอุณหภูมิที่เย็นกว่าตัวถังหลักจึงสามารถตรวจสอบความผิดปกติจากความร้อนได้

ณ.6.2. ตัวถังหลัก และถังน้ำมันสำรอง

ตัวถังนั้นจะบรรจุส่วนทำงานหลักของหม้อแปลง (แกนเหล็ก และขดลวด) รวมทั้งฉนวนด้วย โดยความสมบูรณ์ของตัวถังนั้นถูกกำหนดโดยคุณลักษณะทางกล ตัวถังจะต้องรับความดันโดยที่ไม่ให้เกิดการรั่ว โดยการตรวจสอบปัญหาของตัวถังนั้นจะตรวจสอบได้จากการสังเกตน้ำมันที่รั่วออกมา

การตรวจสอบถุงยาง(Rubber Bag) ทำได้โดยการสอดอุปกรณ์ที่มีปลายเป็นสำลีเข้าไป ด้านบนของถังน้ำมันสำรองแล้วกวาดไปรอบๆ อย่างเบาๆ ถ้าสำลีชุ่มไปด้วยน้ำมันแสดงว่ามีรูรั่วเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังมี Transducers ช่วยในการตรวจจับด้วย

- capacitive Transducer สามารถตรวจจับหน้าสัมผัสโดยน้ำมันได้
- Gas Collection Relay ที่ติดอยู่ด้านบนตัวถังน้ำมันสำรองสามารถตรวจจับ

อากาศได้

ระดับน้ำมันบนถังน้ำมันสำรองเป็นสิ่งที่ต้องตรวจสอบว่าน้ำมันมีระดับที่เหมาะสมในการใช้งานหรือไม่ โดยการทำให้เครื่องหมายระดับน้ำมันนั้นจะทำเมื่ออุณหภูมิ 25 °C เพื่อให้ในการอ้างอิงการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำมัน

สารดูความชื้นสำหรับหม้อแปลงชนิดใช้ถุงยางในถังน้ำมันสำรองจะต้องได้รับการตรวจเช็ค และเปลี่ยนอยู่เสมอเมื่อประสิทธิภาพในการดูความชื้นหมดลง

การตรวจสอบตัวถังหลักควรตรวจสอบในหัวข้อต่อไปนี้

- ตรวจสอบน้ำมันรั่ว
- ตรวจสอบร่องรอยความเสียหาย รอยแตก หรือการสึกกร่อน
- ตรวจสอบระดับน้ำมัน
- ตรวจสอบอุปกรณ์ทำให้อากาศแห้งหรือถุงยางของถังน้ำมันสำรอง
- ตรวจสอบระบบกราวด์ของตัวถังหลักและการเชื่อมต่อนิวทรัล
- ตรวจสอบฉนวนทางไฟฟ้าสำหรับตัวถังหลัก
- ตรวจสอบสถานะทุกค่าก่อนที่จะส่งหม้อแปลงกลับมาทำงาน

เมื่อซิลิกาเจลที่ทำให้อากาศแห้งมีสีเปลี่ยนไปจะแสดงว่าซิลิกาเจลเกิดการอิ่มตัวแล้วเนื่องจากระยะเวลาและความชื้นจึงต้องทำการเปลี่ยนใหม่โดยใช้เกณฑ์เมื่อสีของซิลิกาเจลเปลี่ยนมากกว่า 50% ของทั้งหมด ยิ่งไปกว่านั้นการที่ซิลิกาเจลไม่มีการเปลี่ยนสีเป็นเวลานานกว่าที่ควรจะเป็น ยังเป็นตัวบ่งบอกว่าอาจจะมีอากาศรั่วตามท่อหรือจุดต่อต่างๆ ได้อีกด้วย

ณ.6.3. ระบบระบายความร้อน

1) Oil Pumps

การตรวจสอบด้วยสายตาของส่วนประกอบของระบบระบายความร้อนควรจะทำอยู่เสมออย่างน้อยไม่เกิน 1 ปี โดย Oil Pump จะต้องถูกตรวจสอบเพื่อให้แน่ใจว่าเหมาะสมในการใช้งานหรือไม่ ถ้ามีรอยขีดขูด โพรงอากาศ หรือสิ่งผิดปกติ ก็ควรบันทึกไว้เพื่อใช้ในการแก้ไขและตรวจสอบต่อไป ส่วนของท่อ วาว หรือรอบๆ พื้นไม่ควรมีรอยน้ำมัน

