

การออกแบบและประกอบสร้างชุดทดสอบทางไฟฟ้าของฉนวนเหลว
Design and Assembly Electrical Test Cell for Liquid Insulators



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

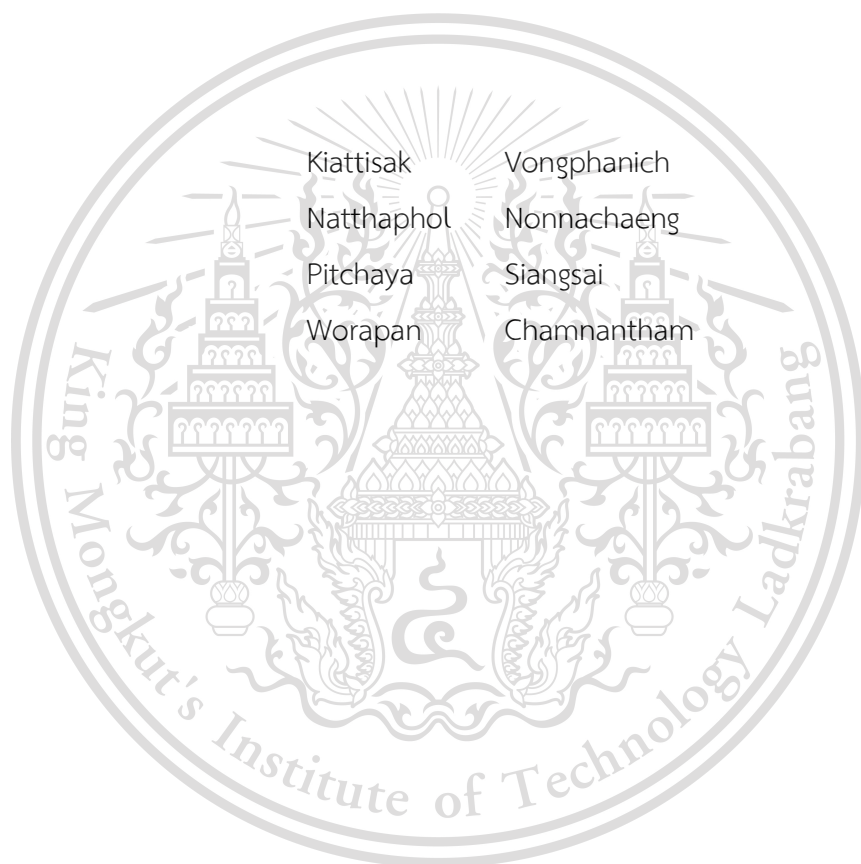
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาปีการศึกษา 2563 ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Design and Assembly Electrical Test Cell for Liquid Insulators



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึ๒02๐เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาปีการศึกษา 2563 ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การออกแบบและประกอบสร้างชุดทดสอบทางไฟฟ้าของฉนวนเหลว
Design and Assembly Electrical Test Cell for Liquid Insulators



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. ดร.ธีรยศ เวียงทอง

รศ. ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2563

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

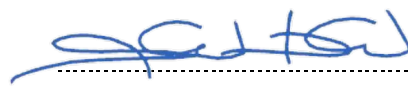
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง


เรื่อง การออกแบบและประกอบสร้างชุดทดสอบทางไฟฟ้าของฉนวนเหลว

ผู้จัดทำ

1. นายเกียรติศักดิ์ วงศ์พานิช
2. นายณัฐพล โนนนาแซง
3. นางสาวพิชญา เสียงใส
4. นางสาววรพรรณ ชำนาญธรรม




..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์. ดร. ชีรยศ เวียงทอง)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์. ดร. นรเศรษฐ์ พัฒนเดช)
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การออกแบบและประกอบสร้างชุดทดสอบทางไฟฟ้าของฉนวนเหลว

นายเกียรติศักดิ์ วงศ์พานิช

นายณัฐพล โนนนาแซง

นางสาวพิชญา เสี่ยงใส

นางสาววรรณ ขำนาถธรรม

ผศ. ดร.ธีรยศ เวียงทอง อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ปีการศึกษา 2563

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและประกอบสร้างชุดทดสอบทางไฟฟ้าของฉนวนเหลว ซึ่งชุดทดสอบและวิธีการทดสอบฉนวนสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในงานด้านไฟฟ้าแรงดันสูงมีอยู่มากมายในปัจจุบัน เช่น การทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงด้วยวิธีการ dielectric breakdown testing เป็นต้น แต่ในหลายวิธีการยังไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบได้ ซึ่งอุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของฉนวน ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ จะกล่าวถึงการออกแบบอุปกรณ์ทดสอบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและจ่ายแรงดันสูงได้ โดยออกแบบอุปกรณ์ทดสอบ คำนึงจากผลการจำลองของความเครียดสนามไฟฟ้าและการกระจายของอุณหภูมิภายในตู้ ซึ่งจะช่วยให้การออกแบบตู้ทดสอบทำได้ง่ายขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Design and Assembly Electrical Test Cell for Liquid Insulators

Kiattisak Vongphanich

Natthaphol Nonnachaeng

Pitchaya Siangsai

Worapan Chamnantham

Assistant. Prof. Dr. Theerayod Wiangtong Advisor

Associate. Prof. Dr. Norasage Pattanadech Co Advisor

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to design and assembly the electrical test cell for liquid insulators. There are several methods and test kits available for insulation testing in high-voltage equipment such as dielectric breakdown testing, etc., Despite that, but many methods are unable to control the Test temperature where the temperature is one of the factors affecting the degradation of the insulation. Therefore, this thesis discusses the design of test equipment capable of controlling temperature and supplying high-voltage electricity based on the simulation results of electric field stress and heat transfer inside the oven.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

||

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ผศ. ดร. ธีระยศ เวียงทอง และรองศาสตราจารย์ ดร. นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการ มาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจสอบ และชี้จุดบกพร่องจนนำไปสู่การแก้ไขปริญญาานิพนธ์นี้ จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ บริษัท ไทยทราโพนิวแมทแพคเจอร์ริง จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการจัดหา น้ำมันหม้อที่จะนำมาใช้ในการทดสอบ ขอขอบคุณ บริษัท ไทยโพลีเมอร์ ซัพพลาย จำกัด ที่ได้ให้ คำปรึกษาเรื่องวัสดุต่าง ๆ ที่เหมาะสมแก่การใช้เป็นฉนวนความร้อนและฉนวนไฟฟ้า ตลอดจนการให้ ส่วนลดในการจัดสร้างอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในตู้ และขอขอบคุณ บริษัทซีเอสเอส-เอเชีย จำกัด ที่ได้ให้ คำปรึกษาและคำแนะนำในการจัดทำตู้อบความร้อน ตลอดจนการให้ส่วนลดในการจัดทำด้วย

ขอขอบคุณกษิติศ มาอินจร และคุณชนาณัติ รักขพันธ์ พี่ๆ ป.โท ที่ให้ความช่วยเหลือและ แก้ปัญหาในการทดสอบด้วยดีมาโดยตลอด

นอกจากนี้ผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้เปิดใช้เครื่องมือ ตลอดจนคุณกมลวรรณเจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเบิกใบเสร็จของโครงการ

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจอีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VI
สารบัญตาราง	IX

บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 แผนการดำเนินงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ความเครียดสนามไฟฟ้าและความคงทนของฉนวน	3
2.2 ลักษณะการเกิดเบรกดาวน์ในแก๊ส	7
2.3 ฉนวนเหลวและฉนวนแข็ง	9
2.4 กลไกของการถ่ายเทความร้อน (Mechanism of heat transfer)	14
2.5 ผลกระทบจากความหนืดในการระบายความร้อนภายในหม้อแปลง	21
บทที่ 3 การออกแบบและจำลองการทดลอง	23
3.1 การออกแบบชุดควบคุมอุณหภูมิสำหรับการทดสอบฉนวนเหลว	23
3.2 ผลการจำลอง	26
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	47
4.1 การทดสอบการกระจายความร้อนของตู้ควบคุมอุณหภูมิ	47
4.2 การทดลองเพื่อวัดกระแสตามผิวของกระดาษที่แช่น้ำมัน	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	52
5.1 สรุปผลการทดลอง	52
5.2 ปัญหาและอุปสรรค	52
5.3 ข้อเสนอในการพัฒนาต่อ	53

