การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ

STUDY ON ELECTRICAL PROPERTIES OF PRESSBOARD IMPREGNATED WITH NATURAL ESTER

จอมภัทร สิริวรจรรยาดี

JOMPATARA SIRIWORACHANYADEE

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2564

KMITL-2021-EN-M-020-020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY ON ELECTRICAL PROPERTIES OF PRESSBOARD IMPREGNATED
WITH NATURAL ESTER

JOMPATARA SIRIWORACHANYADEE

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT’S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2021

KMITL-2021-EN-M-020-020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2021

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTUTUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ
นักศึกษา	นายจอมภัทร สิริวรจรรยาดี
รหัสประจำตัว	61601208
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2564
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพรสบอร์ดที่ทำการอิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ ซึ่งเป็นฉนวนที่ถูกใช้ในการฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยเริ่มจากการนำตัวอย่างเพรสบอร์ดขนาด 100x100 ตารางมิลลิเมตร ความหนา 1.6 มิลลิเมตร มาอบในตู้อบสุญญากาศที่ปรับอุณหภูมิได้ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ความดัน 200 มิลลิบาร์ ระยะเวลานาน 12 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นที่อยู่ภายในโพรงของเพรสบอร์ด หลังจากอบเสร็จให้นำตัวอย่างเพรสบอร์ดนั้นมาอิมเพรกเนตในเอสเตอร์ธรรมชาติ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 200 มิลลิบาร์ โดยที่ระยะเวลาในการอิมเพรกเนตจะเป็นการควบคุมความชื้นของเพรสบอร์ด ซึ่งจะแบ่งหัวข้อการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพรสบอร์ดออกเป็น 2 หัวข้อ ได้แก่ การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพรสบอร์ดด้วยผลจากความชื้น คือ เป็นการศึกษาผลจากความชื้นของเพรสบอร์ดโดยการเปรียบเทียบระยะเวลาในการอิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ (0, 8, 16 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ) และนำมาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ เช่น การทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Breakdown Voltage test) ตามมาตรฐาน IEC 60243-1:2013, การทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าขั้วบวกและขั้วลบ (Positive and Negative Lightning Impulse Breakdown Voltage test) ตามมาตรฐาน IEC 60243-3:2013 และการทดสอบการวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน (PDC measurement test) นอกจากนี้แล้วจะทำการศึกษาผลของการเสื่อมสภาพของเพรสบอร์ดจากการทดสอบทางไฟฟ้า ในหัวข้อนี้จะแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อย่อย ได้แก่ การวัดค่า PDC ของเพรสบอร์ดหลังจากการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ, การวัดค่า PDC ของเพรสบอร์ดหลังจากการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และการวัดค่า PDC ของเพรสบอร์ดหลังจากการจำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Study on Electrical Properties of Pressboard Impregnated with Natural Ester
Student	Mr. Jompatara Siriworachanyadee
Student ID	61601208
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2021
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Norasage Pattanadech

ABSTRACT

This thesis presents the study about the electrical properties of pressboard impregnated with natural ester that used in a transformer, beginning by preparing the pressboard (Rectangular shape 100 mm. and 1.6 mm. thickness). The prepared pressboards were dried up in the vacuum oven with temperature at 80 degrees Celsius for 12 hours under 200 mbar pressure for removing the moisture within the pressboards. After that the pressboards were impregnated with natural ester at 60 degrees Celsius under 200 millibar. The study on electrical properties of the pressboards was divided into 2 topics: (1) the effect of moisture content on the electrical properties of pressboards and (2) the effect of electrical stresses on the electrical properties of the pressboards. For the first topic, the prepared pressboards were tested for electrical properties, i.e., AC breakdown voltage test following to IEC 60243-1:2013, positive and negative lightning impulse breakdown voltage test following IEC 60243-3:2013 and polarization and depolarization current measurement (PDC measurement). For the second topic, PDC measurement was performed with the pressboard experienced with various types of electrical stress, i.e., AC voltage, impulse voltage and partial discharge phenomena.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ตามเป้าหมายเนื่องจากได้รับการสนับสนุน ความช่วยเหลือ ความกรุณา และคำแนะนำดีๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาค้นคว้าจากผู้มีพระคุณหลายท่าน ได้แก่

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช ที่ให้คำปรึกษา และคอยชี้แนะ มอบความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า ตลอดจนคำติที่ดีที่คอยเตือนสติข้าพเจ้าด้วยความเป็นห่วงเป็นใย

ขอขอบพระคุณ บริษัท เทสล่า พาวเว่อร์ จำกัด ที่คอยสนับสนุน อุปกรณ์สำหรับการทดสอบ และชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ รวมถึงคำแนะนำในการทดสอบทางไฟฟ้าต่างๆ

ขอขอบคุณ คุณกิตติพศ จริยานุรัตน์ ที่คอยให้คำปรึกษา และความช่วยในการทำการทดสอบทางไฟฟ้าต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณ กองทดสอบไฟฟ้าแรงสูง สถานีไฟฟ้าแรงสูงบางพลี การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์การทดสอบ PDC Analyzer เพื่อใช้ในการทดสอบวัดค่า PDC จนจบการทำวิจัย

สุดท้ายขอขอบคุณแรงผลักดันที่สำคัญ ครอบครัวของข้าพเจ้า ที่คอยเป็นกำลังใจตลอดมาทั้งยามท้อแท้ ยามยากลำบากก็คอยให้กำลังใจข้าพเจ้าจนสามารถก้าวผ่านมาได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย....................I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ....................II
กิตติกรรมประกาศ....................III
สารบัญ....................IV
สารบัญตาราง....................VI
สารบัญรูปภาพ.................... VII
บทที่ 1 บทนำ.................... .1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา....................1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์จองการศึกษา....................2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา....................2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย....................2
1.5 ขอบเขตการวิจัย....................3
1.6 ขั้นตอนของการวิจัย....................3
1.7 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง....................4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย....................6
2.1 ฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้า.................... 6
2.1.1 ฉนวนแข็ง (solid insulation).................... 6
2.1.2 ฉนวนเหลว (liquid insulation)....................8
2.1.3 กระบวนการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้า....................10
2.2 การทดสอบฉนวนไฟฟ้า.................... 11
2.2.1 การทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ....................11
2.2.2 การทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า....................11
2.2.3 การทดสอบดิสชาร์จบางส่วน....................16
2.2.4 การทดสอบการวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน........17
บทที่ 3 ตัวอย่างทดสอบและการทดสอบ.................... 18
3.1 ตัวอย่างชิ้นทดสอบและชุดทดสอบ....................18
3.2 การทดสอบ....................21
3.2.1 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพรสบอร์ดที่มีผลจากความชื้น....................21
3.2.2 การศึกษาผลของการเสื่อมสภาพของเพรสบอร์ดจากการทดสอบทางไฟฟ้า...26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดสอบ.......28

4.1 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพรสบอร์ดที่มีผลจากความชื้น.......28

4.1.1 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ.......28

4.1.2 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า.......29

4.1.3 การทดสอบกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน.......30

4.2 การศึกษาผลของการเสื่อมสภาพของเพรสบอร์ดจากการทดสอบทางไฟฟ้า.......32

4.2.1 การวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดหลังจากการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ.......32

4.2.2 การวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดหลังจากการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า.......34

4.2.3 การวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดหลังจากการจำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วน.......35

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.......38

5.1 สรุปผลการทดลอง.......38

5.1.1 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพรสบอร์ดที่มีผลจากความชื้น.......38

5.1.2 การศึกษาผลของการเสื่อมสภาพของเพรสบอร์ดจากการได้รับความเครียดทางไฟฟ้า.......39

5.2 ข้อเสนอแนะ.......41

เอกสารอ้างอิง.......42

ภาคผนวก.......44

ประวัติผู้เขียน.......61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย......3
2.1 การแบ่งประเภทของฉนวนแข็ง......6
2.2 ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของกระดาษอิมเพรกเนตด้วยฉนวนเหลวที่ 20 องศาเซลเซียส (ε_{res})......8
2.3 คุณสมบัติของฉนวนเหลวชนิดต่างๆ......9
3.1 รายละเอียดและคุณสมบัติของเพรสบอร์ดที่นำมาใช้ทดสอบ......19
4.1 ค่าความชื้นในเอสเตอร์ธรรมชาติ......28
4.2 ค่าความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับของเพรสบอร์ด......28
4.3 ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าขั้วบวกของเพรสบอร์ด......29
4.4 ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าขั้วลบของเพรสบอร์ด......29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ หน้า

2.1 เพรสบอร์ด......7
2.2 กระดาษคร๊าฟ......7
2.3 โครงสร้างของเอสเตอร์ธรรมชาติ......8
2.4 การย่อยสลายตามธรรมชาติของฉนวนเหลว......9
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้น และแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลว......10
2.6 โครงสร้างของเซลลูโลส......10
2.7 รูปแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม......12
2.8 รูปแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตัดหลังคลื่น......13
2.9 รูปแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตัดหน้าคลื่น......13
2.10 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ วงจร A......13
2.11 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ วงจร B......14
2.12 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบหลายชั้นตามวงจรมาร์กซ์......15
2.13 การเกิดดิสชาร์จรูปแบบต่างๆ......16
2.14 วงจรการวัด และองค์ประกอบพื้นฐานของ PDC......17
2.15 องค์ประกอบของกระแสโพลาไรซ์เซชัน......18
3.1 อิเล็กโตรดชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของเพรสบอร์ด......20
3.2 ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของเพรสบอร์ด......21
3.3 การจัดเรียงเพรสบอร์ดในตู้อบ......21
3.4 การเตรียมอิมเพรกเนตเพรสบอร์ดด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ......22
3.5 วงจรทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ด......22
3.6 วงจรทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด......23
3.7 ชุดทดสอบสำหรับวัดค่า PDC ของตัวอย่างเพรสบอร์ด......24
3.8 เครื่อง PDC-Analyzer ที่ใช้สำหรับวัดค่ากระแสของเพรสบอร์ด......24
3.9 วงจรการวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน......25
4.1 PDC ของเพรสบอร์ดที่ไม่ได้อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ......30
4.2 PDC ของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ นาน 8 ชั่วโมง......30
4.3 PDC ของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ นาน 16 ชั่วโมง......31
4.4 PDC ของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ นาน 24 ชั่วโมง......31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ หน้า

4.5 PDC ของเพรสบอร์ดที่ไม่ได้อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ....32

4.6 PDC ของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ นาน 8 ชั่วโมง....32

4.7 PDC ของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ นาน 16 ชั่วโมง....33

4.8 PDC ของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ นาน 24 ชั่วโมง....33

4.9 PDC ของเพรสบอร์ดที่ไม่ได้อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ....34

4.10 PDC ของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ นาน 8 ชั่วโมง....34

4.11 PDC ของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ นาน 16 ชั่วโมง....35

4.12 PDC ของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ นาน 24 ชั่วโมง....35

4.13 PDC ของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ นาน 8 ชั่วโมง....36

4.14 PDC ของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ นาน 16 ชั่วโมง....36

4.15 PDC ของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ นาน 24 ชั่วโมง....37

5.1 กราฟเปรียบเทียบ PDC ของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ....39

5.2 กราฟเปรียบเทียบPDC ของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติจาก การทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ....39

5.3 กราฟเปรียบเทียบPDC ของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติจาก การทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า....40

5.4 กราฟเปรียบเทียบPDC ของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติจาก การจำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วน....41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หม้อแปลงไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญอย่างมากของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากำลัง ส่วนประกอบหลักของหม้อแปลงประกอบด้วย ตัวนำ แกนเหล็ก และฉนวนไฟฟ้า การฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยฉนวนไฟฟ้าหลัก 2 ชนิด คือ ฉนวนแข็ง และฉนวนเหลว ฉนวนแข็งในหม้อแปลงได้แก่ กระดาษคร๊าฟ กระดาษ บอร์ด และเพรสบอร์ด ทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้า และรองรับแรงทางกล และยังเป็นฉนวนที่สามารถบ่งบอกอายุการใช้งานของหม้อแปลงด้วย สำหรับฉนวนเหลวนั้นเป็นฉนวนหลักทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้า และทำหน้าที่ระบายความร้อนให้กับหม้อแปลง ปัจจุบันในอุตสาหกรรมการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้านิยมใช้น้ำมันหม้อแปลง (transformer oil) หรือน้ำมันแร่ (mineral oil) เป็นฉนวนหลัก คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง แต่ก็ยังมีขีดจำกัดอยู่บางประการ เช่น ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าจะลดลงเป็นอย่างมากเมื่อมีปริมาณความชื้นเจือปนเพิ่มขึ้น (10-25 ppm) จุดติดไฟของน้ำมันหม้อแปลงมีค่าไม่สูงมากนัก ประมาณ 150°C และความสามารถในการย่อยสลายตามธรรมชาติได้น้อย เมื่อเทียบกับฉนวนเหลวกลุ่มเอสเตอร์ ซึ่งได้รับการพัฒนาขึ้นมาทีหลัง เอสเตอร์ธรรมชาติ (natural ester) ได้ถูกใช้เป็นฉนวนเหลวในอุตสาหกรรมหม้อแปลงไฟฟ้าในต่างประเทศ เนื่องจากคุณสมบัติโดยรวมดีกว่าน้ำมันหม้อแปลงหรือน้ำมันแร่ คุณสมบัติของเอสเตอร์ธรรมชาติ ได้แก่ ค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์มีค่าสูงถึงแม้ว่าจะมีประมาณความชื้นเจือปนสูง (350 ppm) มีจุดติดไฟ และจุดวาปไฟที่อุณหภูมิสูงประมาณ 300 องศาเซลเซียส และมีความสามารถในการย่อยสลายตามธรรมชาติได้ประมาณ 90% ภายในระยะเวลา 28 วัน เมื่อเทียบกับน้ำมันหม้อแปลงที่สามารถย่อยสลายได้เพียง 10% ภายในระยะเวลาเดียวกัน ถึงแม้ว่าราคาของเอสเตอร์ธรรมชาติมีราคาที่แพงกว่าน้ำมันหม้อแปลง แต่ก็ได้มีอุตสาหกรรมในประเทศไทยบางแห่งได้นำฉนวนชนิดนี้ เพราะคุณสมบติโดยรวมดีกว่า และเป็นฉนวนที่รักษาสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามเมื่อมีการใช้งานไประยะเวลาหนึ่ง คุณสมบัติของเพรสบอร์ดที่ใช้เป็นฉนวนร่วมกับเอสเตอร์ธรรมชาติจะเสื่อมลง ส่งผลต่อประสิทธิภาพ และอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้า ทางกล ทางเคมี จึงมีความสำคัญมากๆ วิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งเน้นไปที่การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวของเพรสบอร์ดที่ใช้เป็นฉนวนร่วมกับเอสเตอร์ธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบคุณสมบัติของเพรสบอร์ด ได้แก่ การทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าขั้วบวก และแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าขั้วลบ รวมไปถึงการทดสอบการวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน เพื่อดูคุณสมบัติความเป็นฉนวน เพื่อนำมาเปรียบเทียบในแต่ละกรณี เนื่องจากผู้ใช้งานหม้อแปลงที่ใช้เอสเตอร์ธรรมชาติเป็นฉนวนเหลวในประเทศไทยยังขาดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับคุณสมบัติของเพรสบอร์ดที่ใช้ภายในหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้เอสเตอร์ธรรมชาติเป็นฉนวนเหลว วิทยานิพนธ์นี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าเบื้องต้นของฉนวนเพรสบอร์ดนำไปใช้ต่อยอดในอุตสาหกรรมการผลิตได้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จุดมุ่งหมายของการศึกษานั้นประกอบไปด้วย 3 วัตถุประสงค์ ดังนี้

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของเพรสบอร์ดที่ใช้งานในหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้เอสเตอร์ธรรมชาติเป็นฉนวน
2. เพื่อศึกษาความเป็นฉนวนของเพรสบอร์ดจากการทดสอบทางไฟฟ้า ได้แก่ การทดสอบความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ และการทดสอบการวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน
3. เพื่อศึกษาผลของการเสื่อมสภาพของเพรสบอร์ดหลังจากผ่านการทดสอบทางไฟฟ้า

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติความเป็นฉนวนของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติที่ระยะเวลาต่างๆ ได้ค่าที่ถูกต้อง และแม่นยำ เพื่อที่สามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบในภาคอุตสาหกรรมการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้า รวมทั้งค่ากระแสโพลาไรซ์เซชัน และกระแสดีโพลาไรซ์-เซชันที่ได้สามารถวิเคราะห์คุณสมบัติของเพรสบอร์ดได้ผลที่ชัดเจน

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นการจำลองการเตรียมการอิมเพรกเนตของเพรสบอร์ดด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติที่ระยะเวลาต่างๆ เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าเบื้องต้นของฉนวนเพรสบอร์ด ผลการทดสอบที่ได้สามารถนำไปใช้ต่อยอดในอุตสาหกรรมการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ฉนวนเอสเตอร์ธรรมชาติเป็นฉนวนเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขอบเขตการวิจัย

เพรสบอร์ดใช้ในการทดสอบ จะใช้เพรสบอร์ด ขนาด 100x100 ตารางมิลลิเมตร หนา 1.6 มิลลิเมตร ในการจำลองระยะเวลาในการอิมเพรกเนตของเพรสบอร์ดจะทำการอิมเพรกเนตในตู้อบสุญญากาศที่ความดันอากาศ 200 มิลลิบาร์ โดยแต่ละเงื่อนไขในการจำลองจะทำการทดสอบทางไฟฟ้า ดังนี้

1. การทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ด

2. การทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด

3. การทดสอบการวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชัน และกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดกับตัวอย่างเพรสบอร์ดที่ได้ทดสอบดังที่กล่าวมา เพื่อมาเปรียบเทียบกับเพรสบอร์ดใหม่ภายใต้เงื่อนไขระยะเวลาในการอิมเพรกเนตเดียวกัน

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูลจากทฤษฎี และงานวิจัยต่างๆ ทั้งภายในประเทศ และต่างประเทศ โดยระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินงานนั้น ครอบคลุมตั้งแต่ เดือนมีนาคม พ.ศ. 2562 ถึงเดือน ตุลาคม พ.ศ. 2563 โดยมีแผนการดำเนินงานดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2561 / 2					ปีการศึกษา 2562 / 1				
	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
1.ศึกษาข้อมูล งานวิจัย รวมทั้งทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	●	●	●							
2.ศึกษาการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สามารถใช้ทดสอบกับเพรสบอร์ดได้				●	●	●				
3.ศึกษาการวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชัน และกระแสดีโพลาไรเซชั่นเพื่อใช้ทดสอบคุณสมบัติของฉนวน						●	●			
4.จำลองกรณีศึกษาของเพรสบอร์ด เพื่อศึกษาคุณสมบัติของเพรสบอร์ด								●	●	●

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 (ต่อ) แผนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2562 / 2					ปีการศึกษา 2563 / 1				
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
6.จัดทำการทดลองเพื่อทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพรสบอร์ด	●	●	●	●	●					
7.ตรวจเช็คความเรียบร้อย และทดสอบซ้ำแก้ไขข้อผิดพลาด				●	●					
8.วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง						●				
9.จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์						●	●	●	●	●

1.7 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาคุณสมบัติของเพรสบอร์ด ถึงแม้ว่ายังไม่แพร่หลายมากนัก แต่ยังพอมีบทความที่มีการศึกษาในลักษณะนี้ ได้แก่

ในปี พ.ศ. 2548 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง Dielectric responses of new and aged transformer pressboard in dry and wet states [1] โดย J. Gielnial, และคณะ ในงาน International Symposium on Electrical Insulating Materials 2005 (ISEIM 2005) สรุปได้ว่าความชื้นเป็นปัจจัยหลักในการทำให้เพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตมีคุณสมบัติเปลี่ยนไป โดยที่มีคุณสมบัติแย่ลง คือมีสภาพความเป็นตัวนำมากขึ้นเนื่องจากความชื้น

ในปี พ.ศ. 2557 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง Diffusion Coefficient in Transformer Pressboard Insulation Part 1: Non Impregnated Pressboard [2] โดย R. Villarroel และคณะ ใน IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol 21 No. 1 สรุปได้ว่าเพรสบอร์ดที่ไม่ผ่านการอิมเพรกเนตด้วยฉนวนเหลวที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มีค่าสัมประสิทธิ์การอิ่มตัวของน้ำต่ำกว่าเพรสบอร์ดที่อุณหภูมิ 40, 60 และ80 องศาเซลเซียสอย่างเห็นได้ชัด และเปรียบเทียบกับความหนาของเพรสบอร์ด ที่อุณหภูมิเดียวกันเพรสบอร์ดที่มีความหนามากกว่าจะมีสัมประสิทธิ์การอิ่มตัวของน้ำมากกว่าเมื่อเวลาผ่านไปเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี พ.ศ. 2558 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง Moisture Diffusion Coefficients of Transformer Pressboard Insulation Impregnated with Natural Esters [3] โดย R. Villarroel และคณะ ใน IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol 22 No. 1 สรุปได้ว่าเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาตินั้นมีความคงทนต่อความชื้นได้ดีกว่าเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันหม้อแปลง เนื่องจากเอสเตอร์ธรรมชาติมีองค์ประกอบที่เรียกว่าไฮโดรฟิลิกที่มากกว่าน้ำมันหม้อแปลง จึงทำให้สรุปได้ว่าที่สภาพแวดล้อมเดียวกัน เพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติสามารถทนต่อความชื้นได้ดีกว่าน้ำมันหม้อแปลง

ในปี พ.ศ. 2559 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง “The Effect of Thermal Aging on Surface Structure and Mechanical Strength of Oil-impregnated [4] โดย Cao Pei และคณะ ในงาน International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis 2016 (CMD 2016) สรุปได้ว่าอุณหภูมิมีผลต่อผิวของเพรสบอร์ดในทางด้านกายภาพ คือมีสีเข้มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูง โครงสร้างเซลลูโลสถูกทำลายให้มีเส้นใยที่สั้นลง และโครงสร้างทางด้านความแข็งแรงของกระดาษก็ลดลง เมื่อเพรสบอร์ดได้รับอุณหภูมิสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้า รวมไปถึงการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนที่ต้องการศึกษา

2.1 ฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

น้ำมันหม้อแปลง และเพรสบอร์ดเป็นฉนวนหลักของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งมีการใช้งานอย่างแพร่หลายเป็นเวลานาน เพราะให้คุณสมบัติความเป็นฉนวนที่ดีในราคาที่เหมาะสม [5] น้ำมันหม้อแปลง หรือน้ำมันแร่ ยังช่วยในการระบายความร้อน เพรสบอร์ดเป็นฉนวนที่สามารถรองรับแรงทางกล [6] ในปัจจุบันเริ่มมีการให้ความสำคัญเกี่ยวกับการรักษาสิ่งแวดล้อมเป็นเหตุทำให้วิศวกรเริ่มทำการวิจัยหาฉนวนเหลวที่มีมลพิษต่ำ และมีการย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย [7,8] นอกจากนี้น้ำมันแร่ที่มีความชื้นสูง และมีสารปนเปื้อนจะง่ายต่อการเบรคดาวน์ ความชื้นยังเป็นสาเหตุของการลดลงของความแข็งแรงทางกลและทางไฟฟ้าของเพรสบอร์ด [9,10] ดังนั้นการศึกษาคุณสมบัติของเพรสบอร์ดจึงมีความจำเป็น การเสื่อมของฉนวนไฟฟ้าขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความชื้น, ความเป็นกรด, ออกซิเจน, อุณหภูมิ และภาระทางไฟฟ้า [11] โดยปัจจัยต่างๆ ก่อให้เกิดกระบวนการออกซิเดชั่น, กระบวนการไฮโดรไลซิส และกระบวนการไพโรไลซิส ส่งผลต่อฉนวนเหลว และฉนวนแข็งภายในหม้อแปลงไฟฟ้า [12]