2) คลีบและพัดลม

พัดลมควรตรวจสอบว่ามีความเหมาะสมในการทำงานหรือไม่เช่นเดียวกับ Oil Pumps หากเกิดปัญหากับมอเตอร์ เกิดเสียง หรือการสั่นควรบันทึกไว้เพื่อตรวจสอบและแก้ไขต่อไป ใบพัดของพัดลมควรมีการป้องกันจากบุคคล ส่วนคลีบนั้นควรตรวจสอบให้แน่ใจว่ามีความเหมาะสมสำหรับการระบายความร้อนหรือการไหลของน้ำมันหรือไม่ รวมทั้งตรวจสอบรอยรั่วของน้ำมันตามพื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) Forced Oil-Air Coolers

Forced Oil-Air Coolers ถูกใช้ในหม้อแปลงยกระดับแรงดันจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและหม้อแปลงเคลื่อนที่ รวมทั้งหม้อแปลงตามสถานีไฟฟ้าย่อย โดยระบบระบายความร้อนมีทั้งพัดลมระบายอากาศและปั๊มช่วยในการไหลของน้ำมันเพื่อให้การระบายความร้อนมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น สำหรับการติดตั้งพัดลมหรือปั๊มนั้นขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมของหม้อแปลงและรูปแบบการใช้งาน

เมื่อมีการใช้งานเป็นเวลานานการระบายอากาศก็จะมีประสิทธิภาพลดลงเนื่องจากสิ่งอุดตัน หรือเศษอนุภาคต่างๆ จึงมีการแก้ไขโดยใช้สเปย์ความดันสูงเพื่อทำความสะอาด ทั้งนี้ต้องระวังไม่ให้เกิดความเสียหายแก่ท่อของคลีป เพราะจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการระบายความร้อน เมื่อการระบายความร้อนไม่ดีก็จะส่งผลให้หม้อแปลงมีอุณหภูมิสูงกว่าปกติซึ่งส่งผลต่ออายุของหม้อแปลง

สรุปการตรวจสอบของระบบระบายความร้อนมีดังนี้

- ตรวจสอบระบบควบคุมการระบายความร้อน และระบบสำรอง
- ตรวจสอบค่าของปั๊ม พัดลม และมอเตอร์วัดการไหล
- ตรวจสอบเงื่อนไขทางกลของปั๊มและพัดลม และระยะเวลาการใช้งาน
- ตรวจสอบประสิทธิภาพของระบบระบายอากาศและทำความสะอาดอุปกรณ์และ

คลีป

ณ.6.4. อุปกรณ์ประกอบ

1) อุปกรณ์วัดอุณหภูมิของเหลวและขดลวด

อุณหภูมิที่วัดคือส่วนบนของน้ำมันและขดลวดโดยจะขึ้นอยู่กับการออกแบบและการทำงานของหม้อแปลง ซึ่งโดยปกติแล้วสามารถวัดได้ที่ตัวหม้อแปลง อุณหภูมิส่วนบนของน้ำมันโดยปกติจะไม่เกิน 80°C และอุณหภูมิขดลวดโดยปกติจะน้อยกว่า 100°C การที่อุณหภูมิมากกว่าปกติจะเป็นตัวบ่งชี้ว่าอาจจะเกิดปัญหาที่ระบบระบายความร้อนหรือการรับโหลดเกินของหม้อแปลง

2) อุปกรณ์วัดระดับของเหลว

อุปกรณ์วัดระดับของเหลวนั้นจะต้องเชื่อถือได้ หน้าปิดใส อ่านง่าย ไม่มีรอยขีดข่วน ไม่มีความชื้นอยู่ในหน้าปิด และเข็มวัดต้องสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระเมื่อทดสอบโดยใช้แม่เหล็ก และสวิตช์ต้องสามารถใช้ได้ตามปกติ โดยปกติระดับน้ำมันจะวัดที่ 25°C แล้วเปรียบเทียบกับอุณหภูมิส่วนบนของน้ำมัน ถ้ารับโหลดเต็มพิกัดจะทำให้อุณหภูมิส่วนบนของน้ำมันมีค่าสูง และระดับน้ำมันจะมีระดับสูงขึ้น ส่วนถ้าหม้อแปลงไม่ได้ทำงานอุณหภูมิส่วนบนของหม้อแปลงก็จะมีค่าเข้าใกล้ 25°C และระดับน้ำมันก็จะใกล้เคียงกับที่ทำเครื่องหมายไว้ที่ 25°C