เอกสารอ้างอิง

ภาคผนวก

ประวัติผู้เขียน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 อิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่าง ๆ กัน	4
2.2 อิเล็กโทรดชนิดภายนอก	6
2.3 หยอดลูกกลมเจือปนในฉนวนเหลวซิลิโคน	10
2.4 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า E_b แปรไปตามช่วงเวลาที่ป้อนแรงดัน	11
2.5 ลักษณะที่ดิสชาร์จเบรกดาวน์แบบรากไม้ระหว่างอิเล็กโทรดปลายแหลมกับระนาบ	12
2.6 ผลของอุณหภูมิที่มีต่ออายุการใช้งานทางกลของฉนวนกระดาษ	13
2.7 ฉนวนมีโพรงแก้ว	14
2.8 รูปแบบการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นโดยการนำ การพา และการแผ่รังสี	14
2.9 การนำความร้อนของสารที่สถานะแตกต่างกัน	16
2.10 ช่วงของสภาพการนำความร้อนสำหรับสถานะต่าง ๆ ของสารที่อุณหภูมิและความดันปกติ	18
2.11 ค่าการนำความร้อนที่แปรตามอุณหภูมิของสารบางชนิด	18
2.12 การพัฒนาชั้นขอบเขตในการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนแบบบังคับ	19
3.1 ชุดควบคุมอุณหภูมิสำหรับการทดสอบฉนวนเหลว	23
3.1 แบบ 3 มิติประกอบสำเร็จของชุดเซลล์ทดสอบ	23
3.2 แบบ 2 มิติของอิเล็กโทรด	24
3.3 แบบ 3 มิติของอิเล็กโทรด	24
3.4 แบบ 3 มิติของชุดทดสอบ (Chamber)	25
3.5 แบบ 3 มิติของตู้ควบคุมอุณหภูมิ	25
3.6 ขณะทำการพิมพ์แบบจำลองชุดเซลล์ทดสอบด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ	26
3.7 แบบจำลอง 3 มิติของอิเล็กโทรด	26
3.8 แบบจำลอง 3 มิติของชุดทดสอบ (Chamber)	27
3.10 ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศที่ระดับแรงดัน 0 kV	28
3.11 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศ	29
3.12 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศที่ระดับแรงดัน 10 kV	29
3.13 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศที่ระดับแรงดัน 20 kV	30
3.14 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศที่ระดับแรงดัน 30 kV	30
3.15 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศที่ระดับแรงดัน 40 kV	31
3.16 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนน้ำมันที่ระดับแรงดัน 0 kV	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์ผู้สอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ห้ามทำซ้ำหรือดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงแหล่งที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนน้ำมันที่ระดับแรงดัน 10 kV	32
3.18 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนน้ำมันที่ระดับแรงดัน 20 kV	32
3.19 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนน้ำมันที่ระดับแรงดัน 30 kV	33
3.20 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนน้ำมันที่ระดับแรงดัน 40 kV	33
3.21 การจำลองการกระจายความร้อนในอากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	34
3.22 การจำลองการกระจายความร้อนในอากาศที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	35
3.23 การจำลองการกระจายความร้อนในอากาศที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส	35
3.24 การจำลองการกระจายความร้อนในอากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส	36
3.25 การจำลองการกระจายความร้อนในอากาศที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส	36
3.26 การจำลองการกระจายความร้อนในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	37
3.27 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวน Mineral Oil ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	37
3.28 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวน Mineral Oil ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	38
3.29 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวน Mineral Oil ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส	38
3.30 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวน Mineral Oil ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส	39
3.31 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวน Mineral Oil ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส	39
3.32 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวน Mineral Oil ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	40
3.33 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวนชนิด FR3 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	40
3.34 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวนชนิด FR3 ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	41
3.35 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวนชนิด FR3 ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.46 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวนชนิด FR3 ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส	42
3.47 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวนชนิด FR3 ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส	42
3.48 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวนชนิด FR3 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	43
3.49 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวน Silicone Oil ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	43
3.50 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวน Silicone Oil ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	44
3.51 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวน Silicone Oil ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส	44
3.52 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวน Silicone Oil ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส	45
3.53 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวน Silicone Oil ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส	45
3.54 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวน Silicone Oil ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	46
4.1 ตำแหน่งติดตั้ง Thermocouple ทั้ง 10 จุด	47
4.2 ขณะทำการติดตั้ง Thermocouple	49
4.3 ขณะติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลอง	49
4.4 วงจรการทดลองเพื่อวัดกระแสรั่วไหลตามผิวของกระดาศที่แช่ในน้ำมัน	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของวัสดุฉนวน ขึ้นอยู่กับแพกเตอร์ต่าง ๆ	5
2.2 ลักษณะดีสชาร์จเบรกดาวนในแกป	7
2.3 ค่าการนำความร้อนของสารบางชนิด	16
2.4 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลบางชนิด	19
3.1 ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศและฉนวนน้ำมัน	34
4.1 เวลาที่เข้าสู่อุณหภูมิตั้งค่าที่ตำแหน่งหมายเลข 1-10	48
4.2 กระแสรั่วไหลตามผิวของกระดาศที่แช่ในน้ำมัน	50
5.1 เปรียบเทียบเวลาที่อุณหภูมิของตู้และอิเล็กทรอนิกส์เข้าสู่ 300 องศาเซลเซียส ระหว่างการจำลองผลการทดลอง และผลการทดลองจริง	52



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีการใช้งานหม้อแปลงในการเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นหรือต่ำลงเพื่อส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังผู้บริโภค หม้อแปลงจึงจัดเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญต่อระบบไฟฟ้าเป็นอย่างมาก ส่วนประกอบหลักที่สำคัญของหม้อแปลงประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ แกนเหล็ก ขดลวดตัวนำ และฉนวน โดยฉนวนที่ถูกใช้งานภายในหม้อแปลงแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ การใช้ฉนวนแข็งร่วมกับฉนวนแก๊สและการใช้ฉนวนแข็งร่วมกับน้ำมันหม้อแปลง ฉนวนที่นิยมใช้กันส่วนมากในปัจจุบันได้แก่ กระดาษอัดซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนแข็งและน้ำมันหม้อแปลง โดยฉนวนแข็งจะไม่นิยมนำมาทดสอบความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าเนื่องจากเมื่อเกิดการเสื่อมสภาพจะไม่สามารถปรับปรุงให้กลับคืนสู่สภาพเดิมได้ จึงมักทดสอบโดยใช้น้ำมันหม้อแปลงเพื่อบอกถึงความสามารถในการคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าและสามารถใช้เป็นสื่อที่จะแสดงถึงความผิดปกติภายในของอุปกรณ์ได้

เพื่อให้การทำงานของหม้อแปลงมีประสิทธิภาพ ยืดอายุการใช้งาน และมีความปลอดภัยในการใช้งานจึงควรมีการตรวจสอบสภาพและการบำรุงรักษาน้ำมันหม้อแปลงอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งการบำรุงรักษาน้ำมันหม้อแปลงสามารถกระทำได้โดยการเก็บตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงขณะที่ใช้งานอยู่มาทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าและเคมีเพื่อวิเคราะห์สภาพของน้ำมันหม้อแปลง และสามารถนำข้อมูลผลทดสอบมาเป็นแนวทางในการบำรุงรักษาและดูแลอุปกรณ์ได้ ซึ่งการทดสอบน้ำมันหม้อแปลงมีหลายวิธี วิธีการที่ง่ายที่สุดและประหยัดค่าใช้จ่ายที่สุด คือวิธีการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวน (Dielectric Breakdown Voltage Test) ทดสอบโดยจ่ายแรงดันกระแสสลับตามมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ วัตถุประสงค์เพื่อทดสอบน้ำมันหม้อแปลงว่ามีค่าความเป็นฉนวนทางด้านไฟฟ้าอย่างไร โดยดูจากผลวิเคราะห์ น้ำมันที่มีค่าแรงดันเบรกดาวน์สูงบ่งบอกถึงค่าความเป็นฉนวนทางไฟฟ้าที่ดี โดยปกติน้ำมันควรมีค่าแรงดันเบรกดาวน์ไม่ต่ำกว่า 30 kV หากมีค่าต่ำกว่า แก้ไขโดยการกรองน้ำมันหรือเปลี่ยนน้ำมันใหม่

โดยทั่วไปการทดสอบดังกล่าวจะทำการทดสอบโดยไม่ได้ควบคุมปัจจัยภายนอก เช่น อุณหภูมิหรือการสั่นของขดลวดภายในหม้อแปลง ซึ่งปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อการสูญเสียสภาพความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงได้เช่นกัน ทางคณะผู้จัดทำจึงได้ออกแบบชุดควบคุมอุณหภูมิสำหรับการทดสอบฉนวนเหลวขึ้น เพื่อศึกษาและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีผลต่อการสูญเสียสภาพความเป็นฉนวนในฉนวนเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ศึกษาและจำลองกลไกการสูญเสียความเป็นฉนวนของฉนวนเหลว
2. จำลองปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนของฉนวนเหลว
3. เพื่อออกแบบชุดควบคุมอุปกรณ์สำหรับการทดสอบฉนวนเหลว

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. สามารถเข้าใจกลไกการสูญเสียความเป็นฉนวนของฉนวนเหลว
2. สามารถจำลองปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนของฉนวนเหลว
3. ออกแบบชุดควบคุมอุปกรณ์สำหรับการทดสอบฉนวนเหลว

1.4 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	พ.ศ. 2563					พ.ศ. 2564		
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. ศึกษาและค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้อง	←				→			
2. ออกแบบและทำการจำลองผลจากการออกแบบ		←		→				
3. สร้างและประกอบชิ้นงาน				←	→			
4. ทดสอบการใช้งานจริงและรวบรวมผลการทดลอง								
4.1 ทดสอบด้านความร้อน						←	→	
4.2 ทดสอบด้านไฟฟ้า						←	→	
4.3 ทดสอบด้านความร้อนและไฟฟ้า							←	→
5. สรุปผลและประเมินผล							←	→
6. จัดทำเอกสารปริญา นินิพนธ์และเตรียมตัวนำเสนอ						←		→

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ความรู้ ความเข้าใจการเกิดปรากฏการณ์การสูญเสียความเป็นฉนวนของฉนวนเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สามารถใช้เพื่อการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความเครียดสนามไฟฟ้าและความคงทนของฉนวน [1]

2.1.1 สนามไฟฟ้าและความเครียดสนามไฟฟ้า

สนามไฟฟ้า คือ บริเวณที่อำนาจทางไฟฟ้าของประจุสามารถส่งไปถึง หรือบริเวณที่มีแรงมากระทำกับประจุเมื่อนำประจุเข้าไปวาง โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นได้ตามกฎของคูลอมบ์ ดังสมการ

$$F_{Q_1 \rightarrow Q'} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{Q'Q_1 \hat{r}}{r^3} = \frac{Q'Q_1 \hat{r}}{4\pi\epsilon r^2} \quad (\text{N}) \quad (2.1)$$

เมื่อ \hat{r} = เวกเตอร์ตำแหน่งสัมพันธ์ของประจุ Q' เทียบกับ Q_1 ซึ่งมีเวกเตอร์หน่วย $\hat{r} = \vec{r} / r$

ϵ = Permittivity ของตัวกลาง = $\epsilon_0 \epsilon_r$

ϵ_0 = Permittivity ของสุญญากาศ หรือที่ว่าง = $8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m

ϵ_r = Permittivity สัมพัทธ์ (ไม่มีหน่วย)

และเมื่อพิจารณาเฉพาะแรงที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยประจุจะเรียกแรงนั้นว่า ความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric Field Intensity) หรือความเครียดสนามไฟฟ้า ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q'} = \frac{\vec{F}}{e} = \sum_{i=1}^N \frac{Q_i \hat{r}_i}{4\pi\epsilon r_i^2} \quad (\text{N/C}) \quad (2.2)$$

เมื่อ e คือประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอนเท่ากับ 1.602×10^{-19} คูลอมบ์ แสดงว่าความเครียดของสนามไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับค่าคงตัวไดอิเล็กทริก ϵ (Permittivity)

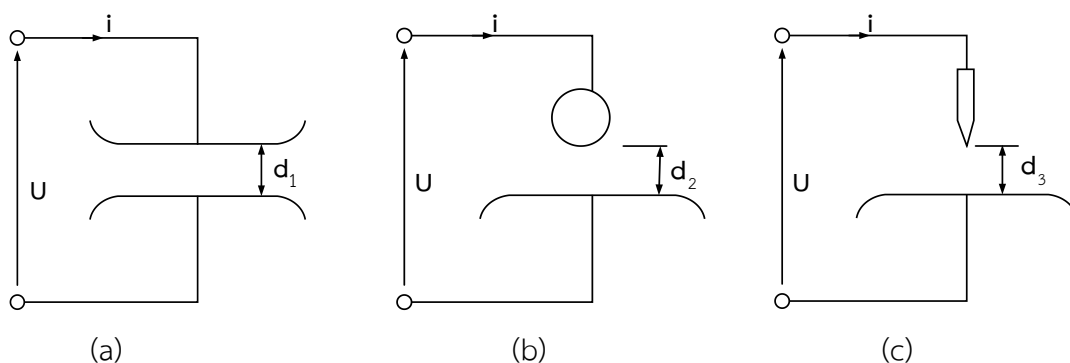
2.1.2 ลักษณะรูปแบบของสนามไฟฟ้าและผลของสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อการเกิดเบรกดาวน์

ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ได้แก่ สนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอและสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ และประเภทของสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสามารถแบ่งย่อยได้เป็น

2 แบบ คือ แบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และแบบไม่สม่ำเสมอสูง โดยลักษณะของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามลักษณะของอิเล็กโทรด ดังรูปที่ 2.1

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.1 อิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่าง ๆ กัน

(a) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform Field)

(b) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly Nonuniform Field)

(c) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูง (Highly Nonuniform Field)

หากป้อนแรงดันไฟฟ้าที่ขนาดเท่า ๆ กันให้กับอิเล็กโทรดลักษณะต่าง ๆ ที่วางอยู่ในอากาศดังรูปที่ 2.1 จะพบว่าลักษณะของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นและความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าไม่เท่ากันแม้จะมีระยะห่าง d_1 , d_2 , และ d_3 เท่ากันก็ตาม

ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรกดาวนในฉนวนแต่ละชนิดจะมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าไม่ตายตัว โดยส่วนใหญ่จะเป็นค่าทางสถิติ มักจะกำหนดหรือระบุด้วยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (E_{max}) ที่เกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดในขณะที่เบรกดาวนเริ่มเกิดขึ้น ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ

ในกรณีที่สนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดเป็นแบบไม่สม่ำเสมอ (ค่าแฟกเตอร์ η^* มีค่าต่ำ) จะมีค่าแรงดันเริ่มต้นที่ทำให้เกิดโคโรนาขึ้นในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด นอกจากนี้ค่าแรงดันเบรกดาวน U_b จะมีค่าสูงกว่าแรงดันเริ่มต้น U_i โดยการเกิดเบรกดาวนแบบนี้ เรียกว่า เบรกดาวนแบบโคโรนา (corona breakdown) ค่าแรงดันเริ่มต้นอาจเขียนในรูปสมการทั่วไปได้ว่า

$$U_i = E_i \cdot d \cdot \eta^* \quad (2.3)$$

เมื่อ U_i = แรงดันเริ่มต้น

E_i = ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดจากแรงดันเริ่มต้น U_i

แต่ในกรณีที่สนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดเป็นแบบสม่ำเสมอ หรือไม่สม่ำเสมอเพียงเล็กน้อย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า (แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า η^* มีค่าสูง) แรงดันเริ่มต้นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในช่องว่างระหว่างไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

อิเล็กโทรดจะเป็นแบบเบรกดาวน์โดยตรง (direct breakdown) โดยไม่เกิดโคโรนาขึ้นก่อน ค่า U_i จะเท่ากับ U_b และ E_i จะเท่ากับ E_b ตามลำดับ

2.1.3 ความคงทนของฉนวนไฟฟ้า (Dielectric Strength) และปัจจัยที่มีผล

ความคงทนของการฉนวนทางไฟฟ้า หมายถึง ค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ฉนวนนั้นสามารถทนอยู่ได้โดยไม่เกิดความเสียหายหรือเกิดเบรกดาวน์ หรือทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพ ซึ่งมีหน่วยเป็น V/cm หรือ kV/cm คือมีหน่วยเป็นค่าแรงดันต่อหน่วยความหนาของฉนวนหรือระยะห่างของอิเล็กโทรด ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ใช้กำหนดค่าความคงทนของการฉนวนทางไฟฟ้าโดยทั่วไปจะหาจากสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

ความคงทนของการฉนวนต่อความเครียดสนามไฟฟ้า E_b ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ว่า

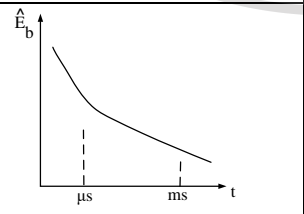
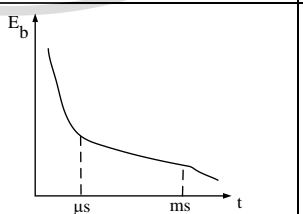
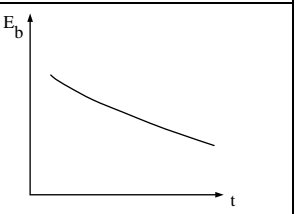
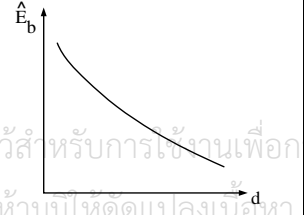
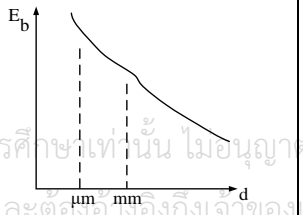
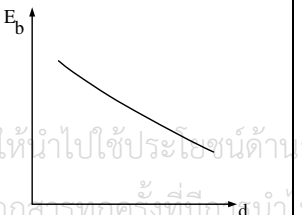
$$E_b = f(\text{ฟังก์ชัน (ลักษณะสนามไฟฟ้า, ลักษณะสมบัติของฉนวน และเวลา)})$$

โดยที่ ลักษณะของสนามไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับรูปลักษณะของอิเล็กโทรด (Electrode Configurations)

ลักษณะสมบัติของฉนวน หมายถึง คุณสมบัติทางไฟฟ้า ทางกล ทางความร้อน และทางเคมี เวลา หมายถึง ช่วงเวลาที่แรงดันคงอยู่ที่ทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าแก่ฉนวน

ความคงทนของฉนวนนั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าและแพ็คเกจอร์สนามไฟฟ้าแล้ว ยังขึ้นอยู่กับแพ็คเกจอร์อื่น ๆ อีกหลายประการ ดังในตารางที่ 2.1

ตาราง 2.1 ความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของวัสดุฉนวน ขึ้นอยู่กับแพ็คเกจอร์ต่าง ๆ

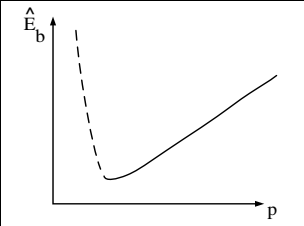
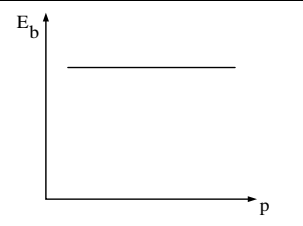
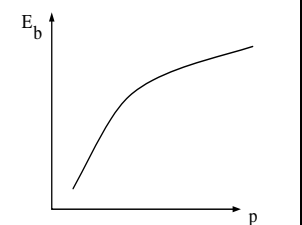
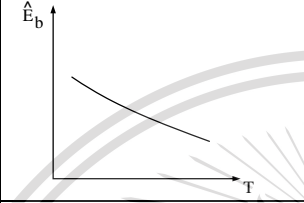
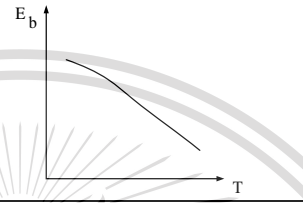
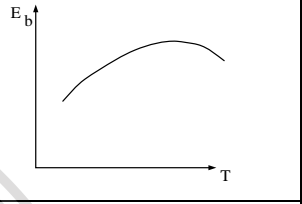
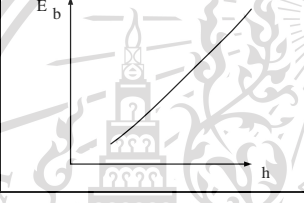
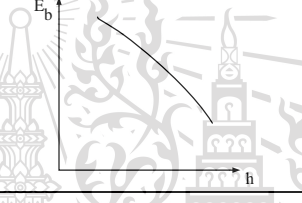
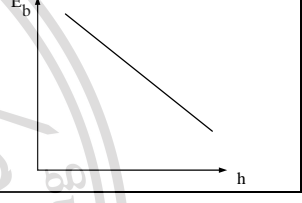
ผลกระทบของ / ฉนวน	แก๊ส	ของแข็ง	ของเหลว
รูปคลื่นแรงดัน	ค่ายอด	ค่า rms	ค่ายอด หรือ rms
เวลาที่ป้อนแรงดัน (t)			
ระยะช่องห่าง (d)			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

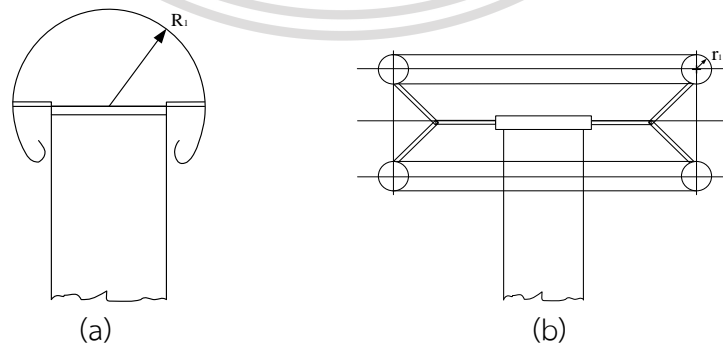
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตาราง 2.2 ความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของวัสดุฉนวน ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่าง ๆ (ต่อ)

ผลกระทบของ / ฉนวน	แก๊ส	ของแข็ง	ของเหลว
รูปคลื่นแรงดัน	ค่ายอด	ค่า rms	ค่ายอด หรือ rms
ความดันอัด (p)			
อุณหภูมิ (T)			
ความชื้น (h)			

2.1.4 อิเล็กโทรดซิลด์ภายนอก

อิเล็กโทรดซิลด์ หมายถึง อุปกรณ์ที่ใส่เข้ามาภายในระบบไฟฟ้าแรงดันสูงเพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณปลายแหลมคมต่าง ๆ เช่น บริเวณขั้วต่อ หรือหัวน็อต เป็นต้น โดยมีหน้าที่ลดหรือควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าที่ขั้วแรงสูง (high voltage terminal) ไม่ให้เกินค่าวิกฤตเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดไดโรนาดิสชาร์จขึ้น อิเล็กโทรดซิลด์ภายนอกปกติอยู่ในอากาศจะมีลักษณะเป็นทรงกลม หรือ เป็นวงแหวนทอ (toroid) ดังในรูปที่ 2.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้รูปที่ 2.2 อิเล็กโทรดซิลด์ภายนอก

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

(b) วงแหวนทอ

2.2 ลักษณะการเกิดเบรกดาวน์ในแก๊ส

2.2.1 เบรกดาวน์ประเภทสมบูรณ์ (complete breakdown)

