

การวิเคราะห์ฉนวนกระดาษในหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้วิธีการซิมูเลชัน
ผลของสนามไฟฟ้าและความร้อน

ANALYSIS OF ELECTRICAL INSULATION PAPER IN POWER TRANSFORMERS BY
SIMULATION OF ELECTRIC FIELD AND THERMAL RESULTS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ (หลักสูตรสหวิทยาการ)
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2567
KMITL-2024-EN-M- 027-212

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANALYSIS OF ELECTRICAL INSULATION PAPER IN POWER TRANSFORMERS BY
SIMULATION OF ELECTRIC FIELD AND THERMAL RESULTS

CHANANUT RAKKAPHAN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING
(MULTI-DISCIPLINARY PROGRAM)
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2024
KMITL-2024-EN-M- 027-212

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2024

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ฉนวนกระดาษในหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้วิธีการ ซีมูเลชันผลของสนามไฟฟ้าและความร้อน
นักศึกษา	นายชนาณัติ รักขพันธ์
รหัสประจำตัว	63601072
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ (หลักสูตรสหวิทยาการ)
พ.ศ.	2567
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ภพ จันท์เจริญสุข

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์คุณภาพของฉนวนกระดาษที่อยู่ในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายในประเทศไทย ซึ่งมีอุณหภูมิขณะใช้งานที่ค่อนข้างสูงกว่าประเทศเขตเมืองหนาวจึงวิเคราะห์การทำงานที่อุณหภูมิใช้งานจนถึงอุณหภูมิสูง โดยใช้หลักการวิเคราะห์ตามหลักการวัดกระแสโพลาร์ไลซ์และดีโพลาร์ไลซ์เซชันด้วยเงื่อนไขการทดสอบแบบต่างๆ ทำให้มีการประยุกต์ใช้การซีมูเลชัน มาใช้เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของฉนวนกระดาษในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าก่อนที่จะทำการทดสอบจริงต่อไป โดยได้ทำการทดสอบด้วยแรงดันและอุณหภูมิต่างๆ ผู้วิจัยจะดำเนินการซีมูเลชัน ระบบทดสอบซึ่งประกอบด้วยชุดทดสอบ ซึ่งอยู่ภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิและแรงดันสูงโดยจะเน้นศึกษาฉนวนน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า และฉนวนกระดาษภายในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า หลังจากดำเนินการทดลองจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความเครียดสนามไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนเล็กน้อย แต่จะส่งผลต่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเนื้อฉนวนค่อนข้างมากจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าขีดจำกัดของการใช้งานของฉนวนกระดาษที่ใช้ในหม้อแปลงน้ำมันแต่ละชนิดเป็นอย่างไรและทำอย่างไรจึงสามารถพัฒนาให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

Thesis	ANALYSIS OF ELECTRICAL INSULATION PAPER IN POWER TRANSFORMERS BY SIMULATION OF ELECTRIC FIELD AND THERMAL RESULTS
Student	Mr. Chananut Rakkaphan
Student ID.	63601072
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical and Computer Engineering (Multi-Disciplinary Program)
Year	2024
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Phop Charchoensook

ABSTRACT

This thesis presents the quality analysis of insulation paper in distribution transformer oil in Thailand. The country is located in the tropical zone and therefore experiences relatively high temperatures. Analytical principles based on polarization and depolarization current method with various test conditions are used. Computer simulation can help to analyze the efficiency of insulation paper in transformer oil under different voltages and temperatures. The tested system consists of an electrode inside a high-temperature and high-voltage control cabinet. It can be concluded that increasing temperature has a marginal effect on the electric field stress of the electrode. However, the rising temperature significantly affects the polarization current that flows through the insulators. The results can indicate the limitation of using oil insulation paper and how to improve the quality of it.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ภพ จันทร์เจริญสุข และ รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับความช่วยเหลือในส่วนของข้อมูลประกอบงานวิจัยจาก บริษัท ไทยทราฟโฟแมนูแฟคเจอร์ จำกัด ทั้งในส่วนของข้อมูลจำเพาะในการออกแบบหม้อแปลงระบบจำหน่ายที่มีการผลิตและใช้งานในประเทศ อีกทั้งยังให้โอกาสเข้าไปเรียนรู้ที่โรงงานเพื่อเสริมสร้างความรู้เกี่ยวกับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตั้งแต่กระบวนการออกแบบไปจนถึงกระบวนการประกอบจนแล้วเสร็จเพื่อเป็นการสนับสนุนผู้วิจัยให้มีความรู้ที่เหมาะสมแก่งานวิจัย

ขอขอบคุณนายเกียรติศักดิ์ วงศ์พานิช นายณัฐพล โนนนาแซง นางสาวพิชญา เสียงใส และ นางสาววรรณ ชำนาญธรรม นักศึกษาปริญญาตรี ที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนงานวิจัยทั้งในส่วนของโปรแกรมซิมูเลชัน อีกทั้งยังขึ้นรูปแบบจำลองอิเล็กทรอนิกส์

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ชนาณัติ รักขพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
1.6 บทบาททวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 ระบบฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้า.....	7
2.1.1 ฉนวนเหลว.....	7
2.1.2 ฉนวนแข็ง.....	9
2.1.3 กระบวนการเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษ.....	11
2.2 การทดสอบฉนวนทางไฟฟ้า.....	12
2.2.1 กระบวนการโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน (Polarization and Depolarization Process : PDC).....	12
2.2.2 กระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน (Polarization and Depolarization Current: PDC).....	16
2.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับกระบวนการ PDC.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบการทดลองและการทดสอบ	20
3.1 การออกแบบอุปกรณ์สำหรับใช้ทำการทดสอบ	20
3.1.1 การออกแบบชุดทดสอบ (Electrode Design).....	20
3.1.2 การออกแบบตู้ควบคุมแรงดันและอุณหภูมิ (Voltage and Temperature Control Cabinet Design)	22
3.2 การออกแบบวิธีการทดสอบและการชั่งน้ำหนัก	23
3.2.1 การเลือกแรงดันสำหรับใช้ทำการทดสอบ	23
3.2.2 การเลือกอุณหภูมิสำหรับใช้ทำการทดสอบ	24
3.2.3 การจำลองการทดสอบด้วยการชั่งน้ำหนักตามทฤษฎีของกระบวนการPDC... 24	
บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล	37
4.1 ผลการชั่งน้ำหนักค่าความเครียดสนามไฟฟ้าและค่ากระแสภายในฉนวนกระดาษที่อุณหภูมิและแรงดันทดสอบต่างๆ	37
4.2 ตารางแสดงค่าผลการชั่งน้ำหนักด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	42
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	43
5.1 สรุปผลการศึกษารายงาน	43
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัย.....	43
เอกสารอ้างอิง	44
ภาคผนวก.....	46
ประวัติผู้เขียน.....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการศึกษา	3
ตารางที่ 1.2 ขั้นตอนการศึกษา (ต่อ)	3
ตารางที่ 1.3 ขั้นตอนการศึกษา (ต่อ).....	4
ตารางที่ 1.4 ขั้นตอนการศึกษา (ต่อ).....	4
ตารางที่ 2.1 ค่าเปอร์มิตติวิตีของกระดาษชุบน้ำมันฉนวนที่ 20 องศาเซลเซียส (ϵ_{res}).....	10
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนผสม (กระดาษและน้ำมัน).....	10
ตารางที่ 3.1 รูปแบบการซึมเล็ดของฉนวนทั้งสามชนิด.....	23
ตารางที่ 3.2 ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศและฉนวนน้ำมัน.....	29
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของอิเล็กโทรดที่อุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันของกระดาษฉนวนน้ำมันหม้อแปลง.....	42
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการจำลองค่ากระแสภายในเนื้อฉนวนหรือกระแสโพลาริเซชันที่อุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันของกระดาษฉนวนน้ำมันหม้อแปลง.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	โครงสร้างทางเคมีของส่วนประกอบพื้นฐานของน้ำมันแร่.....	7
รูปที่ 2.2	โครงสร้างทางเคมีของเอสเทอร์ธรรมชาติ	8
รูปที่ 2.3	เปรียบเทียบอัตราการย่อยสลายตามธรรมชาติของฉนวนหลายชนิดต่าง ๆ.....	8
รูปที่ 2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวน์และค่าความชื้นของฉนวนหลายชนิดต่าง ๆ.....	9
รูปที่ 2.5	เพรสบอร์ดและกระดาษคราฟท์	10
รูปที่ 2.6	โครงสร้างเซลลูโลสและการเสื่อมสภาพของเซลลูโลส	11
รูปที่ 2.7	การป้อนแรงดันให้กับฉนวน	12
รูปที่ 2.8	อิเล็กทรอนิกส์โพลาริเซชัน (ก) อะตอมของฉนวนเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้ามากระทำ (ข) อะตอมของฉนวนเมื่อมีสนามไฟฟ้ามากระทำ (อะตอมของฉนวนเกิดไดโพล)	13
รูปที่ 2.9	อิเล็กทรอนิกส์โพลาริเซชัน (ก) วัสดุฉนวนเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้ามากระทำ (ข) วัสดุฉนวนเมื่อมีสนามไฟฟ้ามากระทำ	13
รูปที่ 2.10	ออเรนเทชันโพลาริเซชัน (ก) โมเลกุลของฉนวนเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้ามากระทำ (ข) โมเลกุลของฉนวนเกิดการหมุนเพื่อเรียงตัวตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าที่มากระทำ	14
รูปที่ 2.11	ออเรนเทชันโพลาริเซชันภายในเนื้อฉนวน (ก) โมเลกุลภายในเนื้อฉนวนเรียงตัวแบบ กระจายเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้ามากระทำ (ข) โมเลกุลภายในเนื้อฉนวนเรียงตัวตาม แนวสนามไฟฟ้าที่มากระทำ	14
รูปที่ 2.12	ฮอปปีงโพลาริเซชัน	15
รูปที่ 2.13	สเปซชาร์จโพลาริเซชัน (ก) ประจุภายในเนื้อฉนวนเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้ามากระทำ (ข) ประจุภายในเนื้อฉนวนเกิดการเคลื่อนที่เมื่อมีสนามไฟฟ้ามากระทำ.....	15
รูปที่ 2.14	ระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดกระบวนการโพลาริเซชันประเภทต่างๆ.....	16
รูปที่ 2.15	การจ่ายแรงดันรูปขั้นให้กับฉนวน	16
รูปที่ 2.16	องค์ประกอบของกระแสโพลาริเซชัน.....	17
รูปที่ 2.17	กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน.....	19
รูปที่ 3.1	แสดงภาพรวมของชุดควบคุมอุณหภูมิเพื่อทดสอบฉนวนหลาย.....	20
รูปที่ 3.2	แบบ 3 มิติประกอบสำเร็จของชุดเซลล์ทดสอบ.....	21
รูปที่ 3.3	แบบ 2 มิติของอิเล็กทรอนิกส์.....	21
รูปที่ 3.4	แบบ 3 มิติของอิเล็กทรอนิกส์.....	21
รูปที่ 3.5	แบบ 3 มิติของชุดทดสอบ (Chamber).....	22
รูปที่ 3.6	แบบ 3 มิติของตู้ควบคุมอุณหภูมิ.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.7 ค่าพารามิเตอร์ของกระดาษฉนวนน้ำมันจากข้อมูลของบริษัทผู้ผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าแห่งหนึ่ง จังหวัดระยอง	23
รูปที่ 3.8 ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศที่ระดับแรงดัน 0 kV	25
รูปที่ 3.9 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศ	26
รูปที่ 3.10 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศที่ระดับแรงดัน 10 kV	26
รูปที่ 3.11 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศที่ระดับแรงดัน 20 kV	26
รูปที่ 3.12 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศที่ระดับแรงดัน 30 kV	27
รูปที่ 3.13 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศที่ระดับแรงดัน 40 kV	27
รูปที่ 3.14 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนน้ำมันที่ระดับแรงดัน 0 kV	28
รูปที่ 3.15 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนน้ำมันที่ระดับแรงดัน 10 kV	28
รูปที่ 3.16 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนน้ำมันที่ระดับแรงดัน 20 kV	28
รูปที่ 3.17 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนน้ำมันที่ระดับแรงดัน 30 kV	29
รูปที่ 3.18 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนน้ำมันที่ระดับแรงดัน 40 kV	29
รูปที่ 3.19 การจำลองการกระจายความร้อนในอากาศที่อุณหภูมิ 50 องศา	30
รูปที่ 3.20 การจำลองการกระจายความร้อนในอากาศที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	31
รูปที่ 3.21 การจำลองการกระจายความร้อนในอากาศที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส	31
รูปที่ 3.22 การจำลองการกระจายความร้อนในอากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส	32
รูปที่ 3.23 การจำลองการกระจายความร้อนในอากาศที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส	32
รูปที่ 3.24 การจำลองการกระจายความร้อนในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	33
รูปที่ 3.25 การจำลองการกระจายความร้อนในน้ำมันหม้อแปลง ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	33
รูปที่ 3.26 การจำลองการกระจายความร้อนในน้ำมันหม้อแปลง ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	34
รูปที่ 3.27 การจำลองการกระจายความร้อนในน้ำมันหม้อแปลง ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส	34
รูปที่ 3.28 การจำลองการกระจายความร้อนในน้ำมันหม้อแปลง ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส	35
รูปที่ 3.29 การจำลองการกระจายความร้อนในน้ำมันหม้อแปลง ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส	35
รูปที่ 3.30 การจำลองการกระจายความร้อนในน้ำมันหม้อแปลง ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.1 ผลการชิมูเลชันแสดงอุณหภูมิของชุดทดสอบที่ 50 องศาเซลเซียส	37
รูปที่ 4.2 ผลการชิมูเลชันที่อุณหภูมิทดสอบ 50 องศาเซลเซียส แรงดันทดสอบ 1 kV.....	37
รูปที่ 4.3 ผลการชิมูเลชันที่อุณหภูมิทดสอบ 50 องศาเซลเซียส แรงดันทดสอบ 4 kV.....	38
รูปที่ 4.4 ผลการชิมูเลชันแสดงอุณหภูมิของชุดทดสอบที่ 100 องศาเซลเซียส	38
รูปที่ 4.5 ผลการชิมูเลชันที่อุณหภูมิทดสอบ 100 องศาเซลเซียส แรงดันทดสอบ 1 kV.....	39
รูปที่ 4.6 ผลการชิมูเลชันที่อุณหภูมิทดสอบ 100 องศาเซลเซียส แรงดันทดสอบ 4 kV.....	39
รูปที่ 4.7 ผลการชิมูเลชันแสดงอุณหภูมิของชุดทดสอบที่ 150 องศาเซลเซียส	39
รูปที่ 4.8 ผลการชิมูเลชันที่อุณหภูมิทดสอบ 150 องศาเซลเซียส แรงดันทดสอบ 1 kV.....	40
รูปที่ 4.9 ผลการชิมูเลชันที่อุณหภูมิทดสอบ 150 องศาเซลเซียส แรงดันทดสอบ 4 kV	40
รูปที่ 4.10 ผลการชิมูเลชันแสดงอุณหภูมิของชุดทดสอบที่ 200 องศาเซลเซียส	40
รูปที่ 4.11 ผลการชิมูเลชันที่อุณหภูมิทดสอบ 200 องศาเซลเซียส แรงดันทดสอบ 1 kV	41
รูปที่ 4.12 ผลการชิมูเลชันที่อุณหภูมิทดสอบ 200 องศาเซลเซียส แรงดันทดสอบ 4 kV.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีโครงสร้างซับซ้อน โครงสร้างหลักได้แก่ แกนเหล็ก ตัวนำ และฉนวน ฉนวนเป็นวัสดุที่สำคัญในหม้อแปลงไฟฟ้า ระบบฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วย ระบบฉนวนเหลวและระบบฉนวนแข็ง ฉนวนเหลวมีหน้าที่ระบายความร้อนจากขดลวดและแกนเหล็กเพราะฉนวนเหลวสามารถไหลผ่านจุดต่าง ๆ ภายในหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีโครงสร้างซับซ้อนได้ สามารถป้องกันการลัดวงจรของขดลวดตัวนำ ซึ่งทำงานร่วมกับฉนวนแข็ง ฉนวนแข็งมีหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าและรับแรงทางกล ฉนวนเหลวมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน เปลี่ยนไปตามภาชนะที่บรรจุ จึงไม่สามารถรับแรงทางกลได้เช่นเดียวกับฉนวนแข็ง

ฉนวนเหลวและฉนวนแข็งได้แก่ น้ำมันแร่และกระดาษตามลำดับ น้ำมันแร่เป็นฉนวนเหลวที่มีใช้งานโดยทั่วไปและใช้มาเป็นระยะเวลานานภายในหม้อแปลงไฟฟ้า แต่ในปัจจุบันมีการพิจารณาวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เอสเตอร์ธรรมชาติเป็นตัวเลือกหนึ่งที่ถูกพิจารณานำมาใช้แทนน้ำมันแร่ เอสเตอร์ธรรมชาติสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติสูงถึง 90% ภายในระยะเวลา 28 วัน ขณะที่น้ำมันแร่ย่อยสลายได้เพียง 10% เมื่อเปรียบเทียบที่ระยะเวลาเท่ากัน เอสเตอร์ธรรมชาติมีจุดติดไฟและจุดวาบไฟที่สูงกว่าน้ำมันแร่ มีจุดอิ่มตัวของน้ำสูงถึง 1100 ppm ขณะที่น้ำมันแร่มีจุดอิ่มตัวของน้ำเพียง 55 ppm อย่างไรก็ตาม เอสเตอร์ธรรมชาติยังมีจุดด้อยกว่าน้ำมันแร่คือความหนืดที่สูงกว่าจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการระบายความร้อนของอุปกรณ์

กระดาษประกอบด้วยเส้นใยเซลลูโลสซึ่งเรียงตัวแบบสุ่ม และสามารถนำมาใช้เป็นฉนวนทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงหลากหลายชนิด เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า, หม้อแปลงระบบวัด, บุชซึ่งกระดาษอิมเพรกเนตน้ำมัน, สายเคเบิลใต้ดินฉนวนกระดาษอิมเพรกเนตน้ำมัน และอื่น ๆ เพอร์สโบริดเป็นกระดาษที่อัดแรง จึงทำให้มีความหนาแน่นสูงและมีความแข็งแรงกว่ากระดาษทั่วไป ดังนั้นเซลลูโลสจึงมีความสำคัญ คุณสมบัติของเซลลูโลสอิมเพรกเนตด้วยฉนวนเหลวขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์หลากหลาย เช่น ประเภทของฉนวนเหลว, กระบวนการอิมเพรกเนตและอื่น ๆ โดยทั่วไป เซลลูโลสไม่อิมเพรกเนตมีความคงทนทางไฟฟ้าต่ำ ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ยอมรับไม่ได้

การวิเคราะห์สภาพฉนวนจึงเป็นสิ่งสำคัญ การวิเคราะห์สภาพฉนวนมีได้หลากหลายวิธี วิธีที่นิยมทดสอบเพื่อวิเคราะห์สภาพฉนวนคือการทดสอบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ผ่านฉนวนเหลว เพราะเป็นการเก็บตัวอย่างทดสอบได้ง่ายและรวดเร็วที่สุด การวิเคราะห์ผ่านฉนวนเหลวสามารถวิเคราะห์ฉนวนแข็งได้ในเบื้องต้น การวิเคราะห์แข็งให้ได้ผลที่แม่นยำที่สุดจะต้องเก็บกระดาษตัวอย่างภายใน

อุปกรณ์นำมาทดสอบ เพราะจุดอ่อนของระบบฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ที่ฉนวนแข็ง ที่ส่วนใหญ่ไม่สามารถคืนสภาพความเป็นฉนวนได้ เมื่อเกิดความเสียหาย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษากระบวนการโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของฉนวนกระดาษที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่ ที่อุณหภูมิและแรงดันทดสอบที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาคุณสมบัติของฉนวนกระดาษที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่ การทดสอบจะสังเกตพฤติกรรมของความเครียดสนามไฟฟ้า การวัดค่ากระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์การเสื่อมสภาพฉนวน ของฉนวนกระดาษที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่ ที่มีบทบาทในอุตสาหกรรมหม้อแปลงไฟฟ้าในปัจจุบัน

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

- เพื่อศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของฉนวนกระดาษที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่
- เพื่อศึกษาคุณสมบัติความเป็นฉนวนของฉนวนกระดาษที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูง
- เพื่อศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของฉนวนกระดาษที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่ภายใต้การเสื่อมด้วยความร้อน ด้วยการทดสอบแรงดันกระตังที่แรงดันสูงและอุณหภูมิสูง และการวัดค่ากระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาคุณลักษณะของฉนวนกระดาษที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่ที่ทดสอบในชุดทดสอบและตู้ควบคุม แรงดัน และ อุณหภูมิ ด้วยวิธีการชิมเลชันซึ่งสังเกตพฤติกรรมดังนี้

1. ศึกษาคุณลักษณะความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวนกระดาษที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่ อันเนื่องมาจากผลของแรงดันต่างตั้งแต่ 1, 2, 3 และ 4 กิโลโวลต์ ที่อุณหภูมิต่างๆตั้งแต่ อุณหภูมิห้อง, 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นทดสอบค่าความเครียดสนามไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 60243-1 (2013)
2. ศึกษาคุณลักษณะของกระแสไฟฟ้าภายในฉนวนกระดาษที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่ที่แรงดัน 1, 2, 3 และ 4 กิโลโวลต์ ที่อุณหภูมิต่างๆตั้งแต่ อุณหภูมิห้อง, 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียส ด้วยการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และทำการวัดค่ากระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันตามมาตรฐาน IEC 60270 (2015) เพื่อวิเคราะห์การเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 สมมติฐานของการศึกษา

แรงดัน และอุณหภูมิ ที่สูงเกินไป มีผลต่อค่าความเครียดสนามไฟฟ้า และค่ากระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน เพื่อศึกษาพฤติกรรมและหาจุดที่เหมาะสมต่อการใช้งานฉนวนกระดาษ เพื่อให้มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีที่สุด เมื่อฉนวนกระดาษที่อิมเพกเนตด้วยน้ำมันแร่ผ่านการทำให้เสื่อมด้วยความร้อน คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปของฉนวนกระดาษจะเป็นส่วนช่วยในการวิเคราะห์คุณภาพฉนวนกระดาษที่อิมเพกเนตด้วยน้ำมันแร่ที่ผ่านการใช้งานแล้ว เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าที่ฉนวนกระดาษที่อิมเพกเนตด้วยน้ำมันแร่เป็นฉนวนประกอบอยู่ในหม้อแปลงน้ำมันทุกขนาด ข้อมูลในการศึกษาจึงค่อนข้างมีหลากหลายผู้วิจัยจึงเลือกศึกษากรณีหม้อแปลงทำงานที่อุณหภูมิสูงและแรงดันสูง