2.1.1 ฉนวนแข็ง (solid insulation)

ฉนวนแข็งนอกจากจะทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าแล้ว บางส่วนยังจะต้องทำหน้าที่ยึดหรือรับแรงกลอันเกิดจากน้ำหนักของโครงสร้าง หรือแรงกลไดนามิกส์ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าอีกด้วย ฉนวนแข็งเมื่อทำการแบ่งประเภทโดยการอาศัยโครงสร้างทางเคมีจะสามารถจำแนกได้เป็น สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และโพลิเมอร์ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การแบ่งประเภทของฉนวนแข็ง

Organic	Inorganic	Synthetic Polymers	
		Thermoplastic	**Thermosetting**
Amber	Ceramics	Prespex	Epoxy
Paper	Glass	Polyethylene	Phemolics
Pressboard	Mica	Polypropylene	Melamine
Rubber	Fiber Glass	Polyvinyl Chloride	Urea Formaldehyde
Wood	Enamel	Polyamic	Crosslinked
Resins		Polycarbonate	Polystyrene
			Elastomers

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉนวนแข็งที่เป็นสารอินทรีย์ทีเกิดจากพืช และสัตว์นั้นจะให้คุณสมบัติความเป็นฉนวนที่ดีแต่จะเสื่อมสภาพเร็วโดยเฉพาะเมื่ออุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงต้องนำฉนวนแข็งดังกล่าวไปปรับปรุงคุณสมบัติเสียก่อน ก่อนที่จะนำไปใช้งานซึ่งมักจะนำไปใช้งานร่วมกับฉนวนเหลวในการเป็นฉนวนของสายเคเบิล ตัวเก็บประจุของหม้อแปลง ลักษณะสมบัติที่ต้องการของฉนวนแข็งอาจกำหนดด้วยคุณสมบัติที่สำคัญคือ

1. ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (dielectric strength)
2. ค่าเปอร์มิตติวิตี้ (ε_r)
3. ค่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$)
4. ค่าความคงทนต่อแรงกล
5. ค่าความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี และความร้อน

ฉนวนแข็งที่มีใช้งานเป็นฉนวนในหม้อแปลงอาจแบ่งออกเป็น กระดาษบาง (Paper), กระดาษอัดแรง (Board) และเพรสบอร์ด (Pressboard) โดยทั่วไปกระดาษบางจะมีความหนาน้อยกว่า 0.8 มิลลิเมตร ส่วนกระดาษอัดแรงจะมีความหนามากกว่า 0.8 มิลลิเมตร กระดาษอัดแรงที่กล่าวถึงในที่นี้จะมีความหมายครอบคลุมไปถึง pressboards, transformer boards และ fuller boards กระดาษที่ใช้เป็นฉนวนโดยทั่วไปจะรู้จักกันในชื่อของกระดาษคร๊าฟ (Kraft paper) ความหนาและความแน่นของกระดาษขึ้นอยู่กับหน้าที่การใช้งานกระดาษที่มีความหนาแน่นต่ำ (0.8 g/cm^3) เหมาะกับการใช้เป็นไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุความถี่สูงและฉนวนของเคเบิล ความหนาแน่นปานกลาง (1 g/cm^3) ใช้เป็นไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุของไฟฟ้ากำลัง กระดาษที่มีความหนาแน่นสูงใช้ในตัวเก็บประจุที่มีขั้วเพื่อเก็บพลังงาน หรือใช้ในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงเนื่องจากกระดาษมีคุณสมบัติดูดซึมความชื้นได้ ฉะนั้นการใช้กระดาษเป็นฉนวนจึงจำเป็นต้องทำให้แห้งแล้วอิมเพรกเนตฉนวนเหลว เช่น น้ำมันฉนวน ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของกระดาษอิมเพรกเนตฉนวนเหลวขึ้นอยู่กับค่าเปอร์มิตติวิตี้ของเซลลูโลสของกระดาษและของฉนวนเหลวที่อิมเพรกเนต และความหนาแน่นของกระดาษซึ่งค่าเปอร์มิตติวิตี้รวมนี้สามารถคำนวนได้ ตัวอย่างค่าเปอร์มิตติวิตี้ของกระดาษอิมเพรกเนตน้ำมันฉนวนแสดงในตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของกระดาษคร๊าฟ และ paper polypropylene paper (PPP) อิมเพรกเนตน้ำมันฉนวนแสดงในตารางที่ 2.2

รูปที่ 2.1 เพรสบอร์ด

รูปที่ 2.2 กระดาษคร๊าฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

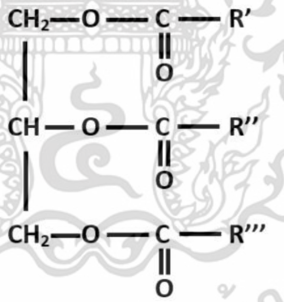
ตารางที่ 2.2 ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของกระดาษอิมเพรกเนตด้วยฉนวนเหลวที่ 20 องศาเซลเซียส (ε_{res})

ฉนวนเหลวที่ใช้อิมเพรกเนต	ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของกระดาษอิมเพรกเนตด้วยฉนวนเหลว (ε_{res})		
	0.8 g/cm^3	1 g/cm^3	1.2 g/cm^3
Trichlorodiphenyl ε_r = 6.1	6.28	6.3	6.4
Pentrachlorodiphenyl	5.71	5.88	6.06
Transformer oil	3.26	3.72	4.3

2.1.2 ฉนวนเหลว (liquid insulation)

ฉนวนเหลวในหม้อแปลงไฟฟ้ามีความสำคัญอย่างมากต่อเสถียรภาพ ความปลอดภัยของระบบไฟฟ้า และผู้ใช้ โดยคุณสมบัติของฉนวนเหลวที่ดีต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่สูง สามารถคืนตัวเป็นฉนวนได้ มีจุดติดไฟสูง และค่าความสูญเสียต่ำ เป็นต้น สำหรับฉนวนเหลวของหม้อแปลงไฟฟ้ามีหลายชนิด ตัวอย่างเช่น น้ำมันหม้อแปลง ไฮโดรคาร์บอนสังเคราะห์ คลอริเนทไฮโดรคาร์บอน น้ำมันซิลิโคน และเอสเตอร์ เป็นต้น

เอสเตอร์ธรรมชาติ (Natural Ester) เอสเตอร์ธรรมชาติผลิตโดยการสกัดจากพืช เช่น ทานตะวัน, ถั่วเหลือง เป็นต้น โครงสร้างหลักประกอบด้วยกรดไขมันกลีเซอรอล (Glycerol Backbone) และแอลกอฮอล์ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเอสเตอร์ธรรมชาติ

การใช้เอสเตอร์ธรรมชาติเป็นฉนวนเหลวของหม้อแปลงไฟฟ้าเริ่มต้นประมาณปี ค.ศ.1990 เนื่องจากความกังวลด้านสิ่งแวดล้อม [13] ในอดีตฉนวนเหลวส่วนใหญ่ที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้า คือ น้ำมันแร่ หรือน้ำมันหม้อแปลง โดยน้ำมันหม้อแปลง มีจุดด้อยหลายประการ ตัวอย่างเช่น จุดติดไฟต่ำทำให้ง่ายต่อการเกิดอัคคีภัยจึงไม่นิยมใช้หม้อแปลงน้ำมันหม้อแปลงในอาคาร ที่สำคัญน้ำมันหม้อแปลงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากมีความสามารถในการสลายตามธรรมชาติได้น้อย จึงทำให้มีการพัฒนาฉนวนเหลวอย่างต่อเนื่องคุณสมบัติของฉนวนเหลวชนิดต่างๆ แสดงดังตาราง ที่ 2.3

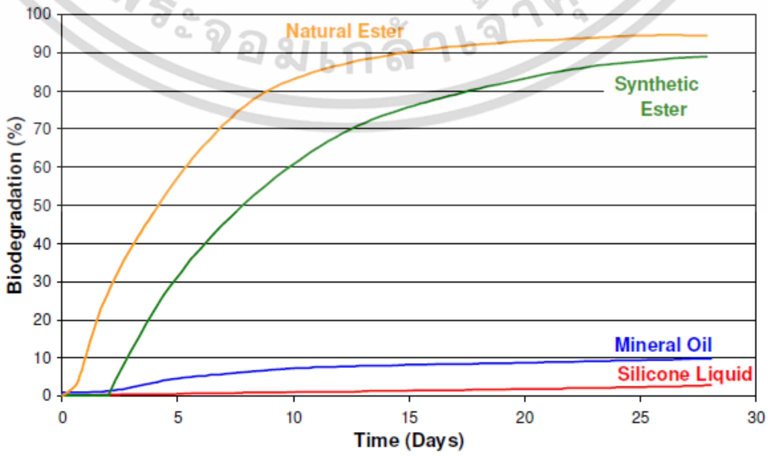
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของฉนวนเหลวชนิดต่างๆ [13]

Property	Mineral Oil	Silicone Liquid	Synthetic Ester	Natural Ester
Flash Point °C	160	>300	>250	>300
Fire Point °C	170	>350	>300	>350
Fire Classification	O	K	K	K
Oxidation Stability	Medium	High	High	High
Moisture Tolerance	Low	Low	Very High	High
Biodegradability	Low	Low	Readily Biodegradable	Readily Biodegradable
Corrosive Sulphur	Possible	None	None	None
Pour Point °C	-50	<-50	-60	-15 to -25
Breakdown Strength IEC 60156 2.5 mm (kV)	>70	>50	>75	>75

จากตารางที่ 2.3 แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติโดยรวมของเอสเตอร์ธรรมชาติดีกว่าน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้กันอยู่ทั่วไป ซึ่งคุณสมบัติของเอสเตอร์ธรรมชาติสามารถสรุปได้ดังนี้

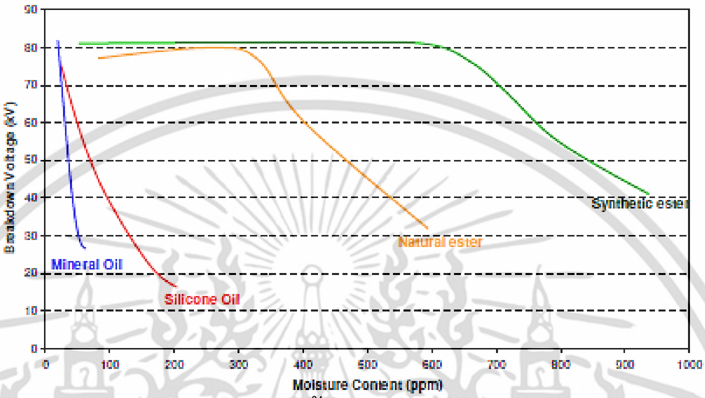
- จุดวาบไฟ และจุดติดไฟสูง ทำให้สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่าน้ำมันหม้อแปลง การใช้ฉนวนเหลวเอสเตอร์สำหรับหม้อแปลงภายในอาคารก่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ใช้ และลดความเสี่ยงจากการเกิดอัคคีภัย
- เอสเตอร์ธรรมชาติเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เอสเตอร์ธรรมชาติสามารถย่อยสลายตามธรรมชาติได้ถึง 90 % ภายในระยะเวลา 28 วัน แสดงดังรูปที่ 2.4 หากรั่วไหลไปตามธรรมชาติก็สามารถย่อยสลายได้เองจะไม่ส่งผลต่อสภาพแวดล้อม ซึ่งช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการกำจัดหากรั่วไหล



รูปที่ 2.4 การย่อยสลายตามธรรมชาติของฉนวนเหลว [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เอสเตอร์ธรรมชาติผลิตจากธรรมชาติ โดยการสกัดจากพืชทำให้ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต และเอสเตอร์ธรรมชาติไม่สามารถระเหยสู่บรรยากาศ ไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อระบบทางเดินหายใจของสิ่งมีชีวิต
- เอสเตอร์ธรรมชาติมีความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์สูงกว่าน้ำมันหม้อแปลง ในสภาวะความชื้นเท่ากัน ถึงแม้ว่าความชื้นของเอสเตอร์ธรรมชาติสูง แต่ก็มีความสามารถคงทนต่อการเบรคดาวน์ได้สูงเช่นกัน แสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.5



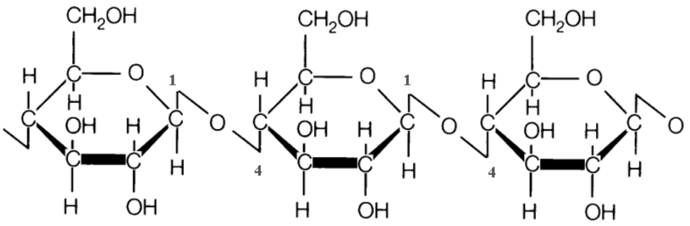
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้น และแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลว [13]

2.1.3 กระบวนการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้า

1. การเสื่อมสภาพของฉนวนเซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นฉนวนแข็งภายในหม้อแปลงไฟฟ้าผลิตจากไม้ เช่น กระดาษ, เพรสบอร์ด เป็นต้น เซลลูโลสประกอบด้วยพันธะกลูโคสจำนวนมาก พันธะ C-O และพันธะไกโคซิดิคที่ถูกจัดเรียง และเชื่อมต่อกันเป็นโซ่ยาว แสดงดังรูปที่ 2.6

โดยฉนวนเซลลูโลสจะมีเสถียรภาพต่ำกว่าฉนวนเหลว เมื่ออุณหภูมิของกระดาษสูงกว่า 105 °C (Insulation class A) ส่งผลให้โซ่พอลิเมอร์ของกลูโคสถูกตัดออก และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 300 °C จะเกิดการสลายพันธะเกิดเป็นแก๊ส CO และ CO_2 โดยปริมาณ CO, CO_2 ที่สูงขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิภายในหม้อแปลงสูงขึ้น และ O_2 ส่งผลให้เกิดความชื้นของฉนวนเซลลูโลสในหม้อแปลงไฟฟ้าสูงขึ้น



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของเซลลูโลส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การเสื่อมสภาพของเอสเตอร์ธรรมชาติ

จากโครงสร้างของเอสเตอร์ธรรมชาติเกิดจากปฏิกิริยาของแอลกอฮอล์ และกรดไขมัน โครงสร้างของเอสเตอร์ธรรมชาติประกอบด้วยพันธะเดี่ยว และพันธะคู่ ซึ่งความชื้นหรือน้ำเป็นโมเลกุลมีขั้ว และมีความสามารถดึงดูดโมเลกุลที่มีขั้วอื่นๆ เนื่องจากน้ำมันหม้อแปลงเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว และน้ำมันซิลิโคนมีขั้วเพียงเล็กน้อย แต่เอสเตอร์ธรรมชาติมีมากจึงสามารถดึงดูดโมเลกุลของน้ำได้ ทำให้ความชื้นของเอสเตอร์ธรรมชาติมีมากกว่าความชื้นของน้ำมันหม้อแปลงและน้ำมันซิลิโคน ความชื้นของฉนวนเหลวสามารถเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ เอสเตอร์ธรรมชาติอ่อนไหวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เนื่องจากโครงสร้างทางเคมี

2.2 การทดสอบฉนวนไฟฟ้า

2.2.1 การทดสอบค่าแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ

การทดสอบนี้ทดสอบเพื่อหาค่าแรงดันเบรกดาวน์เพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยฉนวนเหลวเป็นการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย รูปทรงอิเล็กโตรดออกแบบตามมาตรฐาน IEC 60243-1 [15] รูปทรงอิเล็กโตรดที่ใช้ทดสอบเป็นแบบ Unequal electrode เนื่องจากเพรสบอร์ดเป็นฉนวนผสมระหว่างเซลลูโลสและฉนวนเหลว โครงสร้างของเซลลูโลสมีความพรุน ฉนวนเหลวสามารถเข้าไปแทนที่อากาศในเซลลูโลสได้ด้วยวิธีการอิมเพรกเนต โดยทั่วไปเส้นใยเซลลูโลสมีความคงทนไดอิเล็กตริกสูงกว่าฉนวนเหลว

2.2.2 การทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

แรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันที่มีรูปคลื่นเลียนแบบมาจากแรงดันเกินเสิร์จทรานเซียนต์ที่เกิดจากเหตุภายนอกที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ฟ้าผ่า เรียกว่า แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า และที่เกิดขึ้นจากสาเหตุภายในระบบส่งจ่ายเอง คือ เกิดจากการทำงานของสวิตช์ หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ เมื่อมีความผิดพร่องเกิดขึ้นในระบบ เรียกว่า แรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่ง

2.2.2.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน

แรงดันอิมพัลส์อาจกำหนดด้วยข้อกำหนดต่อไปนี้

1. ขนาดของแรงดันโดยปกติจะหมายถึงค่ายอดของรูปคลื่นแรงดัน ในกรณีที่มีระลอกซ้อน ที่เกิดจากออสซิลเลชันใกล้ๆ ยอดรูปคลื่น ให้ถือเอาค่าเฉลี่ยจากค่ายอดรูปคลื่นระลอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ขั้วของแรงดันอาจเป็นขั้วบวกหรือลบก็ได้ เมื่อเทียบกับดิน

3. เวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 หมายถึงช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากค่าศูนย์เสมือนจนถึงค่ายอด

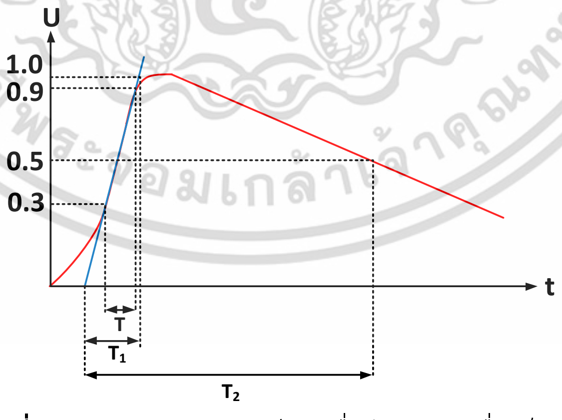
4. เวลาช่วงหลังคลื่น T_2 หมายถึงช่วงเวลาตั้งแต่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์เสมือนผ่านค่ายอดจนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด

รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์อาจแบ่งเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่

1. รูปคลื่นเต็ม (full wave) ซึ่งหมายถึงรูปคลื่นที่มีขนาดเพิ่มขึ้นถึงค่ายอดแล้วค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเป็นศูนย์

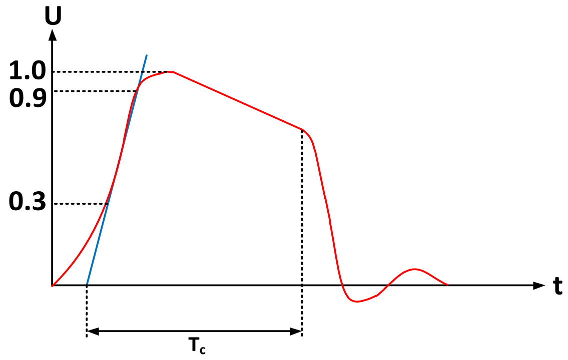
2. รูปคลื่นตัด (chopped wave) เกิดจากการป้อนแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มเข้าไปที่ วัสดุทดสอบ และการฉนวนของวัสดุทดสอบนั้นทนต่อแรงดันที่ป้อนเข้าไปไม่ได้ จึงเกิดการสปาร์คผ่านเกิดวาบไฟตามผิว หรือเกิดเบรกดาวน์เจาะทะลุ ทำให้เกิดการลัดวงจร ณ จุดนั้น การเกิดคลื่นตัดนี้ อาจจะเกิดขึ้นที่ส่วนหลังคลื่น หรือส่วนหน้าคลื่นก็ได้

ในรูปที่ 2.7 แสดงถึงแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม รูปที่ 2.8 แสดงถึงแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตัดหลังคลื่น และรูปที่ 2.9 แสดงถึงแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตัดหน้าคลื่นตามลำดับ รูปคลื่นตัดมีส่วนกำหนดที่สำคัญ คือ เวลาช่วงคลื่นตัด (chopped time) T_c ถ้าเกิดตัดที่หลังคลื่น ขนาดของแรงดันคือ ค่ายอด (peak) ถ้าเกิดตัดที่หน้าคลื่นขนาดแรงดันก็คือ ค่าที่ได้ ณ จุดตัด ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของรูปคลื่นที่เหลือ

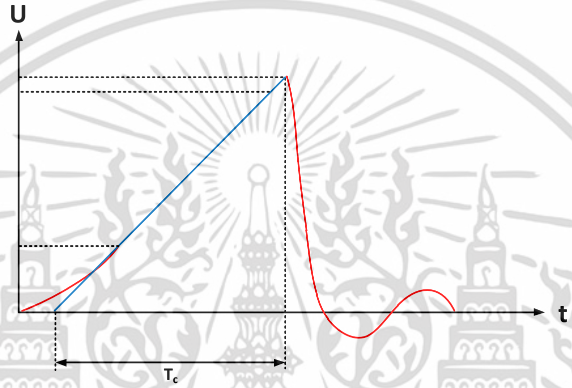


รูปที่ 2.7 รูปแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 รูปแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตัดหลังคลื่น [13]



รูปที่ 2.9 รูปแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตัดหน้าคลื่น [13]

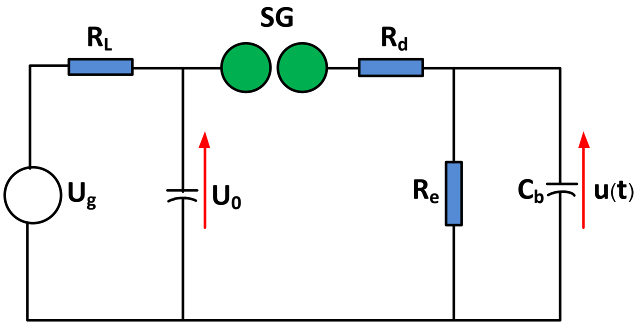
ถ้าต้องการทราบว่าแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นมานั้นเป็นไปตามมาตรฐานกำหนดหรือไม่ ให้หาค่า T_1, T_2 หรือ T_c โดยวิธีที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.9 ว่าอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดต่อไปนี้หรือไม่ คือ เวลาช่วงหน้าคลื่น $T_1 = 1.2\ \mu S \pm 30\%$ คือ จะต้องอยู่ในช่วง 0.84 – 1.56 μS และ เวลาช่วงหลังคลื่น $T_2 = 50\ \mu S \pm 20\%$ คือ จะต้องอยู่ในช่วง 40 – 60 μS

ค่ายอดแรงดัน U_m ยอมให้ผิดพลาดได้ $\pm$ 3% ของค่าที่ระบุรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