เบรกดาวน์ประเภทสมบูรณ์ หมายถึง การเกิดเบรกดาวน์ตลอดแก๊สที่เชื่อมโยงระหว่างอิเล็กโทรด ซึ่งเกิดขึ้นในฉนวนแล้วแรงดันเหลือ้น้อยมาก มีกระแสไหลอยู่มากตามแนวที่เกิดเบรกดาวน์ กระแสเบรกดาวน์นี้จะจำกัดด้วยความต้านทานภายในของตัวจ่ายแรงดัน ในขณะที่เบรกดาวน์เกิดขึ้นจะเป็นเวลาเดียวกันกับอาร์กเริ่มเกิด โดยดีสชาร์จเบรกดาวน์ประเภทสมบูรณ์ยังอาจแบ่งตามลักษณะที่เกิดขึ้นได้เป็น 2 แบบ คือ

- เบรกดาวน์โดยตรง (direct breakdown) ซึ่งจะเกิดขึ้นในแก๊สที่มีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยคือจะไม่มีโคโรนา หรือดีสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นก่อนเบรกดาวน์ เมื่อได้เงื่อนไขเบรกดาวน์ ก็จะเกิดเบรกดาวน์ทันที
- เบรกดาวน์แบบโคโรนา (corona breakdown) ซึ่งจะเกิดขึ้นในแก๊สที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงคือ จะมีโคโรนาหรือดีสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นก่อนเบรกดาวน์ ค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด สามารถคำนวณได้ แรงดันเบรกดาวน์แบบโคโรนามีค่าสูงกว่าค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด และคำนวณไม่ได้ลักษณะดีสชาร์จเบรกดาวน์ทั้งสองแบบ อาจแสดงด้วยตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ลักษณะดีสชาร์จเบรกดาวน์ในแก๊ส

ลักษณะในแก๊ส	สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ	สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย	สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง
ไม่มีดีสชาร์จและดีสชาร์จเบรกดาวน์บางส่วน			
ลักษณะเบรกดาวน์สมบูรณ์	 เบรกดาวน์โดยตรง	 เบรกดาวน์โดยตรง	 เบรกดาวน์แบบโคโรนา
ค่าแรงดันเบรกดาวน์หรือโคโรนาเริ่มเกิด	$U_b = E_b \times d$	$U_b = E_b \times d \times \eta^*$	$U_i = E_b \times d \times \eta^*$ $U_b = U_i$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลิขสิทธิ์ทั้งหมดให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.2.2 ดิสชาร์จบางส่วน (partial discharge = PD)

ดิสชาร์จบางส่วน หรือการเบรกดาวนไม่สมบูรณ์ซึ่งจะเกิดขึ้นในระบบการฉนวนที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ซึ่งการเบรกดาวนเพียงบางส่วน คือ เบรกดาวนที่ไม่เชื่อมโยงระหว่างอิเล็กโทรด เป็นการเกิดไอออนในเซชันในแก๊สเพียงบางส่วน บางทีก็เรียกว่าดิสชาร์จบางส่วน (partial discharge = PD) หรือ ฟรีดิสชาร์จ เช่น ดิสชาร์จแบบโคโรนา ดิสชาร์จตามผิว เป็นต้นแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ โคโรนาดิสชาร์จ (corona discharge), ดิสชาร์จตามผิว (surface discharge) และดิสชาร์จภายใน (internal discharge)

ดิสชาร์จแบบโคโรนา เป็นการดิสชาร์จในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงรอบปลายอิเล็กโทรดแหลมหรือขอบคมที่อยู่ในอากาศหรือแก๊สความดันปกติ เรียกว่า โคโรนา การที่โคโรนาดิสชาร์จจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าเกินค่าสนามไฟฟ้าวิกฤต (E_c) ในอากาศ เมื่อเกิดโคโรนาในอากาศอาจสังเกตหรือรับรู้ได้ด้วยร่างกายคน คือ จะได้ยินเสียง Hissing (เสียงแมลงบิน) มีกลิ่นโอโซน (O_3) หากมีดิสชาร์จจะเห็นแสงเรือง โคโรนาดิสชาร์จเกิดขึ้นในรูปพัลส์สั้นๆ ซึ่งมีสเปกตรัมความถี่สูงถึง MHz คลื่นความถี่สูงนี้จะรบกวนระบบสื่อสาร เรียกว่า คลื่นรบกวนวิทยุ (RIV = Radio Influence Voltage) การเกิดโคโรนา หมายถึงมีพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา จึงเป็นสิ่งที่ควรหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดขึ้นในการออกแบบระบบต่าง ๆ

ดิสชาร์จตามผิว ในสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ หรือไม่สม่ำเสมอก็ตามฉนวนแข็งจะมีส่วนทำให้สนามไฟฟ้าในส่วนที่มีเปอร์มิตติวิตีต่ำ เช่น แก๊สหรืออากาศจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้นจนเป็นผลให้เกิดดิสชาร์จขึ้นในส่วนที่เป็นอากาศ การดิสชาร์จตามผิวเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวน (tangential field: E_t) มีค่าสูงถึงค่าวิกฤต (E_c) ตัวอย่างเช่น แผ่นฉนวนแข็งคั่นระหว่างอิเล็กโทรดกับแผ่นระนาบ ที่ปกยึดปลอกฉนวนตัวนำ และปลายสายเคเบิลแรงสูง

ดิสชาร์จภายใน เกิดขึ้นภายในฉนวนแข็งหรือฉนวนเหลว ซึ่งมีฟองแก๊สอยู่ภายใน ความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวนที่ดิสชาร์จภายในเริ่มเกิดขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าของแก๊สที่แฝงอยู่ภายในเนื้อฉนวน ซึ่งการมีฟองแก๊สอยู่ภายในฉนวนจะเป็นสาเหตุที่นำไปสู่การเกิดเบรกดาวนในที่สุด และจะทำให้อายุการใช้งานของฉนวนนั้นสั้นลง ดังนั้นการตรวจสอบคุณภาพของการฉนวนจึงมีเรื่องการตรวจดิสชาร์จภายในที่เรียกว่า PD เป็นหัวข้อสำคัญอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.3 ฉนวนเหลวและฉนวนแข็ง

2.3.1 ลักษณะสมบัติที่สำคัญของฉนวนเหลวและฉนวนแข็ง

ลักษณะสำคัญที่เป็นตัวชี้บอกถึงคุณสมบัติและคุณภาพของฉนวนมี 4 ประการคือ

1) ความต้านทานของฉนวน ฉนวนทางอุดมคติหรือฉนวนไฟฟ้าที่สมบูรณ์ จะไม่นำกระแสเลย เมื่อถูกป้อนด้วยแรงดันกระแสตรง กล่าวคือ จะไม่มีสภาพนำไฟฟ้าอยู่เลย หรือกล่าวได้อีกว่าฉนวนนั้นมีค่าความต้านทานสูงเป็นอนันต์ แต่ฉนวนไฟฟ้าในทางปฏิบัตินั้นมักจะนำกระแสอยู่บ้าง แต่มีค่าน้อยมากเมื่อป้อนแรงดันกระแสตรง นั้นแสดงว่า สารฉนวนไฟฟ้ามีค่าความต้านทานสูงไม่เป็นอนันต์ หากแต่มีค่าสูงจำกัดที่วัดได้ ค่าความต้านทานยิ่งสูงก็แสดงว่าฉนวนนี้มีคุณภาพการฉนวนยิ่งดี เมื่อนำฉนวนไปคั่นระหว่างอิเล็กโทรดที่ป้อนแรงดันกระแสตรงเป็นเวลานานจนมีกระแสไหลผ่านฉนวนนั้น เรียกกระแสที่ไหลผ่านนั้นว่า กระแสรั่ว กระแสรั่วที่ไหลผ่านฉนวนนี้ แบ่งออกเป็นสองรูปแบบ คือ รูปแบบแรก กระแสจะไหลผ่านเนื้อฉนวน หรือเรียกว่า ความต้านทานเชิงปริมาตร (volume resistance) เนื่องจากฉนวนมีสภาพนำอยู่บ้าง ส่วนอีกรูปแบบ กระแสจะไหลผ่านตามผิวฉนวน เนื่องจากผิวมีสภาพนำเนื่องจากมีสิ่งเปราะอะเปื้อนและความชื้นที่ผิว หรือเรียกว่าความต้านทานเชิงผิว (surface resistance)

2) ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก หรือ Permittivity เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ และเป็นตัวบอกลักษณะของไดอิเล็กตริกหรือสารฉนวนไฟฟ้าว่ามีลักษณะเป็นแบบใด

3) แפקเตอร์กำลังไฟฟ้าสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) ในทางปฏิบัติฉนวนหรือไดอิเล็กตริกมีกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก อาจแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ กำลังสูญเสียจากสภาพนำไฟฟ้า σ (conduction loss), กำลังสูญเสียจากโพลาริเซชัน (polarization loss) และกำลังสูญเสียจากไอออไนเซชัน (ionization loss) ในลักษณะของดีสชาร์จบางส่วน (PD)

4) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน (E_b) เป็นตัวบ่งชี้ให้ทราบว่าฉนวนสามารถทนต่อแรงดันได้มากหรือน้อยเพียงใด โดยมีการกำหนดด้วยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่จะทำให้ฉนวนเบรกดาวน ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่มีโครงสร้างทางเคมีและทางฟิสิกส์ต่างกัน สารประเภทที่มีโครงสร้างเป็นผลึกจะเกิดการเบรกดาวนตามแนวที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมน้อยที่สุด ซึ่งมักจะสังเกตเห็นว่าร่องรอยของการเกิดเบรกดาวนในฉนวนจะไม่เป็นแนวเส้นตรง โดยปกติฉนวนแข็งจะทนต่อแรงดันเบรกดาวนได้สูงกว่าฉนวนเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.3.2 การเกิดเบรกดาวนซ์ของฉนวนเหลวเชิงการค้า

การเกิดเบรกดาวนซ์ในฉนวนเหลวนั้นยังไม่มีทฤษฎีที่สามารถนำมาอธิบายได้แบบแน่นอน เนื่องจากการเกิดเบรกดาวนซ์ในฉนวนเหลวนั้นมีปัจจัยหลายอย่างที่ส่งผล อาจแบ่งออกได้เป็น 2 แนวคิดหลัก คือ แนวคิดที่หนึ่ง สมมติให้ฉนวนเหลวเป็นเนื้อเดียวกันตลอด และอธิบายการเกิดเบรกดาวนซ์ในลักษณะเดียวกันกับกลไกเบรกดาวนซ์ในแก๊ส ส่วนอีกแนวคิดได้อธิบายการเกิดเบรกดาวนซ์ในฉนวนเหลวที่เกิดจากสิ่งเจือปน หรือฟองแก๊ส โดยสรุปคือยังไม่มีแนวคิดใดที่สามารถอธิบายปรากฏการณ์การเบรกดาวนซ์ได้ทุกกรณี อย่างไรก็ตามการเกิดเบรกดาวนซ์ในฉนวนเหลวเชิงการค้าอาจเกิดได้จากสาเหตุดังต่อไปนี้