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการศึกษา

การดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2563					ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2563				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	●	●	●	●	●	●	●			
2. ศึกษาข้อมูลการทดสอบทางไฟฟ้าของกระดาษฉนวน							●	●	●	●

ตารางที่ 1.2 ขั้นตอนการศึกษา (ต่อ)

การดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2564					ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2564				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
3. ออกแบบที่ใช้ในการทดสอบตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง	●	●	●	●	●					
4. ออกแบบการทดลองและค่าที่ใช้ในการทดสอบ					●	●	●	●		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.3 ขั้นตอนการศึกษา (ต่อ)

การดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2565					ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2565				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
4. ซึ่มุเลชันเบื้องต้น และแก้ไขปัญหาจากการทดสอบ	●	●	●							
5. จำลองกรณีศึกษาของกระดาษฉนวนในระบบทดสอบ				●	●	●	●			
6. ทดสอบกระดาษฉนวนที่จำลองกรณีศึกษาตามเงื่อนไขที่กำหนด								●	●	●

ตารางที่ 1.4 ขั้นตอนการศึกษา (ต่อ)

การดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2566					ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2566				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
7. ตรวจสอบข้อมูลและทดสอบซ้ำ	●	●	●	●						
8. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง				●	●					
9. จัดทำวิทยานิพนธ์						●	●	●	●	●

1.6 บทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในปี พ.ศ. 2557 C. Y. Perkasa และคณะได้นำเสนองานวิจัยเรื่อง A Comparison of the Formation of Bubbles and Water Droplets in Vegetable and Mineral Oil Impregnated Transformer Paper ได้ศึกษาการเรียงตัวของฟองอากาศจากฉนวนกระดาษระหว่างจ่ายโหลดเกินพิกัดของระบบฉนวนเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนต และผลทดสอบจะนำมาเปรียบเทียบกับน้ำมันแร่ที่ถูกศึกษามาก่อนหน้านี้แล้ว กำหนดการจำกัดอุณหภูมิสำหรับฟองอากาศและหยดน้ำในน้ำมันพีซสำหรับกระดาษที่มีปริมาณน้ำ 1-6% มีการเพิ่มขึ้นอย่างมากของเวลาการเกิดฟองอากาศและอุณหภูมิการปล่อยฟองอากาศในน้ำมันพีซของกระดาษที่มีปริมาณน้ำต่ำกว่า 2% ความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างฟองอากาศในน้ำมันแร่และน้ำมันพีซอยู่ในช่วง 6-13°C สำหรับกระดาษที่มีความชื้น 1-6% หยดน้ำ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อดั้วระหว่าง 5-16°C สูงกว่าน้ำมันพืช เมื่อเทียบกับน้ำมันสำหรับเพรสบอร์ดที่มีปริมาณน้ำ 1.5-6% สำหรับระบบกระดาษแห้ง ฟองอากาศจะก่อตัวได้ดีในน้ำมันพืชเมื่อเทียบกับกระดาษที่มีปริมาณน้ำเท่ากัน สำหรับระบบกระดาษเปียก โอกาสการเกิดฟองอากาศในน้ำมันพืชต่ำกว่าน้ำมันแร่เนื่องจากอุณหภูมิการก่อตัวเป็นฟองอากาศที่สูงขึ้น [1]

ในปี พ.ศ. 2560 F. Vahidi และคณะได้นำเสนองานวิจัยเรื่อง A Comparison of Oil-impregnated Pressboard Electrical Conductivity Behavior for Two Different High Density Pressboards ได้ศึกษาเปรียบเทียบค่าความนำของเพรสบอร์ดความหนาแน่นสูงที่ต่างกันจากโรงงานผู้ผลิต 2 แห่ง ความหนา 2 มิลลิเมตร เพรสบอร์ดถูกวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันด้วยชุดทดสอบทรงกระบอกที่มีอิเล็กโตรดระนาบ พร้อมกับเติมฉนวนเหลวให้ท่วมอิเล็กโตรด ค่าความนำทางไฟฟ้าของเพรสบอร์ด 2 กลุ่มถูกศึกษาโดยขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้า อุณหภูมิ และความชื้นของชิ้นงานทดสอบ ผลการเปรียบเทียบบ่งบอกว่าอิทธิพลของอุณหภูมิมีผลต่อค่าความนำไฟฟ้าด้วยเปอร์เซ็นต์ที่สัมพันธ์ของเพรสบอร์ดที่อิมเพกเนตขึ้นอยู่กับองค์ประกอบความชื้นของชิ้นงานทดสอบ การเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบความชื้นทำให้ค่าความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างมาก เพรสบอร์ดทั้งสองชนิดแสดงพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของความชื้นและความเครียดสนามไฟฟ้าเหมือนกัน [2]

ในปี พ.ศ. 2560 L. Cui และคณะได้นำเสนองานวิจัยเรื่อง Comparative Analysis of Air-gap PD Characteristics: Vegetable Oil/pressboard and Mineral Oil/pressboard ได้ศึกษาคุณลักษณะดิสชาร์จบางส่วนของช่องว่างอากาศในเพรสบอร์ดกับน้ำมัน rapeseed กลั่นและน้ำมันแร่ Karamay 25# ซึ่งฉนวนเหลวทั้ง 2 ชนิดนี้กำลังใช้งานอยู่ในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง รูปแบบการเกิดของดิสชาร์จบางส่วนในการทดลองจะถูกมาเปรียบเทียบ พบว่าดิสชาร์จบางส่วนของเพรสบอร์ดกับน้ำมันพืชเด่นชัดมาก มุมเริ่มต้นน้อยลง ขนาดประจุลดลง อัตราการเกิดซ้ำสูงขึ้นและรูปแบบของดิสชาร์จบางส่วนมีลักษณะคล้ายหูกกระต่ายมากกว่าเพรสบอร์ดกับน้ำมันแร่ กระบวนการพัฒนาดิสชาร์จบางส่วนสามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอนคือ ระยะประจุเริ่มต้น, ระยะพัฒนาจุดอ่อน, ระยะการปรากฏการดิสชาร์จ และระยะก่อนการเบรกดาวน์ [3]

ในปี พ.ศ. 2563 D. Liu และคณะได้นำเสนองานวิจัยเรื่อง Electrical Characteristics of Cellulose Pressboard Modified by Nano-TiO₂ in Mineral and Vegetable Mixed Oil ได้ศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเพรสบอร์ดที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ และน้ำมันผสมระหว่างน้ำมันแร่กับน้ำมันพืช การทดลองประกอบด้วยแรงดันเริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วนและความคงทนเบรกดาวน์ไฟฟ้ากระแสสลับ ค่าเปอร์เซ็นต์ที่สัมพันธ์ของน้ำมันผสมสูงกว่าน้ำมันแร่สามารถลดความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์ที่สัมพันธ์ระหว่างน้ำมันผสมกับเพรสบอร์ด เพื่อเพิ่มการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในระบบฉนวนเพรสบอร์ดกับน้ำมัน การเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์ที่สัมพันธ์ระหว่างน้ำมันผสมกับเพรสบอร์ดลดลงช่วย

ปรับปรุงให้ค่าแรงดันเริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วนและความคงทนเบรกดาวนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไปในทิศทางที่ดีขึ้น [4]

ในปี พ.ศ. 2563 Y. Wang และคณะได้นำเสนองานวิจัยเรื่อง Analysis of SEM Characteristics of Transformer Oil-immersed Insulation Pressboard before and after Thermal Aging ศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะของเพรสบอร์ดก่อนและหลังจากทำให้เสื่อมด้วยความร้อนผ่านการส่องกล้อง SEM ลักษณะที่ปรากฏของจากกล้องของเพรสบอร์ดที่มีทำให้เสื่อมสภาพจากความร้อนมีความแตกต่างกันและลักษณะที่ปรากฏของจากกล้องจะเปลี่ยนไปจากการแตกหักของพันธะเคมีในโครงสร้างภายในของเส้นใย เมื่อทำให้เสื่อมมากขึ้น เส้นผ่านศูนย์กลางของไฟเบอร์บอร์ดจะค่อย ๆ ลดลง ความหนาจะลดลงก่อนแล้วจึงเพิ่มขึ้น เมื่อทำให้เพรสบอร์ดเสื่อมสภาพเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จะมีค่า degree of polymerization เป็น 250 ซึ่งเป็นค่าที่เข้าใกล้การหมดสภาพการใช้งานของฉนวน ความกว้างของเส้นใยลดลงเหลือเป็น 78.54% ของเพรสบอร์ดที่ไม่เสื่อมสภาพ ความขรุขระเหลือเพียง 0.226 [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้อธิบายถึงระบบฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ได้แก่ ฉนวนเหลว และ ฉนวนแข็ง รวมถึงการทดสอบฉนวนทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ ได้แก่ การทดสอบค่าแรงดันเบรกดาวน์ ไฟฟ้ากระแสสลับ การทดสอบค่าแรงดันเบรกดาวน์ฟ้าผ่า การวัดค่ากระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน และการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน

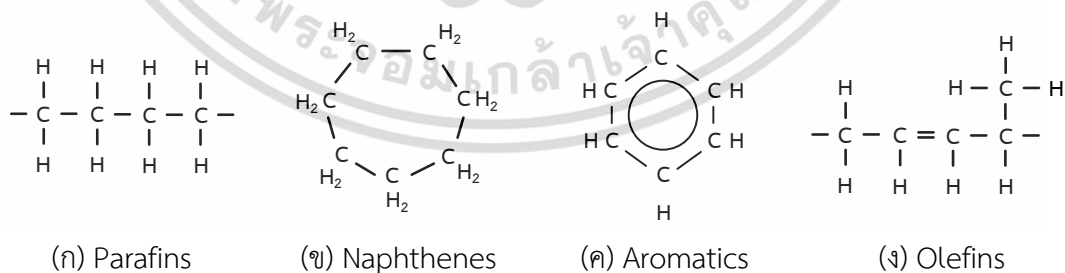
2.1 ระบบฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

2.1.1 ฉนวนเหลว [6-8]

ฉนวนเหลวที่ใช้ในงานในปัจจุบันมีหลากหลายชนิด แต่สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักคือ ฉนวนเหลวอินทรีย์ และ ฉนวนเหลวนินทรีย์ ฉนวนเหลวอินทรีย์ประกอบด้วยคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ฉนวนเหลวอินทรีย์ได้มาจากวัตถุดิบธรรมชาติ เช่น น้ำมันแร่, น้ำมันพืช, เอสเตอร์ธรรมชาติ ฯลฯ หรือกระบวนการสังเคราะห์ เช่น เอสเตอร์สังเคราะห์, ไฮโดรคาร์บอนสังเคราะห์ ฯลฯ ฉนวนเหลวนินทรีย์เกิดจากกระบวนการผลิต เช่น ไนโตรเจน น้ำบริสุทธิ์ ฯลฯ

2.1.1.1 น้ำมันแร่

น้ำมันแร่ (Mineral oil) หรือ น้ำมันปิโตรเลียม หรือ น้ำมันหม้อแปลง เป็นฉนวนน้ำมันที่มีการใช้งานมาเป็นเวลานานและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง น้ำมันแร่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบและเติมสารปรุงแต่งบางชนิดเพื่อให้มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ส่วนประกอบพื้นฐานของน้ำมันแร่ประกอบด้วย paraffins, naphthenes, aromatics, และ olefins แสดงดังรูปที่ 2.1

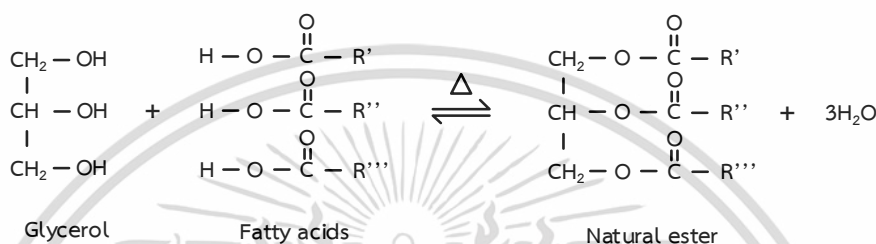


รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของส่วนประกอบพื้นฐานของน้ำมันแร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

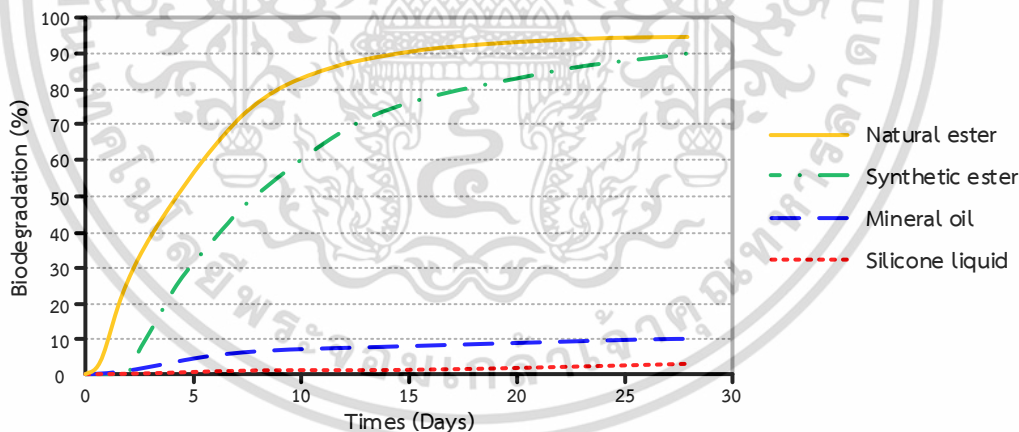
2.1.1.2 เอสเตอร์ธรรมชาติ

เอสเตอร์ธรรมชาติเป็นตัวเลือกหนึ่งของฉนวนทางเลือก ที่จะเข้ามาแทนที่น้ำมันแร่ในอนาคต มีความสามารถในการย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม มีจุดติดไฟ จุดวาบไฟที่สูงกว่าน้ำมันแร่ แต่เอสเตอร์ธรรมชาติมีจุดด้อยในด้านความหนืด การเกิดออกซิเดชัน จุดไหลเท ที่ต่ำกว่าน้ำมันแร่ โครงสร้างทางเคมีของเอสเตอร์ธรรมชาติแสดงดังรูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของเอสเตอร์ธรรมชาติ



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของเอสเตอร์ธรรมชาติ

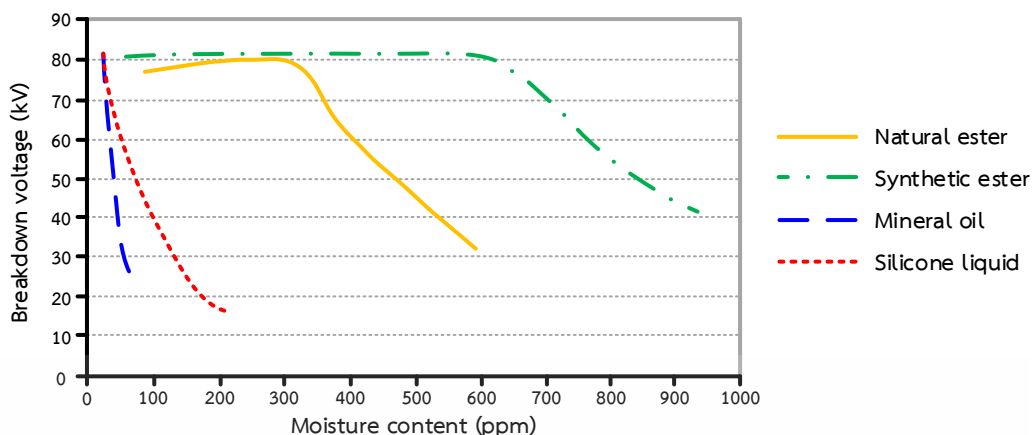
เอสเตอร์ธรรมชาติสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติสูงถึง 90% ภายในระยะเวลา 28 วัน ขณะที่น้ำมันแร่ย่อยสลายได้เพียง 10% เมื่อเปรียบเทียบที่ระยะเวลาเท่ากัน แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบอัตราการย่อยสลายตามธรรมชาติของฉนวนเหลวชนิดต่าง ๆ

ปริมาณความชื้นที่มากขึ้นส่งผลต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์ของเอสเตอร์ธรรมชาติลดลง เมื่อมีค่าความชื้นสูงขึ้นจนมีค่าประมาณ 350 ppm ในขณะที่น้ำมันแร่จะมีค่าแรงดันเบรกดาวน์ลดลงเมื่อค่าความชื้นสูงขึ้นจนมีค่าประมาณ 25 ppm แสดงดังรูปที่ 2.4 ทั้งนี้เป็นเพราะโมเลกุลของเอสเตอร์ธรรมชาติมีขั้ว จึงทำให้มีลักษณะคล้ายแม่เหล็กดึงดูดโมเลกุลของน้ำได้ดี ขณะที่น้ำมันแร่เป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เอสเตอร์ธรรมชาติมีจุดอิ่มตัวของน้ำสูงถึง 1100 ppm ขณะที่น้ำมันแร่มีจุดอิ่มตัวของน้ำเพียง

55 ppm ที่อุณหภูมิ 23°C เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวน์และค่าความชื้นของฉนวนเหลวชนิดต่าง ๆ

2.1.2 ฉนวนแข็ง

ฉนวนแข็งเมื่อเกิดความเสียหายเนื่องจากความเครียดทางไฟฟ้า ความร้อน หรือความเครียดทางกล ส่วนใหญ่จะไม่สามารถคืนสภาพได้เหมือนกับฉนวนแก๊สและฉนวนเหลว ดังนั้นฉนวนแข็งที่ดีจะต้องมีความคงทนต่อความเครียดทางไฟฟ้า มีค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำ มีความคงทนต่อความเครียดทางกล มีความคงทนต่อความร้อนและปฏิกิริยาเคมี ฉนวนแข็งแบ่งประเภทตามโครงสร้างทางเคมีจะสามารถจำแนกได้เป็น ฉนวนแข็งอินทรีย์ เช่น กระดาษ, ยาง, เรซิน ฯลฯ ฉนวนแข็งอนินทรีย์ เช่น เซรามิก, ไมกา, แก้ว ฯลฯ และฉนวนแข็งโพลีเมอร์ เช่น Polyvinyl Chloride (PVC), epoxy, Polyethylene (PE) ฯลฯ ฉนวนแข็งที่ใช้งานภายในหม้อแปลงชนิดน้ำมันคือ กระดาษและกระดาษอัดแรง

กระดาษและกระดาษอัดแรง (Paper and Boards) กระดาษที่มีใช้งานอาจแบ่งออกเป็น กระดาษบาง (Paper) หรือกระดาษอัดแรง (Board) โดยทั่วไปกระดาษบางจะมีความหนาน้อยกว่า 0.8 มิลลิเมตร ส่วนกระดาษอัดแรงจะมีความหนามากกว่า 0.8 มิลลิเมตร กระดาษอัดแรงที่กล่าวถึงในที่นี้ จะมีความหมายครอบคลุมไปถึง pressboards transformer boards และ fuller boards กระดาษที่ใช้เป็นฉนวนโดยทั่วไปจะรู้จักกันในชื่อของกระดาษคราฟท์ (Kraft paper) ความหนาและความแน่นของกระดาษขึ้นอยู่กับหน้าที่การใช้งานกระดาษที่มีความหนาแน่นต่ำ (0.8 g/cm^3) เหมาะกับการใช้เป็นไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุความถี่สูงและฉนวนของเคเบิล ความหนาแน่นปานกลาง (1 g/cm^3) ใช้เป็นไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุของไฟฟ้ากำลัง กระดาษที่มีความหนาแน่นสูงใช้ในตัวเก็บประจุที่มีขั้วเพื่อเก็บพลังงาน หรือใช้ในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงเนื่องจากกระดาษมีคุณสมบัติดูดซับความชื้นได้ ฉะนั้นการใช้กระดาษเป็นฉนวนจึงจำเป็นต้องทำให้แห้งแล้วชุบฉนวนเหลว เช่น น้ำมันฉนวน ค่าเปอร์มิตติวิตีของกระดาษชุบฉนวนเหลวขึ้นอยู่กับค่าเปอร์มิตติวิตีของเซลล์โลสของกระดาษและของฉนวนเหลวที่ชุบ และความหนาแน่นของกระดาษซึ่งค่าเปอร์มิตติวิตีรวมนี้สามารถคำนวณได้ ตัวอย่างค่าเปอร์มิตติวิตีของกระดาษชุบน้ำมันฉนวนแสดงในตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของกระดาษคราฟท์ และ paper polypropylene paper (PPP) ชุบน้ำมันฉนวน แสดงในตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.5 เพรสบอร์ดและกระดาษคราฟท์

ตารางที่ 2.1 ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของกระดาษชุบน้ำมันฉนวนที่ 20 องศาเซลเซียส (ϵ_{res})

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

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนผสม (กระดาษและน้ำมัน)

ประเภท	ฉนวนเหลวที่ใช้อิมเพรกเนต	ความเครียดแรงดันเฉลี่ย (kV cm ⁻¹)	ค่า tan δ ที่อุณหภูมิห้อง	ค่า tan δ ที่อุณหภูมิใช้งาน
Kraft paper	Mineral oil	180	3.8×10^{-3} at 23°C	5.7×10^{-3} at 85°C
Kraft paper	Silicone liquid	180	2.7×10^{-3} at 23°C	3.1×10^{-3} at 85°C
Paper-polypropylene-paper (paper)	Dodecyl benzene	180	9.8×10^{-4} at 18°C	9.9×10^{-4} at 100°C
Kraft paper	Polybutens	180	2.0×10^{-3} at 25°C	2.0×10^{-3} at 25°C