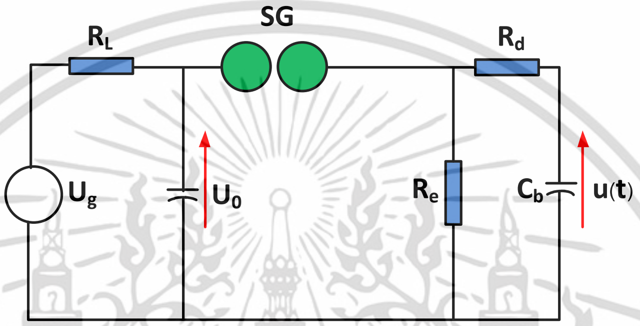
2.2.2.2 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

วงจรพื้นฐานที่ใช้สร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ามี 2 แบบ ดังในรูปที่ 2.10 และ รูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ วงจร A [13]



รูปที่ 2.11 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ วงจร B [13]

ความหมายในรูปวงจร 2.10 และ 2.11

U_g คือ แรงดันกระแสตรงของตัวจ่าย

U_0 คือ แรงดันอัดประจุกระแสตรง

C_s คือ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นตัวเก็บพลังงาน

C_b คือ ตัวเก็บประจุโหลด (รวมทั้งความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์เครื่องวัดและอื่นๆ)

R_L คือ ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ

R_d คือ ความต้านทานหน่วง

R_e คือ ความต้านทานปล่อยประจุ

U(t) คือ แรงดันอิมพัลส์ที่ได้แปรไปตามเวลา

SG คือ สปาร์กแกป

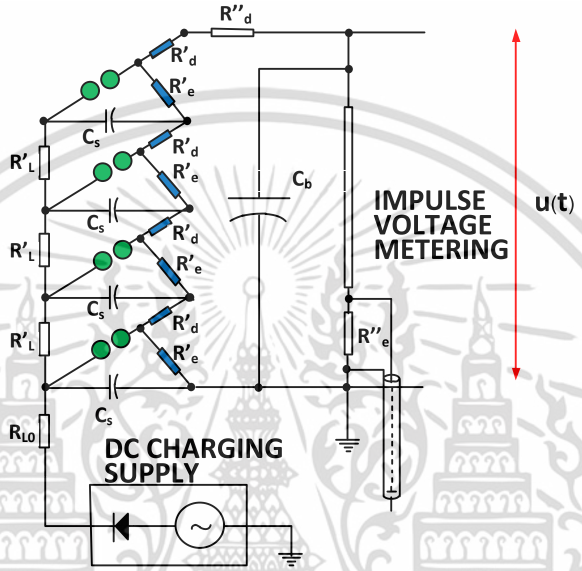
2.2.2.3 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายชั้น

จากวงจรพื้นฐานของการสร้างแรงดันอิมพัลส์ ปกติจะออกแบบให้สร้างแรงดันได้ถึง 200 kV ซึ่งไม่เพียงพอสำหรับการทดสอบ BIL ของอุปกรณ์ที่ใช้กับแรงดันระบบ 52 kV หรือสูงกว่า ค่าแรงดันอิมพัลส์สูงๆ อาจสร้างได้ด้วยเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบหลายขั้น โดยใช้วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ ตามหลักการของมาร์กซ์ (Marx’s circuit) ดังในรูปที่ 2.12

ความหมายของสัญลักษณ์ในวงจร จะเหมือนกับวงจรขั้นพื้นฐาน (เครื่องหมาย ’ แสดงถึงเป็นค่าต่อชั้นและเครื่องหมาย ” แสดงถึงองค์ประกอบภายนอกที่เพิ่มขึ้นเพื่อปรับรูปคลื่น)



รูปที่ 2.12 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบหลายชั้นตามวงจรมาร์กซ์ [13]

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

เมื่อเกิดสปาร์กวงจรจะต่อกันแบบอนุกรมจะได้ค่ารวมเป็น

$C_s = C'_s / n$

$R_d = nR'_d$

$R_e = nR'_e$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 การทดสอบดิสชาร์จบางส่วน

ดิสชาร์จบางส่วนจัดเป็นกระบวนการที่ฉนวนเริ่มเสียสภาพ มีการถ่ายเทพลังงานและความเครียดสูงขึ้นภายในเนื้อฉนวน แต่ไม่มากพอที่จะทำให้เกิดการเบรคดาวน์ หากเกิดการดิสชาร์จสะสมเป็นระยะเวลาหนึ่งจะส่งผลทำให้ฉนวนนั้นเสียสภาพ และเกิดเบรคดาวน์ในที่สุด โดยส่วนใหญ่ดิสชาร์จบางส่วนเกิดในบริเวณสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ เช่น ขอบคม, ปลายแหลม หรือ วัสดุ มีสิ่งปนเปื้อน เป็นต้น ซึ่งทำให้สนามไฟฟ้าภายในฉนวนนั้นไม่สม่ำเสมอ และเกิดความเครียดขึ้น อย่างไรก็ตามผลกระทบจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีในเนื้อฉนวน ฉนวนเสียสภาพบางส่วน ลดอายุไขในการใช้งานของฉนวน โดยดิสชาร์จบางส่วนสามารถจำแนกออกเป็น 3 แบบ

1. โคโรน่าดิสชาร์จ (corona discharge)

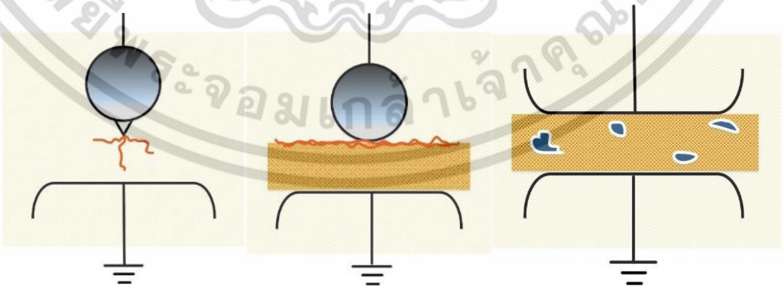
โคโรน่าดิสชาร์จ เกิดประจุไฟฟ้าพลังงานสูงภายในเนื้อฉนวนที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง เช่น ขอบคม ปลายแหลม ในบางกรณีอาจส่งผลทำให้เกิดแสง และเกิดปฏิกิริยาเคมี เมื่อโคโรน่าถูกสะสมจะยิ่งทำลายเนื้อฉนวนมากขึ้น

2. ดิสชาร์จตามผิว (surface discharge)

ผิวฉนวนมีความสำคัญต่อระบบไฟฟ้าอย่างมาก หากสกปรก หรือเกิดรอยชำรุด ทำให้จุดนั้นเกิดความเครียดมาก ซึ่งมีโอกาสนำไปสู่ความล้มเหลวของระบบไฟฟ้า

3. ดิสชาร์จภายใน (internal discharge)

ความไม่สมบูรณ์ของเนื้อฉนวน เช่น โพรงอากาศ สิ่งเจือปน ฉนวนภายในชำรุด เป็นต้น จุดเหล่านี้ล้วนเป็นสาเหตุการดิสชาร์จภายใน และนำไปสู่การเจาะทะลุ หรือเบรกดาวน์ในที่สุด



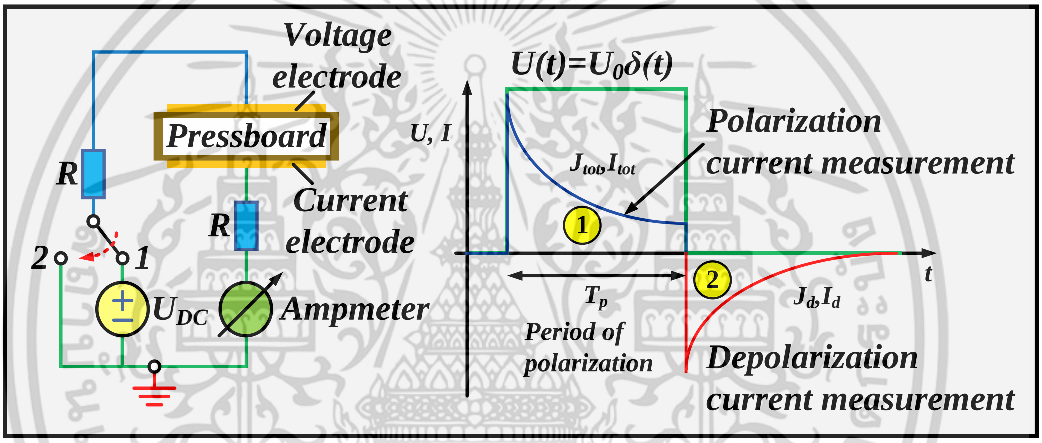
รูปที่ 2.13 การเกิดดิสชาร์จรูปแบบต่างๆ [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 การทดสอบการวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบวิธีหนึ่งในหลายๆวิธี เพื่อหาความชื้นในระบบฉนวน เช่น Bushing, Cable, Generator, Motor และ Transformer โดยการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชัน แล้วดูผลของกระแสทั้งสองช่วง เพื่อมาวิเคราะห์หาความชื้นในระบบฉนวนอีกที

การวัด PDC คือการวัดกระแสทั้ง 2 ชนิด เพื่อศึกษาความแตกต่างของกระแสภายใต้โครงสร้าง อิทธิพล และความซับซ้อนของเนื้อฉนวนที่แตกต่างกัน จากรูปที่ 2.14 แสดงรูปวงจร และองค์ประกอบพื้นฐานของ PDC



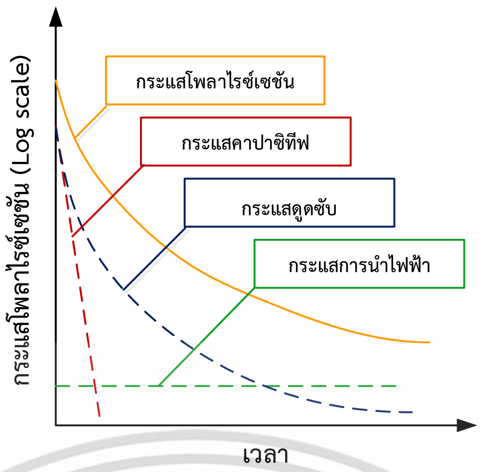
รูปที่ 2.14 วงจรการวัด และองค์ประกอบพื้นฐานของ PDC [14]

1. กระแสโพลาไรซ์เซชัน (polarization current)

กระแสโพลาไรซ์เซชันในทางทฤษฎีและองค์ประกอบของกระแสแสดงได้ดังรูปที่ 2.15 ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วน คือ กระแสคาปาซิทีฟ (capacitive current) เป็นกระแสที่เกิดขึ้นจากกระบวนการโพลาไรซ์เซชันภายในเนื้อฉนวน กระแสต่อมาคือ กระแสดูดซับ (absorption current) เป็นกระแสที่เกิดจากค่าความนำไฟฟ้าของวัสดุซึ่งมีอยู่ในวัสดุทุกชนิด กระแสสุดท้ายคือ กระแสการนำไฟฟ้า (conductance current) เป็นกระแสที่เกิดจากค่าความนำไฟฟ้าของวัสดุซึ่งมีอยู่ในวัสดุทุกชนิด

แต่ในทางปฏิบัติกระแสโพลาไรซ์เซชันที่วัดได้จะมีกระแสรั่วไหล (leakage current, i_l) รวมอยู่ด้วยซึ่งกระแสรั่วไหลนี้เกิดขึ้นจากสิ่งปนเปื้อนที่ผิวฉนวนหรือเกิดจากความสกปรกของสภาพแวดล้อมขณะทำการทดสอบโดยจะพิจารณากระแสการนำไฟฟ้าและกระแสรั่วไหลเป็นกระแสนำไฟฟ้าที่วัดได้ในทางปฏิบัติ (practical conduction current, $i_{con(practical)}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 องค์ประกอบของกระแสโพลาไรซ์เซชัน [14]

กระแสโพลาไรซ์เซชันในทางทฤษฎีสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 1

$$i_{pol}(t) = C_0V_0\,[\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} + \varepsilon\delta(t) + f(t)] \quad (1)$$

โดยที่ C_0 คือ ค่าความจุไฟฟ้าทางเรขาคณิต (geometric capacitance) ของวัตถุทดสอบ

V_0 คือ แรงดันกระแสตรงที่ใช้ในการทดสอบ

σ_0 คือ ค่าความนำไฟฟ้ากระแสตรงบริสุทธิ์ (pure dc conductivity)

ε_0 คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสุญญากาศ (permittivity of vacuum)

ε_{inf} คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ (relative permittivity) ที่เวลาเริ่มต้น (ที่ 0 วินาที)

$\delta(t)$ คือ ฟังก์ชันเดลต้า (delta function) ที่เกิดขึ้นจากการจ่ายแรงดันรูปขั้นบันไดแบบทันทีทันใดให้กับวัตถุทดสอบที่เวลาเริ่มต้น

$f(t)$ คือ ฟังก์ชันผลตอบสนองของไดอิเล็กตริก (dielectric response function)

2. กระแสดีโพลาไรซ์เซชัน (depolarization current)

จากข้อ 1. เมื่อหยุดจ่ายแรงดันให้กับฉนวนและทำการลัดวงจรฉนวนเพื่อให้ฉนวนเกิดการคายประจุลงสู่กราวด์ โมเลกุลและประจุไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนจะเกิดการจัดเรียงตัวเข้าสู่สภาวะปกติก่อนที่จะมีสนามไฟฟ้ามากระทำ กระแสคายประจุ (Discharge current) ที่วัดได้ขณะทำการลัดวงจรให้กับฉนวนจะถูกเรียกว่า กระแสดีโพลาไรซ์เซชัน (depolarization current, i_{depol}) ซึ่งองค์ประกอบของกระแสนี้ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ กระแสคาปาซิทีฟดิสชาร์จ (capacitive discharge current) เป็นกระแสที่เกิดขึ้นและลงอย่างทันที ซึ่งมีลักษณะกระแสเหมือนกับกระแสคาปาซิทีฟของกระแสโพลาไรซ์เซชัน แต่มีขั้วตรงกันข้าม และอีกกระแสหนึ่ง คือ กระแสดูดซับดิสชาร์จ (absorption discharge current) เป็นกระแสที่มีค่าสูงในช่วงแรก เมื่อเวลาผ่านไปนานๆ กระแสดังกล่าวจะค่อยๆลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ตัวอย่างทดสอบและการทดสอบ

ในบทนี้อธิบายถึงรายละเอียดคุณสมบัติของตัวอย่างชิ้นทดลอง ชุดทดสอบ วงจรการทดสอบ การออกแบบการทดลอง ตลอดจนรายละเอียดการทดลอง ซึ่งการทดลองนั้นจะถูกแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อ ได้แก่ การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพรสบอร์ดที่มีผลจากความชื้น และการศึกษาผลของการเสื่อมสภาพของเพรสบอร์ดจากการทดสอบทางไฟฟ้า

3.1 ตัวอย่างชิ้นทดสอบและชุดทดสอบ

ในการทดลองนี้ตัวอย่างเพรสบอร์ดของบริษัทแห่งหนึ่ง ซึ่งตัวอย่างเพรสบอร์ดที่ถูกนำมามีคุณสมบัติโดยรวมแสดงตามตารางที่ 3.1 ตามมาตรฐาน IEC 60641-2 (2004) [16]

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดและคุณสมบัติของเพรสบอร์ดที่นำมาใช้ทดสอบ [16]

Item		Unit	Standard	Test Result	Testing Method
Thickness		Mm	1.38-1.61	1.45-1.60	IEC 60641-2 (2004)
Density		g/cm^3	1.0-1.2	1.19	
Tensile strength	MD≥	MPa	100	100.19	
	CD≥		75	76.89	
Elongation	MD≥	%	2.5	3.12	
	CD≥		3.5	4.05	
Shringkage	MD≤	%	0.5	0.43	
	CD≤		0.7	0.61	
	TD≤		5.0	3.51	
PLY Bond (testing by eye)		-	When tearing one or several piles bursting with obviously rough sighs & coming-out fibers	When tearing one or several piles bursting with obviously rough sighs & coming-out fibers	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) รายละเอียดและคุณสมบัติของเพรสบอร์ดที่นำมาใช้ทดสอบ

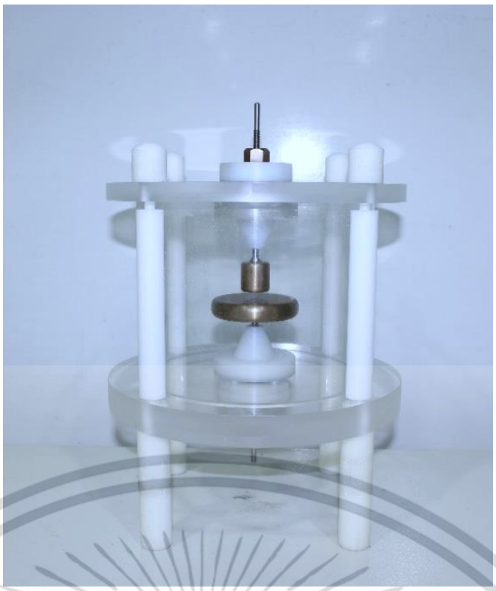
Item		Unit	Standard	Test Result	Testing Method
Moisture content≤		%	6.0	5.6	IEC 60641-2 (2004)
Ash content≤		%	0.7	0.32	
Conductivity of aqueous extract≤		mS/m	5.0	3.96	
PH of aqueous extract		/	6.0-9.0	7.1	
Oil absorbency≥		%	11	16.14	
Electrical strength	In air	kV/mm	12	13.65	
	In oil≥		45	48.42	-

สำหรับชุดทดสอบที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าจะใช้ชุดทดสอบที่ออกแบบเองที่สามารถบรรจุน้ำมัน และใส่ตัวอย่างเพรสบอร์ดได้ ตัวโครงสร้างทำจากวัสดุอะคริลิคใส มีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวง เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 เซนติเมตร หนา 5 มิลลิเมตร ประกบกับแผ่นอะคริลิควงกลมเจาะรู ไว้ใช้ยึดกับอิเล็กโตรดด้านแรงดัน และด้านกราวด์

ส่วนชุดอิเล็กโตรดที่ใช้ในชุดทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60243-1 [15] ทำจากทองเหลือง โดยอิเล็กโตรดด้านรับแรงดันเป็นอิเล็กโตรดทรงกระบอกมีขอบมนรัศมี 3 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 ± 1 มิลลิเมตร และความสูง 25 มิลลิเมตร ส่วนอิเล็กโตรดด้านกราวด์มีขอบมนรัศมี 3 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 ± 1 มิลลิเมตร และมีความสูง 15 มิลลิเมตร [15] แสดงดังรูปที่ 3.1 และชุดทดสอบสำหรับการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์แสดงดังรูปที่ 3.2

รูปที่ 3.1 อิเล็กโตรดชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของเพรสบอร์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของเพรสบอร์ด

3.2 การทดสอบ

การทดสอบนั้นถูกแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อ คือ การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพรสบอร์ดด้วยผลจากความชื้น และการศึกษาผลของการเสื่อมสภาพของเพรสบอร์ดจากการได้รับความเครียดทางไฟฟ้า

3.2.1 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพรสบอร์ดที่มีผลจากความชื้น

หัวข้อนี้เป็นการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ ที่ระยะเวลาอิมเพรกเนตต่างๆ คือ 0, 8, 16, 24 ชั่วโมง ตามลำดับ ก่อนทำการอิมเพรกเนตเพรสบอร์ดด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติจะทำการอบเพรสบอร์ดก่อน เพื่อควบคุมปริมาณความชื้นในเพรสบอร์ดดังรูปที่ 3.3 ในการอบจะอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 200 มิลลิบาร์ นาน 12 ชั่วโมง จากนั้นทำการอิมเพรกเนตเพรสบอร์ดด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติดังรูปที่ 3.4 ซึ่งจะทำการอิมเพรกเนตที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 200 มิลลิบาร์ เป็นระยะเวลาที่กำหนด

รูปที่ 3.3 การจัดเรียงเพรสบอร์ดเพื่อเตรียมสำหรับการอิมเพรกเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

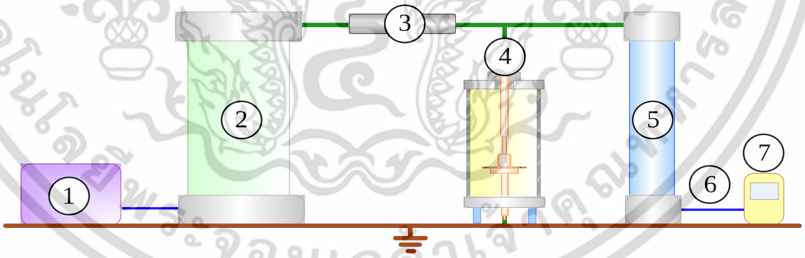
(ก) การเตรียมอิมเพรกเนตด้วยฉนวนเหลว (ข) เพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในตู้อบ

รูปที่ 3.4 การเตรียมอิมเพรกเนตเพรสบอร์ดด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ

แล้วจึงนำมาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ดังนี้

1) การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (ac breakdown voltage test)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ เป็นการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย รูปทรงอิเล็กโตรดที่ใช้เป็นรูปทรงแบบ Unequal electrode ตามมาตรฐาน IEC 60243-1 สำหรับการทดสอบนี้ เนื่องจากเพรสบอร์ดเป็นฉนวนผสมระหว่างเซลลูโลสและฉนวนเหลว โครงสร้างของเซลลูโลสมีความพรุน ฉนวนเหลวสามารถแทรกซึมเข้าไปแทนที่อากาศในเซลลูโลสได้ด้วยวิธีการอิมเพรกเนต ในการทดสอบจะทดสอบโดยการใส่เพรสบอร์ดที่ผ่านการอิมเพรกเนตในชุดทดสอบ แล้วต่อวงจรทดสอบดังรูป



(ก) ไดอะแกรมวงจรทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ด

1: variable voltage transformer (variac)
2: ac high voltage source 100 kV, 50 mA
3: current limiting resister
4: test vessel
5: ac voltage divider 200 kV
6: coaxial cable RG8
7: multimeter

(ข) วงจรทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ด

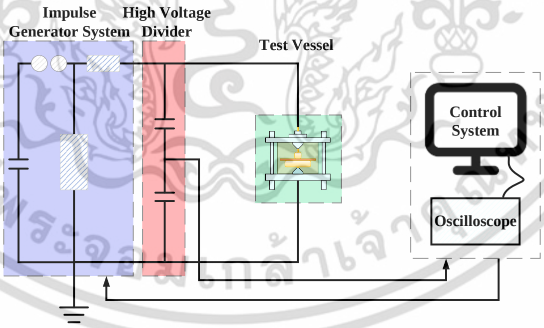
รูปที่ 3.5 วงจรทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

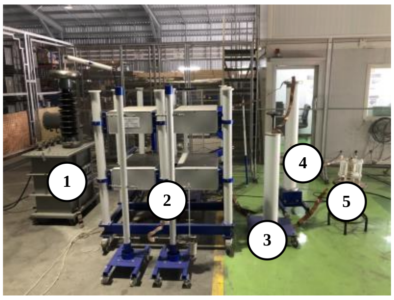
2) การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (lightning impulse breakdown voltage test)

ในการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดนี้จะทำการทดสอบทั้งแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าขั้วบวกและขั้วลบ ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้ โดยจะทำการต่อวงจรดังรูปที่ 3.6