การเกิดโพรงและฟองแก๊ส (cavitation breakdown) ซึ่งมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่าฉนวนเหลว ซึ่งจะเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดเบรกดาวนซ์ในฉนวนเหลวได้



รูปที่ 2.3 หยดลูกกลมเจือปนในฉนวนเหลวซิลิโคน

การเกิดสิ่งเจือปนของของแข็ง เป็นต้นเหตุทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าในของเหลวเพิ่มขึ้นเฉพาะจุด และสามารถก่อให้เกิดการเบรกดาวนซ์ในฉนวนเหลวได้

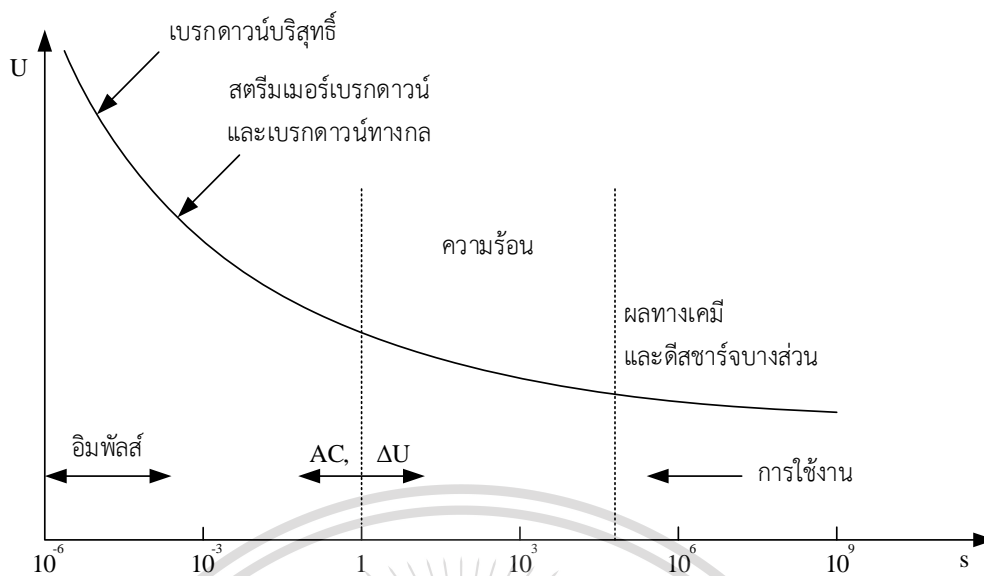
2.3.3 การเกิดเบรกดาวนซ์ของฉนวนแข็ง

การเกิดเบรกดาวนซ์ในฉนวนแข็ง จะแตกต่างจากการเกิดเบรกดาวนซ์ในฉนวนแก๊ส และฉนวนเหลว กล่าวคือ ฉนวนแก๊สและฉนวนเหลวสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้หลังจากเกิดการเบรกดาวนซ์ในเวลาไม่นาน แต่ฉนวนแข็งเมื่อเกิดเบรกดาวนซ์แล้วจะเสียสภาพฉนวนอย่างถาวร และไม่สามารถนำมาใช้งานต่อได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.4 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า E_b แปรไปตามช่วงเวลาที่ย้อนแรงดัน

การเกิดการเบรกดาวน์ในฉนวนแข็ง อาจแบ่งออกตามช่วงเวลาของแรงดันที่ป้อน และปรากฏการณ์การเกิดเบรกดาวน์ได้ ดังนี้

1) เบรกดาวน์แบบบริสุทธิ์หรือแบบไอออนิก เป็นเบรกดาวน์ที่เกิดขึ้นในระยะเวลาอันสั้น (ประมาณ 0.001 วินาที) โดยมีการป้อนแรงดันที่มีผลให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมากและถือเป็นการคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของฉนวนแท้จริง

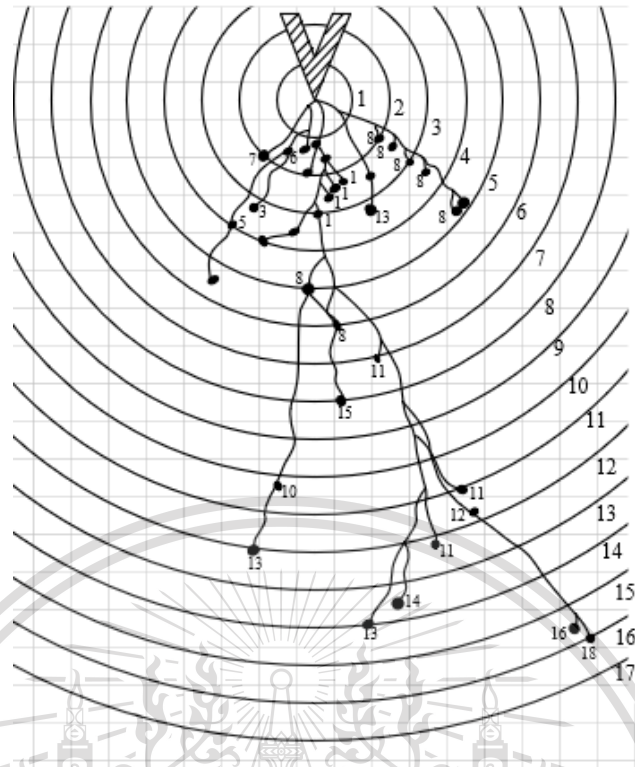
2) เบรกดาวน์เนื่องจากแรงกลไฟฟ้า เป็นการเบรกดาวน์ที่ฉนวนแข็งที่อยู่ในสนามไฟฟ้าจะเกิดแรงมากระทำกับประจุที่ผิวของฉนวน จึงทำให้เกิดแรงดึงดูดกันระหว่างด้านผิวของฉนวนดังกล่าว ทำให้เนื้อฉนวนได้รับแรงอัดจนเกิดการบิดเบี้ยวได้ และถ้าหากแรงกลไฟฟ้านี้เกินขีดจำกัดความคงทนต่อแรงอัดของฉนวนก็จะทำให้เกิดความเสียหายแก่ตัวฉนวนได้ โดยทั่วไปแรงอัดที่เกิดบนฉนวนจากสนามไฟฟ้ารวม 1 MV/cm จะมีค่าหลายกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

3) เบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์ เป็นเบรกดาวน์ที่มีลักษณะการเกิดอ้างอิงมาจากกลไกการเกิดเบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์ โดยในทางปฏิบัติการเบรกดาวน์มักจะไม่เกิดดีสชาร์จครั้งเดียว หรือในแนวเส้นทางเดียว แต่จะมีลักษณะเป็นแบบหลายแนวเส้นทางจากการที่ดีสชาร์จหลายครั้ง ดังในรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.5 ลักษณะที่ดิสซาร์จเบรกดาวน์แบบรากไม้ระหว่างอิเล็กโทรดปลายแหลมกับกระนาบ

4) เบรกดาวน์แบบเทอร์มัล คือการเบรกดาวน์ของฉนวนแข็งที่เกิดขึ้นจากผลของความร้อนที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวนเนื่องจากกระแสไหลผ่าน โดยฉนวนแข็งจะยังคงสภาพอยู่ได้ถ้าหากความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นสามารถระบายออกไปสู่สิ่งแวดล้อมได้ทัน โดยไม่ทำให้อุณหภูมิสูงเกิดขีดจำกัดของฉนวนนั้น แต่ถ้าอัตราความร้อนเกิดขึ้นสูงกว่าที่ระบายออกไป ก็จะทำให้เสียความสมดุล และนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์แบบเทอร์มัลขึ้นได้

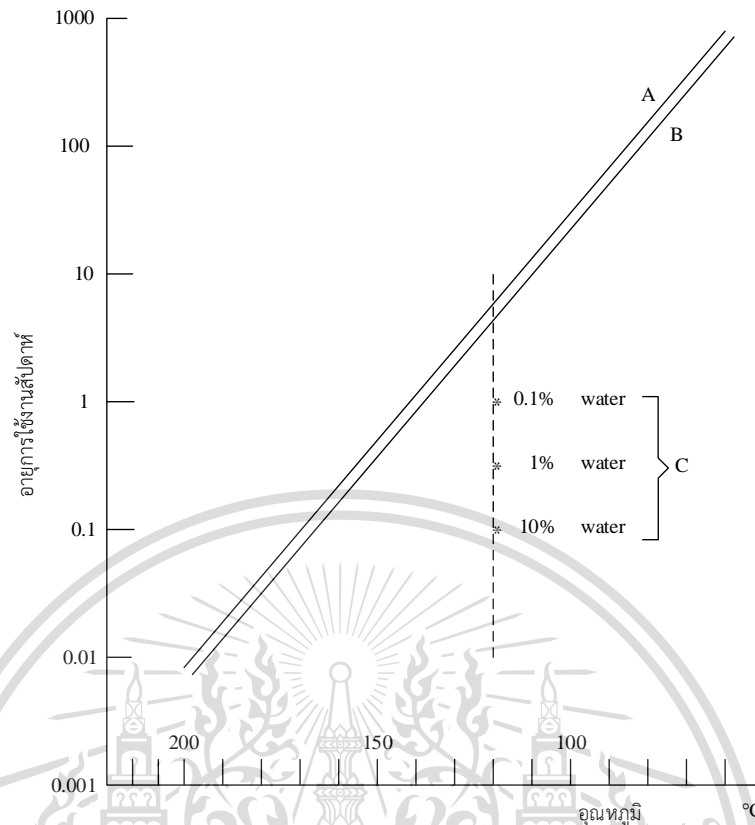
5) เบรกดาวน์เนื่องจากผลทางเคมี

ผลทางเคมี ฉนวนอาจเสื่อมสภาพทางเคมีได้ แม้ว่าจะไม่ได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าก็ตาม โดยฉนวนที่มีเกิดการเสื่อมสภาพจะเป็นฉนวนที่มาจากสารอินทรีย์ เช่น กระดาษ หรือยาง เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.6 ผลของอุณหภูมิที่มีต่ออายุการใช้งานทางกลของฉนวนกระดาศ

- กระดาศแห้งในสุญญากาศจุ่มในน้ำมันหม้อแปลงสัมพัทธ์กับ
- กระดาศแห้งในสุญญากาศจุ่มในน้ำมันหม้อแปลงสัมพัทธ์กับ N_2
- กระดาศชื้นลุ่มน้ำมันสัมพัทธ์ N_2