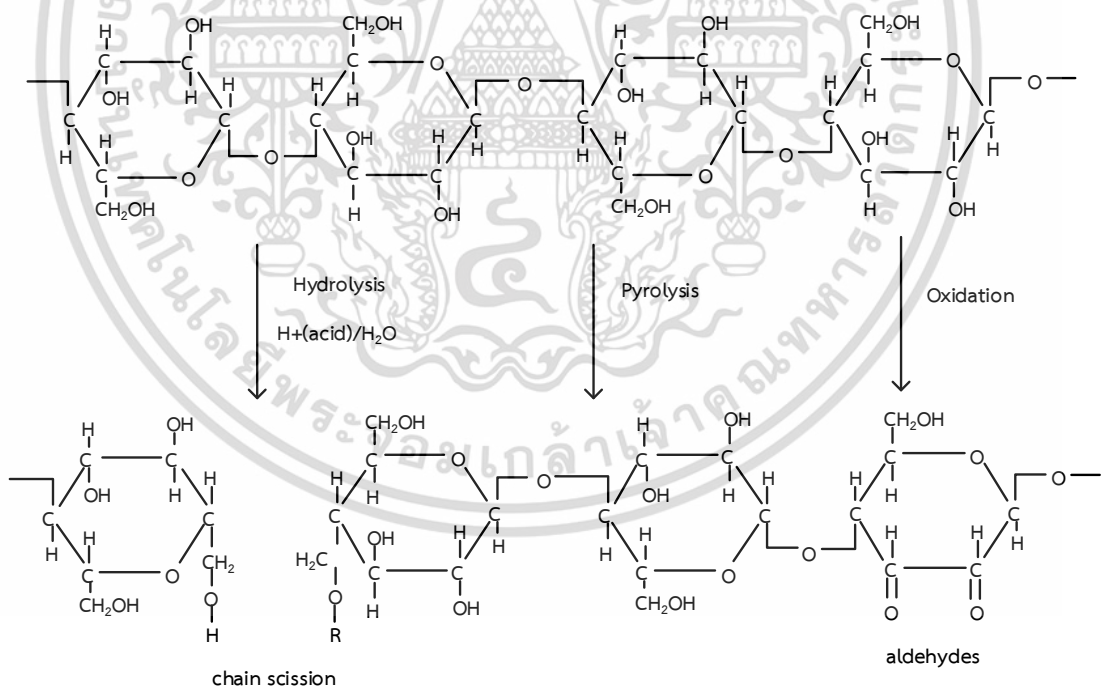
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 กระบวนการเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษ [9]

ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เป็นกระบวนการเคมีที่เร่งปฏิกิริยาที่อัตราการสลายพันธะขึ้นอยู่กับการดคาร์บอกซิลิกที่แยกตัวออกจากน้ำ เนื่องจากน้ำและกรดคาร์บอกซิลิกเกิดขึ้นจากกระบวนการเสื่อมสภาพของเซลลูโลสและเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติ หรือเกิดจากน้ำภายนอกรั่วไหลเข้าไป

ออกซิเดชัน (Oxidation) เป็นปฏิกิริยาเคมีซึ่งมีออกซิเจนทำปฏิกิริยากับพันธะคู่คาร์บอนของกรดไขมันไม่อิ่มตัวสำหรับฉนวนกระดาษ ซึ่งออกซิเจนเกิดจากการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และออร์แกนิกไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (ROOH) หรือออกซิเจนภายนอกรั่วไหลเข้าไป

ไพโรไลซิส (Pyrolysis) เกิดขึ้นได้โดยไม่ต้องมีน้ำหรือออกซิเจนหรือสารตั้งต้นอื่นเพื่อเริ่มต้นการสลายพันธะ แต่เกิดจากการเสื่อมสภาพเนื่องจากเซลลูโลสได้รับอุณหภูมิสูงเกินพิกัดใช้งาน และการเสื่อมสภาพจะทำให้เกิดการสลายพันธะเซลลูโลสบางส่วน เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สารประกอบฟوران และน้ำ จะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและออกซิเดชันได้อีกด้วย รูปที่ 2.6 โครงสร้างเซลลูโลสและการเสื่อมสภาพของเซลลูโลส



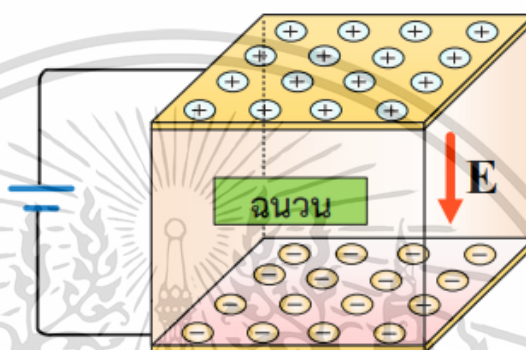
รูปที่ 2.6 โครงสร้างเซลลูโลสและการเสื่อมสภาพของเซลลูโลส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การทดสอบฉนวนทางไฟฟ้า

2.2.1 กระบวนการโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (Polarization and Depolarization Process : PDC)

เมื่อทำการป้อนแรงดันกระแสตรงให้กับ ฉนวน หรือ ไดอิเล็กทริก ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยที่ขนาดของแรงดันไม่สามารถทำให้ฉนวนเกิดการเบรกไดวานได้ โมเลกุลของฉนวนจะเกิดการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าจากภายนอกที่มากระทำ ซึ่งจะทำให้เกิด “กระบวนการโพลาริเซชัน (Polarization Process)” ขึ้นภายในเนื้อฉนวน

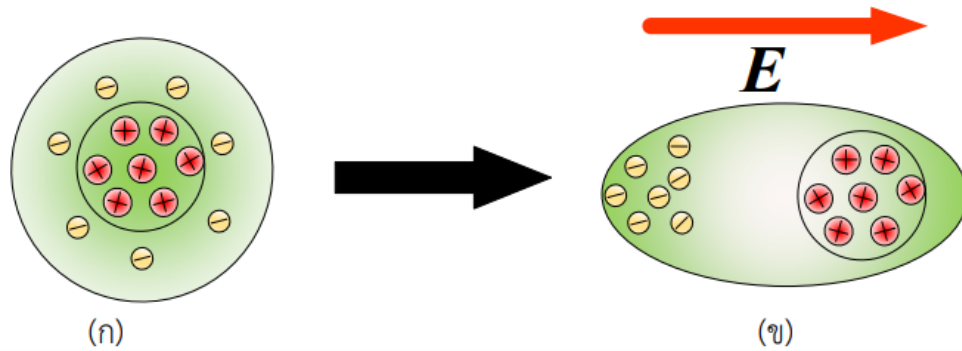


รูปที่ 2.7 การป้อนแรงดันให้กับฉนวน

กระบวนการโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นภายในฉนวนถูกแบ่งออกเป็น 5 ประเภท ดังนี้

- อิเล็กทรอนิกส์โพลาริเซชัน (Electronic Polarization) หรือ ออปติคอลโพลาริเซชัน (Optical Polarization)

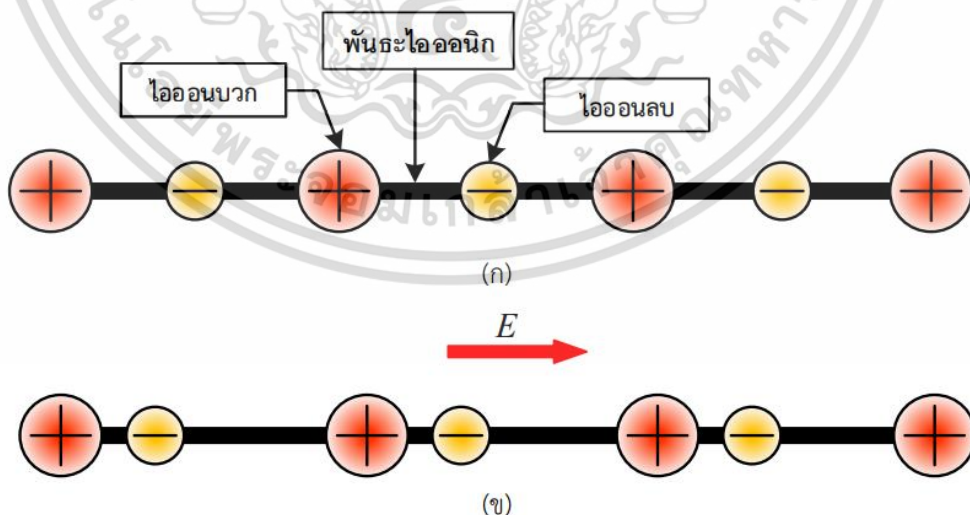
อิเล็กทรอนิกส์โพลาริเซชันเป็นกระบวนการโพลาริเซชันในระดับอะตอมของฉนวนซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้เมื่อฉนวนได้รับแรงกระทำจากสนามไฟฟ้าภายนอก กลุ่มหมอกอิเล็กตรอนที่อยู่รอบๆ นิวเคลียสของอะตอมของฉนวนจะเกิดการเคลื่อนที่เพื่อจัดเรียงตัวใหม่ตามแนวสนามไฟฟ้าที่มากระทำ ซึ่งการจัดเรียงตัวใหม่ของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนจะทำให้อะตอมของฉนวนเกิดไดโพล (dipole) หรือเกิดการมีขั้วขึ้น การเคลื่อนที่ของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนเพื่อจัดเรียงตัวใหม่ภายใต้สนามไฟฟ้านี้ถูกเรียกว่า อิเล็กทรอนิกส์โพลาริเซชัน แต่อย่างไรก็ตามการเคลื่อนที่ของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนดังกล่าวจะมีขนาดเล็กมากเพราะแรงจากสนามไฟฟ้าภายนอกที่กระทำต่อกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนและนิวเคลียสมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับแรงยึดเหนี่ยวภายในอะตอมที่นิวเคลียสกระทำต่อกลุ่มหมอกอิเล็กตรอน อิเล็กทรอนิกส์โพลาริเซชันนี้เป็นการโพลาริเซชันที่ไม่ทำให้เกิดการสูญเสียทางไฟฟ้า และเป็นกระบวนการโพลาริเซชันที่ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ กระบวนการโพลาริเซชันประเภทนี้จะเกิดขึ้นภายในเวลาประมาณ 10^{-14} วินาที



รูปที่ 2.8 อิเล็กทรอนิกส์โพลาริเซชัน (ก) อะตอมของฉนวนเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้ามากระทำ (ข) อะตอมของฉนวนเมื่อมีสนามไฟฟ้ามากระทำ (อะตอมของฉนวนเกิดไดโพล)

- ไอออนิกโพลาริเซชัน (Ionic Polarization) หรือ อะตอมมิคโพลาริเซชัน (Atomic Polarization)

ไอออนิกโพลาริเซชันเป็นกระบวนการโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นกับวัสดุที่เป็นผลึกไอออนิก เช่น เกลือ (NaCl) โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) เป็นต้น ซึ่งไอออนิกโพลาริเซชันมีกระบวนการเกิดดังนี้ เมื่อฉนวนได้รับแรงกระทำจากสนามไฟฟ้าภายนอก ไอออนบวกและไอออนลบของพันธะไอออนิกจะเคลื่อนที่ โดยที่ไอออนบวกจะเคลื่อนที่ตามทิศทางสนามไฟฟ้าและไอออนลบจะเคลื่อนที่ตรงข้ามกับทิศทางสนามไฟฟ้า ซึ่งการเคลื่อนที่ของไอออนบวกและไอออนลบนี้จะทำให้เกิดไดโพลที่เกิดขึ้นภายในผลึกไอออนิกของฉนวนเกิดความไม่สมดุล ดังนั้น จึงทำให้เกิดไดโพลลัพธ์ขึ้นภายในวัสดุฉนวน การเคลื่อนที่ของไอออนบวกและไอออนลบดังกล่าวจะทำให้เกิดการไม่สมดุลของไดโพลภายในฉนวนซึ่งกระบวนการดังกล่าวถูกเรียกว่า ไอออนิกโพลาริเซชัน

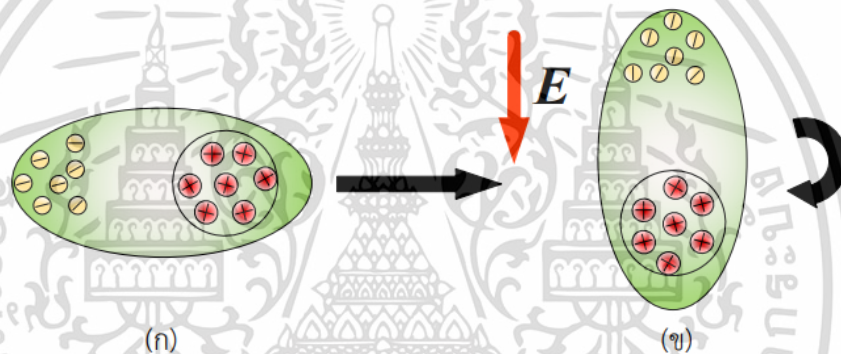


รูปที่ 2.9 อิเล็กทรอนิกส์โพลาริเซชัน (ก) วัสดุฉนวนเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้ามากระทำ (ข) วัสดุฉนวนเมื่อมีสนามไฟฟ้ามากระทำ

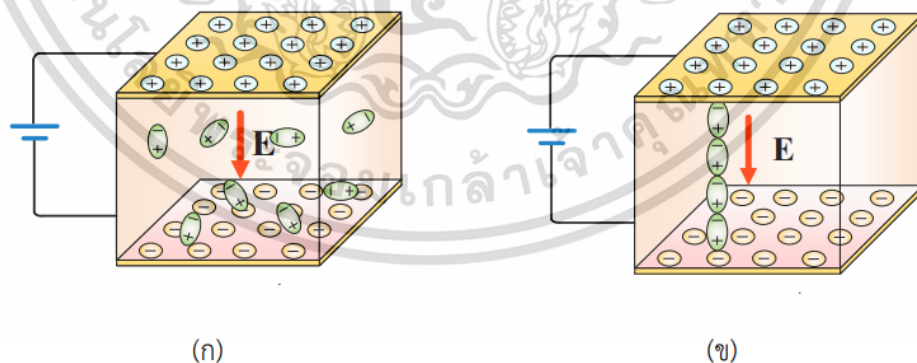
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ออเรนเทชันโพลาริเซชัน (Orientation Polarization) หรือ ไดโพลาร์โพลาริเซชัน (Dipolar Polarization)

ออเรนเทชันโพลาริเซชันเป็นการโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นกับไดโพลที่มีโมเมนต์เป็นแบบเชิงขั้วถาวร (permanent dipole) เช่น น้ำ กรดไฮโดรคลอริก เป็นต้น โดยปกติเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าจากภายนอกกระทำ โมเมนต์เชิงขั้วถาวรภายในไดโพลจะมีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ นั่นคือ โมเมนต์จะหมุนและกระจัดกระจายอย่างอิสระ ซึ่งการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบของโมเมนต์เชิงขั้วถาวรนี้จะทำให้สนามไฟฟ้าลัพธ์ภายในไดโพลมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่เมื่อไดโพลดังกล่าวอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า โมเมนต์ของไดโพลจะมีการหมุนและมีการเรียงตัวตามแนวสนามไฟฟ้าที่มากกว่า ซึ่งการเรียงตัวของโมเมนต์เพื่อตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าที่มากกว่านี้จะทำให้เกิดออเรนเทชันโพลาริเซชันขึ้น ซึ่งการโพลาริเซชันประเภทนี้จะใช้เวลาในการเกิดนานกว่าอิเล็กทรอนิกโพลาริเซชันและอะตอมมิกโพลาริเซชัน



รูปที่ 2.10 ออเรนเทชันโพลาริเซชัน (ก) โมเมนต์ของฉนวนเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้ามากกว่า (ข) โมเมนต์ฉนวนเกิดการหมุนเพื่อเรียงตัวตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าที่มากกว่า



รูปที่ 2.11 ออเรนเทชันโพลาริเซชันภายในเนื้อฉนวน (ก) โมเมนต์ภายในเนื้อฉนวนเรียงตัวแบบกระจัดกระจายเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้ามากกว่า (ข) โมเมนต์ภายในเนื้อฉนวนเรียงตัวตามแนวสนามไฟฟ้าที่มากกว่า

- ฮอปปีงโพลาริเซชัน (Hopping Polarization)

ฮอปปีงโพลาริเซชันเป็นกระบวนการโพลาริเซชันที่อธิบายปรากฏการณ์ที่ประจุภายในฉนวน (localized charges) เช่น อิเล็กตรอน และ โฮล (hole) สามารถกระโดดจากตำแหน่ง
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเนื้อหาเว็บไซต์นี้พบข้อผิดพลาดใดๆ
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

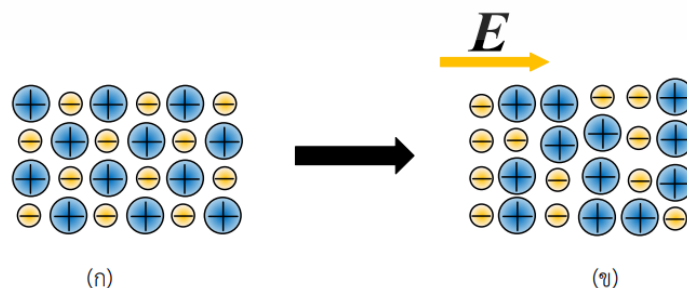
หนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง ซึ่งจะทำให้เกิดพฤติกรรมการโพลาริซภายในฉนวนได้ ฮอปปีง โพลาริซเซชันมีกระบวนการเกิดดังนี้ เมื่อฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนและโฮล ภายในฉนวนจะเกิดพฤติกรรมการกระโดดจากอีกตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งโดยที่ พฤติกรรมการกระโดดนี้จะเกิดในระยะเวลาสั้น จากนั้นประจุดังกล่าวจะค้างอยู่ในตำแหน่ง ใหม่ที่กระโดดไป ซึ่งพฤติกรรมการย้ายตำแหน่งของประจุภายในฉนวนจะทำให้เกิดการ โพลาริซภายในเนื้อฉนวน ตัวอย่างฮอปปีงโพลาริซเซชัน เช่น อิเล็กตรอนสามารถกระโดด จากตำแหน่งเดิมของมันไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง ซึ่งการกระโดดของอิเล็กตรอนนี้จะทำให้ ตำแหน่งเดิมกลายเป็น โฮล หรือ แสดงพฤติกรรมเป็นประจุบวก และทำให้ตำแหน่งใหม่ที่ อิเล็กตรอนกระโดดไปแสดงพฤติกรรมเป็นประจุลบ จากปรากฏการณ์ที่ได้อธิบายข้างต้น สามารถทำให้เกิดข้อหรือเกิดการโพลาริซภายในฉนวนได้



รูปที่ 2.12 ฮอปปีงโพลาริซเซชัน

- สเปซชาร์จโพลาริซเซชัน (Space Charge Polarization) หรือ อินเทอร์เฟเชียล โพลาริซเซชัน (Interfacial Polarization)

สเปซชาร์จโพลาริซเซชันเป็นกระบวนการโพลาริซที่มีกระบวนการเกิด ดังนี้ เมื่อฉนวนอยู่ภายใต้ สนามไฟฟ้า อนุภาคประจุบวกและอนุภาคประจุลบที่สามารถเคลื่อนที่ได้ที่อยู่ภายในเนื้อฉนวนจะ เคลื่อนที่แยกออกจากกัน และอนุภาคประจุดังกล่าวจะเคลื่อนที่มาสะสมกันตรงรอยต่อของฉนวน 2 ชนิดที่มีค่าเปอร์มิตติวิตี (permittivity) แตกต่างกัน ซึ่งจะทำให้เกิดการสะสมของประจุบวกหรือ ประจุลบที่รอยต่อของฉนวนดังกล่าว การเคลื่อนที่ของประจุกระทั่งทำให้เกิดการสะสมของประจุที่ รอยต่อระหว่างฉนวน 2 ชนิด ถูกเรียกว่า สเปซชาร์จโพลาริซเซชัน ซึ่งสเปซชาร์จโพลาริซเซชันนี้จะ ทำให้การกระจายของสนามไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนผิดเพี้ยนไป



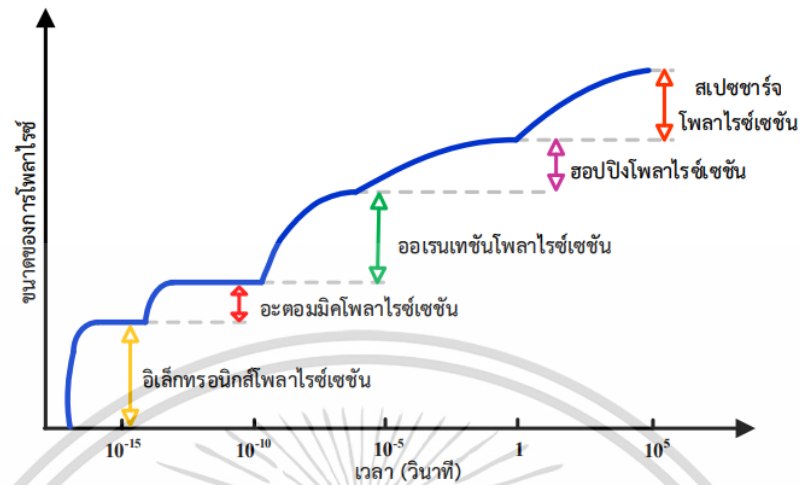
รูปที่ 2.13 สเปซชาร์จโพลาริซเซชัน (ก) ประจุภายในเนื้อฉนวนเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้ามากระทำ

(ข) ประจุภายในเนื้อฉนวนเกิดการเคลื่อนที่เมื่อมีสนามไฟฟ้ามากระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้ได้เห็นใบเซอร์ไอเซนด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

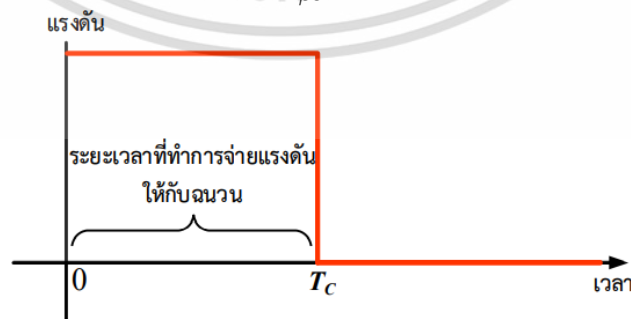
ระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดกระบวนการโพลาไรซ์ประเภทต่างๆ และขนาดของการโพลาไรซ์แสดงได้ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดกระบวนการโพลาไรซ์ประเภทต่างๆ