1. นำตัวอย่างเพรสบอร์ดที่ต้องการทดสอบประกอบลงไปในชุดทดสอบ โดยให้ฉนวนเหลวอยู่ในระดับที่ห่างจากขอบบนของชุดทดสอบ 1-2 เซนติเมตร
2. ตรวจสอบเอสเตอร์ธรรมชาติที่ถูกเทลงในชุดทดสอบว่ามีฟองอากาศหรือไม่ ถ้ามีให้ใช้แท่งแก้วคนเบาๆ จนกว่าฟองอากาศจะหมด
3. ทำการขึ้นป้อนอิมพัลส์ที่ต้องการไปยังชุดทดสอบ ระดับแรงดันสูงสุดที่ป้อนจะเป็นค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์ทะลุเนื้อฉนวน
4. ทำการบันทึกค่าแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเบรกดาวน์ที่อ่านได้จากออสซิลโลสโคป
5. เมื่อฉนวนเหลวที่ใช้ทดสอบเกิดการเบรกดาวน์แล้วให้ทำการเทเปลี่ยนใหม่ทั้งหมดทำความสะอาดคราบเขม่าที่ติดตามชุดทดสอบและอิเล็กโตรดที่ใช้ในการทดสอบ จากนั้นตั้งพักชุดทดสอบทิ้งไว้ประมาณ 4-5 นาที
6. ทำขั้นตอนที่ 3-5 ซ้ำ ในกรณีเงื่อนไขการทดสอบเหมือนกัน เพื่อให้ได้ค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์จำนวน 6 ค่า เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยต่อไป



(ก) ไดอะแกรมวงจรทดสอบแรงดันฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด



1: transformer 100 kV 10kVA

2: impulse generator

3: high voltage divider

4: capacitive voltage divider

5: test cell

(ข) วงจรทดสอบแรงดันฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด

รูปที่ 3.6 วงจรทดสอบการวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด

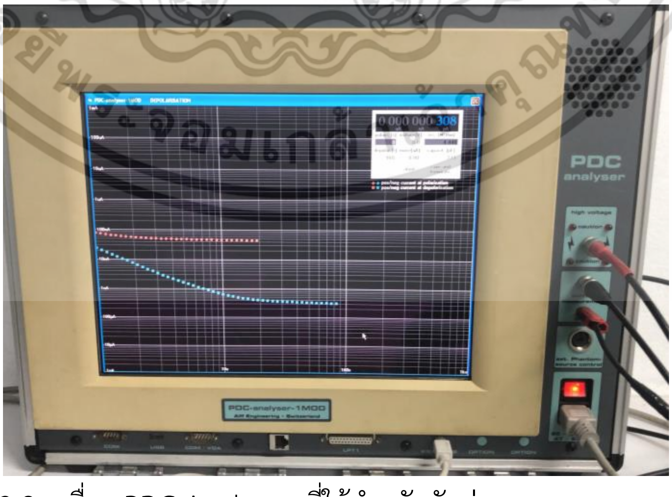
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) การทดสอบการวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชัน และกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน (PDC)

ในส่วนของการวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันนี้เป็นการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำ เป็นการทดสอบแบบไม่ทำลายสภาพฉนวนเดิมของฉนวนทดสอบ โดยสามารถทำการทดสอบได้ทั้งในห้องปฏิบัติการและทดสอบภาคสนาม นิยมใช้ทดสอบฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

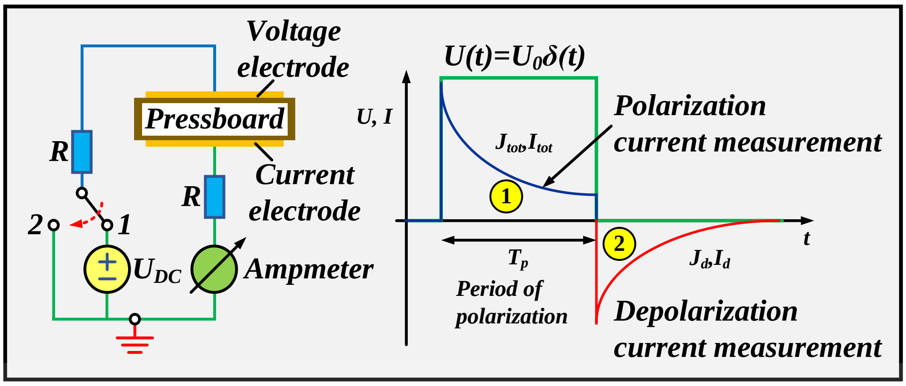
ชุดทดสอบสำหรับการทดสอบนี้ถูกออกแบบตามมาตราฐาน JIS (C2111) ดังรูปที่ 3.7 เพื่อใช้ในการทดสอบการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน โดยแรงดันกระแสตรงจะถูกป้อน และวัดค่าผ่านเครื่อง PDC-Analyzer ดังรูปที่ 3.8 และวงจรการวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันแสดงดังรูปที่ 3.9

รูปที่ 3.7 ชุดทดสอบสำหรับวัดค่า PDC ของตัวอย่างเพรสบอร์ด

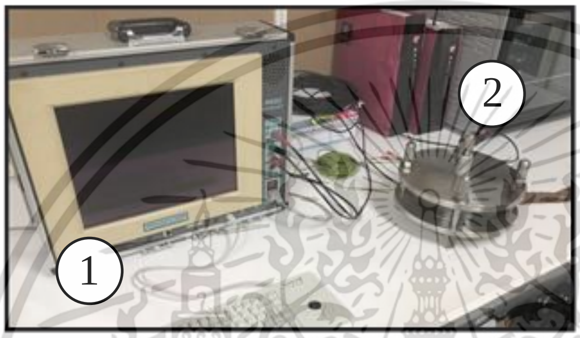


รูปที่ 3.8 เครื่อง PDC-Analyzer ที่ใช้สำหรับวัดค่ากระแสของเพรสบอร์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ไดอะแกรม และองค์ประกอบพื้นฐานของ PDC



1: PDC-Analyzer

2: test vessel

(ข) วงจรการวัดค่ากระแส

รูปที่ 3.9 วงจรการวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน

กระบวนการการวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันถูกแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

- Initial process เป็นขั้นตอนการวัดค่ากระแสที่ตกค้างอยู่ในฉนวนที่ทำการศึกษา
- Control process เป็นขั้นตอนการตรวจสอบระบบโดยการป้อนแรงดันกระแสตรง 50 โวลท์ เป็นเวลา 5 วินาที กับฉนวนที่ทำการทดสอบเพื่อวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชัน และตัดวงจรเพื่อให้กระแสดีโพลาไรซ์เซชันจนถึงค่ากระแสตกค้างที่วัดได้ในขั้นตอนแรก
- Main process เป็นขั้นตอนการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชัน และกระแสโพลาไรซ์เซชัน เพื่อนำไปวินิจฉัยคุณสมบัติความเป็นฉนวนของฉนวนโดยจะทำการทดสอบโดยการป้อนแรงดันกระแสตรง 300 โวลท์ นาน 1100 วินาที เพื่อวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันหลังจากนั้นตัดวงจรระบบ นาน 1100 วินาที หรือจนกว่าจะถึงค่ากระแสตกค้างที่วัดได้ในขั้นตอนแรก เพื่อวัดกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การศึกษาผลของการเสื่อมสภาพของเพรสบอร์ดจากการได้รับความเครียดทางไฟฟ้า

หัวข้อเป็นการวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดหลังการได้รับความเครียดทางไฟฟ้าดังนี้

1) การวัดค่า PDC ของเพรสบอร์ดหลังจากการทดสอบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

การทดสอบนี้จะทำการป้อนแรงดันกระแสสลับให้กับตัวอย่างเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติจนเกิดการเบรกดาวน์ ซึ่งการทดสอบถูกทำและควบคุมภายใต้สภาวะเงื่อนไขห้องทดสอบ ค่าอุณหภูมิ 32.8 ℃, ความชื้นสัมพัทธ์ 66.2 ppm และความดันบรรยากาศ 758 mmHg โดยรายละเอียดขั้นตอนการทดลองมีดังนี้

1. ทำการอบเพรสบอร์ดเพื่อไล่ความชื้น และอิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ นาน 0, 8, 16 และ 24 ชั่วโมงตามลำดับ
2. นำตัวอย่างเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติที่ระยะเวลาต่างๆ มาทำการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจนเกิดการเบรกดาวน์
3. เมื่อทำการทดสอบเบรกดาวน์กระแสสลับเสร็จสิ้น นำตัวอย่างเพรสบอร์ดที่นั้นมาทำการวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน
4. ทำการบันทึกค่ากระแส และรูปกราฟเพื่อนำมาวิเคราะห์
5. ทดสอบซ้ำในหัวข้อที่ 2-4 กับเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยระยะเวลาต่างๆ
6. นำผลการทดสอบในแต่ละกรณีมาเปรียบเทียบ และวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบ

2) การวัดค่า PDC ของเพรสบอร์ดหลังจากการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

การทดสอบนี้จะทำการป้อนแรงดันฟ้าผ่าให้กับตัวอย่างเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติจนเกิดการเบรกดาวน์ ซึ่งการทดสอบถูกทำและควบคุมภายใต้เงื่อนไขห้องทดสอบ อุณหภูมิ 31.6 ℃, ความชื้นสัมพัทธ์ 65.0 ppm และความดันบรรยากาศ 758 mmHg โดยรายละเอียดการทดลองมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ทำการอบเพรสบอร์ดเพื่อไล่ความชื้น และอิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ นาน 0, 8, 16 และ 24 ชั่วโมงตามลำดับ
2. นำตัวอย่างเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตที่ระยะเวลาต่างๆ มาทำการป้อนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจนเกิดการเบรกดาวน์
3. เมื่อทำการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเสร็จสิ้น นำตัวอย่างเพรสบอร์ดนั้นมาทำการวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน
4. ทำการบันทึกค่ากระแส และรูปกราฟเพื่อนำมาวิเคราะห์
5. ทดสอบซ้ำในข้อที่ 2-4 กับเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยระยะเวลาต่างๆ
6. นำผลการทดสอบในแต่ละกรณีมาเปรียบเทียบ และวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบ

3) การวัดค่า PDC ของเพรสบอร์ดหลังจากการจำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

การทดสอบนี้จะทำการทดสอบโดยการป้อนแรงดันกระแสสลับ 23 kV เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อจำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของเพรสบอร์ดรูปแบบ internal discharge ซึ่งการทดสอบถูกทำและควบคุมภายใต้เงื่อนไขห้องทดสอบ อุณหภูมิ 32 °C, ความชื้นสัมพัทธ์ 64.8 ppm และความดันบรรยากาศ 758 mmHg โดยรายละเอียดการทดลองมีดังนี้

1. ทำการอบเพรสบอร์ดเพื่อไล่ความชื้น และอิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ นาน 0, 8, 16 และ 24 ชั่วโมงตามลำดับ
2. นำตัวอย่างเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตที่ระยะเวลาต่างๆ มาทำการป้อนแรงดันกระแสสลับ 23 kV เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อจำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในฉนวนทดสอบ
3. เมื่อครบเวลาที่กำหนด นำตัวอย่างเพรสบอร์ดนั้นมาทำการวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน
4. ทำการบันทึกค่ากระแส และรูปกราฟเพื่อนำมาวิเคราะห์
5. ทดสอบซ้ำในข้อที่ 2-4 กับเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยระยะเวลาต่างๆ
6. นำผลการทดสอบในแต่ละกรณีมาเปรียบเทียบ และวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

ในบทนี้แสดงผลการทดสอบที่ถูกแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อ คือ การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพรสบอร์ดด้วยผลจากความชื้น และการศึกษาผลของการเสื่อมของเพรสบอร์ดจากการทดสอบทางไฟฟ้า

4.1 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพรสบอร์ดที่มีผลจากความชื้น

ก่อนทำการทดสอบจะทำการวัดค่าความชื้นของเอสเตอร์ธรรมชาติที่ถูกเติมลงในชุดทดสอบ เพื่อจำลองสภาพเพรสบอร์ดเสมือนอยู่ในหม้อแปลง และป้องกันแรงดันจากอิเล็กโตรดด้านแรงดันเกิดวาปไฟไปยังจุดต่างๆ ที่ไม่ต้องการ ค่าความชื้นที่วัดได้แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความชื้นในเอสเตอร์ธรรมชาติ

ชนิดฉนวนเหลว	ปริมาณความชื้น (ppm)	
	ก่อนผ่านกระบวนการทดสอบ	หลังผ่านกระบวนการทดสอบ
เอสเตอร์ธรรมชาติ	243	180

4.1.1 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC breakdown voltage test)

ผลการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ตามมาตราฐาน IEC 60243-1 (2013) ของตัวอย่างเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ด

ระยะเวลาในการอิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ	จำนวนครั้งการทดสอบ						ค่าเฉลี่ย (kV)
	1	2	3	4	5	6	
ไม่ได้อิมเพรกเนต	21.3	20.4	20.2	22.0	21.5	20.7	21.02
8 ชั่วโมง	51.6	50.4	52.3	51.7	51.3	52.5	51.63
16 ชั่วโมง	68.2	65.4	66.1	65.7	68.0	51.4	66.68
24 ชั่วโมง	67.4	66.9	68.1	68.3	67.8	67.0	67.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning impulse breakdown voltage test)

การทดสอบนี้จะทำการทดสอบวัดค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทั้งขั้วบวกและขั้วลบของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติดังนี้

1. แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าขั้วบวก

การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าขั้วบวกของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าขั้วบวกของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ

ระยะเวลาในการอิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ	จำนวนครั้งการทดสอบ						ค่าเฉลี่ย (kV_p)
	1	2	3	4	5	6	
ไม่ได้อิมเพรกเนต	41.7	46.3	42.1	42.1	42.5	42.5	42.87
8 ชั่วโมง	109.2	107.5	99.2	101.7	112.5	106.2	106.05
16 ชั่วโมง	117.1	121.1	115.3	120.2	113.7	118.4	117.63
24 ชั่วโมง	120.5	120.5	110.7	119.3	121.3	115.5	117.97

2. แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าขั้วลบ

การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าขั้วลบของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าขั้วลบของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ

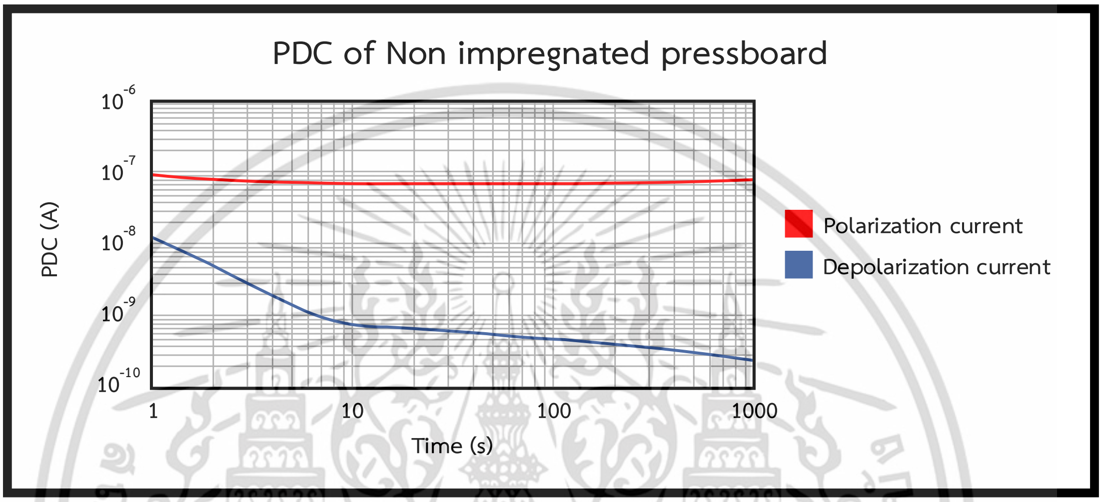
ระยะเวลาในการอิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ	จำนวนครั้งการทดสอบ						ค่าเฉลี่ย (kV_p)
	1	2	3	4	5	6	
ไม่ได้อิมเพรกเนต	42.1	42.5	43.0	44.6	40.1	45.2	42.92
8 ชั่วโมง	108.3	101.7	107.4	100.5	99.7	100.5	103.01
16 ชั่วโมง	116.5	120.3	110.7	119.3	117.1	115.5	116.57
24 ชั่วโมง	120.5	121.3	115.5	117.4	110.2	119.6	117.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 การทดสอบกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน (Polarization and depolarization current measurement)

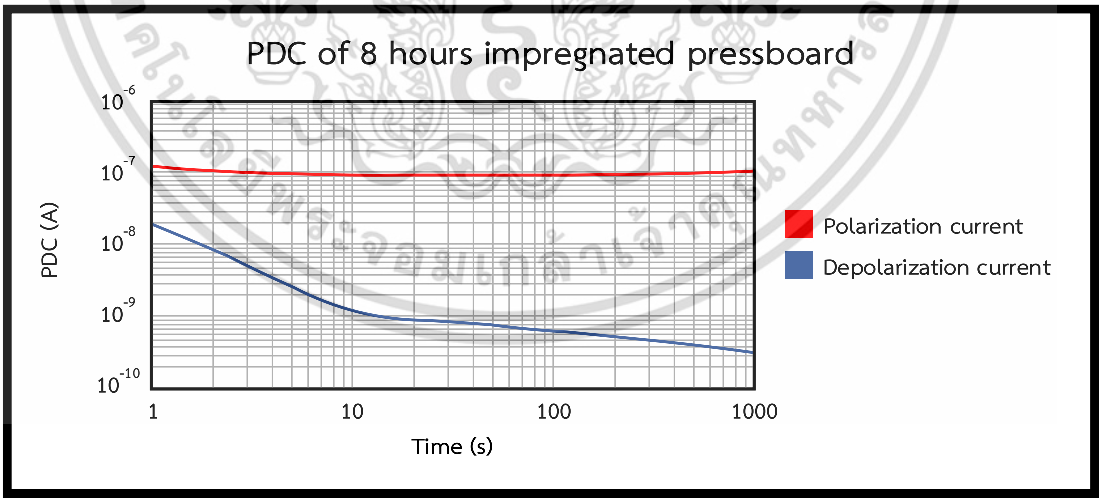
ผลการวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ ระยะเวลานาน 0, 8, 16 และ 24 ชั่วโมงตาม ถูกแสดงดังรูปที่ 4.1-4.4 ตามลำดับ

<u>กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดที่ไม่ได้อิมเพรกเนต</u>



รูปที่ 4.1 PDC ของเพรสบอร์ดที่ไม่ได้อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ

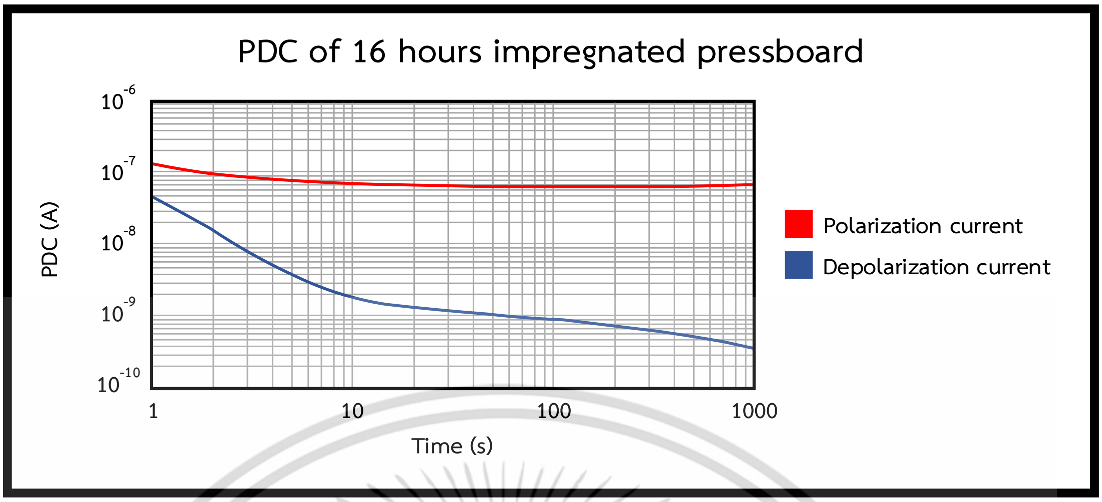
<u>กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนต นาน 8 ชั่วโมง</u>



รูปที่ 4.2 PDC ของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ นาน 8 ชั่วโมง

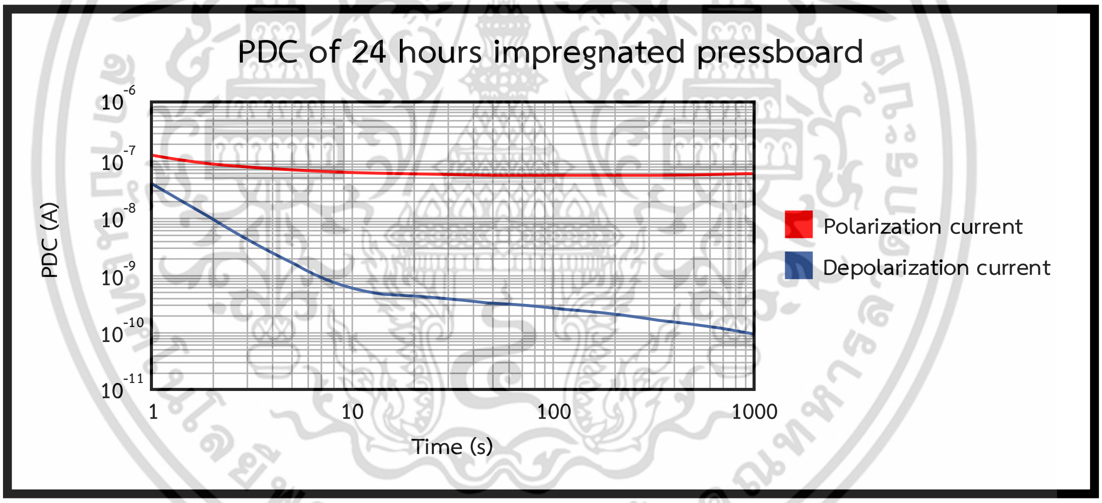
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนต นาน 16 ชั่วโมง</u>



รูปที่ 4.3 PDC ของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ นาน 16 ชั่วโมง

<u>กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนต นาน 24 ชั่วโมง</u>



รูปที่ 4.4 PDC ของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ นาน 24 ชั่วโมง