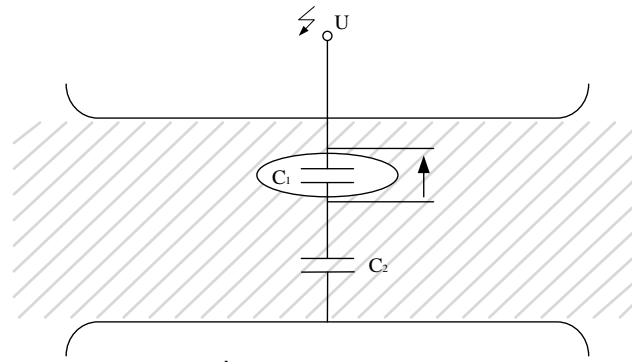
ผลทางไฟฟ้าเคมี เป็นผลมาจากการที่ไอออนในเนื้อฉนวนเกิดการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ กับไฟฟ้า เช่น กระบวนการ อิเล็กโทรไลซิส เป็นต้น ซึ่งส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของฉนวนได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรง

6) เบรกดาวนเนื่องจากดีสชาร์จภายใน เป็นการดีสชาร์จภายในเนื้อฉนวนแข็งเนื่องจากฉนวนประเภทอื่นที่มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปนอยู่ เช่น มีฟอง หรือโพรงแก๊สในเนื้อฉนวน หรือที่บริเวณรอยต่อระหว่างฉนวนกับอิเล็กโทรด สารเจือปนนี้จะเกิดเบรกดาวนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำกว่าเนื้อฉนวน โดยสามารถแบ่งโพรงฉนวนที่เกิดขึ้นได้ดังนี้ โพรงฉนวนเป็นแก๊ส, โพรงฉนวนเป็นสิ่งเจือปน และโพรงฉนวนเป็นน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

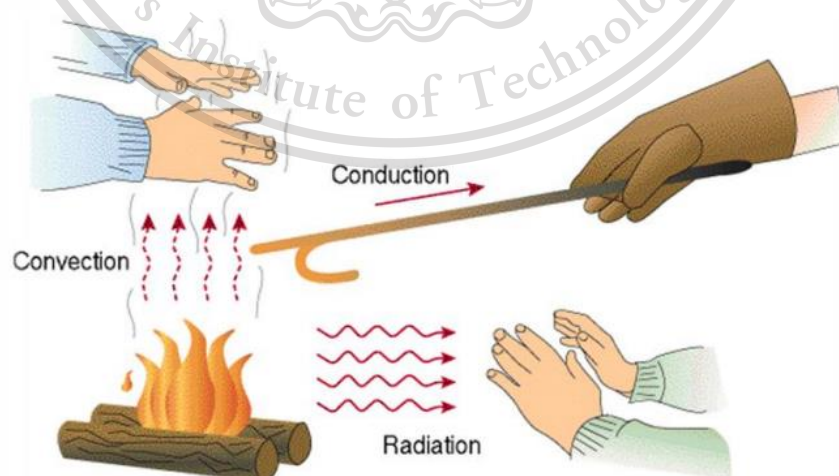


รูปที่ 2.7 ฉนวนมีโพรงแก๊ส

2.4 กลไกของการถ่ายเทความร้อน (Mechanism of heat transfer) [2]

การถ่ายเทความร้อน คือ การส่งผ่านพลังงานความร้อนซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ดังนั้น เมื่อใดก็ตามที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้นในตัวกลางหรือระหว่างตัวกลาง การถ่ายเทความร้อนมักจะเกิดขึ้นได้ รูปที่ 2.8 แสดงการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในแบบต่าง ๆ เมื่อมีเกรเดียนต์อุณหภูมิ (Temperature Gradient) เกิดขึ้นในตัวกลางที่อยู่นิ่ง เช่น ของแข็ง หรือของไหล

เทอมของการนำความร้อน (Conduction) จะเป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นผ่านตัวกลาง ในขณะที่การพาความร้อน (Convection) จะเป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวและของไหลที่เคลื่อนที่เมื่อมีอุณหภูมิแตกต่างกัน ส่วนการแผ่รังสีความร้อน (Thermal Radiation) จะเป็นการที่ทุกพื้นที่ผิวที่มีอุณหภูมิหนึ่งจะปล่อยพลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา ดังนั้นในสถานะที่ปราศจากตัวกลางใด ๆ จะมีการถ่ายเทความร้อนสุทธิที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวสองพื้นผิวที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันได้



รูปที่ 2.8 รูปแบบการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นโดยการนำ การพา และการแผ่รังสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้วางใจได้ ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.4.1 การนำ (Conduction)

การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนเพียงวิธีเดียวที่เกิดขึ้นในวัตถุที่เป็นตัวกลางทึบแสง เมื่อมีความลาดชันของอุณหภูมิสามารถเกิดได้ทั้งในของแข็ง ของเหลวและแก๊ส แต่เนื่องจากการไหลหมุนเวียนเกิดขึ้นในของเหลวและแก๊ส แต่สำหรับในของแข็งทึบแสงจะไม่มีการเคลื่อนไหวยภายในวัสดุจะมีแต่การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำเพียงอย่างเดียว อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนจะเป็นสัดส่วนกับค่าความลาดชันของอุณหภูมิ (Temperature gradient) dT/dx คูณกับพื้นที่ A ที่ความร้อนไหลผ่าน ดังสมการ (2.4)

$$\text{Rate of conduction } \propto \left(\frac{(\text{area})(\text{Temperature difference})}{\text{Thickness}} \right)$$

$$q_{\text{cond}} \propto A \frac{dT}{dx} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.4)$$

เมื่อ q_{cond} = อัตราการถ่ายเทความร้อน โดยการนำความร้อน (W)
 A = พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน (m^2)
 T = อุณหภูมิ (K)
 X = ระยะทางการเคลื่อนที่ของความร้อน (m)

ความสามารถในการนำความร้อนของสาร วัดด้วยปริมาณที่เรียกว่า ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) หรือใช้ตัวอักษรย่อว่า K ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลางที่มีความร้อนเคลื่อนที่ผ่านอัตราการนำความร้อนจึงมีค่าเป็น

$$q_{\text{cond}} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.5)$$

เมื่อ q = อัตราการไหลของความร้อนในทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่ (W, J/s)
 A = พื้นที่การถ่ายเทความร้อน (m^2)
 T = อุณหภูมิ (K)
 X = ระยะทางที่ตั้งฉากกับพื้นที่การถ่ายเทความร้อน
 K = สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m K)

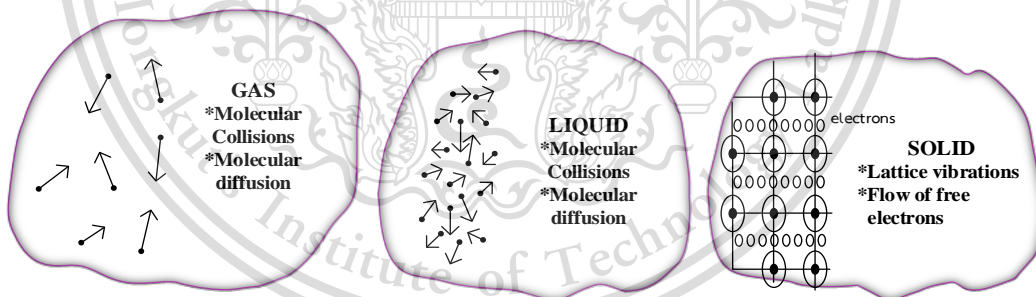
สมการที่ 2.5 คือ กฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ (Fourier's law of conduction) เครื่องหมายลบที่อยู่ทางขวามือของสมการเป็นผลเนื่องจากกฎข้อที่สองทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งกำหนดว่า ความร้อนจะต้องไหลจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำ แต่เนื่องจากความลาด

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ชั้นของอุณหภูมิจะตั้งลดลงเมื่อระยะทาง X เพิ่มมากขึ้น จึงมีเครื่องหมายเป็นลบ ดังนั้นหากต้องการให้อัตราการถ่ายเทความร้อนไหลในทิศทางที่เป็นบวกหรือมีค่าเป็นบวก จะต้องเติมเครื่องหมายลบไว้ด้านขวาของสมการ (2.5)

อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางนั้นขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น รูปทรง ความหนา และวัสดุที่ใช้ในการทำตัวกลาง รวมทั้งความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างตัวกลาง ค่าการนำความร้อน k เป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของวัตถุ การนำความร้อนเป็นการถ่ายเทพลังงานจากอนุภาคที่มีพลังงานสูงไปยังอนุภาคที่มีพลังงานต่ำกว่าสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในของเหลว ของแข็ง และแก๊ส ค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ ๆ ของแก๊สไม่สามารถหาได้จากการวิเคราะห์ ดังนั้นข้อมูลเกี่ยวกับการนำความร้อนส่วนใหญ่ของวัสดุจึงได้มาจากการวัดและการทดสอบโดยทั่วไปแล้วค่าการนำความร้อนของวัสดุจะแปรตามอุณหภูมิ แต่การนำไปใช้งานในด้านการปฏิบัตินั้นส่วนใหญ่แล้วจะใช้ค่าการนำความร้อนคงที่ที่หากจากอุณหภูมิจนเฉลี่ย สารที่มีความสามารถในการนำความร้อนสูง เช่น โลหะ จะมีค่า k ส่วนสารที่มีความสามารถในการนำความร้อนต่ำ เช่น สารอโลหะ ก็จะมีค่า k ต่ำ ค่า k จึงเป็นคุณสมบัติประจำตัวของสารที่สำคัญมากในการศึกษาถึงการเคลื่อนที่ของความร้อนในสารนั้น จะสามารถเปรียบเทียบความสามารถในการนำความร้อนของสารต่าง ๆ โดยการเปรียบเทียบจากค่า k ของสารเหล่านั้น โดยสารที่มีค่า k สูง จะเรียกว่า สารตัวนำ (conductor) และสารที่มีค่า k ต่ำ จะเรียกว่า ฉนวน (Insulator) ตัวอย่าง ค่า k ของสารบางชนิดแสดงดังรูปที่ 2.8-2.10 และตาราง 2.3