โดยปกติแล้วระดับน้ำมันจะไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง การตรวจสอบนั้นจะทำทุกเดือนหรือทุกปี เมื่อไหร่ก็ตามที่ระดับน้ำมันถึงจุดต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ก็จะต้องทำการบำรุงรักษา และควรตรวจสอบความเหมาะสมในการทำงานของอุปกรณ์ชนิดนี้ทุกครั้ง ถ้าพบข้อบกพร่องก็ควรแก้ไขหรือเปลี่ยนต่อไป

3) Rapid Pressure Rise Relay

รีเลย์ชนิดนี้จะต้องได้รับการทดสอบและสอบเทียบตามมาตรฐาน และมีหลายปัจจัยที่ทำให้ประสิทธิภาพของรีเลย์ลดลง เช่น การสั่นสะเทือน ความชื้น และการสึกกร่อนจากสิ่งแวดล้อมภายนอก ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบด้วยสายตาอยู่เสมอ ส่วนการทำงานของสวิตช์ควรจะสามารถทำงานได้อย่างปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) Gas Accumulation Relay

ควรจะทำ การตรวจสอบท่อของรีเลย์และทำการเปลี่ยนเมื่อตรวจพบความเสียหาย ส่วนหน้าปัดรีเลย์นั้นจะต้องเชื่อถือได้ หน้าปัดใส อ่านง่าย ไม่มีรอยขีดข่วน ไม่มี ความชื้นอยู่ในหน้าปัด เข็มวัดต้องสามารถเคลื่อนที่ได้ อย่างอิสระเมื่อทดสอบโดยใช้แม่เหล็ก และสวิทช์ต้องสามารถใช้งานได้ ตามปกติ

5) Pressure Relief Devices

ในความเป็นจริงการทำงานของอุปกรณ์ชนิดนี้ถูกกำหนดโดยผู้ผลิตและไม่ควรเปลี่ยนแปลง ถ้าไม่ได้รับคำแนะนำจากผู้ผลิตก่อน โดยการทำงานคือเมื่อมีแรงดันในตัวถังมากก็จะดันสปริงออกและปลดปล่อยความดันออก ซึ่งสปริงจะเก็บพลังงานไว้มากดังนั้นไม่ควรถอดชิ้นส่วนออกถ้าไม่จำเป็น หรือไม่มีการป้องกัน

Pressure Relief Devices (PRD) จะมีการปิดผลึกและใช้น้ำมันหล่อลื่นชนิดพิเศษ เมื่อถูกใช้งานเป็นระยะเวลาความถึงการสั้น หรืออุณหภูมิ อาจทำให้น้ำมันหล่อลื่นเสื่อมสภาพหรือรั่วออก มากจึงควรตรวจสอบและแก้ไขต่อไป

ตรวจสอบระบบการทำงานของสวิทช์แจ้งเตือนว่ามีการสีกกร่อนหรือเสียหายหรือไม่ โดยปกติ แล้วสวิทช์จะถูกออกแบบมาให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถตรวจเช็คได้ เมื่อตรวจสอบแล้วสวิทช์จะต้องใช้งานได้ อย่างปกติ

6) อุปกรณ์ควบคุมระบบระบายความร้อน

อุปกรณ์ควบคุมระบบระบายความร้อนประกอบด้วยอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อทางไฟฟ้าหรือทางกล ระหว่างตัวตรวจวัดอุณหภูมิของเหลวหรือน้ำมัน (LTI/OTI) หรือตัวตรวจวัดอุณหภูมิของขดลวด (WTI) กับพัดลม บีม และระบบการไหลเวียนของน้ำมัน (ตัวถัง คลีบ และท่อ) โดยจะมีสวิทช์ และ หน้าสัมผัสต่างๆ เพื่อควบคุม