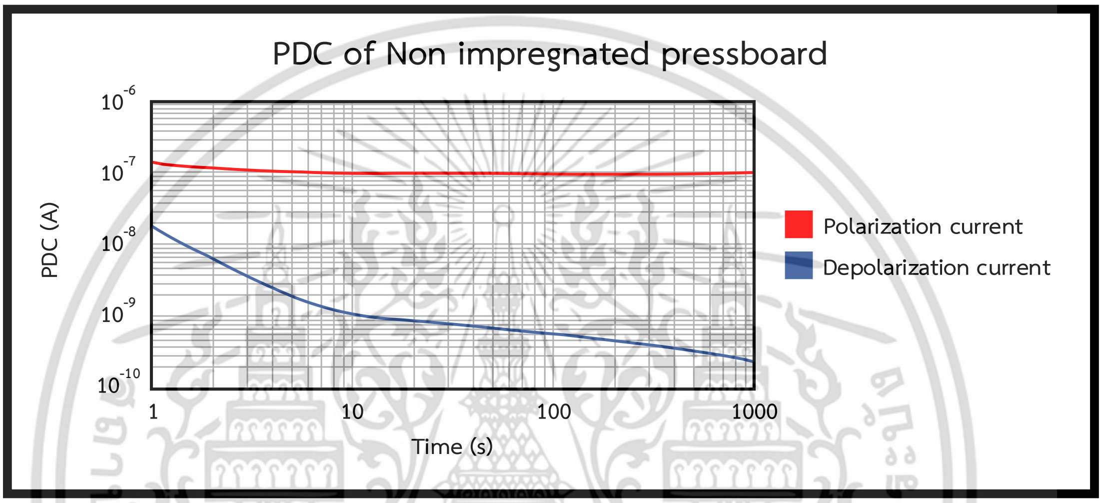
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาผลของการเสื่อมสภาพของเพรสบอร์ดจากการทดสอบทางไฟฟ้า

4.2.1 การวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดหลังจากได้รับความเครียดทางไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

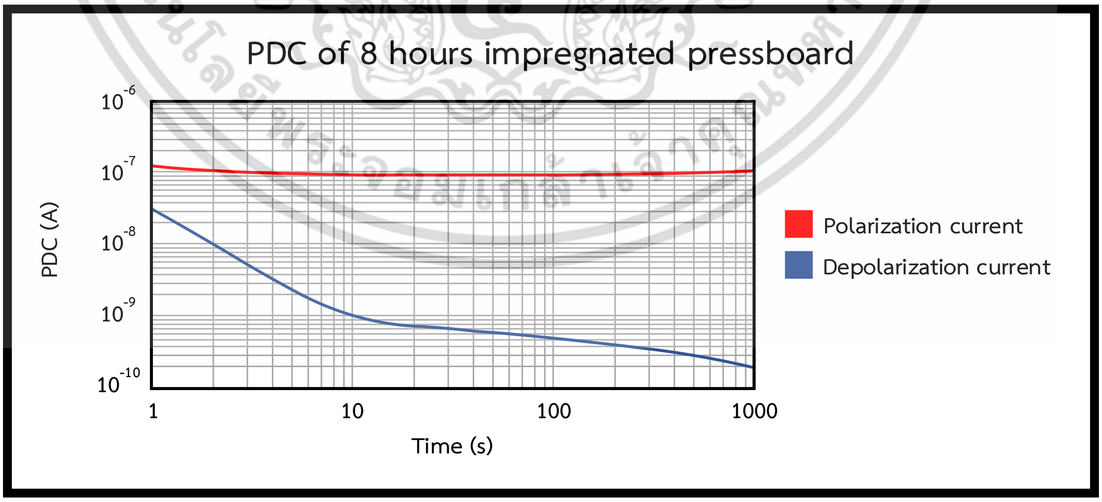
ผลการวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ ระยะเวลานาน 0, 8, 16 และ 24 ชั่วโมงตาม แสดงดังรูปที่ 4.5-4.8 ตามลำดับ

<u>กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดที่ไม่ได้อิมเพรกเนต</u>



รูปที่ 4.5 PDC ของเพรสบอร์ดที่ไม่ได้อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ

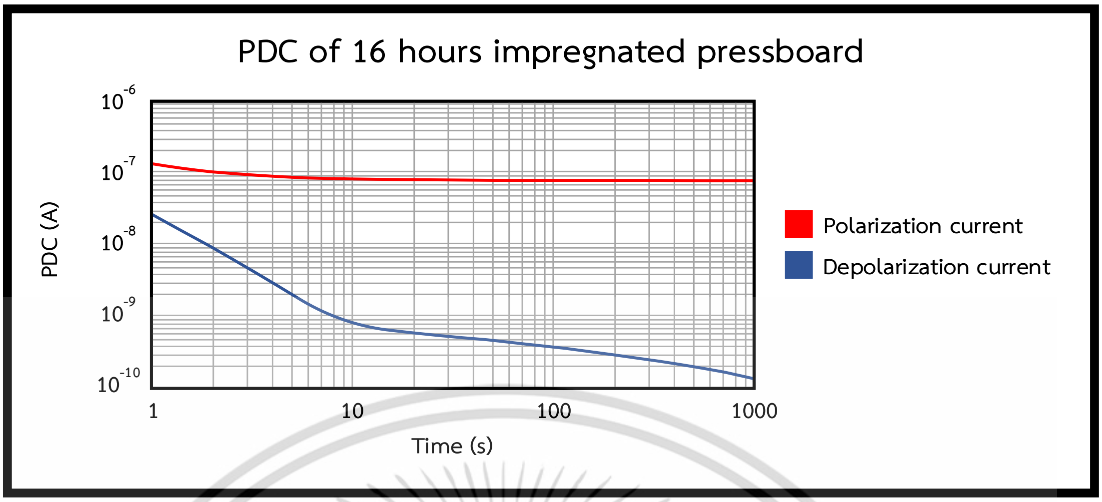
<u>กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนต นาน 8 ชั่วโมง</u>



รูปที่ 4.6 PDC ของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ นาน 8 ชั่วโมง

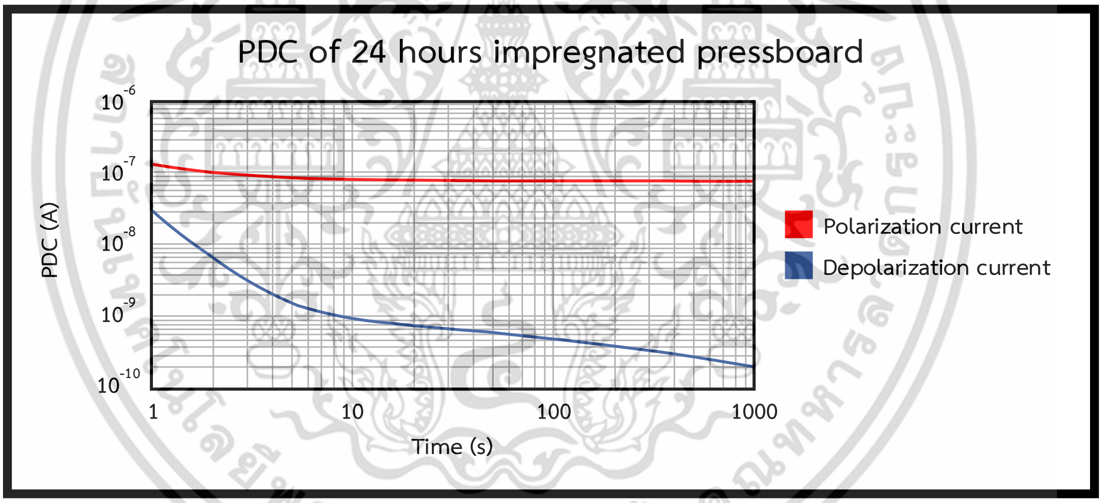
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนต นาน 16 ชั่วโมง



รูปที่ 4.7 PDC ของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ นาน 16 ชั่วโมง

กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนต นาน 24 ชั่วโมง



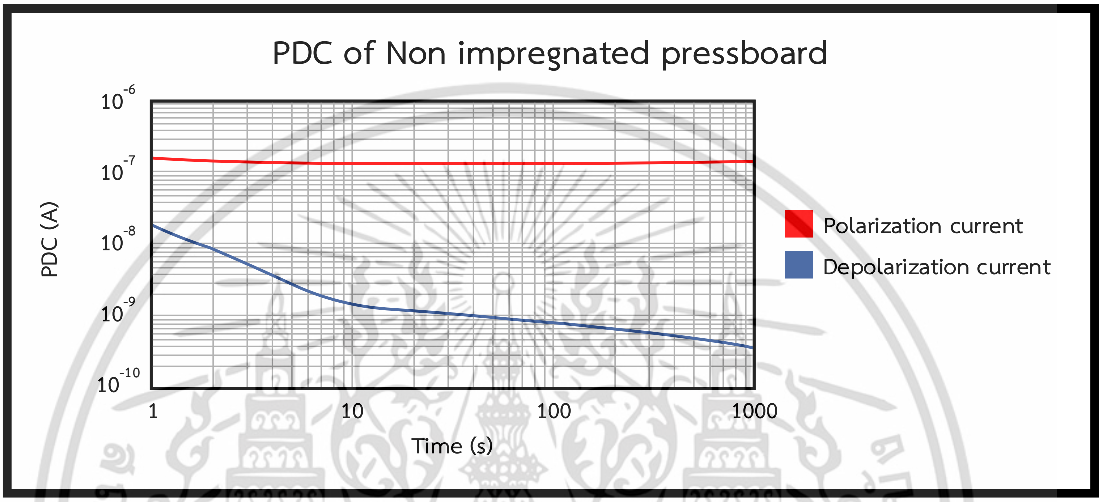
รูปที่ 4.8 PDC ของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ นาน 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดหลังจากการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

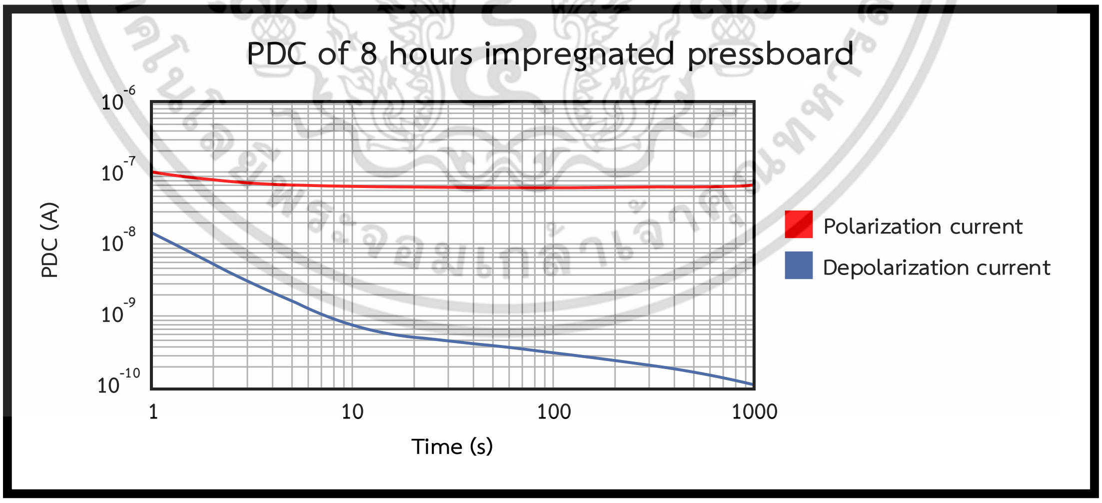
ผลการวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ ระยะเวลานาน 0, 8, 16 และ 24 ชั่วโมงตาม ถูกแสดงดังรูปที่ 4.9-4.12 ตามลำดับ

กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดที่ไม่ได้อิมเพรกเนต



รูปที่ 4.9 PDC ของเพรสบอร์ดที่ไม่ได้อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ

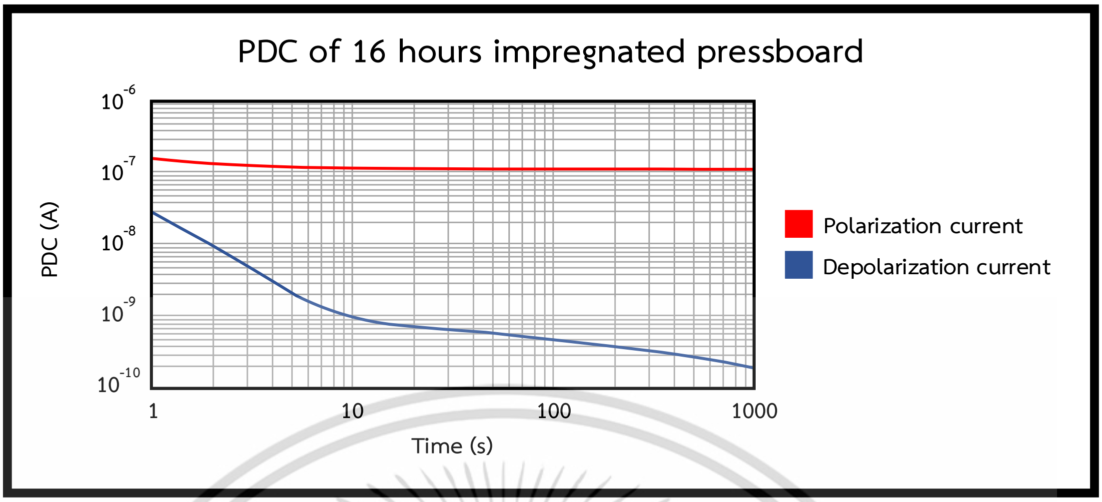
กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนต นาน 8 ชั่วโมง



รูปที่ 4.10 PDC ของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ นาน 8 ชั่วโมง

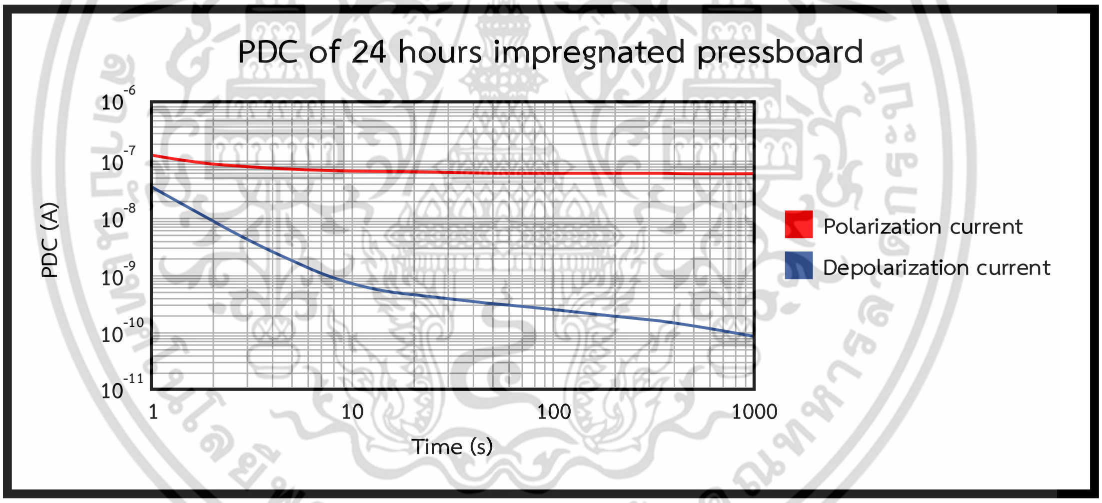
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนต นาน 16 ชั่วโมง



รูปที่ 4.11 PDC ของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ นาน 16 ชั่วโมง

กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนต นาน 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.12 PDC ของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ นาน 24 ชั่วโมง

4.2.3 การวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดหลังจากการจำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

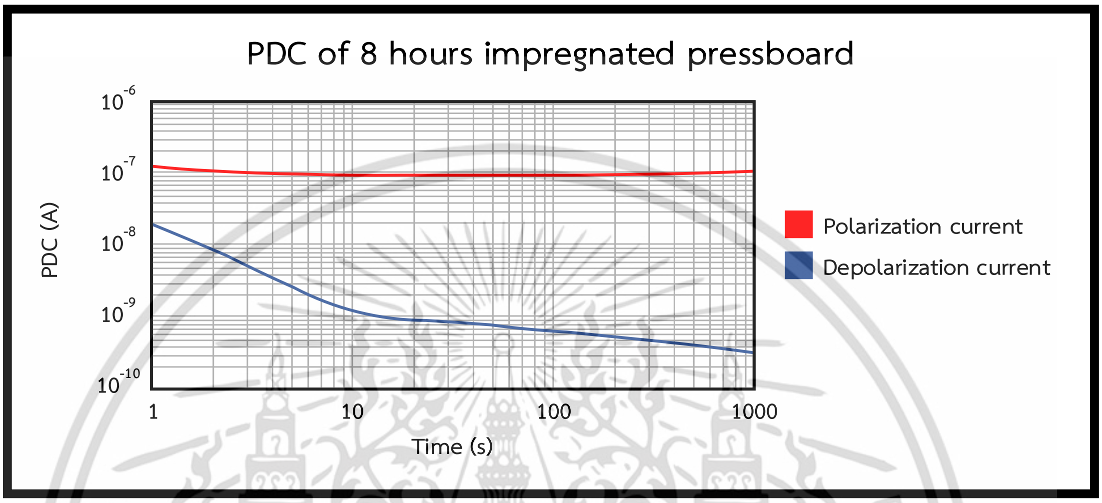
ผลการวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ ระยะเวลานาน 0, 8, 16 และ 24 ชั่วโมงตาม แสดงดังรูปที่ 4.13-4.15 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดที่ไม่ได้อิมเพรกเนต

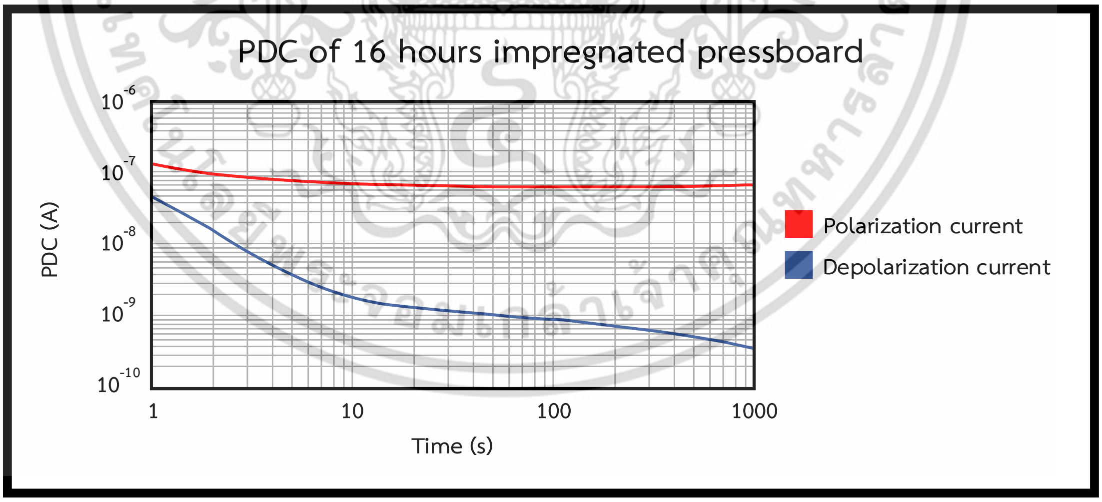
ไม่สามารถวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของการศึกษากรณีนี้ได้ เนื่องจากระหว่างการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน ตัวอย่างเพรสบอร์ดบอร์ดเกิดการเบรกดาวน์ระหว่างการจับเวลา เนื่องจากเพรสบอร์ดมีความชื้นมาก

กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนต นาน 8 ชั่วโมง



รูปที่ 4.13 PDC ของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ นาน 8 ชั่วโมง

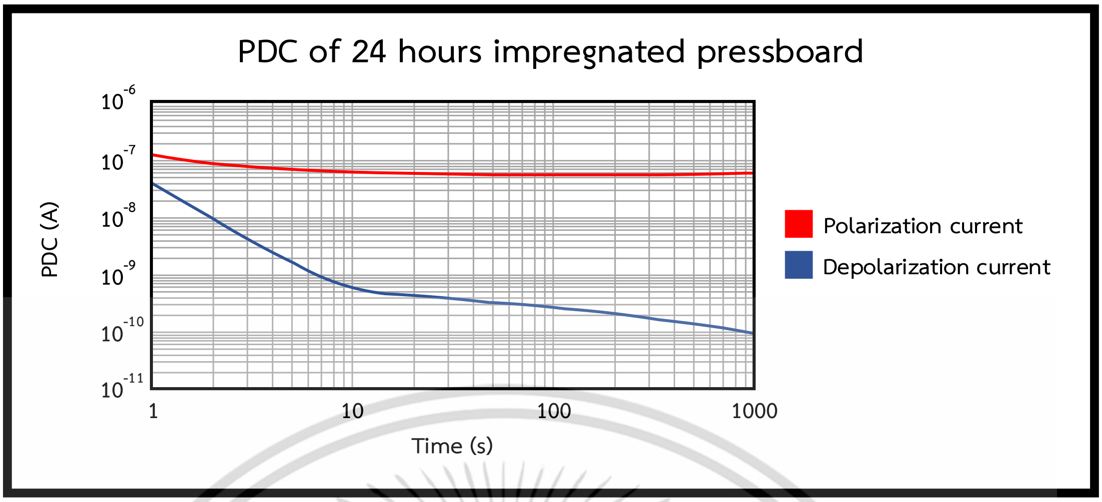
กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนต นาน 16 ชั่วโมง



รูปที่ 4.14 PDC ของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ นาน 16 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนต นาน 24 ชั่วโมง</u>



รูปที่ 4.15 PDC ของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ นาน 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในหัวข้อนี้จะเป็นการสรุปผลการทดลองจากการทดสอบ 2 หัวข้อ ดังนี้

5.1.1 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพรสบอร์ดที่มีผลจากความชื้น

1. การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

ค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของเพรสบอร์ดที่ไม่อิมเพรกเนตและอิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติที่ระยะเวลา 8, 16 และ 24 ชั่วโมง จากการทดสอบด้วยแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ พบว่า เพรสบอร์ดที่ผ่านการอิมเพรกเนตนั้นจะมีความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับสูงกว่าเท่าตัว เมื่อเทียบกับเพรสบอร์ดที่ไม่ผ่านการอิมเพรกเนต และการอิมเพรกเนต 16 ชั่วโมงดูเหมือนจะเพียงพอ

2. การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

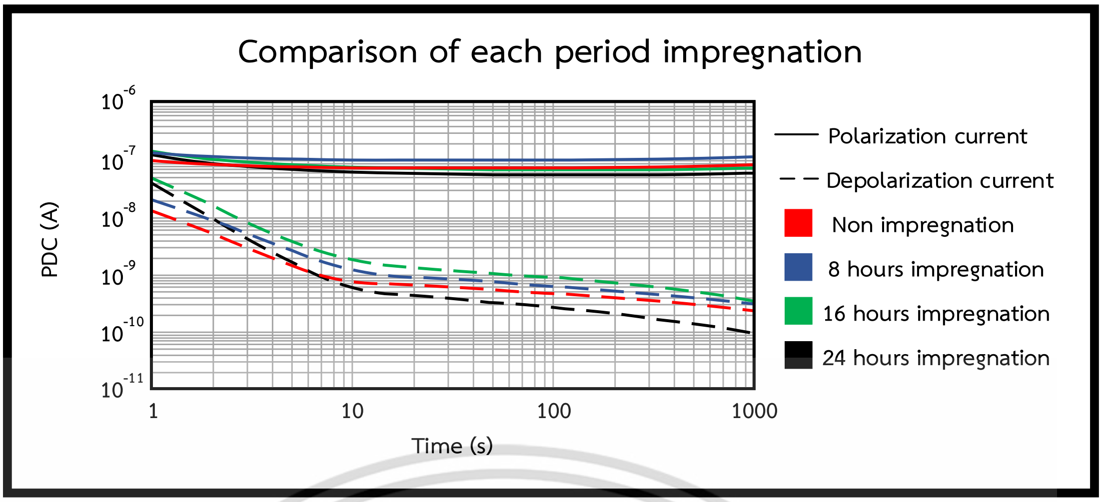
ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดที่ไม่อิมเพรกเนตและอิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติที่ระยะเวลา 8, 16 และ 24 ชั่วโมง จากการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทั้งขั้วบวกและขั้วลบ พบว่า

- จากการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทั้งขั้วบวกและขั้วลบ พบว่า ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทั้ง 2 ขั้วนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน
- ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดที่ไม่ได้อิมเพรกเนต และที่อิมเพรกเนตต่างกันอย่างชัดเจนเนื่องจากผลของความชื้นภายในเนื้อฉนวน คือค่าแรงดันของเพรสบอร์ดที่ไม่ได้อิมเพรกเนต มีค่าน้อยกว่าเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตนาน 8, 16 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ
- ระยะเวลาที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติของเพรสบอร์ดที่ 16 และ 24 ชั่วโมง มีค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าใกล้เคียงกันมาก คือมีค่าประมาณ 117 kV_p ทั้งการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าขั้วบวกและขั้วลบ

3. การทดสอบกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน

จากผลการวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชัน พบว่า ระยะเวลาในการอิมเพรกเนตมีผลโดยตรงต่อค่ากระแสทั้งสอง คือ ระยะในการอิมเพรกเนตมากขึ้น ผลต่างของกระแสทั้งสองลดลง กล่าวได้อีกนัยหนึ่งคือ กระแสคอนดักติวิตี้ลดลง กราฟเปรียบเทียบค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดที่ไม่ได้อิมเพรกเนตและอิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาตินาน 8, 16 และ 24 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 5.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

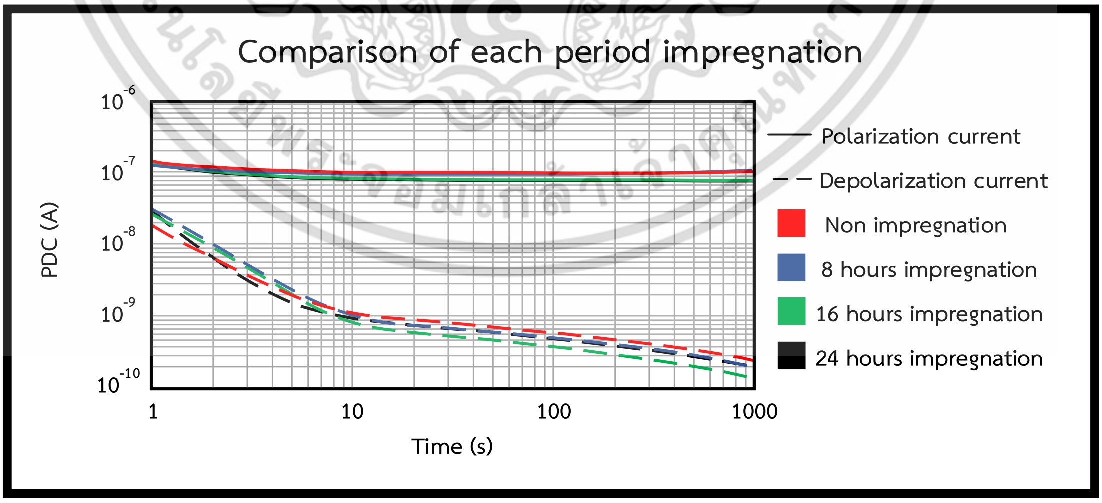


รูปที่ 5.1 กราฟเปรียบเทียบ PDC ของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติ

5.1.2 การศึกษาผลของการเสื่อมสภาพของเพรสบอร์ดจากการได้รับความเครียดทางไฟฟ้า

1. การวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดหลังจากการทดสอบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

จากการทดสอบการวัดค่ากระแส พบว่า ค่า PDC มีค่าไม่ต่างกันมากในแต่ละกรณี สรุปได้ว่าค่ากระแสทั้ง 2 มีค่าใกล้เคียงกัน กราฟแสดงการเปรียบเทียบของกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดที่ไม่ได้อิมเพรกเนตและอิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาตินาน 8, 16 และ 24 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 5.2

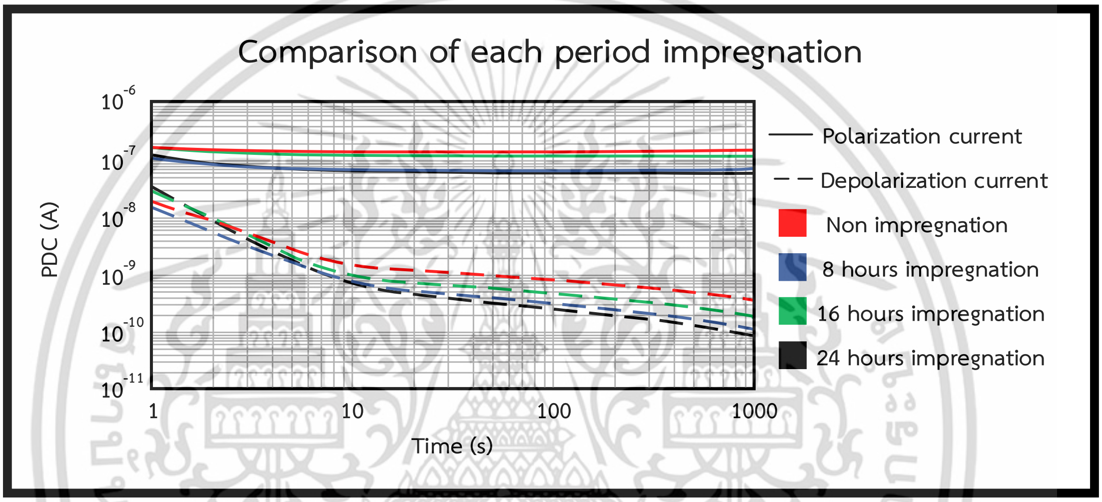


รูปที่ 5.2 กราฟเปรียบเทียบ PDC ของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติหลังจากการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดจากการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

จากการทดสอบการวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดหลังจากการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า พบว่า ผลต่างของกระแสทั้ง 2 มีใกล้เคียงกันในแต่ละกรณี กราฟแสดงการเปรียบเทียบของกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดที่ไม่ได้อิมเพรกเนตและอิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาตินาน 8, 16 และ 24 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 5.3



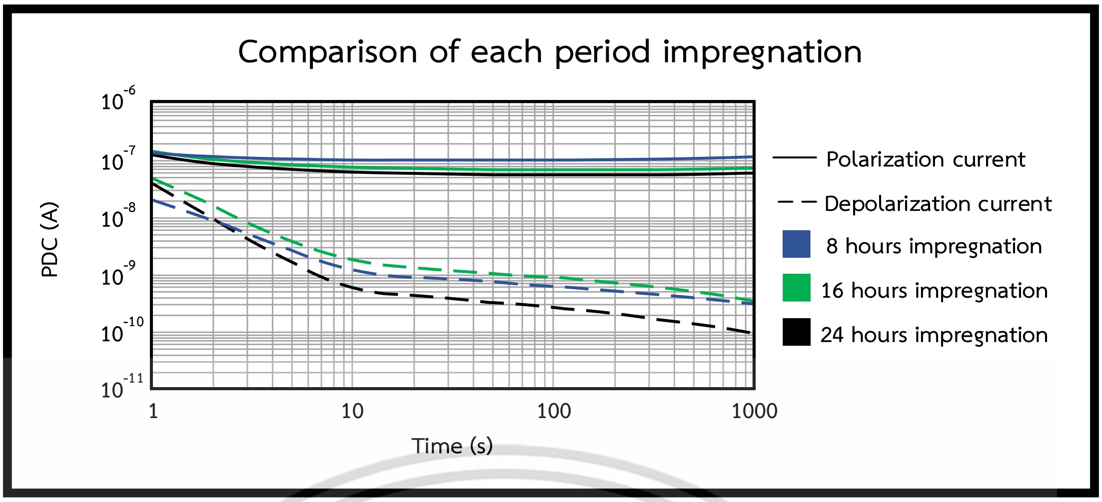
รูปที่ 5.3 กราฟเปรียบเทียบ PDC ของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติหลังจากการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

3. การวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดหลังจากการจำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

จากการทดสอบวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดหลังจากการจำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วน พบว่า

- การจำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วนไม่สามารถทดลองกับเพรสบอร์ดที่ไม่ได้อิมเพรกเนตเนื่องจากเกิดการเบรกดาวน์กับตัวอย่างเพรสบอร์ด จึงไม่ได้นำตัวอย่างนี้มาทดสอบการวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน
- สังเกตได้ว่าค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันดังรูปที่ 5.4 มีลักษณะใกล้เคียงกับรูปที่ 5.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาตินาน 8, 16 และ 24 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 5.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 กราฟเปรียบเทียบ PDC ของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเตอร์ธรรมชาติหลังจากการจำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ผลที่ได้จากการทดสอบบางส่วนอาจเกิดข้อผิดพลาด อันเนื่องมาจากความชื้นเข้าไปในเนื้อฉนวนขณะเก็บตัวอย่างหลังจากการอบ หรือเก็บตัวอย่างเพื่อไปทดสอบการวัดค่ากระแส

2. พารามิเตอร์บางค่าที่ได้จากการวัดค่า PDC ในเครื่อง PDC Analyzer ควรจะนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นฉนวนเพิ่มเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] J. Gielnia, C. Ekanayake, K. Walczak, A. Graczkowski, S. Gubanski, “**Dielectric responses of new and aged transformer pressboard in dry and wet states**”, Proceedings of 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials, 2005. (ISEIM 2005), P.386, 2005.

[2] R. Villarroel, D. F. García, B. García and J. C. Burgos, “**Diffusion Coefficient in Transformer Pressboard Insulation Part 1: Non Impregnated Pressboard**”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 21, No. 1; February 2014

[3] R. Villarroel, D. F. García, B. García and J. C. Burgos, “**Moisture Diffusion Coefficients of Transformer Pressboard Insulation Impregnated with Natural Esters**”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 22, No. 1; February 2015.

[4] Cao Pei, Ji Shengchang, Zhu Lingyu, Cui Yanjie, “**The Effect of Thermal Aging on SurfaceStructure and Mechanical Strength of Oil-impregnated Pressboard**”, 2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD) P.1000 - 1003 2016.

[5] รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช, “วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า(เล่ม 1) ฉนวนและวัสดุฉนวนไฟฟ้า Electrical Engineering Materials,” พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพมหานคร: ห้างหุ้นส่วนจำกัดมีนเซอร์วิส ซัพพลาย, 2557.

[6] I. V. Timoshkin, M. J. Given, M. P. Wilson, and S. J. MacGrego, "**Review of Dielectric Behavior of Insulating Liquids**," Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2009, pp. 1-4.

[7] Amanpreet Singh Gill," **The Design of Transformer oil**, "IEEE Conf. Elect. Ins., pp. 250-247, 5April .2000.

[8] Cigre Brochure 436, "**Experiences in service with new Insulating liquids**," October .2010.

[9] Cigre Brochure 323, "**Ageing of cellulose in mineral-oil insulation transformers**," October 2007.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[10] Caesar Y. Perkasa, Nick Lelekakis, Tadeusz Czaszejko, Jaury Wijaya and Daniel Martin, "**A Comparison of the Formation of Bubbles and Water Droplets in Vegetable and Mineral Oil Impregnated Transformer Paper**," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 21, pp. 2111-2118, October 2014

[11] L. Du, W. Wang, W. Chen and C. Wei**, "Reaction mechanism of transformer oil pyrolysis based on ReaxFF molecular simulation,"** 2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Chengdu, 2016, pp. 1-4.

[12] A. B. Norazhar, A. Abu-Siada and S. Islam, "**A review on chemical diagnosis techniques for transformer paper insulation degradation,"** 2013 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Hobart, TAS, 2013, pp. 1-6.

[13] กิตติพศ จริยานุรัตน์. (2559). **การศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าและทางความร้อนของหม้อแปลงที่ใช้ เอสเตอร์ธรรมชาติเป็นฉนวนเปรียบเทียบกับหม้อแปลงที่ใช้น้ำมันหม้อแปลง และใช้น้ำมันปาล์มเป็นฉนวน**. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[14] **ณัฐนรี ภูมิพื้นผล.** (2559). **การวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวิธีวัดกระแสโพลาไรซ์เซชัน และดีโพลาไรซ์เซชัน**. ปริญญานิพนธ์, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[15] IEC 60243-1, Edition 3.0 – 2013, **Electric strength of insulating materials – Test methods – Part 1: Tests at power frequencies.**

[16] IEC 60641-2 – 2004, **Pressboard and presspaper for electrical purposes – Part 2: Methods of tests.**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. S. Maneerot, J. Siriworachanyadee, W. Likhitsupin, S. Likhitsupin, C. Srinangyam and N. Pattanadech, "Polarization and Depolarization Current Characteristics of Natural Ester Impregnated Pressboards with Different Periods of Impregnation," *2020 8th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, Phuket, 2020, pp. 381-384

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Polarization and Depolarization Current Characteristics of Natural Ester Impregnated Pressboards with Different Periods of Impregnation

Sakda Maneerot
Electrical Engineering Dept.
Faculty of Engineering,
King Mongkut Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok , Thailand
sakda.mnr@gmail.com

Jompatara Siriworachanyadee
Electrical Engineering Dept.
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
jompatara.s@gmail.com

Wit Likhitsupin
Engineer
Advance Power Equipment
(Thailand) Co., Ltd
Bangkok, Thailand
wit_likhitsupin@hotmail.com

Suwapich Likhitsupin
High Voltage Testing Dept.
Electricity Generating
Authority of Thailand
Nonthabury, Thailand

Chissanupong Srinangyam
Electrical Engineering Dept.
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
60010240@kmitl.ac.th

Norasage Pattanadech
Electrical Engineering Dept.
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
norasage@yahoo.com

***Abstract*—This paper represents the polarization and depolarization current (PDC) characteristics of natural ester impregnated pressboards with different impregnation period. The pressboard specimen were prepared as a rectangular shape (the length and the width are 120 mm as well) and thickness dimension of the pressboard in the experiment was approximately 1.6 mm. The pressboards were dried up in the vacuum oven with temperature at 80°C for 12 hours under 200 mbar pressure. In addition, these pressboards were divided into 3 groups according to the impregnation periods. The 1st group, the pressboard was non-impregnated with natural ester. The 2nd and 3rd group, the pressboards were impregnated at 60°C for 8 and 16 hours, respectively, under 200 mbar pressure-controlled condition. The plane-plane electrodes inserted with the specified number of the pressboard specimens were prepared. These electrodes were installed in the test cell filled with the natural ester. A 24 kV AC Voltage was applied to the test cell for 3 months. At the end of the first month, half of the pressboard samples was token from the test cells. Then, the PDC characteristics of these natural ester impregnated pressboards were investigated. At the end of the third month, another half of the pressboard samples was token from the test cells to perform PDC measurement also. It was found that the PDC values of the pressboards with longer period impregnation process were lower than these of the pressboards with longer period impregnation process. Besides, the PDC values of the pressboards experienced with longer electric field stress period (3 months) were higher than these of the pressboards experienced with shorter electric field stress period (1 month).**

Keywords—natural ester, impregnation, pressboard, polarization and depolarization current

I. INTRODUCTION

In electrical power transmission and distribution system, a transformer is important equipment that used to transform voltage and current. Insulation is the majority component in transformers which is indicate the age of transformers. The insulation system consists of two major insulation i.e., solid and liquid insulation that can be deteriorates over time by many factors. The insulation integrity of transformers can be analyzed by various techniques. Polarization and depolarization current (PDC) measurement is the one of the test methods providing the information of insulation condition.

In the 1990s, the PDC test technique is popularity method as it can estimate the condition of oil and paper separately without opening the transformer tank [1].

The principle of PDC measurement is based on the prolonged application of the V_{DC} (Direct current voltage) across the test object. While testing, the current arising from the activation of the polarization process with different time constants corresponding to different insulation materials and due to the conductivity of the test object, is measured. After completing the polarization process, open circuit, and then the test object is discharged to earth. This process call "the depolarization process". Both the currents depend on the qualification of the insulating material same as by the geometric structure of the insulation system [2].

In this paper, the PDC measurement is used to examine the PDC characteristics of the natural ester impregnated pressboard specimen impregnated with various duration.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

978-1-7281-5931-7/20/$31.00 ©2020 IEEE

II. RELATED THEORIES

A. The PDC Measurement

PDC measurement is one of the analysis test methods used to assess the dielectric properties of an insulating materials degraded by moisture content in the insulation, electrical stress, mechanical stress, thermal stress, and contamination in the insulation [2].

The polarization current (i_{pol}) exists when the DC voltage source is applied to the pressboard. Whereas the depolarization current (i_{depol}) is detected when the pressboard is shorted circuit. The polarization current consists of conduction and absorption current including capacitive current. The magnitude of absorption current and depolarization current is equal but have opposite polarity.

$$i_{pol}(t) = C_0 V_c[\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} + \varepsilon_\infty \delta(t) + f(t)] \quad (1)$$

Where C_0 is the geometric capacitance of test object

V_c is the applied step voltage

ε_0 is permittivity of free space (8.85×10^{-12} F/m)

σ_0 is DC conductivity

ε_∞ is the high frequency component of the permittivity

$\delta(t)$is the delta function arising from the applied step voltage immediately following $t = 0$

$f(t)$ is the dielectric response function

In equation (1), it can be divided in to 3 terms. The 1st term is conductivity of insulation. The 2nd term is practically impossible measured because of the large dynamic range of current amplitudes inherent "fast polarization process". Finally, the 3rd term is the remaining "slow polarization process" [3,4].

$$i_{depol}(t) = -C_0 V_c[f(t) - f(t - T_c)] \quad (2)$$

Where C_0 is the geometric capacitance of test object

V_c is the applied step voltage

T_c is the time duration when the step voltage was applied.

$f(t)$ is the dielectric response function

$f(t-T_c)$ is the dielectric response function in depolarization process

In equation (2), the depolarization current is the relaxation of polarization.

The conduction current (i_{con}) occurs normally in the imperfection insulation and it is enlarged by contaminant and/or dirt on the insulation surface. However, contaminant and/or dirt does not affect the insulation texture. The conduction current only exists when applied DC voltage source and has a constant magnitude [3].

$$i_{con} = C_0 V_0[\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}] \quad (3)$$

Where C_0 is the geometric capacitance of test object

V_0 is the applied voltage when i_{con} has a constant magnitude

σ_0 is DC conductivity

ε_0 is permittivity of free space (8.85×10^{-12} F/m)

B. Oil Impregnated Pressboard

Oil impregnated pressboard that consists of liquid insulation (natural ester) and solid insulation (insulating paper) forms a kind of composite insulation pattern which is the major insulation material in the electrical equipment due to high insulation performance compared with other single type insulation. Pressboards are used to be electrical insulation and support the mechanical force occurring in the transformers [5].

III. EXPERIMENTAL DETAILS

The PDC experiment was performed to investigate the PDC characteristics of the impregnated pressboards by using the PDC Analyzer 1 MOD.

A. Test Vessel

The test vessel for this experiment is shown in Fig. 1. This electrode can be used for measuring the dielectric dissipation factor or so-called loss tangent and the permittivity of the non-impregnated pressboards and the natural ester impregnated pressboard according to JIS (C2111) standard. This test vessel was designed and constructed to prevent moisture ingress from the surrounding environment.

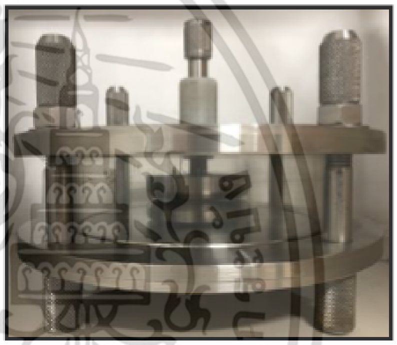


Fig. 1. The test vessel for solid insulation testing.

B. PDC Measurement

For PDC measurement, a 300 DC voltage was applied to test object for 1100 seconds. Firstly, the DC source was switched on, the polarization current passing though the pressboard was measured. After completed this process, the DC source was switched off and the pressboard specimen was shorted circuit then the depolarization current from the pressboard was measured. The depolarization current continuously decreased until steady state approaching. The principle of PDC method and the equivalent circuit for PDC measurement are illustrated in Fig. 2.

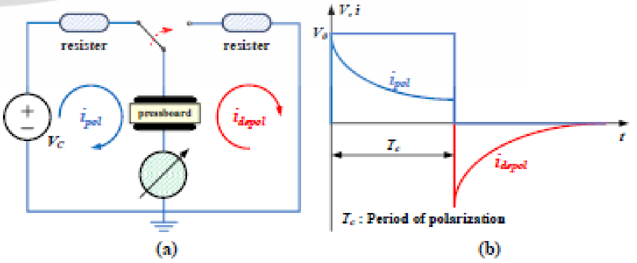


Fig. 2. PDC measurement (a) the PDC measurement circuit and (b) the principle of PDC.

The PDC measurement circuit for natural ester impregnated pressboard experiment is illustrated in Fig. 3.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fig. 3. The PDC measurement for natural ester impregnated pressboard.

PDC measurement was divided into 3 processes as follows:

- Initial process: it is only remaining current measurement from the test object in order to ascertain the amount of any remaining current inside the test object.
- Control process: this process is to examine the measurement system by applying a 50 DC Voltage in test circuit for 5 seconds to test object for measuring i_{pol}. Next, short circuit the test object for measuring i_{depol} until i_{depol} was as remaining current from initial process.
- Main process: this process investigate the dielectric characteristics of natural ester impregnated pressboards by applying a 300 DC voltage (charging voltage) to the test object for 1100 seconds (charging period) and shorting circuit the pressboard for 1100 seconds (discharging period). The control program will perform charge and discharge sequentially in accordance with the specified time setting.

The examples of the pressboard specimens are illustrated in Fig. 4.

(a) (b)

Fig. 4. The examples of the pressboards experienced with the stressed voltage of 24 kV for (a) 1 month and (b) 3 months.

C. Test Procedures

There were 6 experiments according to impregnation period (no-impregnation, 8 hour impregnation period and 16 hour impregnation period) and electric field stress period (1 and 3 months). Before the PDC measurement was performed, Impregnated pressboards were prepared as follows:

- First, heating the pressboards with temperature at 80°C for 12 hours under 200 mbar pressure for removing the moisture within the pressboards.
- Second, fulfilling the pressboard with the prepared natural ester and heating them with temperature at 60°C for 0, 8, and 16 hours respectively under 200 mbar pressure.
- Third, applying the electric field stress to the pressboards within the test cell by which a AC 24 kV was applied to the electrodes having the pressboard samples in between.
- Next, at the end of the first month, half of the pressboard samples was token from the test cells.
- After that, installing the pressboard specimen in the test vessel as shown in Fig. 1.
- Then, performing the PDC measurement.
- Finally, at the end of the third month, another half of the pressboard samples was token from the test cells to perform PDC measurement as well.

The conditions of natural ester impregnated pressboards for the PDC measurement is shown in Table I.