รูปที่ 2.9 การนำความร้อนของสารที่สถานะแตกต่างกัน

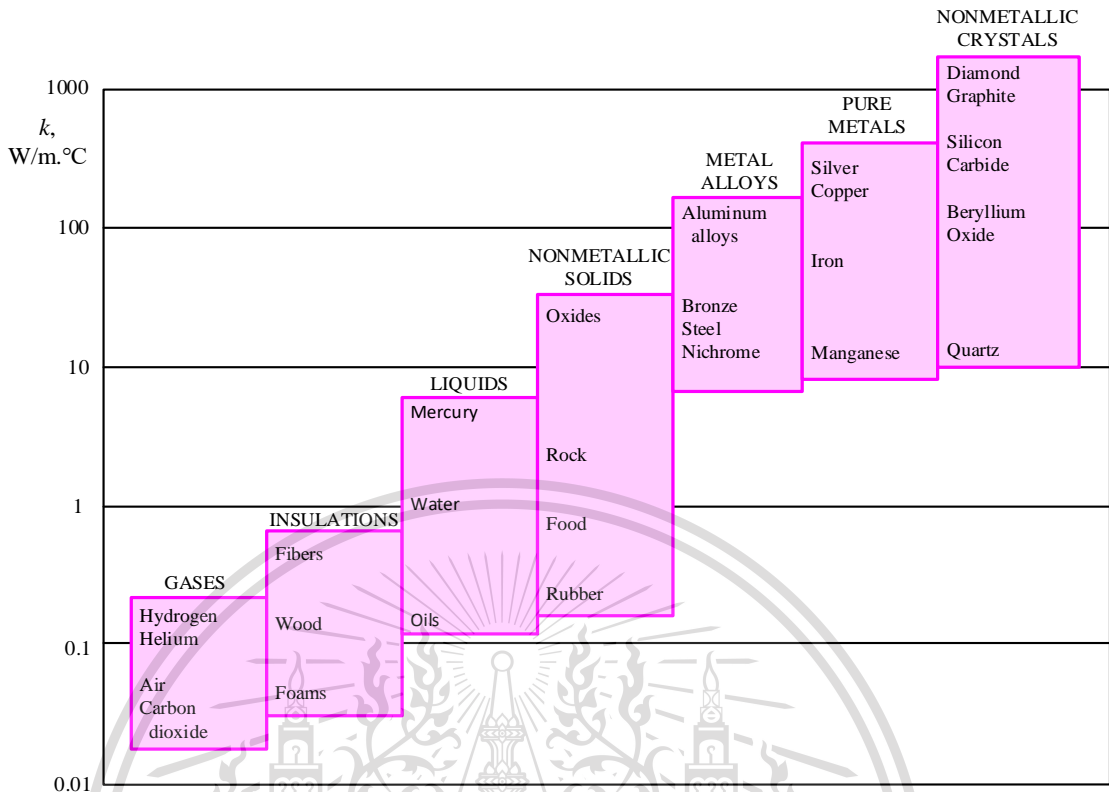
ตาราง 2.3 ค่าการนำความร้อนของสารบางชนิด

วัตถุ	ค่าการนำความร้อน (K), W/MK
โลหะบริสุทธิ์	35-430
โลหะเหลว	9-90
ของเหลว (อโลหะ)	0.2-2.0
ของแข็ง (อโลหะ)	0.02-20
ฉนวน	0.02-0.40

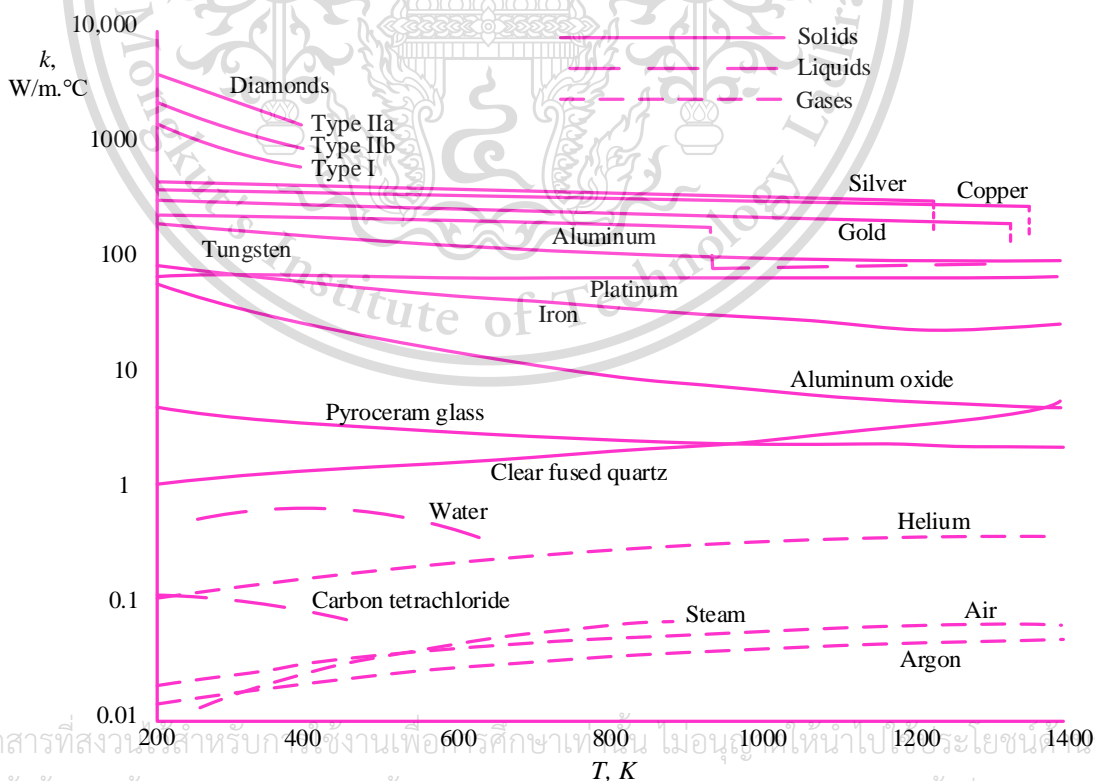
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีโทษปรับและต้องขังอีกด้วยหากละเมิดลิขสิทธิ์ที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.10 ช่วงของสภาพการนำความร้อนสำหรับสถานะต่าง ๆ ของสารที่อุณหภูมิและความดันปกติ



รูปที่ 2.11 ค่าการนำความร้อนที่แปรตามอุณหภูมิของสารบางชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังห้ามมิให้ตัดต่อแปลงเนื้อหาและข้อมูลอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารฉบับนี้ที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.4.2 การพา (Convection)

การถ่ายเทความร้อนโดยการพาประกอบด้วยกลไก 2 อย่าง คือ พลังงานเกิดการถ่ายเทอันมีผลเนื่องมาจากการเคลื่อนที่หรือการแพร่แบบสุ่มของโมเลกุล และผลเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของของไหลการถ่ายเทลักษณะนี้เกิดขึ้นได้ เช่น ในระบบที่มีเกรเดียนต์อุณหภูมิจะมีการถ่ายเทความร้อนได้ และเนื่องจากโมเลกุลในกลุ่มของไหลจะมีการเคลื่อนที่แบบสุ่มอยู่ด้วย ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นจึงเกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่แบบสุ่มของโมเลกุลและการเคลื่อนที่ของของไหลส่วนใหญ่ การถ่ายเทความร้อนโดยการพา แบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ ได้แก่

2.4.2.1 การพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection) หรือ การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural convection) คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของของแข็งโดยกลไกภายนอก เช่น พัดลม หรือ เครื่องสูบน้ำ

2.4.2.2 การพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection) คือการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ไม่มีกลไกใด ๆ ที่ทำให้ของไหลเคลื่อนที่ แต่ของไหลที่อยู่ใกล้กับผิวของของแข็งก็อาจเคลื่อนที่ได้โดยแรงลอยตัวของของไหลเอง แรงลอยตัวนี้เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหล เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นของของไหลขึ้น

พิจารณาการพาความร้อนที่เกิดขึ้นในของไหลเคลื่อนที่ผ่านพื้นผิวของแข็งที่มีอุณหภูมิต่างกัน ดังรูป 2.12 ที่แสดงการถ่ายเทความร้อนโดยการพาระหว่างพื้นผิวร้อนกับของไหลที่เคลื่อนที่ผ่านไปบนแผ่นวัตถุ ซึ่งแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของความเร็วและอุณหภูมิ จุดที่น่าสังเกตคือ ความเร็วจะลดน้อยลงในทิศทางที่วิ่งเข้าสู่ผิวของวัตถุด้วยผลของแรงจากความเสียดทานที่เนื่องมาจากความหนืดของของไหลและเนื่องจากของไหลชั้นที่อยู่ติดกับผิวนั้นมีความเร็วเป็นศูนย์ ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ระหว่างผิวของแผ่นวัสดุกับของไหลชั้นดังกล่าวเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบการนำอย่างเดียว ของไหลที่มีความเร็วสูงจะให้ค่าความลาดชันของอุณหภูมิสูงทำให้มีอัตราการนำความร้อนสูงตามไปด้วย ตาราง 2.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลบางชนิด

การคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพานั้นเป็นสิ่งยุ่งยาก เมื่อพิจารณาแล้ว มีหลายสิ่งหลายอย่างที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของความร้อนแบบการพานี้ เช่น คุณสมบัติต่าง ๆ ของของไหล เช่น ความหนาแน่น ความร้อนจำเพาะ ความหนืด ฯลฯ ความเร็วของของไหล ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของพื้นผิวของของแข็ง และของไหล เป็นต้น นิวตัน (Newton) ได้ตัดปัญหาความยุ่งยากเหล่านี้ โดยเสนอสมการสำหรับคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพา ดังนี้

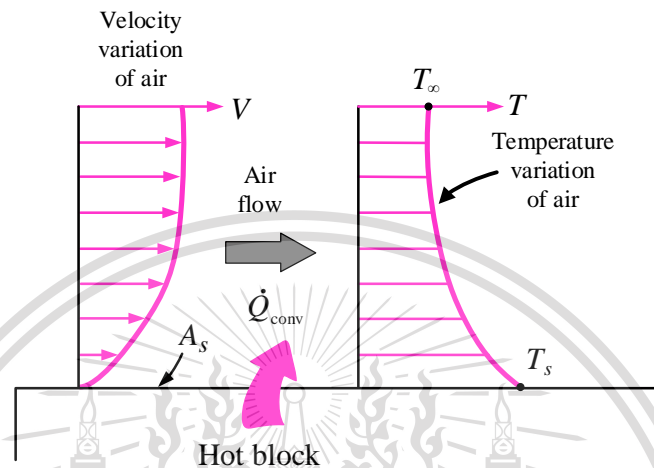
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา $q = h(T_h - T_c)$ อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกา (2.6) ไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โดยที่ h คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (heat transfer coefficient) มีหน่วยเป็น $W/m^2 K$ ในระบบ SI และ $Btu/ft^2 hr ^\circ F$ และ q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของของแข็งที่สัมผัสกับของไหล, T_h คือ อุณหภูมิที่ร้อนกว่า (ของของไหล หรือพื้นผิวของของแข็ง) และ T_c คือ อุณหภูมิที่เย็นกว่า (ของของไหล หรือพื้นผิวของของแข็ง)



รูปที่ 2.12 การพัฒนาชั้นขอบเขตในการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนแบบบังคับ

ตาราง 2.4 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลบางชนิด

ประเภทการพาความร้อนและชนิดของไหล	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย ($W/M^2 K$)
การพาความร้อนแบบอิสระ, อากาศ	5-25
การพาความร้อนแบบอิสระ, น้ำ	20-100
การพาความร้อนแบบบังคับ, อากาศ	10-200
การพาความร้อนแบบบังคับ, น้ำ	50-10,000
น้ำกำลังเดือด	3,000-100,000
ไอของน้ำที่กำลังกลั่นตัว	5,000-100,000