2.2.2 กระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน (Polarization and Depolarization Current: PDC) [11, 13-15]

เมื่อทำการป้อนแรงดันกระแสตรงให้กับฉนวน กระบวนการโพลาไรซ์ที่เกิดขึ้นภายในฉนวนจึงเป็นการโพลาไรซ์ประเภทอินเตอร์เฟซโพลาไรซ์เซชันเป็นหลัก และในปัจจุบัน เนื่องจากไม่สามารถวัดขนาดการโพลาไรซ์ภายในฉนวนได้โดยตรง จึงหาขนาดของการโพลาไรซ์ที่เกิดขึ้นภายในฉนวนโดยสังเกตจากขนาดของกระแสที่ไหลผ่านฉนวนขณะที่ฉนวนเกิดการโพลาไรซ์ จากรูปที่ 2.15 เมื่อพิจารณาการป้อนแรงดันกระแสตรงให้กับฉนวนเป็นเวลานานเพียงพอที่จะทำให้ฉนวนเกิดการโพลาไรซ์และขนาดของแรงดันที่ป้อนไม่เพียงพอที่จะทำให้ฉนวนเกิดการเบรกดาว์นฉนวนจะเกิดการโพลาไรซ์เพื่อตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าจากภายนอกที่มากระทำ และเมื่อฉนวนเกิดการโพลาไรซ์จะทำให้เกิดกระแสไหลผ่านเนื้อฉนวน ซึ่งกระแสที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการป้อนแรงดันให้กับฉนวนนี้คือ กระแสโพลาไรซ์เซชัน (polarization current, i_{pol})

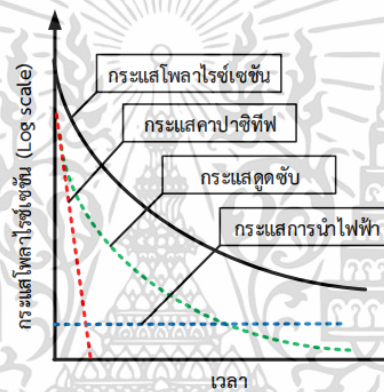


รูปที่ 2.15 การจ่ายแรงดันรูปขึ้นให้กับฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.1 กระแสโพลาริเซชัน (Polarization current)

กระแสโพลาริเซชันในทางทฤษฎีจะมีองค์ประกอบ 3 ส่วน คือ 1. กระแสคาปาซิทีฟ (capacitive current, i_c) ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดขึ้นและจะลดลงในทันทีทันใด 2. กระแสแอมชอปชัน (absorption current, i_{ab}) ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดขึ้นจากกระบวนการโพลาริเซชันภายในเนื้อฉนวน และ 3. กระแสการนำไฟฟ้า (conductance current, i_{con}) ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดจากค่าความนำไฟฟ้าของวัสดุและมีอยู่ในวัสดุทุกชนิด กระแสโพลาริเซชันในทางทฤษฎีและองค์ประกอบของกระแสแสดงได้ดังรูปที่ 2.16 แต่ในทางปฏิบัติกระแสโพลาริเซชันที่วัดได้จะมีกระแสรั่วไหล (leakage current, i_l) รวมอยู่ด้วย ซึ่งกระแสรั่วไหลนี้เกิดขึ้นจากสิ่งปนเปื้อนที่ฉนวนหรือเกิดจากความสกปรกของสภาพแวดล้อมขณะทำการทดสอบ โดยจะพิจารณากระแสการนำไฟฟ้าและกระแสรั่วไหลเป็นกระแสการนำไฟฟ้าที่วัดได้ในทางปฏิบัติ (practical conduction current, $i_{con(practical)}$)



รูปที่ 2.16 องค์ประกอบของกระแสโพลาริเซชัน

$$i_{pol(practical)} = i_{charge} - i_c - i_{con} - i_l \quad (1)$$

$$i_{con(practical)} = i_{con} + i_l \quad (2)$$

กระแสโพลาริเซชันในทางทฤษฎีสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3)

$$i_{pol}(t) = C_0 V_0 \left[\frac{\sigma_0}{\epsilon_0} + \epsilon_\infty \delta(t) + f(t) \right] \quad (3)$$

โดยที่

C_0 คือ ค่าความจุไฟฟ้าทางเรขาคณิต (geometric capacitance) ของวัตถุทดสอบ

V_0 คือ แรงดันกระแสดร่งที่ใช้ในการทดสอบ

σ_0 คือ ค่าความนำไฟฟ้ากระแสตรงบริสุทธิ์ (pure dc conductivity)

ϵ_0 คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ (permittivity of vacuum)

ϵ_∞ คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ (relative permittivity) ที่เวลาเริ่มต้น (ที่เวลา 0 วินาที)

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นว่าเป็นประโยชน์ต่อการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3) สามารถแบ่งกระแสโพลาร์ไรซ์เซชันออกเป็น 3 เทอม เรียงลำดับจากซ้ายไปขวาดังนี้ เทอมที่ 1 คือ เทอมของ $\frac{V_0}{\epsilon_0}$ ซึ่งเป็นเทอมที่มีความสัมพันธ์กับค่าความนำไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนและเป็นเทอมที่ไม่ขึ้นอยู่กับการบวนการโพลารไรซ์ของฉนวน เทอมที่ 1 นี้ จะปรากฏในขณะที่ทำการจ่ายแรงดันให้กับฉนวนเท่านั้น ซึ่งเทอมที่ 1 จะเป็นเทอมที่มีความสัมพันธ์กับกระแสการนำไฟฟ้าของฉนวน

เทอมที่ 2 คือ เทอมของ $\epsilon_0 \delta(t)$ ซึ่งเป็นเทอมที่ไม่สามารถทำการบันทึกได้ในทางปฏิบัติเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของขนาดกระแสอย่างรวดเร็ว ซึ่งเทอมที่ 2 นี้ จะเกิดจากการบวนการโพลารไรซ์ที่ใช้ระยะเวลาในการเกิดรวดเร็ว ดังเช่น อิเล็กทรอนิกส์โพลารไรซ์เซชัน เป็นต้น

เทอมที่ 3 คือ เทอมของ $f(t)$ เป็นเทอมที่มีความสัมพันธ์กับการบวนการโพลารไรซ์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวนยกเว้นกระบวนการโพลารไรซ์ที่ใช้ระยะเวลาในการเกิดรวดเร็วดังที่กล่าวไปในเทอมที่ 2 ซึ่งเทอมที่ 3 นี้ จะเป็นเทอมที่มีความสัมพันธ์กับกระแสคาปาซิทีฟและกระแสแอมโพรอปชัน

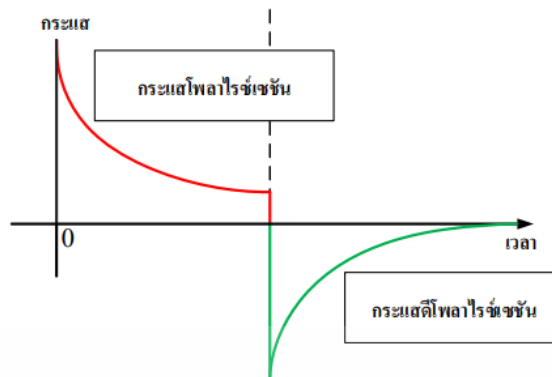
2.2.2.2 กระแสดีโพลารไรซ์เซชัน (Depolarization current)

จากข้อ 2.2.2.1 เมื่อหยุดจ่ายแรงดันให้กับฉนวนและทำการลัดวงจรฉนวนเพื่อให้ฉนวนเกิดการคายประจุลงสู่กราวด์โมเลกุลและประจุไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนจะเกิดการจัดเรียงตัวเข้าสู่สภาวะปกติก่อนที่จะมีสนามไฟฟ้ามากระทำ กระแสคายประจุ (Discharge current) ที่วัดได้ขณะทำการลัดวงจรให้กับฉนวนจะถูกเรียกว่า กระแสดีโพลารไรซ์เซชัน (depolarization current, i_{depol}) กระแสดีโพลารไรซ์เซชันจะมีองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ 1. กระแสคาปาซิทีฟดิสชาร์จ (capacitive discharge current, $i_{c(discharge)}$) ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดขึ้นและลดลงอย่างทันทีทันใดและจะมีคุณลักษณะเหมือนกับกระแสคาปาซิทีฟของกระแสโพลารไรซ์เซชันแต่มีขั้วตรงข้ามกัน และ 2. กระแสแอมโพรอปชันดิสชาร์จ (absorption discharge current, $i_{ab(discharge)}$) ซึ่งเป็นกระแสที่มีค่าสูงในช่วงแรกและเมื่อทำการคายประจุให้กับฉนวนต่อไปเรื่อยๆ กระแสดังกล่าวจะมีค่าลดลง กระแสแอมโพรอปชันดิสชาร์จนี้จะมีคุณลักษณะเหมือนกับกระแสแอมโพรอปชันของกระแสโพลารไรซ์เซชันแต่จะมีขั้วตรงข้ามกัน สำหรับกระแสดีโพลารไรซ์เซชันจะไม่มีส่วนประกอบของกระแสการนำไฟฟ้าและกระแสรั่วไหลรวมอยู่ด้วยเนื่องจากทำการหยุดจ่ายแรงดันให้กับฉนวนแล้ว กระแสดีโพลารไรซ์เซชันเขียนได้ดังสมการที่ (5) และกระแสโพลารไรซ์เซชันและกระแสดีโพลารไรซ์เซชันที่วัดได้แสดงดังรูปที่ 2.17

$$i_{depol(parctical)} = i_{c(discharge)} + i_{ab(discharge)} \quad (4)$$

$$i_{depol}(t) = -C_0 V_0 + [f(t) - f(t+T_c)] \quad (5)$$

T_c คือ ระยะเวลาที่ทำการจ่ายแรงดันให้กับวัตถุทดสอบ



รูปที่ 2.17 กระแสโพลาร์ชาร์จเซชันและกระแสดีโพลาร์ชาร์จเซชัน

เมื่อพิจารณาสมการที่ (1) และ (4) พบว่า สามารถหากระแสการนำไฟฟ้าในทางปฏิบัติได้ โดยการนำกระแสดีโพลาร์ชาร์จเซชันที่วัดได้มาลบออกจากกระแสโพลาร์ชาร์จเซชันที่วัดได้ในทางปฏิบัติ

$$i_{con(practical)} = i_{pol(practical)} - i_{depol} \quad (6)$$

$$i_{con(practical)} = i_{charge} - i_c - i_{con} - i_i - i_{c(discharge)} - i_{ab(discharge)} \quad (7)$$

$$i_{con(practical)} = i_{con} + i_i \quad (8)$$

2.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับกระบวนการ PDC [16-18]

ตามทฤษฎีการที่อุณหภูมิของฉนวนเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้กระแสโพลาร์และดีโพลาร์สูงขึ้นทั้งคู่เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพลังงานของอิเล็กตรอนอิสระภายในวัสดุฉนวนจะมีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกัน เนื่องจากเหตุดังกล่าวส่งผลให้อิเล็กตรอนอิสระที่มีพลังงานสูงภายในเนื้อฉนวนที่อุณหภูมิสูงสามารถเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้าได้มากขึ้นนั้นจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้กระแสโพลาร์ชาร์จเซชันและดีโพลาร์ชาร์จเซชันเพิ่มสูงขึ้นตามความหนาแน่นอิเล็กตรอน

บทที่ 3

การออกแบบการทดลองและการทดสอบ

ในบทนี้อธิบายถึงการออกแบบการทดลอง รายละเอียดของการทดลอง ชุดทดสอบ และวงจรการทดสอบ โดยการทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะวิเคราะห์พฤติกรรม 2 อย่างของฉนวนกระดาษ ได้แก่ 1. การศึกษาความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวนกระดาษอันเนื่องมาจากผลของอุณหภูมิและแรงดัน และ 2. การศึกษากระแสสะสมในเนื้อของฉนวนกระดาษที่ถูกทำให้เสื่อมด้วยอุณหภูมิสูงที่แรงดันต่างๆ

3.1 การออกแบบอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

การทดลองนี้ศึกษาความเครียดสนามไฟฟ้า และกระแสสะสมในเนื้อของฉนวนกระดาษอันเนื่องมาจากผลของอุณหภูมิ และแรงดันสูง มีการออกแบบระบบสำหรับการชิวเลชันดังนี้



รูปที่ 3.1 แสดงภาพรวมของชุดควบคุมอุณหภูมิเพื่อทดสอบฉนวนเหลว

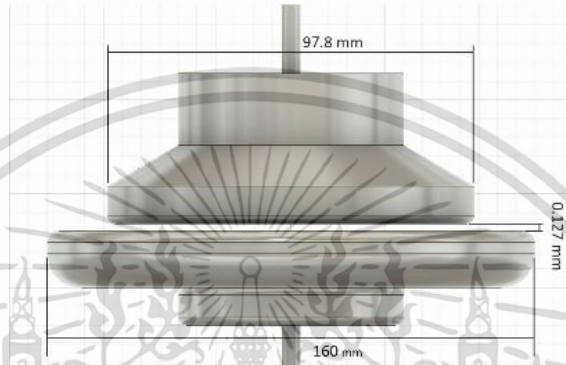
ชุดควบคุมอุณหภูมิเพื่อทดสอบฉนวนเหลวจะแบ่งการออกแบบเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ชุดเซลล์ทดสอบและตู้ควบคุมอุณหภูมิ

3.1.1 ชุดเซลล์ทดสอบ (Electrode Design)

ชุดเซลล์ทดสอบออกแบบโดยอ้างอิงจากรายงานของ CEGRE เรื่อง HVDC Transformer Insulation : Oil Conductivity กล่าวถึงลักษณะของเซลล์ทดสอบรวมถึงวิธีการทดสอบการนำไฟฟ้าของฉนวนเหลว โดยชุดเซลล์ทดสอบดังกล่าวประกอบด้วยอิเล็กโทรด 3 ชั้น (High-Voltage Electrode, Measuring Electrode และ Grounded Ring Electrode) และชุดทดสอบ (Chamber) ซึ่งจะออกแบบ 2 มิติ (2D) และ 3 มิติ (3D) โดยใช้โปรแกรม AutoCAD และ Fusion 360 ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 แบบ 3 มิติประกอบสำเร็จของชุดเซลล์ทดสอบ



รูปที่ 3.3 แบบ 2 มิติของอิเล็กโทรด



(a)



Grounded Ring Electrode



Measuring Electrode



High-Voltage Electrode

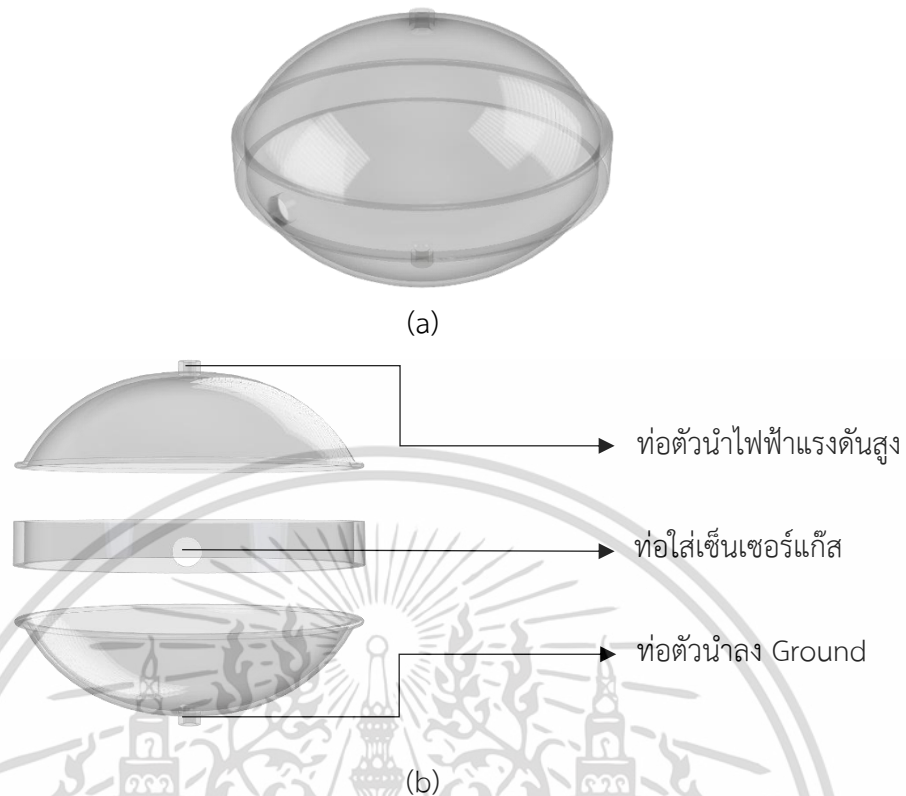
(b)

รูปที่ 3.4 แบบ 3 มิติของอิเล็กโทรด

(a) แบบประกอบสำเร็จของอิเล็กโทรด

(b) แบบแสดงรายละเอียดของอิเล็กโทรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นจำเป็นต้องขอขออนุญาตในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แบบ 3 มิติของชุดทดสอบ (Chamber)

(a) แบบประกอบสำเร็จของชุดทดสอบ (Chamber)

(b) แบบแสดงรายละเอียดของชุดทดสอบ (Chamber)

3.1.2 การออกแบบตู้ควบคุมแรงดันและอุณหภูมิ (Voltage and Temperature Control Cabinet Design)

ตู้ควบคุมอุณหภูมิออกแบบโดยคำนึงถึงระยะปลอดภัย (Clearance) ของไฟฟ้าแรงดันสูงในอากาศ และนำมาออกแบบเพื่อไม่ให้เกิดการเบรกดาวน์ระหว่างชุดควบคุมอุณหภูมิและเซลล์ทดสอบ



รูปที่ 3.6 แบบ 3 มิติของตู้ควบคุมอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบวิธีการทดสอบและการชิมูเลชัน

3.2.1 การเลือกแรงดันสำหรับใช้ทำการทดสอบ

โดยผู้วิจัยได้ออกแบบการทดสอบโดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้ากับชุดทดสอบด้วยแรงดันต่างๆ ตั้งแต่ 0 kV 1 kV 2 kV ไปจนถึง 4 kV ดังตารางที่ 3.1 ผู้วิจัยจะดำเนินการทดลองชิมูเลชันชุดทดสอบ โดยใช้ฉนวนอากาศ ฉนวนน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า และฉนวนกระดาศภายในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า โดยค่าพารามิเตอร์สำหรับการทดสอบจะอ้างอิงข้อมูลของฉนวนกระดาศหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานจริง ในหม้อแปลงไฟฟ้าที่ผลิตโดยบริษัทหม้อแปลงไฟฟ้าแห่งหนึ่งในจังหวัดระยองประเทศไทย ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ค่าพารามิเตอร์ของกระดาศฉนวนน้ำมันจากข้อมูลของบริษัทผู้ผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าแห่งหนึ่งจังหวัดระยอง

3.2.2 การเลือกอุณหภูมิสำหรับใช้ทำการทดสอบ

สำหรับอุณหภูมิที่ผู้วิจัยออกแบบใช้ในการทดสอบคือจะเริ่มต้นทดสอบที่อุณหภูมิห้อง (Ambient Temperature) โดยในการทดลองนี้ผู้วิจัยสมมติให้อุณหภูมิห้องอยู่ที่ 30 องศาเซลเซียส และจะทำการเพิ่มอุณหภูมิทดสอบขึ้นครั้งละ 50 องศาเซลเซียส ไปจนถึงอุณหภูมิทดสอบสุดท้ายที่ 300 องศาเซลเซียส ของฉนวนทั้ง 3 ชนิด ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 รูปแบบการชิมูเลชันของฉนวนทั้งสามชนิด

Voltage (kV)	1	2	3	4
	Ambient Temp	Ambient Temp	Ambient Temp	Ambient Temp
Temp (°C)	50	50	50	50
	100	100	100	100
	150	150	150	150
	200	200	200	200
	250	250	250	250
	300	300	300	300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การจำลองการทดสอบด้วยการชิวเลขันตามทฤษฎีของกระบวนการ PDC

การจำลองการทดสอบด้วยการชิวเลขันจะอ้างอิงทฤษฎีของกระบวนการโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันโดยการทดสอบนี้เป็นการทดสอบทางไฟฟ้าเพื่อบ่งบอกคุณลักษณะแรงดันเบรกดาวนักระสลับของน้ำมันหม้อแปลงที่อุณหภูมิและแรงดันแตกต่างกันตามเงื่อนไขดังตารางที่ 3.1 ที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น วิธีการขึ้นแรงดัน การคิดค่าเฉลี่ยของการทดสอบ และชุดทดสอบสำหรับการทดสอบนี้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60243-1 (2013) และมาตรฐาน CIGRE A2/D1.41

3.2.3.1 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า

ผู้ควบคุมอุณหภูมิถูกออกแบบขึ้นเพื่อรองรับการทดลองที่ระดับแรงดันประมาณ 0-40 kV ซึ่งเป็นระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูง หากไม่มีการตรวจสอบผลของความเครียดสนามไฟฟ้าที่อุปกรณ์ต่าง ๆ เมื่อทำการทดสอบอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์และเป็นอันตรายต่อผู้ทำการทดลอง และเพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าจึงจัดทำขึ้นเพื่อตรวจสอบระยะปลอดภัยทางไฟฟ้า (Clearance Distance) ระหว่างผู้ควบคุมอุณหภูมิกับอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในตู้ และศึกษาผลของความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างอิเล็กทรอนิกส์

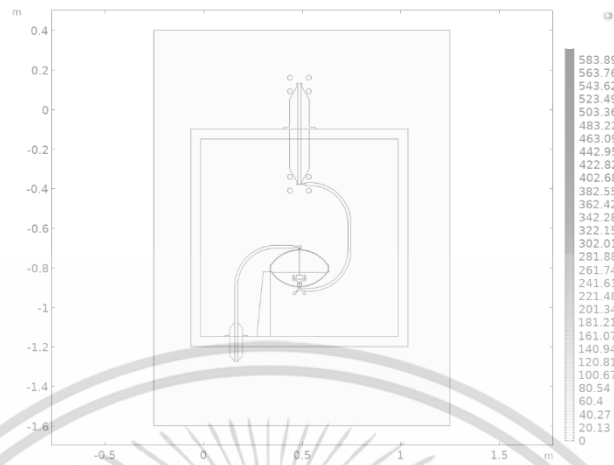
ทำการจำลองผลโดยป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงตั้งแต่ 0-40 kV ให้กับตู้ที่ได้ออกแบบไว้ โดยแบ่งการจำลองออกเป็น 2 กรณี ดังนี้