TABLE I. THE CONDITIONS OF NATURAL ESTER IMPREGNATED PRESSBOARDS FOR PDC MEASUREMENT

Order	Condition	
	Impregnation (hours)	*Electric field stress duration (Month)*
1	0	1
2		3
3	8	1
4		3
5	16	1
6		3

IV. EXPERIMENTAL RUSULTS

The measured polarization and depolarization current are plotted in a log-log scale as illustrated in Figs. 5 - 7.

The resistance and capacitance of the test specimens are shown in Table II. The resistance and capacitance values were calculated based on the PDC test results.

TABLE II. PDC TEST RESULTS OF IMPREGNATED PRESSBOARD

Aging (month)	Impregnation (hour)	Parameters		
		Resistance [Ω]		*Capacitance [pF]*
		Pol	*Depol*	
1	0	2.24×10^{11}	2.14×10^{11}	136
	8	2.51×10^{11}	2.46×10^{11}	136
	16	2.88×10^{11}	2.82×10^{11}	135
3	0	1.96×10^{11}	1.86×10^{11}	135
	8	2.04×10^{11}	1.98×10^{11}	136
	16	2.12×10^{11}	2.06×10^{11}	135

เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

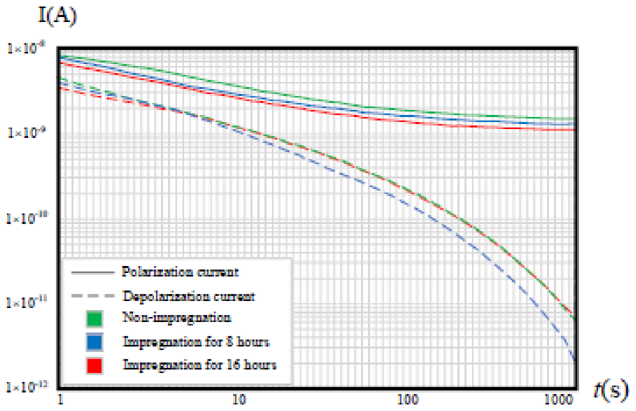


Fig. 5. The polarization and depolarization currents of the 1 month electric field stress-impregnated pressboard samples.

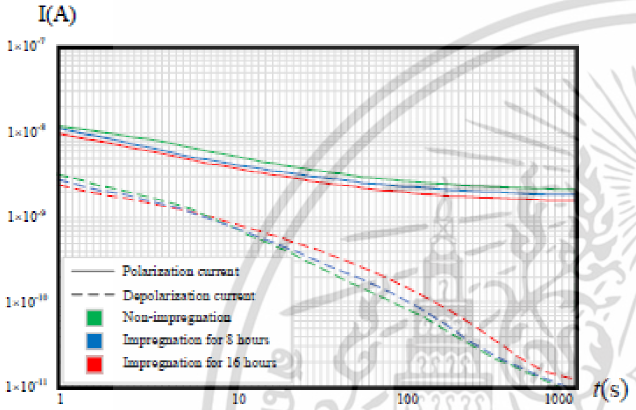


Fig. 6. The polarization and depolarization currents of the 3 month electric field stress-impregnated pressboard samples.

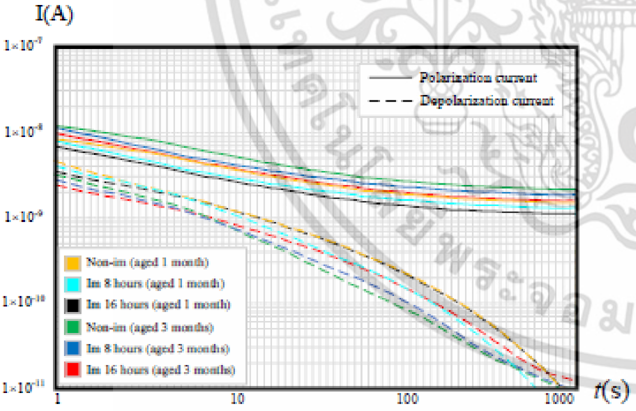


Fig. 7. The comparison of the polarization and depolarization currents of the 1 and 3 month electric field stress-impregnated pressboard samples..

According to Fig. 5-7, it can be seen that the PDC value of non-impregnated pressboard is the highest. When increasing the impregnation of the pressboards, the PDC values of such pressboards decrease. It can be seen that impregnation for 16 hours causes the lowest PDC value. Besides, the PDC values of the pressboards experienced with longer electric field stress period (3 months) were higher than these of the pressboards experienced with shorter electric field stress period (1 month).

V. CONCLUSION

According to the test result, the polarization current and depolarization current of impregnated pressboards directly depends on the impregnation periods and the electric field stress duration, decrease when increasing the period of impregnation. The moisture content greatly affects to the polarization and depolarization current of pressboard.

Likewise, the aging with 24 kV to pressboard affects to the polarization and depolarization current of pressboard follow as Fig. 7.

ACKNOWLEDGMENT

The authors gratefully acknowledge the support of this paper by TESLA Power Co., Ltd., Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) for PDC testing device, and the staff of the High Voltage Laboratory, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL).

REFERENCES

[1] T.K. Saha, M.K. Pradhan, and J.H. Yew, "Optimal time selection for the polarisation and depolarisation current measurement for power transformer insulation diagnosis" in *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, p. 7, 2007.

[2] N.A. Muhamad, B.T. Phung, T.R. Blackburn, and K.X. Lai, "Polarization and depolarization current (PDC) tests on biodegradable and mineral transformer oils at different moisture levels," *Australasian Universities Power Engineering Conference*, September 2009.

[3] W.S. Zaengl, and el at., "Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment, Part I: Theoretical Considerations", *IEEE Electrical Insulation Mag*., vol 19, no. 5, pp. 5-19, 2003.

[4] A. Küchler, "High Voltage Engineering Fundamentals-technology-Applications", Springer Vieweg, 2017.

[5] Cao, P., et al., "The effect of thermal aging on surface structure and mechnical strength of oil-impregnated pressboard," *2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, 2016.

[6] J. Siriworachanyadee, S. Maneerot, and et al., "The polarization and depolarization current characteristics of mineral oil, natural ester(FR3), palm oil, and liquid impregnated pressboard", *2019 IEEE 20th International conference on dielectric liquids (ICDL)*, 2019.

[7] K. Jariyanurat, S. Maneerit, and et al., "Electrical characteristics of natural ester impregnated pressboards under different periods of impregnation", *2016 International conference on condition monitoring and diagnosis (CMD)*, 2016.

[8] N. Pattanadech, K. Luk-in, and et al., "Dissolved gas analysis caused by electrical breakdown of liquid impregnated pressboards", *2019 16th International conference on electrical engineering/electronics, computer, telecommunications and information technology (ECTI-CON)*, 2019.

[9] Tapan Kumar Saha; Prithwiraj Purkait, "Dielectric Response Measurements," in *Transformer Ageing: Monitoring and Estimation Techniques* , IEEE, pp.81-209, 2017.

[10] R. Liao, J. Hao, and et al., "A comparative study of physicochemical, dielectric and thermal properties of pressboard insulation impregnated with natural ester and mineral oil", *IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation*, 2011.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. J. Siriworachanyadee and N. Pattanadech, "AC and Lightning Impulse Breakdown Voltage of Natural Ester Impregnated Pressboards," *2020 8th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, Phuket, 2020, pp. 377-380

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AC and Lightning Impulse Breakdown Voltage of Natural Ester Impregnated Pressboards

Jompatara Siriworachanyadee
Electrical Engineering Dept.
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
jompatara.s@gmail.com

Norasage Pattanadech
Electrical Engineering Dept.
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
norasage@yahoo.com

***Abstract*—The paper represents AC and lightning impulse (positive and negative impulse) breakdown voltage characteristics of natural ester impregnated pressboards with different impregnation period. The pressboard specimen was prepared as a rectangular shape (the length and the width are 120 mm as well) and thickness dimension of the pressboard in the experiment was approximately 1.6 mm. The pressboards were dried up in the vacuum oven with temperature at 80˚C for 12 hours under 200 mbar pressure. In addition, these pressboards were divided into 3-group according to the impregnation periods. The 1st group, the pressboards were impregnated with natural ester at 60˚C for 8 hours under 200 mbar pressure. The 2nd and 3rd group, the pressboards were impregnated at 60˚C for 16 and 24 hours, respectively, under 200 mbar pressure-controlled conditions. The plane-plane electrodes inserted with the specified number of the pressboard specimens were prepared. These electrodes were installed in the test cell filled with the natural ester. A 24 kV AC Voltage was applied to the test cell for 3 months. At the end of the first month, half of the pressboard samples was token from the test cells. Then, the AC breakdown voltage and impulse breakdown voltage characteristics of the impregnated pressboard were investigated in accordance with IEC 60243-1 and IEC 60243-3, respectively. At the end of the third month, another half of the pressboard samples was token from the test cells to perform AC and lightning impulse breakdown voltage test also. From the test results, all pressboards which are impregnated for a long period provided higher AC breakdown voltage than the pressboard which are impregnated for a short period. In the other hand, the impulse breakdown voltage values of each condition are not very different. Obviously, the period for impregnation significantly affects the AC breakdown characteristic of the natural ester impregnated pressboard. On the otherwise, it is not affecting the impulse breakdown characteristic of the natural ester impregnated pressboard.**

Keywords—AC breakdown voltage, impulse breakdown voltage, impregnated pressboard, natural ester

I. Introduction

In electrical power transmission and distribution system, a transformer is an important equipment that used to transform voltage and current. The main functions of liquid insulation work as a heat transfer medium and an electrical insulation. The majority insulation in the transformer consists of solid insulation (pressboard) and liquid insulation such as mineral oil, natural ester, or silicone oil. The most normally used liquid insulation in transformers is mineral oil because it has good properties and low cost. Nowadays, natural ester is the alternative liquid insulation that has some advantage points than mineral oil due to its can be resistant to moisture, highly flammable, easily decomposed, and prolong of pressboard [1-3].

Solid insulation or impregnated pressboards in transformers supports the mechanical forces and commonly used between transformer windings as oil barriers for breaking up large oil gaps.

In this paper, AC and impulse breakdown voltage test are performed to examine the electrical properties of natural ester impregnated pressboard used in a transformer.

II. Related Theories

A. Natural Ester Properties

Natural ester is liquid insulation produced from oil which extracted from grain introduced to be used in the transformers. The structure of natural ester is based on 3 glycerol backbones which naturally occurring fatty acid are bonded combined from "esterification reaction". Natural ester has been used as alternative liquid insulation in transformer.

B. Oil Impregnated Pressboard

Oil impregnated pressboard that consists of liquid insulation (natural ester) and solid insulation (pressboard, craft paper) forms a kind of composite insulation patterns. It is the major insulating material in the electrical equipment due to its increase insulation performance. Pressboard is used to be electrical insulation and supports the mechanical force [4].

C. AC Breakdown Voltage Test

AC breakdown voltage test is one of the destructive tests used to examine the properties of insulation. According to IEC 60243-1, this method is determining the short time electric strength of impregnated pressboard or solid insulation material at frequency between 48 – 62 Hz [5].

D. Lightning Impulse Breakdown Voltage Test

Impulse breakdown voltage accordance with IEC 60243-3 is determining the electric strength of impregnated pressboard or solid insulation material under 1.2/50 μs impulse voltage strength [6]. For the lightning impulse voltage "1.2/50", 1.2 μs is a front time (permissible deviation ± 30%) and 50 μs is a time to half-value (permissible tolerance ± 20%).

III. Test sample preparation and Test Procedure

This part consists of three main parts. First, the test sample preparation and test procedure will be explained. Second, AC breakdown strength testing of pressboard

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

978-1-7281-5931-7/20/$31.00 ©2020 IEEE

impregnated with natural ester according to IEC 60243-1 [5] is shown in Fig. 4. Third, impulse breakdown voltage testing of pressboard impregnated with natural ester according to IEC 60243-3 is shown in Fig. 5. In case impulse breakdown voltage testing, positive impulse and negative impulse breakdown voltage were tested [6].

A. Test Sample Preparation and Test Procedure

There were 8 experiments according to impregnation period (no-impregnation, 8 hours impregnation period, 16 hours impregnation period and 24 hours impregnation period) and electric field stress period (1 and 3 months). Before the AC and lightning impulse breakdown voltage test were performed, impregnated pressboards were prepared as follows:

- First, heating the pressboards with temperature at 80˚C for 12 hours under 200 mbar pressure for removing the moisture within the pressboard.
- Second, fulfilling the pressboard with the prepared natural ester and heating with temperature at 60˚C for 0, 8, 16, and 24 hours respectively under 200 mbar pressure.
- Third, applying the electric field stress to the pressboards within the test cell by which a AC 24 kV was applied to the electrodes having the pressboard samples in between.
- Next, at the end of the first month, half of the pressboard samples were taken from the test cells.
- After that, installing the pressboard specimen in the test cell.
- Then, performing AC and lightning impulse breakdown voltage test.
- Finally, at the end of the third month, another half of the pressboard samples was taken from the test cells to perform AC and lightning impulse breakdown voltage test as well.

The test cell is full-filled with natural ester to simulate the same condition of pressboard as the inside of the transformer and prevent flash over along with the pressboard surface.

The conditions of the pressboard impregnated with natural ester are shown in TABLE I.

TABLE I. THE CONDITION OF NATURAL ESTER IMPREGNATED PRESSBOARD

Order	Condition	
	Impregnation (hours)	*Electric field stress duration (month)*
1	0	1
2	8	
3	16	
4	24	
5	0	3
6	8	
7	16	
8	24	

The examples of the pressboards experienced with the electric field stress of an AC 24 kV are shown in Fig. 1.

Fig. 1. The examples of the pressboards experienced with the stress voltage of 24 kV for (a) 1 month and (b) 3 months.

B. AC Breakdown Voltage Test

This method investigates the AC breakdown voltage characteristics of natural ester impregnated pressboard and use the electrode system that is designed and constructed in accordance with IEC 60243-1 as illustrated in Fig. 2 [5].

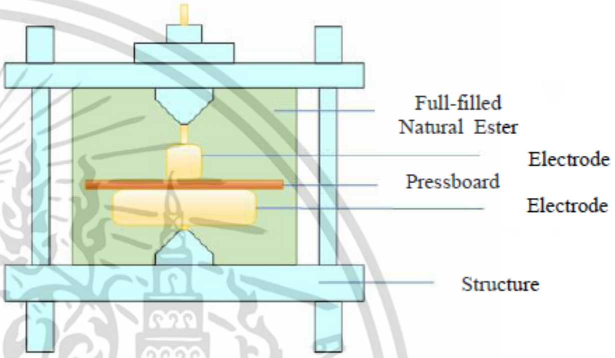


Fig. 2. Test cell for breakdown testing of natural ester impregnated pressboard.

The dimension of electrode, according to IEC 60243-1, is shown in Fig. 3.

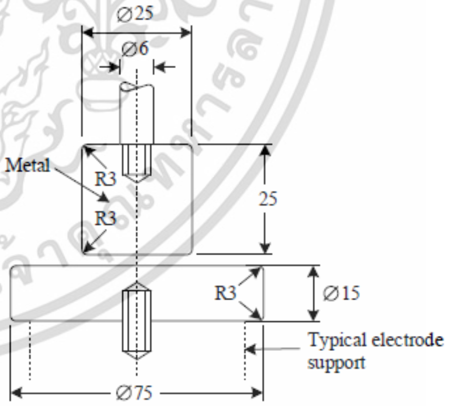


Fig. 3. The dimension of electrode according to IEC 60243-1 (Unequal electrodes).

The testing circuit diagram is presented in Fig. 4.

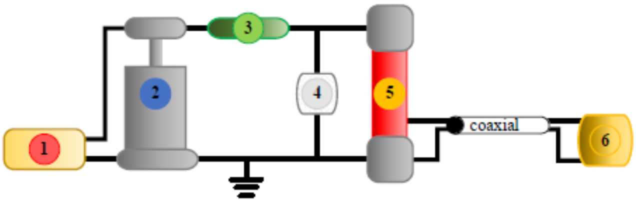


Fig. 4. Test circuit diagram for AC breakdown voltage test of natural ester impregnated pressboards.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา ... ไม่ใช่เพื่อประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

where (1) Variable voltage transformer
(2) AC high voltage source 100 kV, 50 mA
(3) Current limiting resister
(4) Test cell
(5) Voltage divider (200 kV_{AC})
(6) Meter for voltage measurement

AC breakdown strength of natural ester impregnated pressboard was tested as follows:

1. This circuit is prepared as illustrated in Fig. 3.
2. The voltage is applied to the pressboard from 0 V until breakdown.
3. The values are recorded obtained from testing.
4. Step 2. to 3. are repeated for breakdown voltage testing of other six pressboard in the same condition.
5. The breakdown voltage values are analyzed.

C. Impulse Breakdown Voltage Test

This method investigates both the positive impulse breakdown voltage and negative impulse breakdown voltage characteristics of oil impregnated pressboard and use the electrode that is designed and constructed according to IEC 60243 as illustrated in Fig. 2 same as AC breakdown voltage test [5].

The circuit diagram for positive and negative impulse breakdown voltage testing is illustrated in Fig. 5.

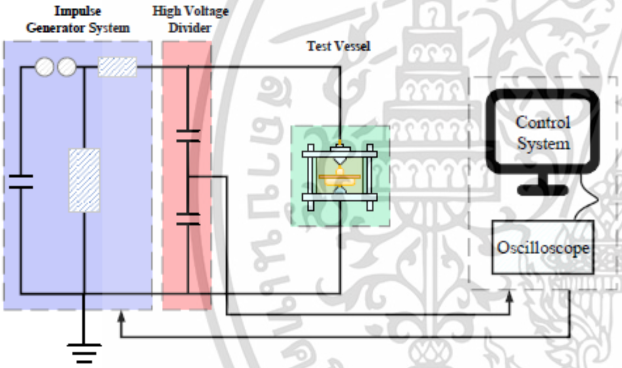


Fig. 5. Impulse breakdown testing diagram.

The example of waveform of impulse breakdown voltage is illustrated in Fig. 6.

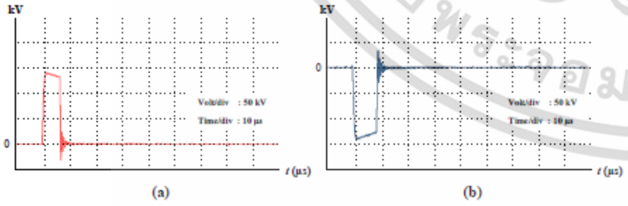


Fig. 6. The example of (a) positive impulse and (b) negative impulse breakdown voltage.

IV. Test Result

The test results of breakdown voltage measurement are represented in Figs. 7-9 and tabulated in Table II.

A. AC Breakdown Voltage Test

AC breakdown voltage test result is shown in Fig.7. The AC breakdown strength of the impregnated pressboard for long impregnation period is higher than these of the impregnated pressboard for short impregnation period. On the other hand, the AC breakdown voltage of the pressboards experienced with longer electric field stress period (3 months) were lower than these of the pressboards experienced with shorter electric field stress period (1 month).

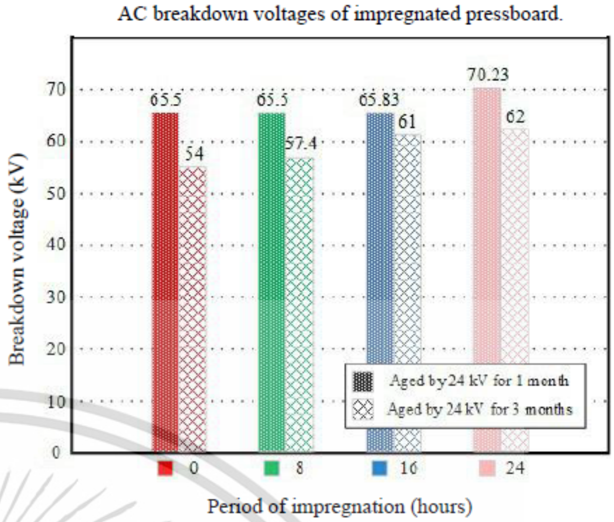


Fig. 7. The results of AC breakdown voltage of impregnated pressboard.

B. Lightning Impulse Breakdown Voltage Test

a) Positive lightning impulse breakdown voltage

Positive impulse breakdown voltages of impregnated pressboards are illustrated in Fig. 8. It can be explained that the positive lightning impulse breakdown voltage of the pressboard for a long impregnation period is higher than the positive impulse breakdown strength of the pressboard for short impregnation period. The longer electric field stress period makes the positive impulse voltage of the pressboards reduce.

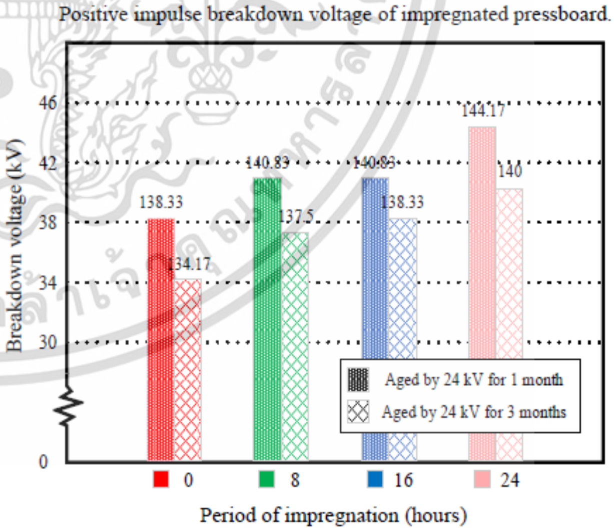


Fig. 8. The results of positive impulse breakdown voltage of impregnated pressboard.

b) Negative lightning impulse breakdown voltage

Negative impulse breakdown voltages of impregnated pressboards are presented in Fig. 9. It can be explained like the previous title (Positive impulse breakdown voltage) that the negative lightning impulse breakdown voltage of the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

pressboard for long impregnation period is higher than the negative impulse breakdown voltage of the pressboard for short impregnation period. The longer electric field stress period makes the negative impulse voltage of the pressboards reduce.

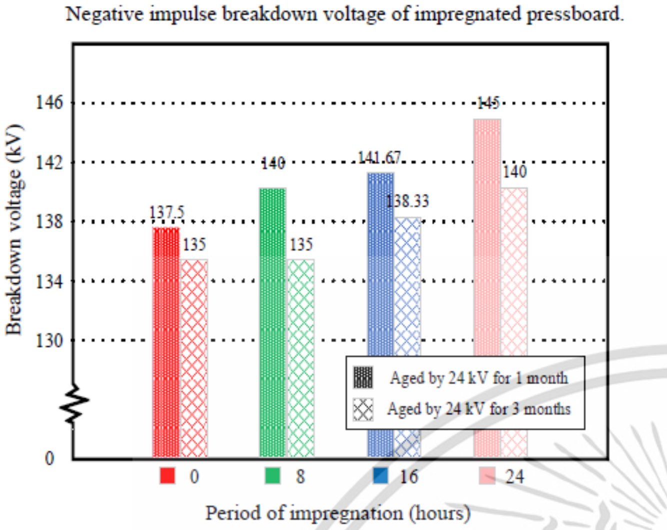


Fig. 9. The results of negative impulse breakdown voltage of impregnated pressboard.

The values of AC and lightning impulse breakdown voltage from all tests can be summarized as in Table II.