การตรวจสอบควรตรวจสอบสวิทช์ต่างๆ ว่ายังสามารถทำงานได้อย่างปกติ และไม่มี การสีกกร่อน ความร้อนเกิน การเปลี่ยนสีบนตัวท่อหุ้มสวิทช์ หรือจุดต่อต่างๆ

สรุปการตรวจสอบอุปกรณ์ประกอบ ควรตรวจสอบตามหัวข้อต่อไปนี้

- ตรวจสอบจุดเชื่อมต่อ สกรู และความสะอาดของฉนวน (บุชชิ่ง)
- ตรวจสอบระดับน้ำมันในบุชชิ่ง คุณภาพและสีของน้ำมัน
- ตรวจสอบฟังก์ชันและสัญญาณของบุชไฮสรีเลย์ รวมทั้งทำความสะอาดหน้าปัด
- ตรวจสอบวาล์วของถังเก็บน้ำมันสำรอง รวมทั้งตำแหน่งของวาล์ว
- ตรวจสอบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิทั้งหมด
- ตรวจสอบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิขดลวดถ้าติดตั้ง
- ตรวจสอบสัญญาณแจ้งเตือนอุณหภูมิสูง
- ตรวจสอบ Pressure Relief Valves ของตัวถังหลักและ OLTC
- ตรวจสอบและทำความสะอาดอุปกรณ์ควบคุม และเซนเซอร์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ณ.6.5. ตู้ของหม้อแปลง

มีอุปกรณ์ประกอบมากมายที่เชื่อมต่ออยู่กับตู้ของหม้อแปลง ซึ่งการตรวจสอบควรปฏิบัติดังนี้
เหล่านี้

- ตรวจสอบอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าสำรอง และสัญญาณของอุปกรณ์
- ตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันความชื้น
- ตรวจสอบจุดต่อต่างๆ และทำความสะอาดหน้าสัมผัส
- ตรวจสอบ Service Hour Counter ถ้ามีการติดตั้ง

ณ.6.6. On-Load Tap Changer

OLTC เป็นอุปกรณ์ที่จะต้องให้ความสนใจเป็นพิเศษเนื่องจากการเป็นการทำงานเชิงกล การตรวจสอบควรปฏิบัติตามหัวข้อต่อไปนี้

1) Diverter Switches

- ตรวจสอบการอัปเดตเพื่อเพิ่มเสถียรภาพการทำงานของ OLTC การอัปเดตนี้สามารถทำได้ง่ายโดยทำการติดตั้งในระหว่างการบำรุงรักษาประจำ

- ถอด Diverter หรือ Selector Switch
- เข้าไปตรวจสอบ และทำความสะอาด
- ตรวจสอบอุปกรณ์ทางกล
- ตรวจสอบหน้าสัมผัส เปรียบเทียบกับค่าที่กำหนดจากผู้ผลิต
- ถ้าตรวจสอบแล้วค่าเกินกว่าข้อกำหนดก็พิจารณาเพื่อเปลี่ยนอุปกรณ์ส่วนนั้น
- เปลี่ยนอุปกรณ์ปิดผลึกหลังจากทำการตรวจสอบและบำรุงรักษาเสร็จแล้ว
- ตรวจสอบอุปกรณ์ขับเคลื่อนและความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์
- ตรวจสอบเพิ่มเติมตามที่คุณผลิตแนะนำ

โดยปกติ Vacuum Switches ไม่จำเป็นต้องบำรุงรักษาจะสามารถใช้งานได้นาน ถ้าจำเป็นต้องตรวจสอบควรจะปฏิบัติตามที่คุณผลิตแนะนำ

2) Motor Drive

- ตรวจสอบด้วยสายตา
- ตรวจสอบลำดับการทำงานที่ละชั้น
- ตรวจสอบ End-Position Blocking (ถ้าสามารถทำได้)
- ตรวจสอบระบบป้องกันความชื้น
- ตรวจสอบอุปกรณ์ควบคุมตัวชี้วัดตำแหน่ง
- ตรวจสอบเพิ่มเติมตามที่คุณผลิตแนะนำ