1. ชุดทดสอบที่อิเล็กทรอนิกส์อยู่ในฉนวนอากาศ
2. ชุดทดสอบที่อิเล็กทรอนิกส์อยู่ในฉนวนน้ำมัน

เนื่องจากในเซลล์ทดสอบมีความสมมาตรจึงทำการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในรูปแบบ 2 มิติ ในระบบพิกัดทรงกระบอก (Cylindrical Coordinate) โดยใช้อุปกรณ์ที่ได้ทำการออกแบบในหัวข้อ 3.1.1 และใช้โปรแกรมในการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศและฉนวนน้ำมันที่เกิดขึ้นจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ค่าต่าง ๆ ซึ่งได้ผลการจำลองดังนี้

การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศ

ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศที่ระดับแรงดัน 0 kV



(a)



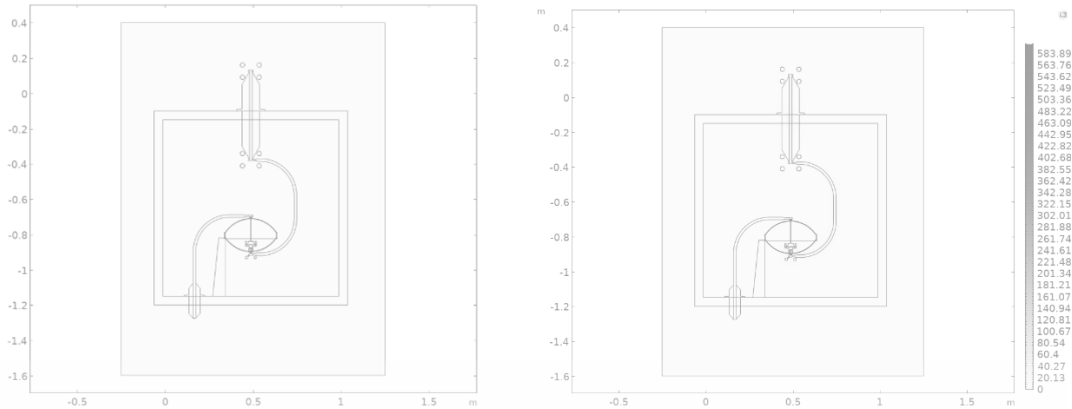
(b)

รูปที่ 3.8 ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศที่ระดับแรงดัน 0 kV

(a) ภาพรวม

(b) ภาพขยายบริเวณอิเล็กโทรด

จากการจำลองผลที่ระดับแรงดันตั้งแต่ 0-4 kV พบว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณอุปกรณ์ภายในตู้ที่ระดับแรงดันต่าง ๆ มีค่าแตกต่างกันน้อยมาก (ไม่มีนัยสำคัญ) ดังรูปที่ 3.11 เปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน 10 kV และ 40 kV จากที่กล่าวมาคณะผู้จัดทำจึงสนใจผลของความเครียดสนามไฟฟ้าที่บริเวณอิเล็กโทรดเป็นสำคัญ



รูปที่ 3.9 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศ

(a) ที่ระดับแรงดัน 0 kV

(b) ที่ระดับแรงดัน 4 kV

ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศที่ระดับแรงดัน 1 kV



รูปที่ 3.10 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศที่ระดับแรงดัน 1 kV

ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศที่ระดับแรงดัน 2 kV



รูปที่ 3.11 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศที่ระดับแรงดัน 2 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศที่ระดับแรงดัน 3 kV



รูปที่ 3.12 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศที่ระดับแรงดัน 3 kV

ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศที่ระดับแรงดัน 4 kV

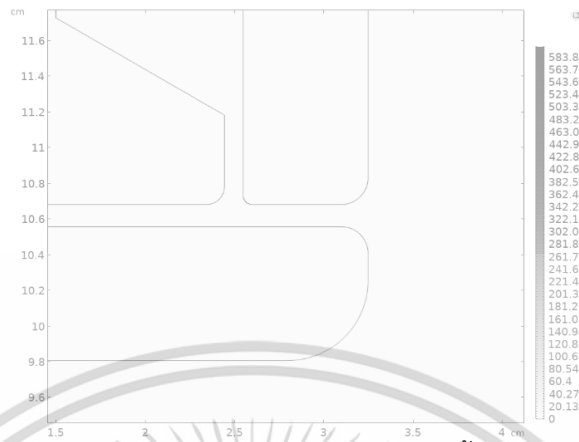


รูปที่ 3.13 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศที่ระดับแรงดัน 4 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนน้ำมัน

ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนน้ำมันที่ระดับแรงดัน 0 kV



รูปที่ 3.14 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนน้ำมันที่ระดับแรงดัน 0 kV

ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนน้ำมันที่ระดับแรงดัน 1 kV



รูปที่ 3.15 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนน้ำมันที่ระดับแรงดัน 1 kV

ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนน้ำมันที่ระดับแรงดัน 2 kV



รูปที่ 3.16 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนน้ำมันที่ระดับแรงดัน 2 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนน้ำมันที่ระดับแรงดัน 3 kV



รูปที่ 3.17 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนน้ำมันที่ระดับแรงดัน 3 kV

ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนน้ำมันที่ระดับแรงดัน 4 kV



รูปที่ 3.18 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนน้ำมันที่ระดับแรงดัน 4 kV

ตารางที่ 3.2 ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศและฉนวนน้ำมัน

ระดับแรงดัน (kV)	ค่าเฉลี่ยความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณอิเล็กโทรด (kV/cm)	
	ฉนวนอากาศ	ฉนวนน้ำมัน
0	0	0
1	109.264	109.244
2	218.527	218.488
3	327.791	327.731
4	437.054	436.975

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

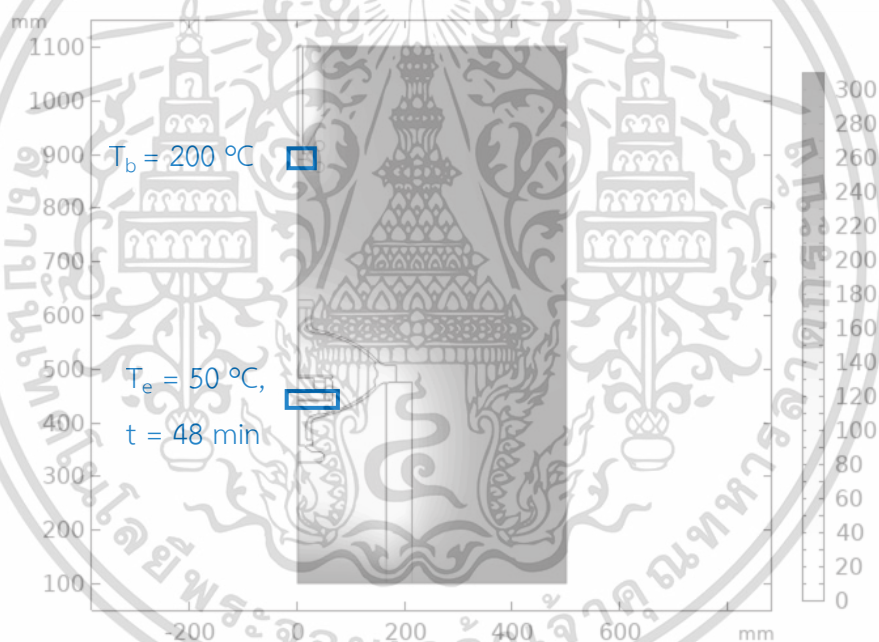
3.2.3.2 การจำลองการกระจายความร้อน

ในการทดสอบฉนวนน้ำมัน อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D1169 จะต้องมีการควบคุมอุณหภูมิของฉนวนน้ำมัน (ประมาณ 90 องศาเซลเซียส) ซึ่งผู้ควบคุมอุณหภูมิทำการออกแบบให้สามารถปรับอุณหภูมิได้ตั้งแต่อุณหภูมิห้อง จนถึง 350 องศาเซลเซียสเพื่อรองรับการทดสอบอื่น ๆ

การจำลองการกระจายความร้อนจึงจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการกระจายความร้อนจากตู้ไปยังฉนวนและอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยแบ่งการจำลองเป็น 2 ส่วน ดังนี้

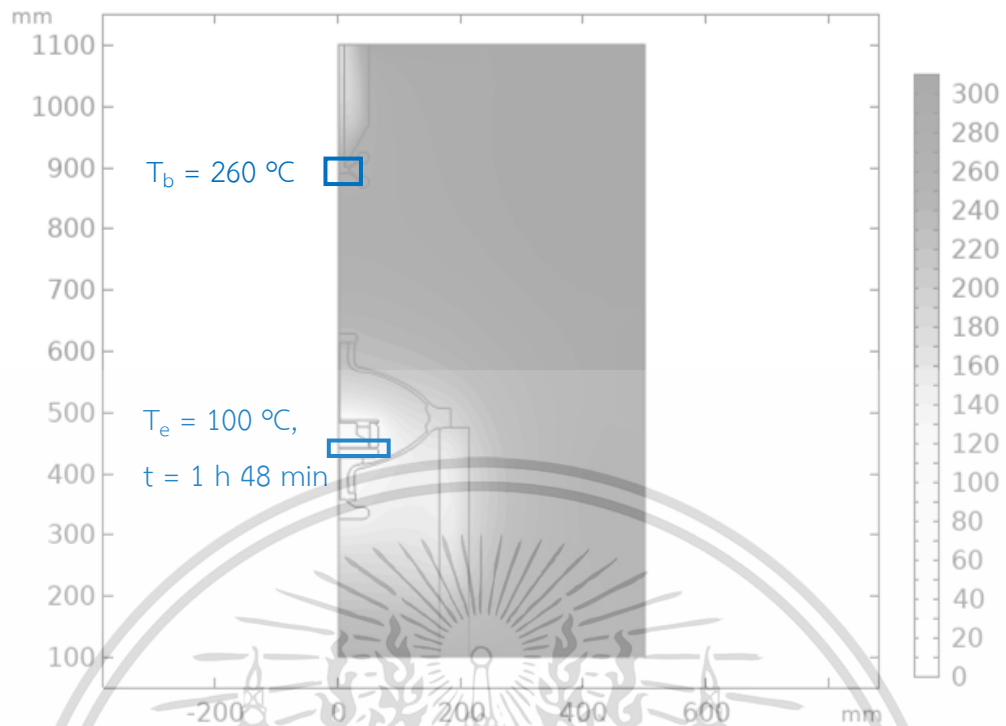
การจำลองการกระจายความร้อนในอากาศ

ผลการจำลองการกระจายความร้อนในอากาศที่อุณหภูมิทั้งหมด 5 อุณหภูมิ ได้แก่ 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียส

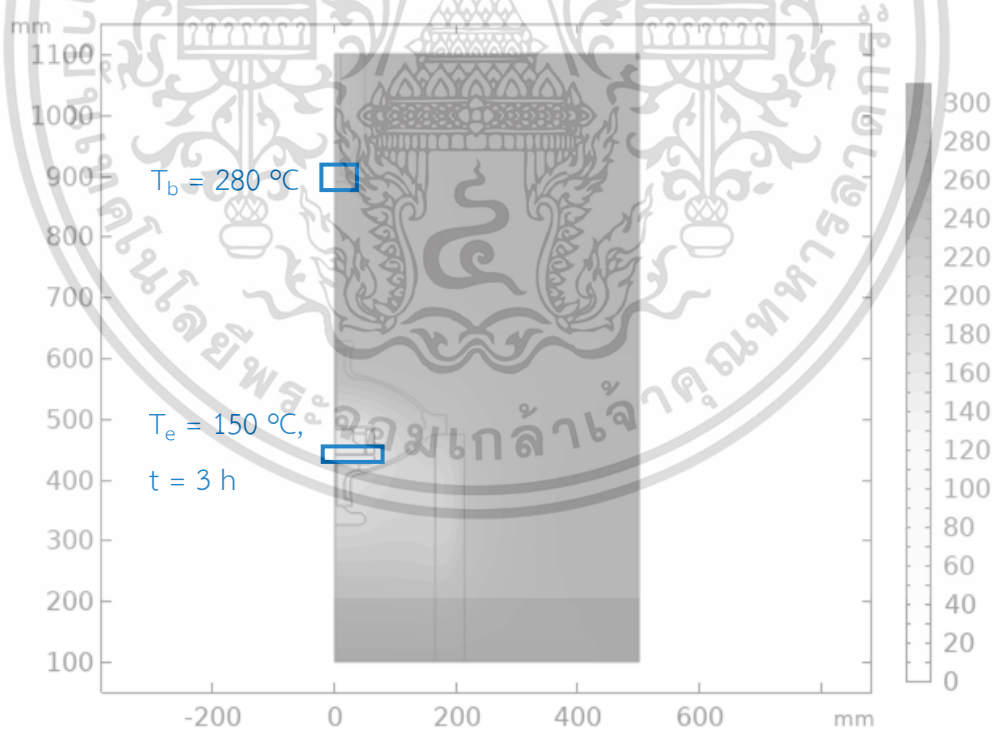


รูปที่ 3.19 การจำลองการกระจายความร้อนในอากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

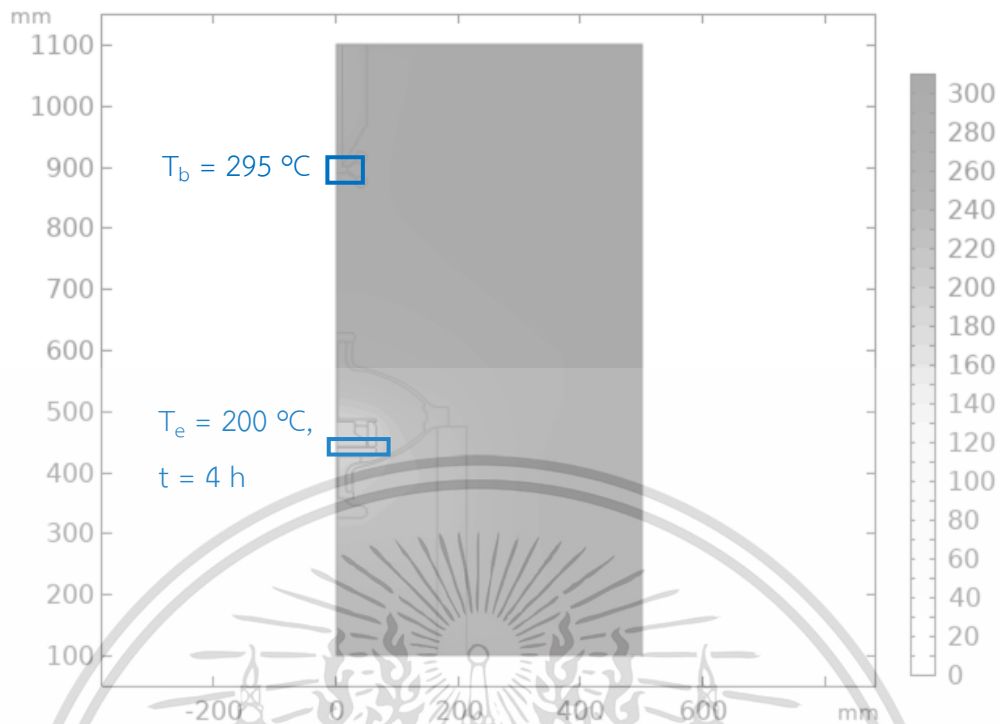


รูปที่ 3.20 การจำลองการกระจายความร้อนในอากาศที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

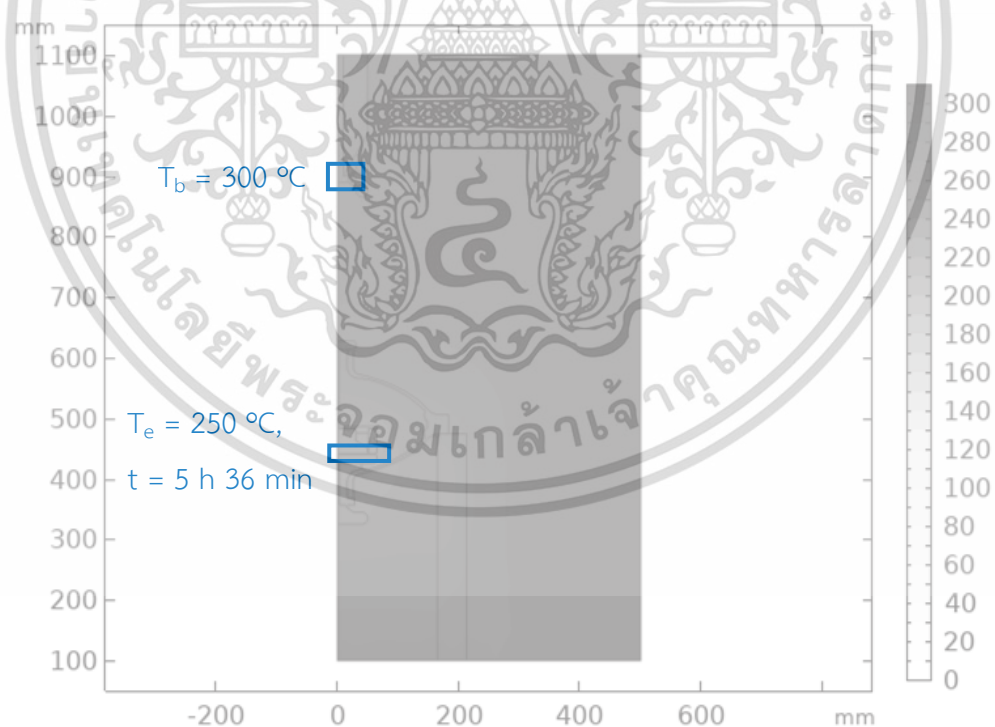


รูปที่ 3.21 การจำลองการกระจายความร้อนในอากาศที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

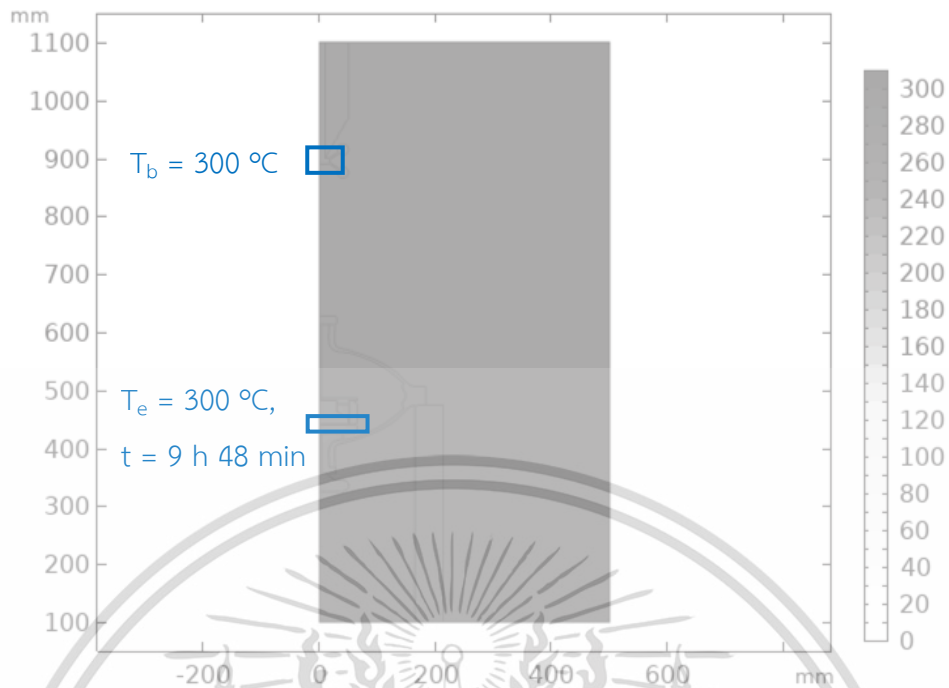


รูปที่ 3.22 การจำลองการกระจายความร้อนในอากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.23 การจำลองการกระจายความร้อนในอากาศที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

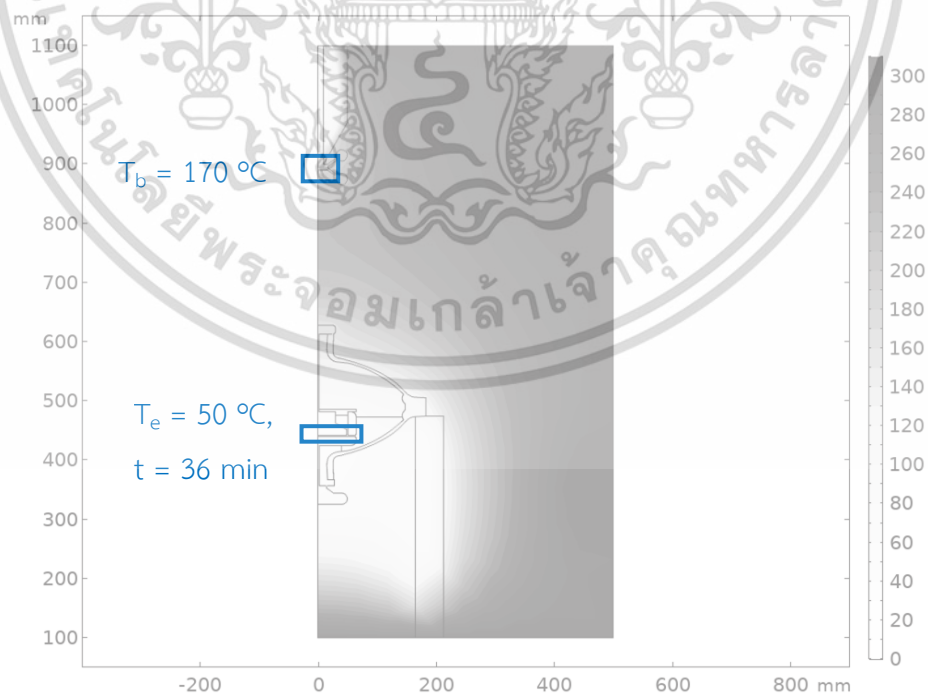
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 การจำลองการกระจายความร้อนในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