TABLE II. THE SUMARY OF EXPERIMENT

Order	Condition		Experiment		
	Impregnation (hour)	*Electric field stress duration (month)*	*AC*	*Im+*	*Im-*
1	0	1	65.5	138.33	137.5
2	8	1	65.5	140.83	140
3	16	1	65.83	140.83	141.67
4	24	1	70.23	144.17	145
5	0	3	54	134.17	135
6	8	3	57.4	137.5	135
7	16	3	61	138.33	138.33
8	24	3	62	140	140

Where *AC* is AC breakdown voltage

Im+ is positive lightning impulse breakdown voltage

Im- is negative lightning impulse breakdown voltage

V. Conclusion

From the test result, it can conclude that:

- The period of impregnation of pressboards obviously effects on both the breakdown voltage of pressboard.
- The aging period of pressboard effects on both the breakdown voltage.
- From TABLE II, the values of positive impulse breakdown voltage are similar the values of negative impulse breakdown voltage.

Acknowledgment

The authors gratefully acknowledge the support of this paper by TESLA Power Co., Ltd., and the staff of the High Voltage Laboratory, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL).

References

[1] Martin, D., and et al., "An overview of the suitability of vegetable oil dielectrics for use in large power transformers," *Proc. 5th Annual Euro TechCon*, Bhester, United Kingdom, 2006.

[2] *CIGRE Working Group A2.35, Ecperiences in Service with New Insulating Liquids*, CIGRE 436, October 2010.

[3] F. Pratomosiwi, Dielectric Properties of Transformer Boards and Papers Impregnated with Alternative Insulating Fluids, April 2014, Dissertation, Graz University of Technology.

[4] Cao, P., and et al., "The effect of thermal aging on surface structure and mechnical strength of oil-impregnated pressboard," *2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, 2016.

[5] IEC 60243-1, *Electric strength of insulating materials – test methods – part 1 : Tests at power frequencies*, 2013.

[6] IEC 60243-3, *Electric strength of insulating materials – test methods – part 3 : Additional requirements for 1.2/50 µs impulse tests*, 2013.

[7] K. Jariyanurat, S. Maneerot, and et al., "Electrical characteristics of natural ester impregnated pressboards under different periods of impregnation", *2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, 2016.

[8] N. Pattanadech, K. Luk-in, and et al., "Dissolved gas analysis caused by electrical breakdown of liquid impregnated pressboards", *2019 16th International conference on electrical engineering/electronics, computer, telecommunications and information technology (ECTI-CON)*, 2019

[9] S. Maneerot, K. Jariyanurat, and et al., "Studies of electrical and thermal characteristics of natural ester immersed transformer compared with mineral oil immersed and palm oil immersed transformer", *2018 Condition monitoring and diagnosis (CMD)*, 2018

[10] S. Potivejkul, N. Pattanadech, and et al., "Electrical characteristics of natural ester based nanofluid", *2017 International electrical engineering cngoress (iEECON)*, 2017

[11] A. Küchler, "High Voltage Engineering Fundamentals-technology-Applications," Springer Vieweg, 2017.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. J. Siriworachanyadee, S. Maneerot, P. Nimsanong, P. Kitchaiya and N. Pattanadech, "The Polarization and Depolarization Current Characteristics of Mineral Oil, Natural Ester (FR3), Palm Oil, and Liquid Impregnated Pressboard," *2019 IEEE 20th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, Roma, Italy, 2019, pp. 1-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Polarization and Depolarization Current Characteristics of Mineral Oil, Natural Ester (FR3), Palm Oil, and Liquid Impregnated Pressboard

Jompatara Siriworachanyadee
Electrical Engineering Dept.,
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
jompatara.s@gmail.com

Sakda Maneerot
Electrical Engineering Dept.,
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
sakda.maneerot@gmail.com

Phethai Nimsanong
Electrical Engineering Dept.,
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
phethai.ni@gmail.com

Prakob Kitchaiya
Chemical Engineering Dept.,
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
kkprakob@kmitl.ac.th

Norasage Pattanadech
Electrical Engineering Dept.,
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
norasage@yahoo.com (corresponding author)

Abstract—**Polarization and Depolarization Current (PDC) measurement is a non-destructive dielectric testing method used to determine the electrical properties of transformer insulation. Nowadays, natural ester has been used as alternative liquid insulation in transformers because it can be easily decomposed, highly flammable, resistant to moisture, and prolong of pressboard (solid insulation in a transformer) compared with mineral oil. Furthermore, palm oil is also an interestingly alternative insulating liquid. This paper presents the PDC characteristics of mineral oil, natural ester (FR3), and palm oil under various temperatures. All received liquid specimen were dry in the controlled temperature oven at 70°C under 200 mbar and then they were cooled down to ambient temperature around 25-30°C. The liquid samples were investigated for three cases as follows: 1) moisture content measurement according to ASTM D1533, 2) dielectric dissipation factor measurement as per ASTM D924, and 3) polarization current and depolarization current measurement at liquid temperature of 30°C, 50°C, and 70°C respectively. The PDC characteristics of mineral oil impregnated pressboards and natural ester impregnated pressboards were also investigated. The PDC test results were analyzed. It was found that the dielectric response of mineral oil was significantly different from natural ester (FR3) and palm oil. Besides, it was clearly that the conduction current of liquid insulation increased with increasing liquid temperature. Moreover, the pressboard impregnated with natural ester provided better insulation characteristics such as lower conduction current than that of the pressboard impregnated with mineral oil.**

Keywords—***Polarization and Depolarization Current Measurement, Dissipation Factor, Mineral Oil, Natural Ester, Palm Oil, Pressboard.***

I. INTRODUCTION

A transformer is an importance equipment used to transfer the electrical energy. Age of transformers depends on the insulation system. The insulation system consists of two main types i.e. liquid and solid insulation. The factors that can deteriorate the efficiency of transformer are insulation degradation, temperature, hot spot, contaminated particle etc. However, there are many ways to avoid and analysis the problems before failures. One of the ways to analysis is non-destructive test being Polarization and Depolarization Current Measurement (PDC).

The PDC measurement started in the 1990s. It is one of the dielectric diagnosis techniques. It has gained immense popularity due to its ability to assess the condition of liquid and pressboard separately without opening the transformer tank [1].

The principle of PDC measurement is based on the application of a DC voltage across a test object for a long time. During this time, the current arising from the activation of the polarization process with different time constants corresponding to different insulation materials and due to the conductivity of the test object, is measured. Then, the circuit is opened and the object is discharged to ground called the depolarization process. The charging and discharging current are influenced by the properties of the insulation material as well as by the geometric structure of the insulating system [2].

This paper aims to study about PDC characteristic of liquid insulation and pressboard used in transformers.

II. THEORY

A. The PDC measurement

Measurement of PDC is one of the diagnosis test methods used to evaluate the dielectric properties of an insulating material, change with moisture, ageing, and contamination [2]. Polarization and depolarization current measurement technique had been developed base on [3,4].

The measurement during applying a DC voltage V_c is the polarization current $i_{pol}(t)$ consisted of absorption current, capacitive current, and conduction current. In equation (1), the first term is related to the conductivity of the insulation. The second term cannot be recorded because of the large dynamic range of current amplitudes inherent ("fast"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ ... ใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

978-1-7281-1718-8/19/$31.00 ©2019 IEEE

polarization process). The last term represents the remaining "slow" polarization process [3].

$$i_{pol}(t) = C_0 V_c[\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} + \varepsilon_\infty \delta(t) + f(t)] \qquad (1)$$

where C_0 is the geometric capacitance of test object
ε_0 is permittivity of free space (8.85419×10^{-12} F/m)
σ_0 is dc conductivity
ε_∞ is the high frequency component of the permittivity
$\delta(t)$ is the delta function arising from the applied step voltage immediately following $t = 0$
$f(t)$ is the dielectric response function

When DC voltage source is switched off and replaced by short circuit, depolarization current $i_{depol}(t)$ happen. It consists of only absorption current because conduction exists merely applying power source [5]. The depolarization current is the relaxation of polarization which can be expressed in equation (2).

$$i_{depol}(t) = -C_0 V_c[f(t) - f(t - T_c)] \qquad (2)$$

where T_c is the time duration when the step voltage was applied.

The equivalent circuit for PDC measurement and the principle of PDC measurement are shown in Fig 1.

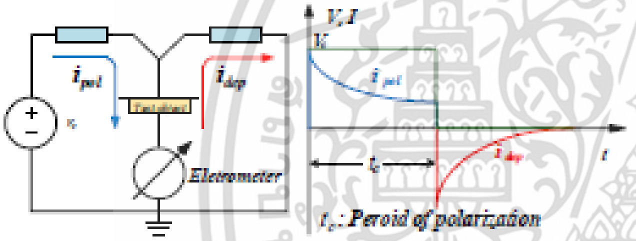


Fig. 1. PDC measurement circuit and principle of polarization and depolarization current measurement [3].

B. *Electrical insulation in transformer*

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

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

Liquid insulation – dielectric liquid is used as electrical insulation, coolant media and arc extinguishing. Generally, mineral oil is widely in transformer industry. Mineral oil used in the transformers must meet the requirement according to IEC 60296 [6] or ASTM D3487 [7] standard. There are two types of mineral oil in transformer, naphthenic oil and paraffinic oil. The relative permittivity of the mineral oil (50 Hz 25°C) is approximately 2.2. Natural ester was also used in the present. In comparison with mineral oils, natural based oils have, inter alia, much higher flashpoint, slightly above 300 °C, which allows the use of alternative fluids in applications that place higher demands in terms of fire safety. These features of these alternative fluids show the advantages outside high biodegradability and fact that it is a renewable natural resource [8].

III. Experimental Details

The experiment was performed for studying the PDC characteristics of three types of liquid i.e. mineral oil, natural ester, and palm oil and liquid impregnated pressboards by using the PDC-Analyzer-1MOD.

A. *Test cell*

Fig. 2. Test cell for liquid insulation testing "Model DAC-OBE-2".

Fig. 2 shows the test cell for liquid insulation testing used in the experiment. This is an electrode for testing accordance with the JIS (C2101) standard and can apply for dielectric loss tangent tests and volume resistivity tests.

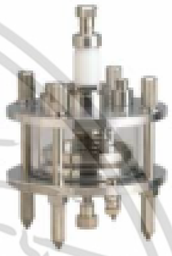


Fig. 3. Test cell for solid insulation testing "Model DAC-OBE-7".

Fig. 3. shows the test cell for solid insulation testing used in the experiment. This electrode can be used for measuring permittivity and dielectric loss tangent of solid insulation in accordance with JIS (C2111) standard.

Both the test cells were designed to prevent moisture ingress from the surrounding environment.

B. *Test set-up*

The PDC test circuit for liquid insulation is shown in Fig. 4.

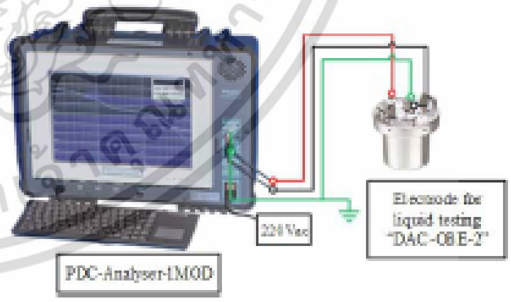


Fig. 4. PDC measurement for liquid insulation testing.

The PDC test circuit for liquid impregnated pressboard is shown in Fig. 5.

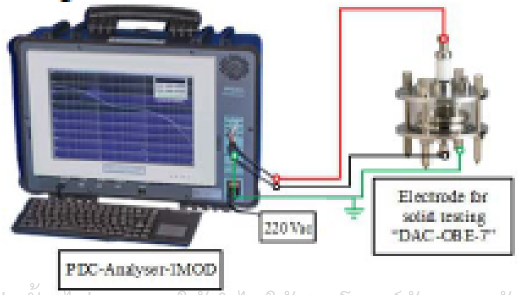


Fig. 5. PDC measurement for insulating pressboard.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The test circuit is connected with a high voltage source and measurement devices. The PDC measurement was used to control the circuit switching and also to record the measured current by the high resistance electrometer. All the measurements were carried out at 200V with 2000 seconds for recording polarization and depolarization current.

C. *PDC test procedure*

The procedures were divided into 2 parts: liquid insulation testing and liquid impregnated paper testing.

1. PDC test for liquid insulation

- First, liquid insulation was heated at 60°C under 200 mbar pressure for 12 hours.
- Second, liquid insulation was naturally recovered to 25 °C under 200 mbar pressure.
- Then, each liquid insulation was tested for moisture content according to ASTM D1533 [9] and dielectric dissipation factor according to IEC 60247 [10] by using METTLER TOLEDO C10S and SOKEN DAC-IM-D6, respectively.
- After that, the liquid insulation was prepared about 50 ml to the test vessel showing in Fig. 4
- Each liquid insulation was tested for the PDC measurement by using the PDC Analyser-1MOD at 30°C, 50°C, and 70°C by which the ambient of the test being 25°C.

2. PDC test for liquid impregnated pressboard

- First, the pressboard was heated at 80 °C under 200 mbar pressure for 12 hours.
- Second, the pressboard was fulfilled with the prepared liquid insulation and was heated at 60°C under 200 mbar pressure for 12 hours.
- After that, the liquid insulation impregnated pressboard was installed in the test vessel as shown in Fig. 5.
- Each liquid impregnated pressboard was tested at the ambient of 25°C.

After finishing the test set up, the PDC test was divided into three-step process: (i) initial measurement, (ii) control measurement, and (iii) main measurement

(i) Initial measurement: this process was only discharge current measurement in order to as certain the amount of any remaining current inside the test object.

(ii) Control measurement: this process was checked the measurement system in test circuit by applying a 50V, 5s, to test object for measure $i_{pol}(t)$. Then, short circuit the test object for measure $i_{dep}(t)$ until $i_{dep}(t)$ was as remaining current from Initial measurement.

(iii) Main measurement: the PDC obtained from this process were used to determine the dielectric characteristics of liquid insulation and/or liquid impregnated pressboard. This process was applied a 200V (charging voltage), 1000 seconds (charging time and discharging time) to the test object. The control program would charge and discharge the test object sequentially according to the specified time setting.

IV. Experimental Results

A. *PDC test for liquid insulation*

Before the PDC measurement was performed, the moisture content and dielectric dissipation factor of each liquid insulation was measured for checking the quality of liquid insulation and proving condition of insulation [11]. Moisture content and dissipation factor of liquid insulation are shown in TABLE I.

TABLE I. Moisture Content and Dissipation Factor of Liquid Insulation

Type	The experiment	
	Moisture content	*Dielectric Dissipation factor (25°C)*
Mineral Oil	23 ppm	0.000275
Natural Ester	180 ppm	0.00347
Palm Oil	336 ppm	0.00351

The PDC test results of each liquid insulation with different temperatures are shown in Fig. 6 - Fig. 8.

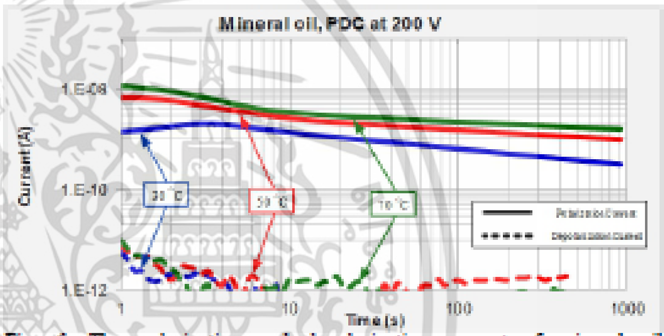


Fig. 6. The polarization and depolarization current of mineral oil with different temperatures.

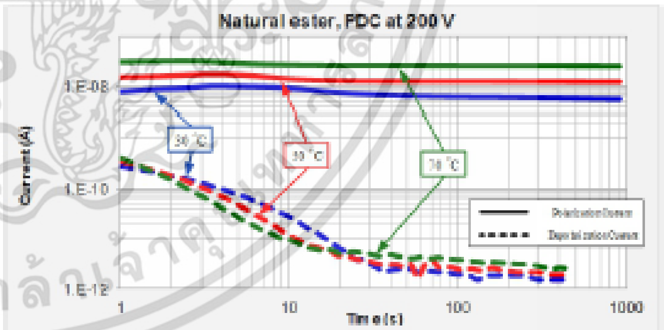


Fig. 7. The polarization and depolarization current of natural ester with different temperatures.

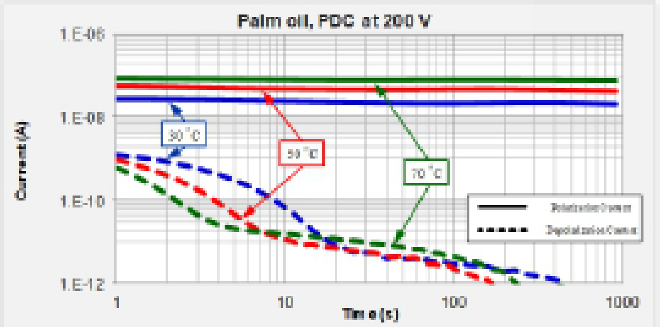


Fig. 8. The polarization and depolarization current of palm oil with different temperatures.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

B. PDC test for liquid impregnated pressboard

This experiment was aimed to comparatively study of between the PDC of liquid insulation impregnated pressboard and non-impregnated pressboard.

The PDC test results of liquid insulation impregnated pressboard are shown in Fig. 9 - Fig. 11.

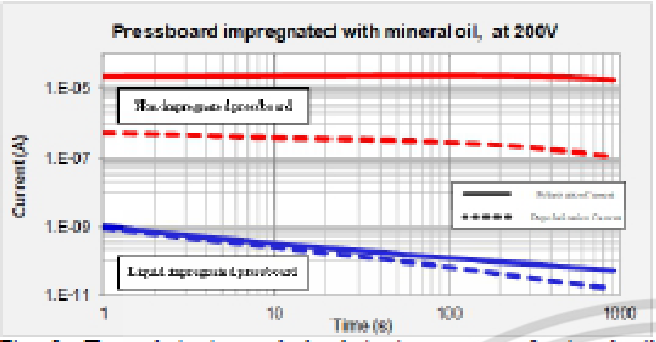


Fig. 9. The polarization and depolarization current of mineral oil impregnated pressboard compared with non-impregnated pressboard

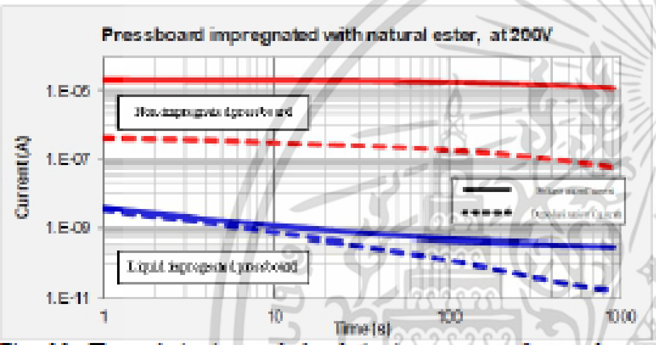


Fig. 10. The polarization and depolarization current of natural ester impregnated pressboard compared with non-impregnated pressboard

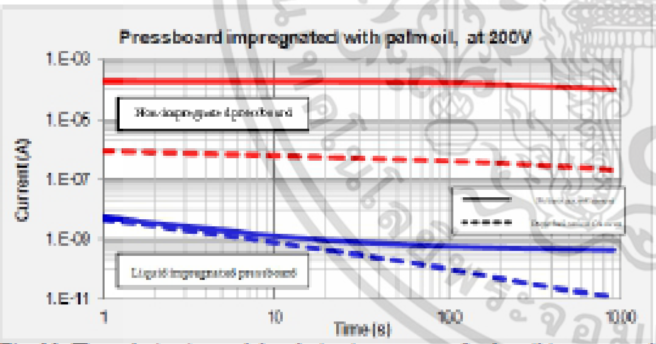


Fig. 11. The polarization and depolarization current of palm oil impregnated pressboard compared with non-impregnated pressboard

V. Conclusion

From Fig. 6 - Fig. 8, the results show that the polarization current and conductivity of each liquid insulation were differed when temperature changed. Therefore, it can be concluded that the polarization current and conduction current of the insulating liquids vary with changing in temperature. Moreover, in case of mineral oil, it had short duration time in depolarization process because it has no polarization process.

From Fig. 9 - Fig. 11, it can be summarized that the moisture content in the pressboard affecting on the polarization current. The polarization current of non-impregnated pressboard was highly than liquid insulation impregnated pressboard obviously.

Acknowledgment

The authors wish to acknowledge Mr. Worachai Sawatdimongkol from TIS company, and all staff of dielectric analytiká laboratory, Faculty of Electrical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. This work is supported by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (grant number KREF 046107)

References

[1] T. K. Saha, M. K. Pradhan, and J. H. Yew, "Optimal time selection for the polarisation and depolarisation current measurement for power transformer insulation diagnosis " in IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007, p. 7.

[2] N.A. Muhamad, B.T. Phung, T.R. Blackburn, and K.X. Lai, "Polarization and depolarization current (PDC) tests on biodegradable and mineral transformer oils at different moisture levels," Australasian Universities Power Engineerinf Conference, September 2009.

[3] W.S. Zaengl, "Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment, part i: theoretical considerations," IEEE Electrical Insulation Magazine, vol 19, no.5, 2003, pp.5-19.

[4] A. Küchler, "High Voltage Engineering Fundamentals-technology-Applications," Springer Vieweg, 2017.

[5] S . A . Bhumiwat, " The latest technology for on- site insulation condition assessment of electrical power apparatus," Electricity Engineers Association of New Zealand, Christchurch, June 2002 .

[6] IEC 60296, Edition 4.0 –2012, Fluids for electro technical applications – Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear.

[7] ASTM D3487 –09, Standard Specification for Mineral Insulating Oil Used in Electrical Apparatus.

[8] V. Mentlík, P. Trnka, M. Svoboda, J. Hornak, J. Soucek, and L. Harvánek, "Natural esters as a part of HV transformer insulation system," 2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), July 2015.

[9] ASTM D1533–12, Standard Test Method for Water in Insulation Liquids by Coulometric Karl Fischer Titration.

[10] IEC 60247–2004, Insulating liquids – Measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor (tan d) and d.c. resistivity.

[11] P. Werelius, M. Ohlen, C. Jialu, and D.M. Robalino, "Dielectric frequency response measurements and dissipation factor temperature impedance," IEEE International Symposium on Electrical Insulation, June 2012.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	:	นายจอมภัทร สิริวรจรรยาดี
วัน เดือน ปีเกิด	:	5 ธันวาคม พ.ศ. 2538
ที่อยู่	:	9/161 หมู่บ้าน KC Natural City ถ.กาญจนาภิเษก แขวงราษฎร์พัฒนา เขตสะพานสูง กรุงเทพมหานคร 10240

ประวัติการศึกษา

ระดับชั้นปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง (2561)

งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

2020 AC and Lightning Impulse Breakdown Voltage of Natural Ester Impregnated Pressboards, *2020 8th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, Thailand

2020 Polarization and Depolarization Current Characteristics of Natural Ester Impregnated Pressboards with Different Periods of Impregnation, *2020 8th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, Thailand

2019 The Polarization and Depolarization Current Characteristics of Mineral Oil, Natural Ester (FR3), Palm Oil, and Liquid Impregnated Pressboard, *2019 IEEE 20th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, Italy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้