3) Tap Selector

- ปกติจะไม่จำเป็นต้องบำรุงรักษา
- ถ้าจำนวนการทำงานถึงจุดที่ต้องบำรุงรักษาควรปรึกษาผู้ผลิต
- ถ้า OLTC เป็นชนิดเก่า ที่ไม่ได้ใช้หน้าสัมผัสแบบ Silver-plated Selector

Contacts แนะนำให้ตรวจสอบและทำความสะอาดทุกปี

4) การเปลี่ยนน้ำมัน

- การเปลี่ยนน้ำมันควรดำเนินการระหว่างการบำรุงรักษา น้ำมันแรงแม่เหล็กไม่ควรถูกเปลี่ยนด้วยน้ำมันที่อยู่คนละระดับหรือน้ำมันชนิดอื่น ถ้าต้องการเปลี่ยนเป็นน้ำมันชนิดอื่นควรปรึกษาผู้ผลิต OLTC ความหนืดและคุณสมบัติความเป็นฉนวนของน้ำมันจะต้องได้รับการอนุมัติจากผู้ผลิต

5) อุปกรณ์ประกอบ

- ตรวจสอบอุปกรณ์ทำให้อากาศแห้งในช่วงเวลาการตรวจสอบปกติ

- ตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันต่างๆ พร้อมกับการตรวจสอบหม้อแปลง

ณ.6.7. การทำงาน และข้อแนะนำในการปฏิบัติงานสำหรับ Buchholz Relay

บุชโฮลรีเลย์ (Buchholz Relay) ที่ติดตั้งบนหม้อแปลงจะมีสองส่วนการทำงานดังต่อไปนี้

- Gas Collection Element

ในส่วนที่บุชโฮลรีเลย์จะทำการสะสมแก๊สที่ออกมาจากตัวถังหม้อแปลง โดยจะเพิ่มขึ้นได้ถึงค่าที่กำหนด ถ้าแก๊สเพิ่มขึ้นเกินกว่าค่าที่กำหนดก็จะปล่อยออกจากบุชโฮลรีเลย์สู่ถังเก็บน้ำมันสำรอง และจะต้องมีการดำเนินการต่อไป การออกแบบหม้อแปลงนั้นควรไม่ให้มีที่สะสมแก๊สได้ ซึ่งจะทำให้แก๊สไปสะสมที่ตัวรีเลย์เพิ่มขึ้น

- Oil Surge Element

บุชโฮลรีเลย์จะทำงานเมื่อน้ำมันไหลผ่านรีเลย์อย่างรวดเร็ว และซึ่งตรงตามลักษณะการไหลของน้ำมันเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้น น้ำมันจะไหลจากตัวถังหลักไปยังน้ำมันสำรองด้วยความรวดเร็วหรือกรณีที่น้ำมันลระดับอย่างรวดเร็วเนื่องจากที่การรั่วของน้ำมันรีเลย์ก็จะทำงานเช่นกัน แต่ในส่วนนี้จะไม่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อให้ทำงานเมื่อมีการสะสมของแก๊ส

ณ.6.7.1. เงื่อนไขในการทำงานของ Gas Collection Element

ปัจจัยที่ทำให้ส่วนของ Gas Collection Element ทำงานมีดังนี้

1) ระดับน้ำมันต่ำ

ถ้าน้ำมันอยู่ระดับที่ต่ำกว่าบุชโฮลรีเลย์ รีเลย์จะทำการแจ้งเตือนก่อนสั่งตัดวงจร โดยเงื่อนไขนี้สามารถยืนยันได้จากอุปกรณ์วัดระดับน้ำมันที่ตัวถังเก็บน้ำมันสำรอง ดังนั้นควรตรวจสอบเมื่อระดับน้ำมันลดลงซึ่งอาจจะเกิดจากน้ำมันรั่วอย่างช้าๆ หรืออุณหภูมิแวดล้อมต่ำอย่างผิดปกติ นอกจากนี้ยังอาจเกิดจรั่วความผิดปกติภายในตัวถังหม้อแปลงทำให้หม้อแปลงรั่วออก

2) การดิสชาร์จบางส่วนภายในหม้อแปลง

พลังงานจากการดิสชาร์จทางไฟฟ้าในน้ำมันจะทำให้เกิดแก๊ส และโดยปกติแก๊สจะละลายในน้ำมัน แต่ในกรณีที่รุนแรงแก๊สเหล่านี้ อาจทำให้เกิดฟองแก๊สได้