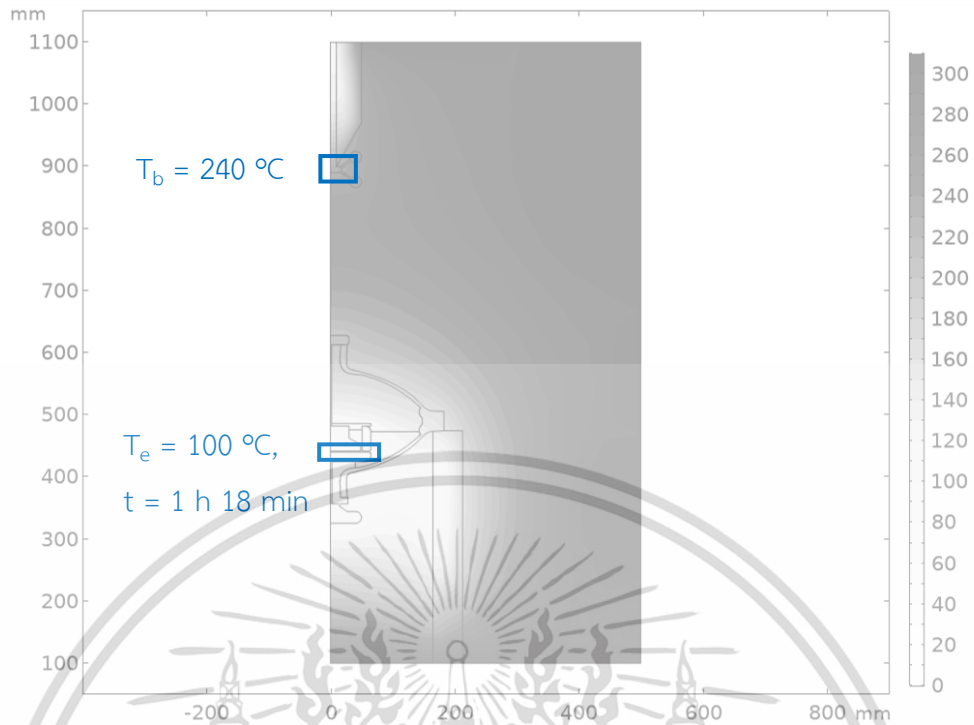
การจำลองการกระจายความร้อนในน้ำมันหม้อแปลง

ผลการจำลองการกระจายความร้อนในน้ำมันหม้อแปลง ที่อุณหภูมิ ทั้งหมด 5 อุณหภูมิ ได้แก่ 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียส

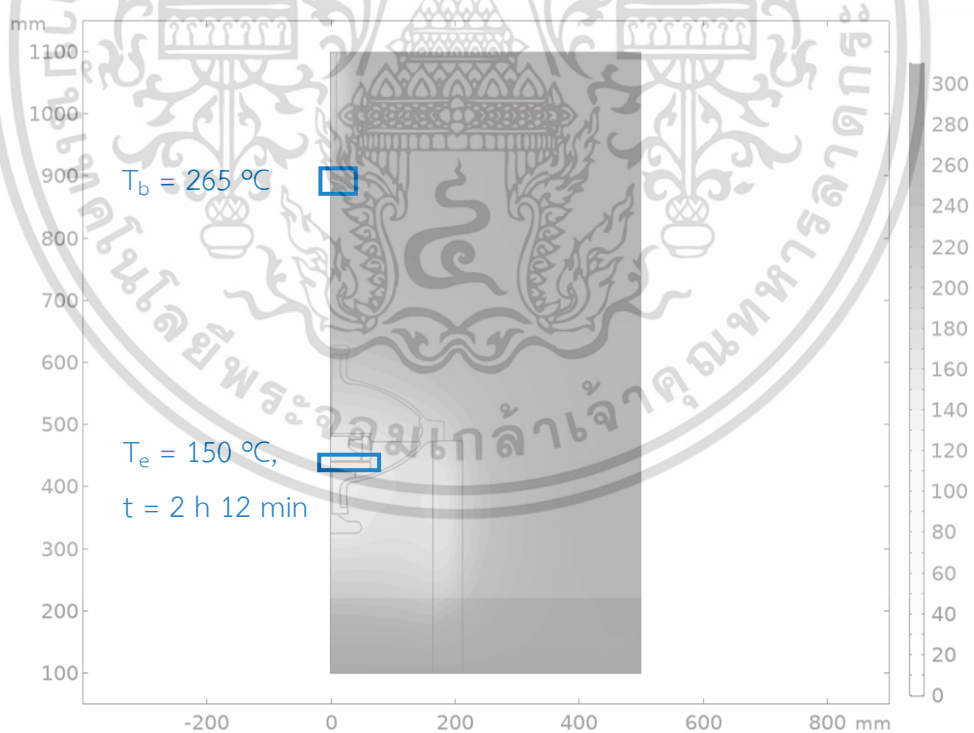


รูปที่ 3.25 การจำลองการกระจายความร้อนในน้ำมันหม้อแปลง ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

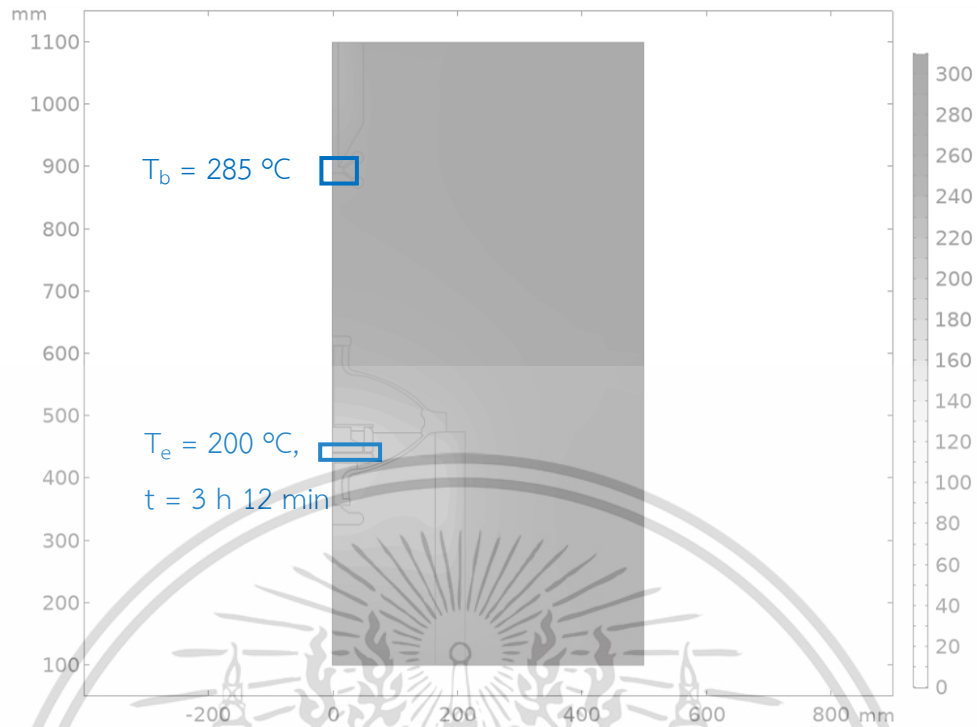


รูปที่ 3.26 การจำลองการกระจายความร้อนในน้ำมันหม้อแปลง ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

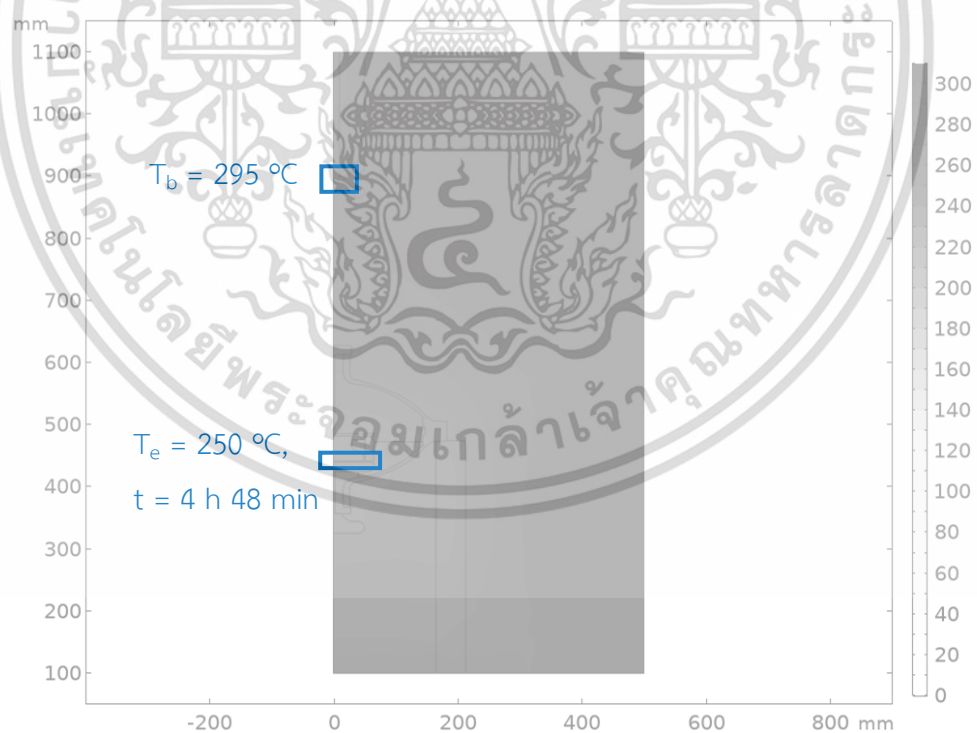


รูปที่ 3.27 การจำลองการกระจายความร้อนในน้ำมันหม้อแปลง ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

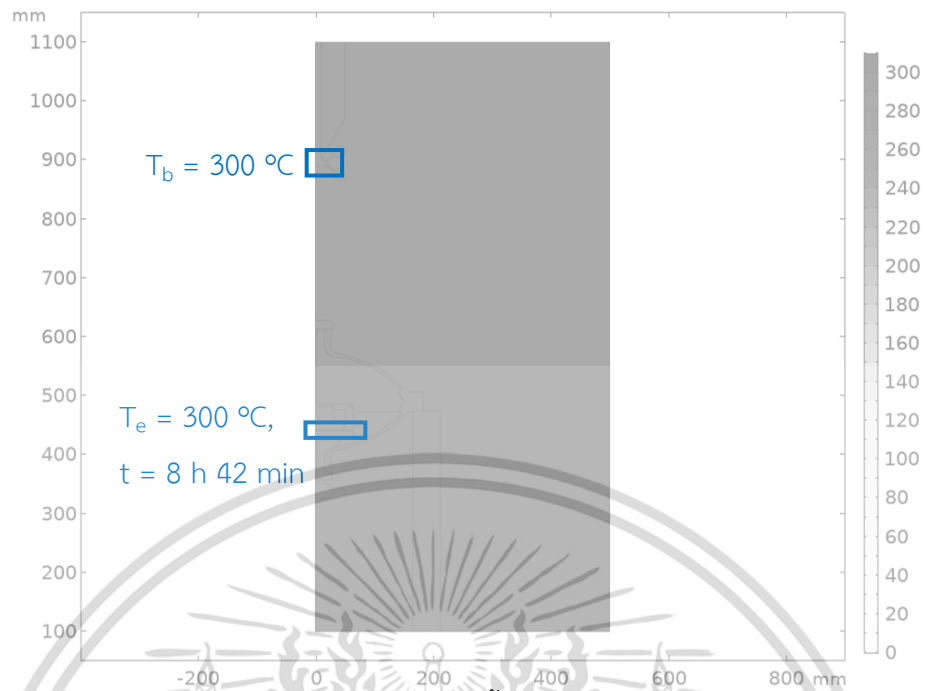


รูปที่ 3.28 การจำลองการกระจายความร้อนในน้ำมันหม้อแปลง ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.29 การจำลองการกระจายความร้อนในน้ำมันหม้อแปลง ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.30 การจำลองการกระจายความร้อนในน้ำมันหม้อแปลง ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

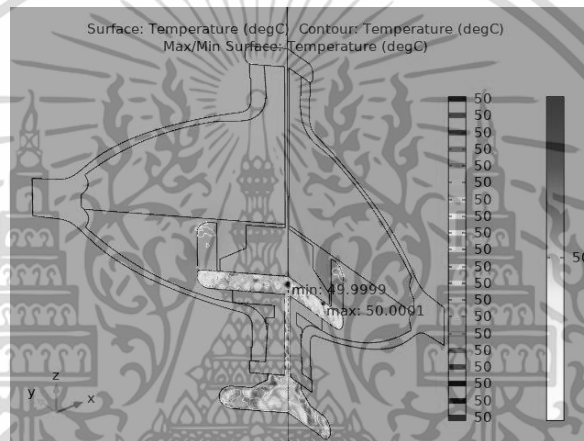
บทที่ 4

ผลการจำลองการทดสอบ

ในบทนี้แสดงผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลของการทดลองการชิมูเลชันโดยผู้วิจัยจะทำการชิมูเลชันที่แรงดัน 1 kV และ 4 kV ณ อุณหภูมิทดสอบต่างๆ แบ่งออกเป็น 2 หัวข้อดังนี้ 4.1 ภาพผลการชิมูเลชันด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และ 4.2 ตารางผลการชิมูเลชันด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

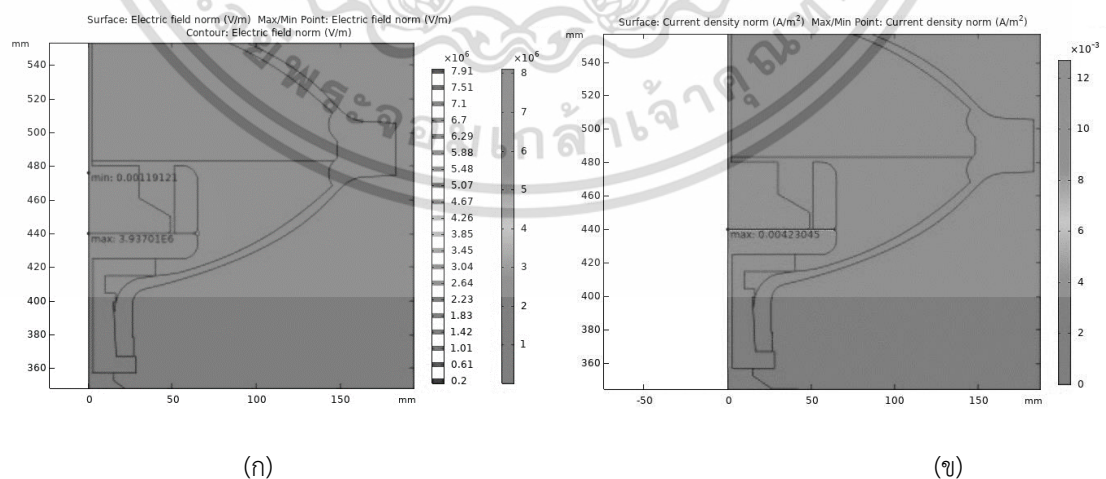
4.1 ผลการชิมูเลชันค่าความเครียดสนามไฟฟ้าและค่ากระแสภายในฉนวนกระดาษที่อุณหภูมิและแรงดันทดสอบต่างๆ

4.1.1 ที่อุณหภูมิทดสอบ 50 องศา



รูปที่ 4.1 ผลการชิมูเลชันแสดงอุณหภูมิของชุดทดสอบที่ 50 องศาเซลเซียส

4.1.1.1 แรงดันทดสอบ 1 kV

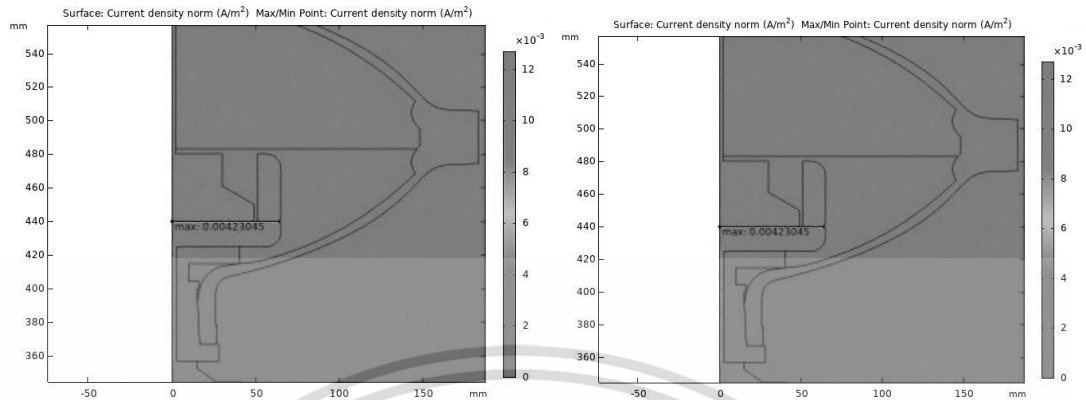


รูปที่ 4.2 ผลการชิมูเลชันที่อุณหภูมิทดสอบ 50 องศาเซลเซียส แรงดันทดสอบ 1 kV

(ก) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (ข) กระแสภายในฉนวนกระดาษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

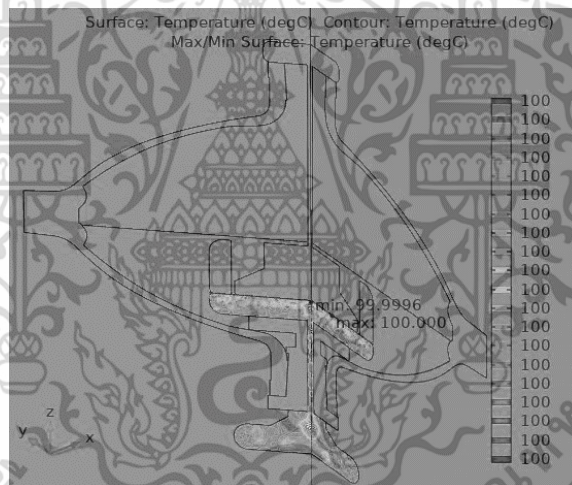
4.1.1.2 แรงดันทดสอบ 4 kV



รูปที่ 4.3 ผลการซิมูเลชันที่อุณหภูมิทดสอบ 50 องศาเซลเซียส แรงดันทดสอบ 4 kV

(ก) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (ข) กระแสภายในฉนวนกระดาษ

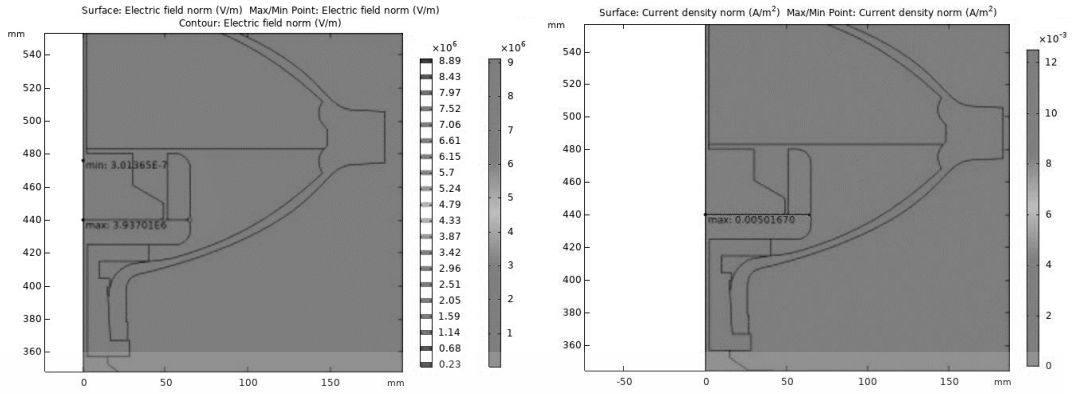
4.1.2 ที่อุณหภูมิทดสอบ 100 องศา



รูปที่ 4.4 ผลการซิมูเลชันแสดงอุณหภูมิของชุดทดสอบที่ 100 องศาเซลเซียส

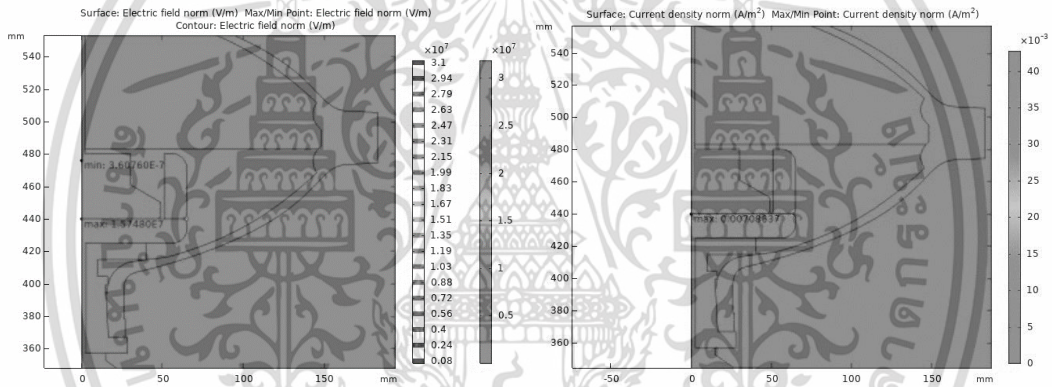
4.1.2.1 แรงดันทดสอบ 1 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



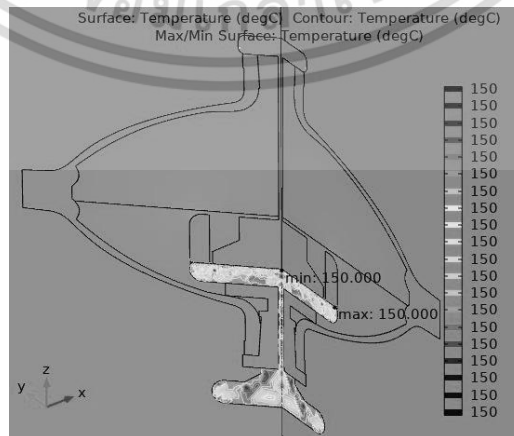
รูปที่ 4.5 ผลการซิมูเลชันที่อุณหภูมิทดสอบ 100 องศาเซลเซียส แรงดันทดสอบ 1 kV
(ก) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (ข) กระแสภายในฉนวนกระดาษ

4.1.2.1 แรงดันทดสอบ 4 kV



รูปที่ 4.6 ผลการซิมูเลชันที่อุณหภูมิทดสอบ 100 องศาเซลเซียส แรงดันทดสอบ 4 kV
(ก) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (ข) กระแสภายในฉนวนกระดาษ

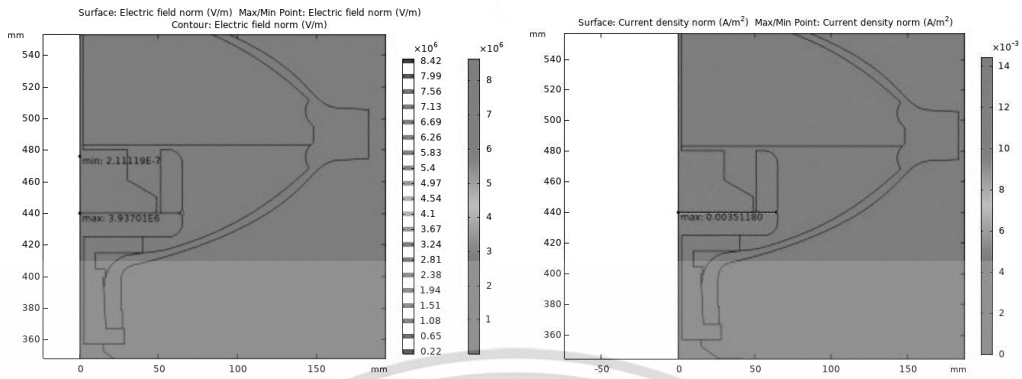
4.1.3 ที่อุณหภูมิทดสอบ 150 องศา



รูปที่ 4.7 ผลการซิมูเลชันแสดงอุณหภูมิของชุดทดสอบที่ 150 องศาเซลเซียส

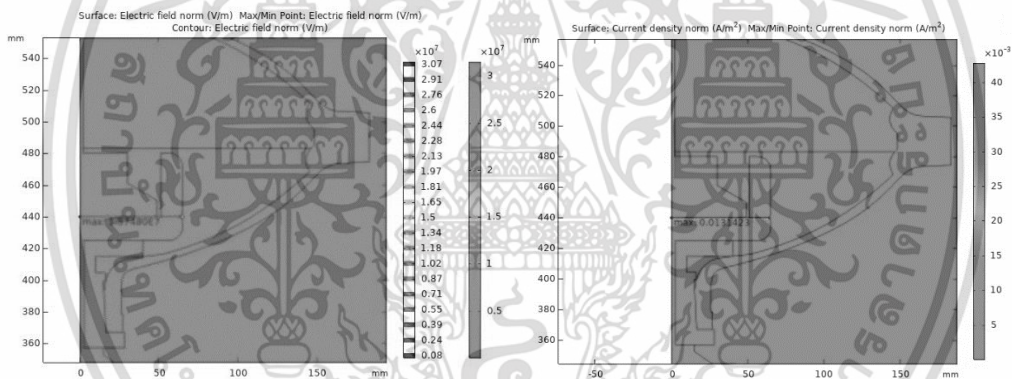
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3.1 แรงดันทดสอบ 1 kV



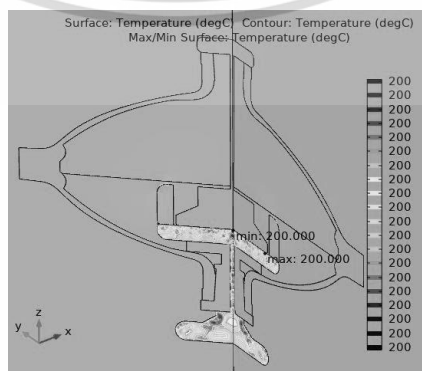
รูปที่ 4.8 ผลการซิมูเลชันที่อุณหภูมิทดสอบ 150 องศาเซลเซียส แรงดันทดสอบ 1 kV
(ก) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (ข) กระแสภายในฉนวนกระดาษ

4.1.3.2 แรงดันทดสอบ 4 kV



รูปที่ 4.9 ผลการซิมูเลชันที่อุณหภูมิทดสอบ 150 องศาเซลเซียส แรงดันทดสอบ 4 kV
(ก) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (ข) กระแสภายในฉนวนกระดาษ

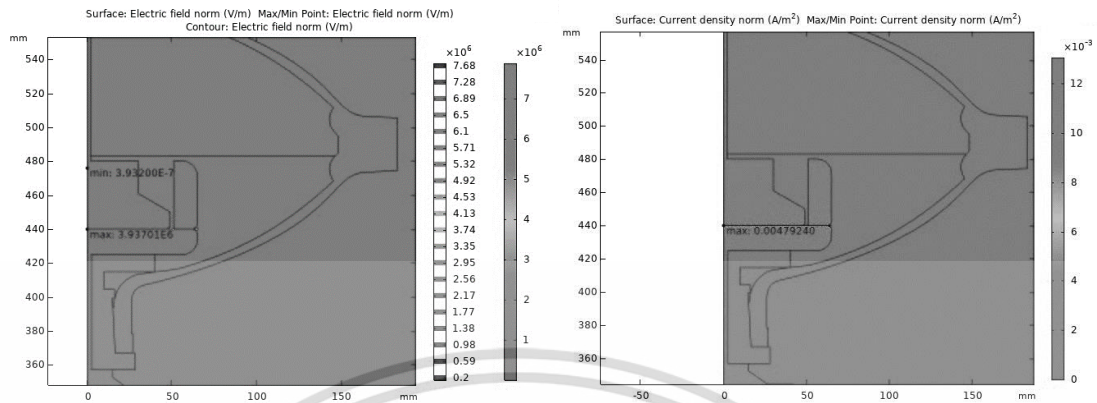
4.1.4 ที่อุณหภูมิทดสอบ 200 องศา



รูปที่ 4.10 ผลการซิมูเลชันแสดงอุณหภูมิของชุดทดสอบที่ 200 องศาเซลเซียส

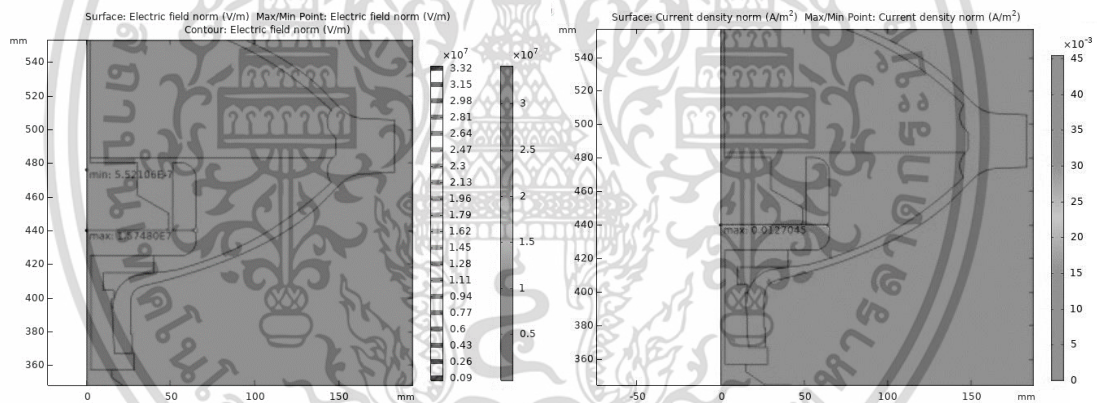
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นแก่ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4.1 แรงดันทดสอบ 1 kV



รูปที่ 4.11 ผลการซิมูเลชันที่อุณหภูมิทดสอบ 200 องศาเซลเซียส แรงดันทดสอบ 1 kV
(ก) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (ข) กระแสภายในฉนวนกระดาษ

4.1.4.2 แรงดันทดสอบ 4 kV



รูปที่ 4.12 ผลการซิมูเลชันที่อุณหภูมิทดสอบ 200 องศาเซลเซียส แรงดันทดสอบ 4 kV
(ก) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (ข) กระแสภายในฉนวนกระดาษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ตารางแสดงค่าผลการชิมูเลชันด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของอิเล็กโทรดที่อุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันของ กระดาษฉนวนน้ำมันหม้อแปลงจะแสดงในตารางที่ 4.1 และ ค่าของกระแสภายในฉนวนหรือกระแส โพลาริเซชันที่อุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าต่างกันจะแสดงในตารางที่ 4.2 โดยช่องในตารางที่มีการเน้น เน้นคือผลการจำลองของภาพผลการจำลองที่แสดงไปแล้วในหัวข้อ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของอิเล็กโทรดที่อุณหภูมิและ แรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันของกระดาษฉนวนน้ำมันหม้อแปลง

Voltage (kV)	Maximum Electric Field Stress (E_{max})(V/m)						
	Controlled Temp ($^{\circ}$ C)						
	30	50	100	150	200	250	300
1	3.9×10^6	3.9×10^6	3.9×10^6	3.9×10^6	3.9×10^6	3.9×10^6	3.9×10^6
2	7.9×10^6	7.9×10^6	7.9×10^6	7.9×10^6	7.9×10^6	7.9×10^6	7.9×10^6
3	1.2×10^7	1.2×10^7	1.2×10^7	1.2×10^7	1.2×10^7	1.2×10^7	1.2×10^7
4	1.6×10^7	1.6×10^7	1.6×10^7	1.6×10^7	1.6×10^7	1.6×10^7	1.6×10^7

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการจำลองค่ากระแสภายในเนื้อฉนวนหรือกระแสโพลาริเซชันที่อุณหภูมิและ แรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันของกระดาษฉนวนน้ำมันหม้อแปลง

Voltage (kV)	Maximum Polarization Current (I_{POL}) (A/m ²)						
	Controlled Temp ($^{\circ}$ C)						
	30	50	100	150	200	250	300
1	2.4×10^{-4}	2.9×10^{-4}	3.5×10^{-4}	4.0×10^{-4}	5.1×10^{-4}	7.7×10^{-4}	8.1×10^{-4}
2	4.4×10^{-4}	4.6×10^{-4}	4.9×10^{-4}	5.2×10^{-4}	5.9×10^{-4}	8.0×10^{-4}	8.9×10^{-4}
3	9.8×10^{-3}	9.9×10^{-3}	2.5×10^{-2}	4.5×10^{-2}	5.7×10^{-2}	7.8×10^{-2}	9.1×10^{-2}
4	1.0×10^{-1}	1.1×10^{-1}	3.2×10^{-1}	4.5×10^{-1}	5.1×10^{-1}	6.8×10^{-1}	8.0×10^{-1}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษาวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกระดาศนวนน้ำมันที่ทำงานที่แรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิที่แตกต่างกันตามสภาพแวดล้อมของประเทศเขตร้อน การวิเคราะห์อาศัยการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เป็นหลัก เมื่ออุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ความเป็นฉนวนของฉนวนเริ่มลดลงตามหลักการของกระบวนการโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน กระแสไฟฟ้าภายในฉนวนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการทำงานเพิ่มขึ้น สิ่งนี้ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพไดอิเล็กทริกของกระดาศนวนน้ำมันในหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ปัญหาสามารถป้องกันได้โดยใช้กระดาศนวนน้ำมันหม้อแปลงที่หนาขึ้น หรือโดยการวางกระดาศนวนหลายชั้นหากทราบแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ต้องการใช้งานแน่นอน

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัย

1. ควรมีการระบุอุณหภูมิสภาพแวดล้อมสูงสุดของบริเวณใช้งานให้มีความละเอียดมากขึ้น เพื่อหาจุดที่เหมาะสมของการออกแบบฉนวนกระดาศภายในน้ำมันหม้อแปลง ซึ่งจะเป็นประโยชน์และองค์ความรู้ต่อโรงงานผู้ผลิตหม้อแปลงภายในประเทศได้อีกเป็นอย่างมาก
2. ควรมีการจำลองกรณีศึกษาด้วยระยะเวลาที่มากกว่านี้ เพื่อให้เห็นผลการทดสอบของเพอร์สอร์คที่เสื่อมสภาพจากการจำลองสภาพใช้งานจริง จะเป็นประโยชน์ต่อการวินิจฉัยหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในพื้นที่เขตร้อน และเป็นการพัฒนาองค์ความรู้ให้กับนักวิจัย
3. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับคุณสมบัติของฉนวนที่หลากหลายชนิดมากขึ้นที่ใช้จำลองในการศึกษานี้ เพื่อสามารถเป็นข้อมูลจำเป็นสำหรับการออกแบบได้ละเอียดยิ่งขึ้นสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้พื้นที่เขตร้อน
4. ควรมีการศึกษาคงสมบัติทางเคมีฟิสิกส์เพิ่มเติม เพื่อให้เข้าใจกลไกการเสื่อมสภาพของกระดาศนวนน้ำมันอย่างถูกต้อง เพราะผลการจำลองการทดสอบทางไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ คือผลตอบสนองจากคุณสมบัติเคมีฟิสิกส์ที่เปลี่ยนไปซึ่งอ้างอิงจากทฤษฎี
5. ควรมีการทดลองจริงเพื่อยืนยันผลการจำลองการทดสอบสภาพความเป็นฉนวนของกระดาศนวนน้ำมันด้วยกระบวนการโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันด้วยชุดทดสอบที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3 เพื่อสนับสนุนผลการจำลองการทดสอบของงานวิจัยฉบับนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Y. Perkasa, N. Lelekakis, T. Czaszejko, J. Wijaya and D. Martin. 2014. "A Comparison of the Formation of Bubbles and Water Droplets in Vegetable and Mineral Oil Impregnated Transformer Paper," in **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**. vol. 21, no. 5, pp. 2111-2118.
- [2] F. Vahidi, S. Haegele and S. Tenbohlen. 2017. "A Comparison of Oil-Impregnated Pressboard Electrical Conductivity Behavior for Two Different High Density Pressboards," **2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)**. Manchester. UK. pp. 1-4.
- [3] L. Cui, W. Chen, A. S. Vaughan, B. Xie, J. Li and Z. Long. 2017. "Comparative Analysis of Air-gap PD Characteristics: Vegetable Oil/Pressboard and Mineral Oil/Pressboard," in **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, vol. 24, no. 1, pp. 137-146.
- [4] D. Liu, Y. Zhao and X. Chen. 2020. "Electrical Characteristics of Cellulose Pressboard Modified by Nano-TiO₂ in Mineral and Vegetable Mixed Oil," **2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)**, Beijing, China, pp. 1-4.
- [5] Y. Wang, R. Fei, M. Gao and J. Shang. 2020. "Analysis of SEM Characteristics of Transformer Oil-immersed Insulation Pressboard before and after Thermal Aging," **2020 IEEE 9th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC)**, Chongqing, China, pp. 1248-1251.
- [6] นรเศรษฐ พัฒนเดช. 2557. **วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า (เล่มที่ 1) ฉนวนและวัสดุฉนวนไฟฟ้า Electrical Engineering Materials**. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: ห้างหุ้นส่วนจำกัด มีนเซอร์วิส ซัพพลาย.
- [7] CIGRE A2/D1.41, "HVDC Transformer Insulation: Oil Conductivity," **CIGRE Report**, pp. 88-90, 2016.
- [8] สำรวย สังข์สะอาด. 2549. **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์.
- [9] N. Boonsaner, N. Panoon, P. Chancharoensook, N. Pattanadech, "Test Chamber Designed with Temperature Control for Partial Discharge and Polarization and

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Depolarization Current Testing,” 2020 CMD 8th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, November 2021.

- [10] IEC 60243-1, Edition 3.0-2013, Electric strength of insulating materials – Test methods – Part 1: Tests at power frequencies.
- [11] IEC 60060-1, Edition 3.0-2010, High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements.
- [12] IEC 60243-3, Edition 3.0-2013, Electric strength of insulating materials – Test methods – Part 3: Additional requirements for 1,2/50 μ s impulse tests.
- [13] พัชรี ทองอินต๊ะ. 2559. “การวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูงโดยวิธีการวัดกระแสโพลาร์ไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาร์ไรซ์เซชัน,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [14] A. J. Kuechler, T. Leibfried, B. Breitenbauch, J. J. Alff, V. D. Houhanessian, and W. S. Zaengl, "Transformer Insulation Diagnosis by Polarization and Depolarization Current Analysis," in 48 International Wissenschaftliches Kolloquium Technische Universität Ilmenau, 2003, pp.161-167
- [15] 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, June 2019.
- [16] S. A. Bhumiwat, “Application of Polarisation Depolarisation Current (PDC) technique on fault and trouble analysis of stator insulation,” Cigre Sc A1 & D1 Joint Colloquim, October 24, 2007, pp. 79-87.




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก
บทความวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 
- [1] C. Rakkaphan, N. Boonsaner, N. Pattanadech and P. Chancharoensook, "Analysis of electrical insulation paper by Simulation for analyze Polarization and Depolarization current testing method" The 9th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST 2023) , Vientiane, Lao, pp. 168-172.

2023 9th International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST 2023)

Vientiane, Laos
1-4 June 2023



IEEE Catalog Number: CFP23O99-POD
ISBN: 979-8-3503-2205-7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Analysis of electrical insulation paper by Simulation for analyze Polarization and Depolarization current testing method

1st Chananut Rakkaphan
Electrical Engineering
Dept., School of
Engineering
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
chananut2013@gmail.com

2nd Nutthaphan Boonsaner
Electrical Engineering
Dept., School of
Engineering
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
nut_work8@hotmail.com

3rd Norasage Pattanadech
Electrical Engineering
Dept., School of
Engineering
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
norasage@yahoo.com

4th Phop Chancharoensook
Electrical Engineering
Dept., School of
Engineering
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
kcphop@kmitl.ac.th

Abstract— This paper presents the quality analysis of insulation paper in distribution transformer oil in Thailand. The country locates in tropical zone and therefore experiences relatively high temperature. Analytical principles based on polarization and depolarization current method with various test conditions are used. Computer simulation can help to analyze the efficiency of insulation paper in transformer oil under different voltages and temperatures. The tested system consists of an electrode inside a high-temperature and high-voltage control cabinet. It can be concluded that increasing temperature has a marginal effect on the electric field stress of the electrode. However, the rising temperature significantly affects the polarization current that flows through the insulators. The results can indicate the limitation of using oil insulation paper and how to improve the quality of it.

Keywords— transformer oil, insulation paper, polarization and depolarization current, electric field stress, dielectric strength

I. INTRODUCTION

This research studies the quality analysis of insulation paper in transformer oil of distribution transformer system. Analytical principles based on polarization and depolarization current method with various test conditions are used. The electrode to be tested is designed according [1]. It is tested in a high temperature cabinet that can continuously heat and maintain the system temperature. The researcher designed the test condition in accordance with the design of the distribution transformer that using insulation paper that used for insulation between layers of high-voltage windings of distribution transformers. It will focus on studying the temperature and voltage used in Thailand, as well as studying the case of abnormally high temperature of distribution transformers by supplying voltage to electrode with various values as well as controlling the test temperature from ambient temperature (Ambient Temp: 30 °C), 50 (°C), 100 (°C), 150 (°C) to 300 (°C), the researcher will simulate experiment of transformer oil and insulation paper inside the transformer oil which the parameters for testing will refer to the information of the transformer paper insulation that is actually used in Thailand which produced by a private transformer company in the eastern region of Thailand. After the researcher conducted a simulation experiment using both types of insulation, the simulation

results were analyzed to observe the behavior of the electric field stress and current in each type of insulation, that vary with voltage and temperature. After this research, the researcher will carry out the simulation model designed in the next real experiment by creating an electrode and a high-temperature and high-voltage control cabinet. But at present, it's still being tested for the efficiency of the supply and continuously maintain high temperature as shown in figure 1.

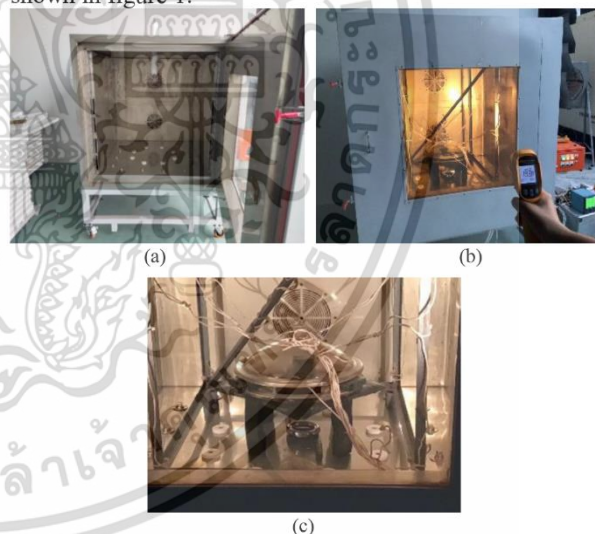


Fig. 1. (a) High-temperature and high-voltage control cabinet (b) Cabinet heat dissipation test overview (c) Cabinet heat dissipation test

II. THEORY

A. Polarization and Depolarization Method

When applying a DC voltage to an insulator or dielectric as shown in Figure 2, where the magnitude of the voltage cannot cause the insulation to break down. Insulating molecules react to an external electric field, which will cause “Polarization process” takes place inside the insulator.

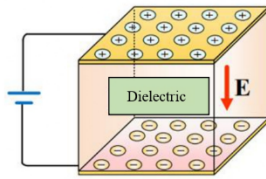


Fig. 2 Voltage input to insulators [2]

When the DC voltage is applied to the insulation for a long time sufficient to polarize the insulation and the magnitude of the input voltage is insufficient to cause the insulation to break down, the insulation will polarize to respond to external electric fields and when the insulator is polarized, it will cause current to flow through the insulator. The current that occurs while applying voltage to this insulator is “Polarization current”.

$$i_{pol(paractical)} = i_c + i_{ab} + i_{con} + i_l \quad (1)$$

$$i_{con(paractical)} = i_{con} + i_l \quad (2)$$

The polarization current can theoretically be written as equation (3).

$$i_{pol} = C_0 V_0 + \left[\frac{\sigma_0}{\epsilon_0} + \epsilon_\infty \delta(t) + f(t) \right] \quad (3)$$

After that, when the voltage is stopped and the insulator is short-circuited, the insulator is discharged to the ground molecules and the electric charge inside the insulator will rearrange to normal before the electric field acts. The discharge current measured while short-circuited the insulator is called depolarization current (depolarization current; i_{depol})

$$i_{depol(paractical)} = i_{e(discharge)} + i_{ab(discharge)} \quad (4)$$

$$i_{depol}(t) = -C_0 V_0 + [f(t) - f(t+T_c)] \quad (5)$$

T_c is the time that voltage is applied to the test object [3]

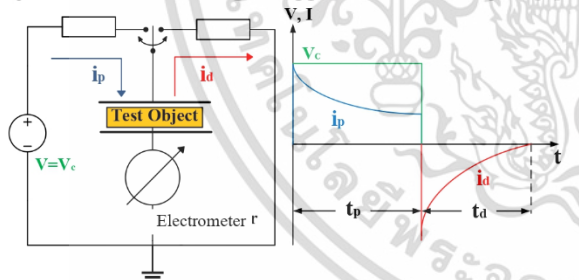


Fig. 3 PDC measurement circuit and principle of polarization and depolarization current measurement [3].