3) ความร้อนเกิน

ความร้อนเกินที่ขดลวดอาจเกิดจากความผิดปกติภายในหรือการรับโหลดเกิน ซึ่งจะต้องได้รับการตรวจสอบ โดยความร้อนเกินจะสร้างแก๊สขึ้นมากด้วย

4) มีอากาศติดอยู่ตามช่องเก็บน้ำมัน

เป็นเหตุการณ์ปกติถ้าไม่ได้ใช้วิธีทำให้เป็นสุญญากาศ หรือทำให้เป็นสุญญากาศแค่บางส่วนในหม้อแปลง การทำให้เป็นสุญญากาศนั้นจะช่วยลดปริมาณแก๊สและฟองแก๊ส

5) อากาศภายนอกเข้ามาในหม้อแปลง

เป็นเรื่องที่เกิดได้ยากที่อากาศจากภายนอกจะเข้ามา เพราะภายในหม้อแปลงจะมีความดันอยู่ระดับหนึ่ง นอกจากจะเข้ามาทางบีมของน้ำมัน ถ้าเกิดขึ้นจะเป็นอันตรายต่อหม้อแปลงอย่างมาก อันเกิดจากฟองอากาศ

6) การสั่นสะเทือน หรือแผ่นดินไหว

บุชโฮลรีเลย์จะมีสวิตช์ปรอทซึ่งอ่อนไหวต่อการสั่นสะเทือน ดังนั้นการใช้งานหม้อแปลงในที่ที่มีการสั่นสะเทือน เมื่อรีเลย์ทำงานก็ควรมีการตรวจสอบเพื่อความถูกต้องด้วย

7) Light Current Faults

เป็นไปได้ที่อาจจะเกิดความผิดพลาดของวงจรหรือตัวรีเลย์เองทำให้การแจ้งเตือนผิดพลาด ดังนั้นความทำการตรวจสอบก่อนที่จะใช้งานหม้อแปลงทุกครั้ง

ฉ.6.7.2. เงื่อนไขในการทำงานของ Oil Surge Element

ปัจจัยที่ทำให้ส่วนของ Oil Surge Element ทำงานมีดังนี้

1) การเบรกดาวนทางไฟฟ้า

พลังงานที่เกิดจากการเบรกดาวนจะทำให้เกิดแก๊สอย่างรวดเร็วและทำให้น้ำมันพุ่งจนทำให้ฟังก์ชันนี้ทำงาน โดยปกติแล้วแก๊สที่ถูกสร้างขึ้นจะทำให้ฟังก์ชันการแจ้งเตือนทำงานก่อน และเมื่อเกิดน้ำมันพุ่งก็จะทำให้ Pressure Relief Devices ทำงานด้วย

2) ระดับน้ำมันต่ำ

3) บีมทำงาน

บุชโฮลรีเลย์อาจอ่อนไหวต่อการที่น้ำมันพุ่งเนื่องจากการที่บีมเริ่มหรือหยุดทำงาน โดยปกติแล้วบีมจะดูดน้ำมันออกจากด้านระบบระบายอากาศและส่งกลับคือที่ด้านบนของตัวถัง และเหตุการณ์จะแย่งเมื่อบีมทุกตัวทำงานพร้อมกัน ซึ่งปกติจะแก้ไขโดยการหน่วงเวลาการทำงานของรีเลย์ขณะบีมทำงานหรือหยุดทำงาน การทำงานของบีมนั้นจะไม่ทำให้เกิดแก๊สซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ได้

4) บุชโฮลรีเลย์ติดตั้งไม่ถูกต้อง

โดยปกติแล้วบุชโฮลรีเลย์จะมีความเอียงของท่อ 3° จากแนวระดับ ความโน้มเอียงของรีเลย์เป็นเรื่องที่สำคัญมากเพราะรีเลย์ได้ถูกออกแบบมาเพื่อให้ทำงานที่ความโน้มเอียงตามที่กำหนด