B. The Relation between Temperature and PDC method

Theoretically, an increase in the insulating temperature will result in both higher polarization and depolarization currents because as the temperature rises, the energy of the free electrons within the insulating material increases, as the reason allows the high-energy free electrons within the insulator at high temperatures can travel under electric fields easier. So it causes polarization and depolarization currents increase with electron density

III. EXPERIMENTAL DETAIL

A. Electrode design

The design of the electrode to be tested will be designed dimensions and curvature according to CIEGRE A2/D1.41 standards [1] as shown in Figure 4. Then it will

be tested in a temperature controlled cabinet that can continuously heat and maintain the electrode temperature. In this test, the researchers placed the electrode in a cabinet where the input voltage was designed to be applied to the bottom of the electrode and grounded at the top of the electrode as shown in Fig 5 to obtain a clearance distance of high voltage that will not cause flashover between the electrode and the temperature control cabinet as shown in Fig 6 because the researcher foresees that PDC process is a process Tests that take quite a long time to test make researchers apply simulation used to assist in the analysis.

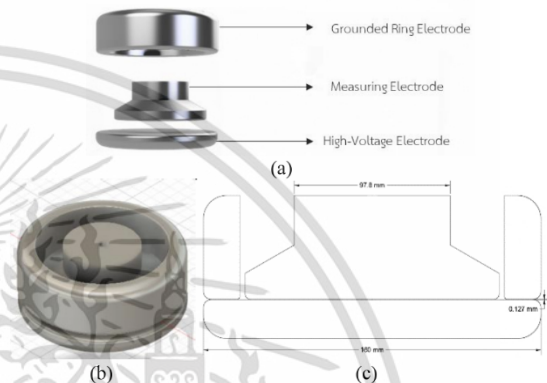


Fig. 4 Electrode 3D model for PDC simulation (a) electrode detail drawing (b) electrode (c) design distance of electrode according to [1]



Fig. 5 Test cell voltage leads run at the bottom and grounded at the top.

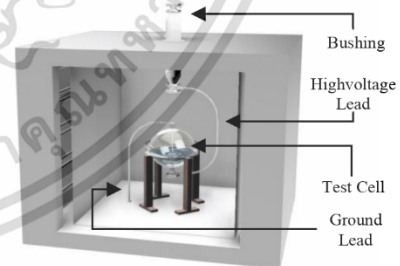
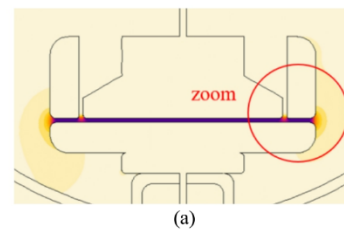


Fig. 6 A system designed for testing PDC processes.

Researcher test the electric field uniformity of the designed electrode according to [1] at a test voltage of 100 V, the uniformity is shown in Fig 7.



ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

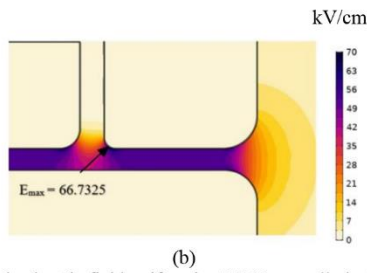


Fig. 7 Electrode electric field uniformity [4] (a) overall electric field (b) zoom in the maximum electric field

B. Method design and simulation model

The researcher has designed the simulation by supplying electricity to the electrode with various voltages ranging from 1 kV, 2 kV, 3 kV and 4 kV, as well as controlling the test temperature from ambient temperature (Ambient Temp: 30 (°C)), 50(°C), then gradually increase in increments of 50(°C) to 300(°C) based on [5] as shown in Table 1. The researcher will simulate using transformer oil and insulation paper inside the transformer oil with 0.127 mm thickness that used for insulation between layers of high-voltage windings of distribution transformers [6]. The test parameters are based on data of actual transformer paper insulation used in transformers manufactured by private transformer company in the eastern part of Thailand as shown in Figure 8. The researcher has been internship at this company for 3 months.

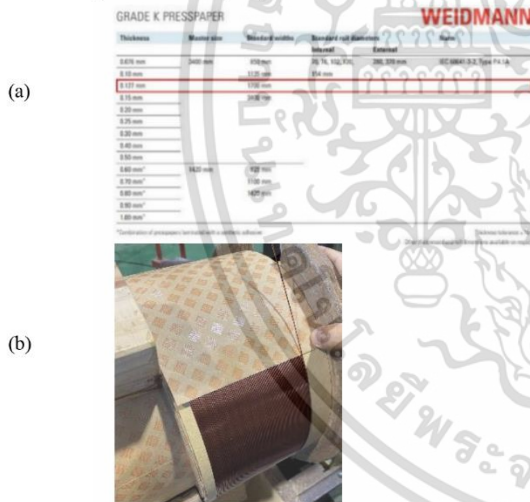


Fig. 8 (a) Parameters of transformer insulation paper (b) Actual transformer oil insulation paper application picture between layers of high voltage winding.

TABLE I. SIMULATION MODEL OF VARIOUS TYPES OF INSULATING ELECTRODES

Voltage (kV)	1	2	3	4
Temp (°C)	Ambient Temp (30)	Ambient Temp (30)	Ambient Temp (30)	Ambient Temp (30)
	50	50	50	50
	100	100	100	100
	150	150	150	150
	200	200	200	200
	250	250	250	250
	300	300	300	300

IV. COMPUTER SIMULATION RESULTS

A. Simulation results

Both types of insulators were performed computer simulation. The simulated results were analyzed [7] to observe the behavior of the electric field stress and current within each insulator by varying voltage and temperature. It can be seen that the electric field stress and current within insulator of the transformer oil are greater than those of the the oil insulation paper. These are clearly shown in Figure 9 to Figure 16. The values of the electric field stress and current within insulator (polarization current) are tabulated in the next section.

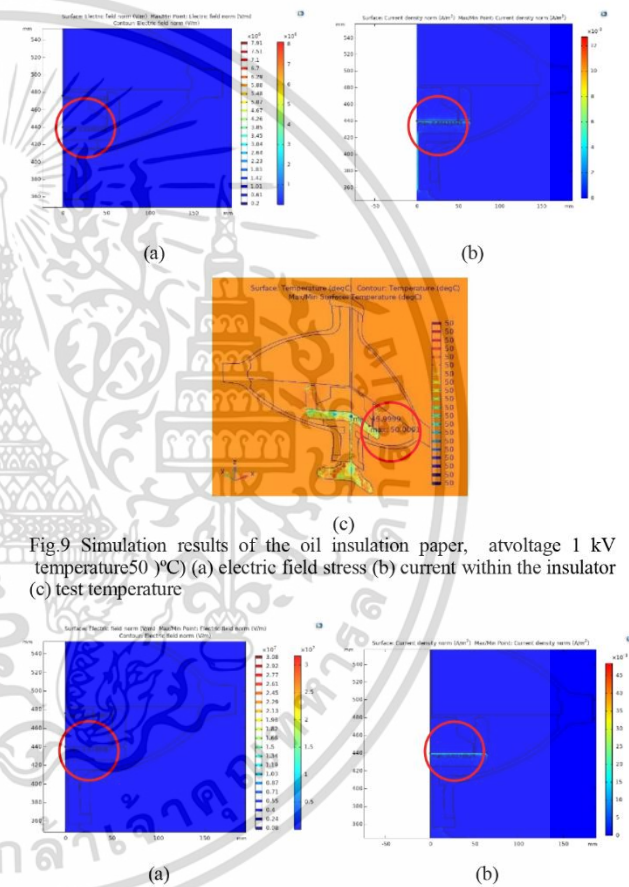


Fig.9 Simulation results of the oil insulation paper, atvoltage 1 kV temperature50 °C (a) electric field stress (b) current within the insulator (c) test temperature

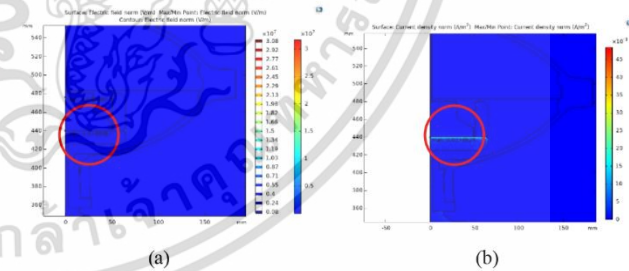


Fig. 10 Simulation results of the oil insulation paper, at voltage 4 kV temperature 50 (°C) (a) electric field stress (b) current within the insulator (c) test temperature

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

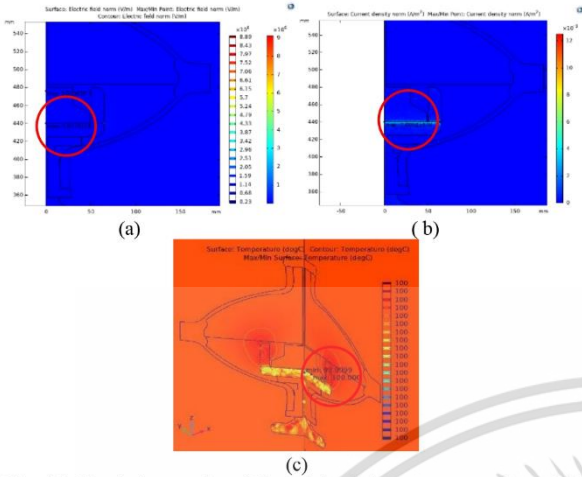


Fig. 11 Simulation results of the oil insulation paper, at voltage 1 kV temperature 100 (°C) (a) electric field stress (b) current within the insulator (c) test temperature

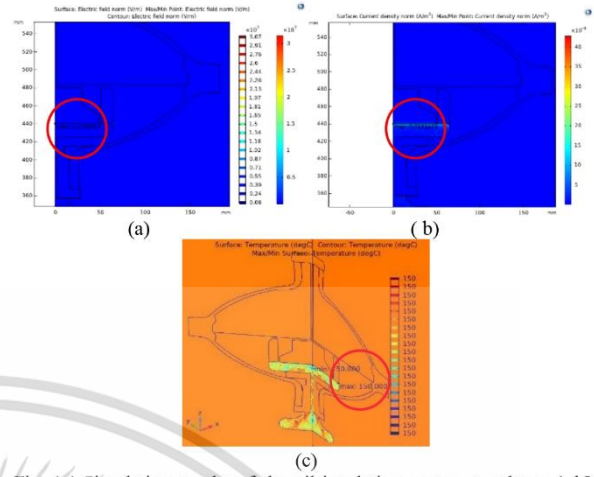


Fig. 14 Simulation results of the oil insulation paper, at voltage 4 kV temperature 150 (°C) (a) electric field stress (b) current within the insulator (c) test temperature

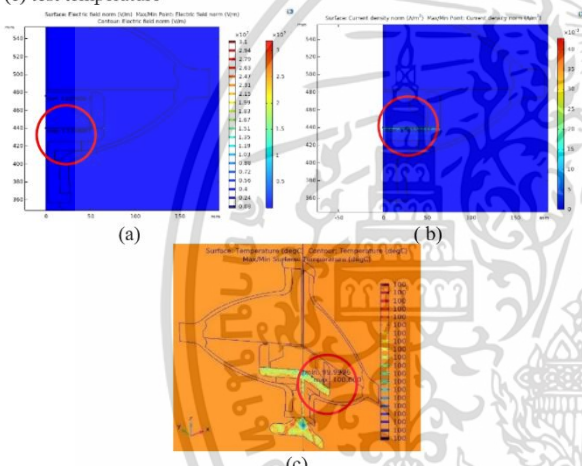


Fig. 12 Simulation results of the oil insulation paper, at voltage 4 kV temperature 100 (°C) (a) electric field stress (b) current within the insulator (c) test temperature

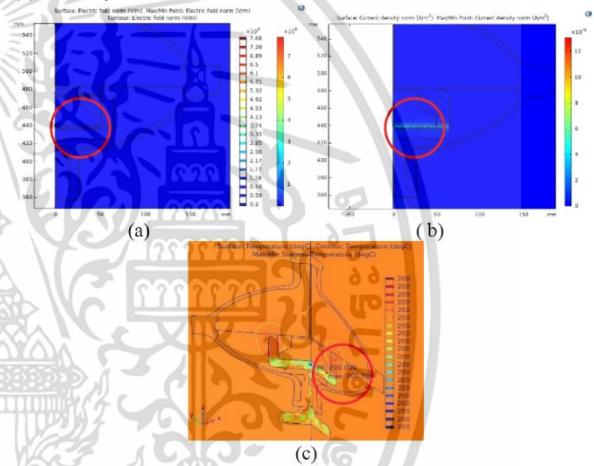


Fig. 15 Simulation results of the oil insulation paper, at voltage 1 kV temperature 200 (°C) (a) electric field stress (b) current within the insulator (c) test temperature

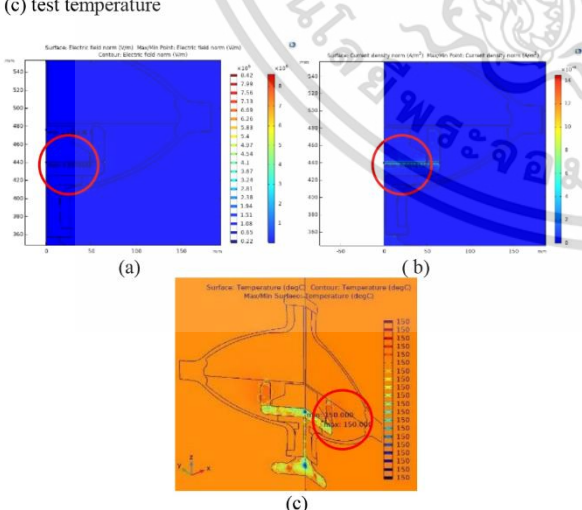


Fig. 13 Simulation results of the oil insulation paper, at voltage 1 kV temperature 150 (°C) (a) electric field stress (b) current within the insulator (c) test temperature

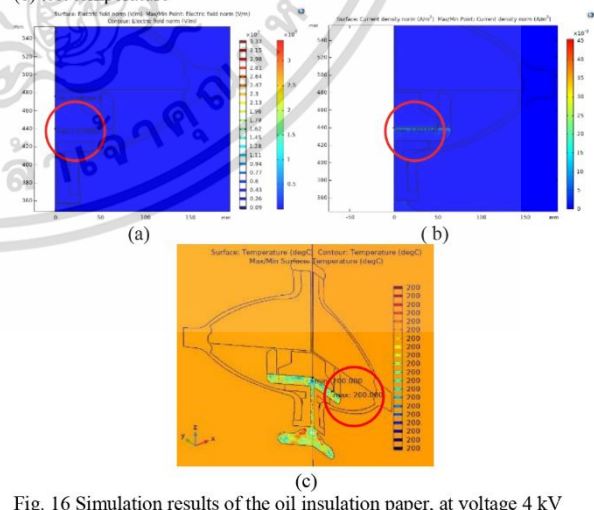


Fig. 16 Simulation results of the oil insulation paper, at voltage 4 kV temperature 200 (°C) (a) electric field stress (b) current within the insulator (c) test temperature

B. Tabulated Results

Electrode maximum electric field stress at different temperature and voltage of the transformer oil-insulation paper are shown in Table 2. Accordingly, the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

values of current within the insulator or polarization current at different temperatures and voltages are shown in Table 3. The highlighted fields are the simulation results from the previous section.

TABLE II. MAXIMUM ELECTRIC FIELD STRESS (E_{max}) AT VARIOUS TEMPERATURE CONTROLLED OF PAPER WITH OIL INSULATION

Voltage (kV)	Maximum Electric Field Stress (E_{max})(V/m)						
	Controlled Temp ($^{\circ}$ C)						
	30	50	100	150	200	250	300
1	3.9x10 ⁶	3.9x10 ⁶	3.9x10 ⁶	3.9x10 ⁶	3.9x10 ⁶	3.9x10 ⁶	3.9x10 ⁶
2	7.9x10 ⁶	7.9x10 ⁶	7.9x10 ⁶	7.9x10 ⁶	7.9x10 ⁶	7.9x10 ⁶	7.9x10 ⁶
3	1.2x10 ⁷	1.2x10 ⁷	1.2x10 ⁷	1.2x10 ⁷	1.2x10 ⁷	1.2x10 ⁷	1.2x10 ⁷
4	1.6x10 ⁷	1.6x10 ⁷	1.6x10 ⁷	1.6x10 ⁷	1.6x10 ⁷	1.6x10 ⁷	1.6x10 ⁷

TABLE III. MAXIMUM POLARIZATION CURRENT (I_{POL}) AT VARIOUS TEMPERATURE CONTROLLED OF PAPER WITH OIL INSULATION

Voltage (kV)	Maximum Polarization Current (I_{POL}) (A/m ²)						
	Controlled Temp ($^{\circ}$ C)						
	30	50	100	150	200	250	300
1	2.4x10 ⁻⁴	2.9x10 ⁻⁴	3.5x10 ⁻⁴	4.0x10 ⁻⁴	5.1x10 ⁻⁴	7.7x10 ⁻⁴	8.1x10 ⁻⁴
2	4.4x10 ⁻⁴	4.6x10 ⁻⁴	4.9x10 ⁻⁴	5.2x10 ⁻⁴	5.9x10 ⁻⁴	8.0x10 ⁻⁴	8.9x10 ⁻⁴
3	9.8x10 ⁻³	9.9x10 ⁻³	2.5x10 ⁻²	4.5x10 ⁻²	5.7x10 ⁻²	7.8x10 ⁻²	9.1x10 ⁻²
4	1.0x10 ⁻¹	1.1x10 ⁻¹	3.2x10 ⁻¹	4.5x10 ⁻¹	5.1x10 ⁻¹	6.8x10 ⁻¹	8.0x10 ⁻¹

V. CONCLUSION

This paper presents a method for analyzing the performance of oil insulation paper operating at different voltages and temperatures according to the environment of tropical countries. The analysis is mainly based on computer simulation. When the temperature and voltage rise, the dielectric strength of the insulators begin to decline corresponding to the principle of polarization and depolarization process. The current inside the insulator increases as the operating temperature increases. This significantly affects the dielectric efficiency of the oil insulation paper in distribution transformers. The problem can be prevented by using thicker transformer oil insulation paper or by stacking the insulation paper in multi-layers if the exact voltage and temperature are known.

ACKNOWLEDGMENT

This work was conceptualized and supported by Kittiphot Athphatpong, KASIDIS MARINJHON, PITCHAYA SIANGSAI and KIATTISAK VONGPHANICH from the Department of Electrical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. Their insights and expertise greatly aid this research. Technical support from a transformer manufacturing company in the eastern region of Thailand is gratefully acknowledged.

REFERENCES

- [1] CIGRE A2/D1.41, "HVDC Transformer Insulation: Oil Conductivity", CIGRE Report, pp. 88-90, 2016.
- [2] K. Chi Kao, Dielectric Phenomena in Solids, 1 st Ed., Academic Press, 2004.
- [3] J. Siritworachanyadee, 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.
- [4] S. A. Bhumiwat, "Application of Polarization Depolarisation Current (PDC) technique on fault and trouble analysis of stator insulation," Cigre Sc A1 & D1 Joint Colloquium, October 24, 2007, pp. 79-87.
- [5] N. F. Kasri, M. A. M. Piah, A. A. Suleiman, N. A. M. Jamail, N. Bashir and N. A. Muhamad, "Design of HV switching for polarization & depolarization current measurement," 2013 IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), Langkawi, Malaysia, 2013.
- [6] Y. Li, Q. Zhang, Y. Zhao, T. Wang, G. Liu and K. Wang, "The influence of temperature on Partial Discharges and wormhole effect of oil-paper insulation under DC voltage," 2017 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Baltimore, MD, 2017.
- [7] J. Siritworachanyadee, 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, June 2019.
- [8] Standard Specification for Mineral Insulating Oil Used In Electrical Apparatus, ASTM D 3487-09.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายชานนตรี รักษาพันธ์
วัน เดือน ปีเกิด	3 ตุลาคม 2540 ที่สงขลา
ที่อยู่	500/29 ม.1 ถ.ฐานอุดมอนุสรณ์ ต.ควนลัง อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110
ประวัติการศึกษา	2563 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) การ Simulation ด้วยโปรแกรมเฉพาะทางไฟฟ้า 2.) การขึ้นแบบจำลองสามมิติ
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย	
พ.ศ. 2563	งานประชุมวิชาการ ICPEI2019 ชลบุรี - การออกแบบฮาร์ดแวร์เพื่อปรับปรุงค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของชิงโครนัสเจนเนอเรเตอร์ในโรงงานผลิตน้ำตาล
พ.ศ. 2563	ปฏิบัติงานในโครงการ อว.สร้างงาน และ ได้รับพัฒนาทักษะในการทำงานในด้านต่างๆ เพื่อต่อยอดเป็นพื้นฐานในการประกอบอาชีพต่อไป ระหว่างวันที่ 1 มิถุนายน พ.ศ. 2563 ถึงวันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2563
พ.ศ.2564-พ.ศ.2565	ปฏิบัติงานที่บริษัท Prime Road Power ในตำแหน่ง Project Manager รับผิดชอบงานในส่วนของการบริหารจัดการโครงการติดตั้ง Solar Rooftop ภายในประเทศไทย
พ.ศ.2565-ปัจจุบัน	ปฏิบัติงานให้กับหน่วยงานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สังกัดการไฟฟ้าเขต 3 ภาคใต้ ประจำอยู่สำนักงานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสาขาอำเภอนาหม่อม จังหวัดสงขลา
พ.ศ.2566	งานประชุมวิชาการ ICEAST 2023 นครหลวงเวียงจันทน์ ประเทศลาว - การวิเคราะห์ฉนวนกระดาศในหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้วิธีการชิมูเลชั่นเพื่อวิเคราะห์ด้วยกระบวนการตรวจสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้