5) การสั่นสะเทือน หรือแผ่นดินไหว

6.7.3. การปฏิบัติเมื่อบุชโฮลรีเลย์แจ้งเตือนหรือตัดวงจร

1) เมื่อรีเลย์แจ้งเตือน

หม้อแปลงจะต้องถูกปลดออกเร็วที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ถ้าหม้อแปลงไม่สามารถปลดออกได้แล้วจะต้องพิจารณาถึงความเสียหายเมื่อเกิดความล้มเหลวขึ้น สำหรับหม้อแปลงที่ไม่มีประวัติจะต้องทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันหรือทดสอบด้วยวิธีอื่น เพื่อให้รู้ว่าเกิดปัญหาอะไรขึ้น และแก้ไขต่อไป

2) เมื่อรีเลย์สั่งตัดวงจรหรือหม้อแปลงหยุดทำงานเมื่อเกิดการแจ้งเตือนเนื่องจากแก๊ส

การตรวจสอบเพื่อตัดสินใจทำการดำเนินการต่อไป ควรทำตามหัวข้อต่อไปนี้

- เก็บตัวอย่างน้ำมันจากตัวถังหลัก และส่วนอื่นๆ ที่บรรจุน้ำมันอยู่ แล้วส่งไป

ตรวจสอบ

- ตรวจสอบแก๊สที่เกิดขึ้นบนบุชโฮลรีเลย์และบันทึกปริมาณแก๊สที่ตรวจพบ

- เก็บตัวอย่างแก๊สที่ถูกสะสมไว้เพื่อส่งตรวจสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ตรวจสอบ Pressure Relief Devices
- ตรวจสอบน้ำมันที่รั่วออกมารอบๆ Pressure Relief Devices
- ตรวจสอบความบิดเบี้ยวของสัญญาณที่อยู่บนตัวถัง รวมถึง Tap Changers
- ตรวจสอบการบันทึกระดับน้ำมันของตัวถังเก็บน้ำมันสำรอง
- ตรวจสอบการบันทึกระดับน้ำมันของบุชชิ่ง
- ตรวจสอบการบันทึกระดับน้ำมันของ Tap Changers Diverters
- ตรวจสอบการทำงานของระบบป้องกันทางไฟฟ้า
- ตรวจสอบการบันทึกความผิดพลาด (Fault Recorders)
- ตรวจสอบและบันทึกตำแหน่งของแทป และเวลาในการทำงานของ Tap

Changers

- บันทึกตำแหน่งของระบบระบายอากาศของระบบควบคุม Tap Changers รวมถึงอุณหภูมิสูงสุดบนหน้าปัดของ WTI



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-สกุล นางสาวนัชชา จันทรปิยวงศ์

เกิดวันที่ 15 พฤศจิกายน พ.ศ. 2537

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจาก โรงเรียนนครนายกวิทยาคม
จังหวัดนครนายก

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนนครนายกวิทยาคม
จังหวัดนครนายก

เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2556

ฝึกงานที่ บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน)

ระหว่าง เดือนมิถุนายน ถึง เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2559



ชื่อ-สกุล นาย ธนากร รุยศรีแก้ว

เกิดวันที่ 8 พฤษภาคม พ.ศ. 2538

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจาก โรงเรียนธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนธัญบุรี จังหวัด
ปทุมธานี

เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2556

ฝึกงานที่ บริษัท โตเกียว เดนกิ กรุ๊ป จำกัด

ระหว่าง เดือนมิถุนายน ถึง เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2559



ชื่อ-สกุล นายธนากร สิงห์เส

เกิดวันที่ 23 กรกฎาคม พ.ศ. 2538

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจาก โรงเรียนหล่มสักวิทยาคม
จังหวัดเพชรบูรณ์

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนหล่มสักวิทยาคม
จังหวัดเพชรบูรณ์

เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2556

ฝึกงานที่ บริษัท โต๊กิโอ เดนกิ กรุ๊ป จำกัด

ระหว่าง เดือนมิถุนายน ถึง เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2559



ชื่อ-สกุล นายธีระวิษณุ กาบแก้ว

เกิดวันที่ 9 ตุลาคม พ.ศ. 2537

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจาก โรงเรียนพะเยาพิทยาคม
จังหวัดพะเยา

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนพะเยาพิทยาคม
จังหวัดพะเยา

เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2556

ฝึกงานที่ บริษัท เทอร์โมเทรเซอร์ จำกัด

ระหว่าง เดือนมิถุนายน ถึง เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้