2.4.3 การแผ่รังสี (Radiation)

การแผ่รังสีความร้อน คือการที่พลังงานถูกปล่อยออกมาจากวัตถุที่มีอุณหภูมิที่แน่นอน โดยวัตถุนั้นอาจเป็นของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส ก็ได้ พลังงานของสนามการแผ่รังสีมีการถ่ายเทโดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือเรียกอีกนัยหนึ่งว่า โฟตอน (Photons) ในขณะที่การถ่ายเทพลังงานโดยการนำหรือการพาความร้อนจะต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายเท การถ่ายเทโดยการแผ่รังสีไม่ต้องอาศัยตัวกลางใด ๆ และจะเกิดการถ่ายเทได้อย่างมีประสิทธิภาพในสภาวะที่เป็นสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิยอนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สำหรับวิศวกรวิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่โดยการแผ่รังสี อาจไม่มีความสำคัญเท่ากับที่จะรู้วิธีการคำนวณหาอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการแผ่รังสี โดยที่ในปี 1884 สตีเฟน และ โบลซ์แมน (Stefan and Boltzmann) ได้เสนอสมการในการคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนสูงสุดโดยการแผ่รังสีจากวัตถุที่มีพื้นที่ A และอุณหภูมิ T ดังนี้

$$q_r = \sigma AT^4 \quad (2.7)$$

โดยที่ q_r คืออัตราการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสี (W) σ คือค่าคงที่ของสตีเฟนและโบลซ์แมน (Stefan and Boltzmann) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ ในระบบ SI และมีค่าเท่ากับ $0.1717 \times 10^{-8} \text{ Btu/hr ft}^2 \text{ R}^4$ ในระบบอังกฤษ A คือพื้นที่ผิวของตัวแผ่รังสีความร้อน (m^2) และ T คืออุณหภูมิของผิวที่แผ่รังสีความร้อน (K)

สมการ 2.7 นี้ สามารถที่จะนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อประโยชน์ในการออกแบบเครื่องมือต่างๆ ได้ วัตถุที่ให้ค่าการแผ่รังสีความร้อนสูงสุดตามสมการที่ 2.7 เรียกว่า วัตถุในอุดมคติ หรือวัตถุดำ (black body) วัตถุที่มีอยู่ทั่วไป จะแผ่รังสีได้น้อยกว่าวัตถุดำ การแผ่รังสีความร้อนจากวัสดุโดยทั่วไปที่มีอุณหภูมิ T และพื้นที่ A จะเขียนได้ดังนี้

$$q_r = \epsilon \sigma AT^4 \quad (2.8)$$

โดยที่ ϵ คือคุณสมบัติทางการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุซึ่งเรียกว่า ค่าการแผ่รังสี (emissivity) ซึ่งเป็นปริมาณที่แสดงถึงประสิทธิภาพการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่สามารถแผ่รังสีความร้อนได้สูงสุด ϵ จะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ

การที่จะหาอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการแผ่รังสีระหว่างวัสดุสองชิ้นที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันนั้นยุ่งยากมาก และยังไม่กล่าวถึงในบทนี้ การพิจารณากรณีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัตถุเล็กที่มีพื้นที่ผิว A และค่าการแผ่รังสีความร้อน ϵ กับวัตถุใหญ่ซึ่งครอบคลุมวัตถุเล็กอยู่ โดยที่วัตถุเล็กมีอุณหภูมิ T_h และวัตถุใหญ่มีอุณหภูมิ T_c เราสามารถเขียนอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนสุทธิของวัตถุทั้งสองได้ดังนี้

$$\begin{aligned} q_r &= \epsilon \sigma A (T_h^4 - T_c^4) \\ q_r &= \epsilon \sigma A (T_h - T_c) (T_h + T_c) (T_h^2 - T_c^2) \\ q_r &= h_r A (T_h - T_c) \end{aligned} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเอาไว้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ห้ามมิให้ผู้อื่นนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่หรือใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใด

โดยที่ $h_r = \epsilon \sigma (T_h + T_c) (T_h^2 + T_c^2)$

h_r คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer coefficient) ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.5 ผลกระทบจากความหนืดในการระบายความร้อนภายในหม้อแปลง [3]

โดยทั่วไปการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดและปริมาตรของน้ำมันหม้อแปลง, ลักษณะของแผงระบายความร้อน, การติดตั้งพัดลมระบายความร้อน ฯลฯ

เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในน้ำมันหม้อแปลงหลายชนิด ยกตัวอย่างการเปรียบเทียบมาจากมาตรฐาน CSA-C50-97 พบว่า น้ำมัน Class A จะมีประสิทธิภาพที่สูงกว่า Class B อย่างเห็นได้ชัด แต่หากทำการเปรียบเทียบน้ำมันที่อยู่ในมาตรฐานเดียวกันจะพบว่าตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Coefficient), ค่าความจุความร้อน (Heat Capacity) และค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ที่มีค่าเท่ากันนั้นจะทำให้ไม่สามารถบ่งบอกได้ว่าน้ำมันชนิดใดมีประสิทธิภาพที่ดีกว่ากันได้ จึงจำเป็นต้องหาตัวแปรอื่นมาใช้ในการพิจารณา

ยกตัวอย่างในหม้อแปลงชนิดน้ำมันที่ถูกออกแบบมาให้ระบายความร้อนโดยอากาศภายนอก (หรือตามมาตรฐาน IEC เรียกว่า ONAN) จะพิจารณาที่คุณลักษณะทางกายภาพของของเหลวเป็นหลัก เช่น ความหนืดของน้ำมัน จะส่งผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในหม้อแปลง ซึ่งความหนืดหรืออัตราการไหลของของเหลวสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. ความเร็วการไหล (Flow Speed)

สามารถหาได้จากสมการ Frictional Resistance ดังนี้

$$\Delta p = \frac{32 \times v \times l \times \gamma \times w}{d^2 \times g} \quad (2.10)$$

โดยที่

- p = ความดัน
- v = kinematic viscosity
- l, d = มิติของท่อ (ความยาว, เส้นผ่านศูนย์กลาง)
- γ = specific weight
- w = ความเร็วของน้ำมันในท่อ
- g = อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$w = \frac{\Delta p \times d^2 \times g}{32 \times l \times \gamma} \times \frac{1}{v} \quad (2.11)$$

และเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันของความหนืดได้เป็น

$$w = f \times \frac{1}{v} \quad (2.12)$$

กล่าวโดยสรุปคือ หากน้ำมันมีความหนืดยิ่งน้อยเท่าใด อัตราไหลของน้ำมันจะยิ่งสูงขึ้นเท่านั้น และประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนก็จะสูงขึ้นไปด้วย

2. Heat Exchange Factor

การแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นจะเกิดขึ้นระหว่างพื้นที่ผิวของขดลวดและน้ำมัน ซึ่งปัจจัยนี้จะมาช่วยในการปรับปรุงคุณลักษณะด้านความหนืดของของเหลว ซึ่งในที่นี้จะใช้เลขเรโนลด์ (Reynolds Number) ในการบอกลักษณะการไหลดังนี้

$$RE = \frac{w \times d}{v} \quad (2.13)$$

หรือสามารถกล่าวได้ว่าที่น้ำมันมีอัตราไหลที่สูงและความหนืดต่ำจะให้เลขเรโนลด์ที่สูงและได้ลักษณะดังนี้

RE < 2300 จะเป็นการไหลแบบ Laminar

RE > 2300 จะเป็นการไหลแบบ Turbulent

ซึ่งหากการไหลของน้ำมันเป็นแบบ Turbulent จะส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนจะทำได้ดีกว่าการไหลแบบ Laminar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

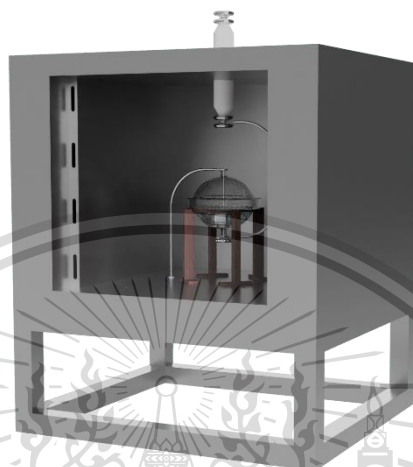
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 3

การออกแบบและการจำลองการทดลอง

3.1 การออกแบบชุดควบคุมอุณหภูมิสำหรับการทดสอบฉนวนเหลว



รูปที่ 3.9 ชุดควบคุมอุณหภูมิสำหรับการทดสอบฉนวนเหลว

ชุดควบคุมอุณหภูมิสำหรับการทดสอบฉนวนเหลวจะแบ่งการออกแบบเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ชุดเซลล์ทดสอบและตู้ควบคุมอุณหภูมิ

3.1.1 ชุดเซลล์ทดสอบ

ชุดเซลล์ทดสอบออกแบบโดยอ้างอิงจากรายงานของ CEGRE เรื่อง HVDC Transformer Insulation : Oil Conductivity [4] 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

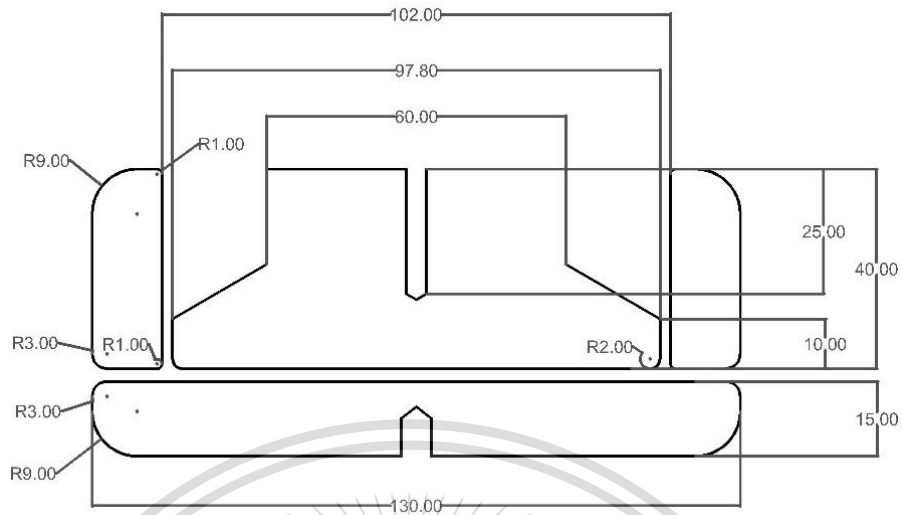


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รูปที่ 3.10 แบบ 3 มิติประกอบสำเร็จของชุดเซลล์ทดสอบ



รูปที่ 3.11 แบบ 2 มิติของอิเล็กโทรด



รูปที่ 3.12 แบบ 3 มิติของอิเล็กโทรด

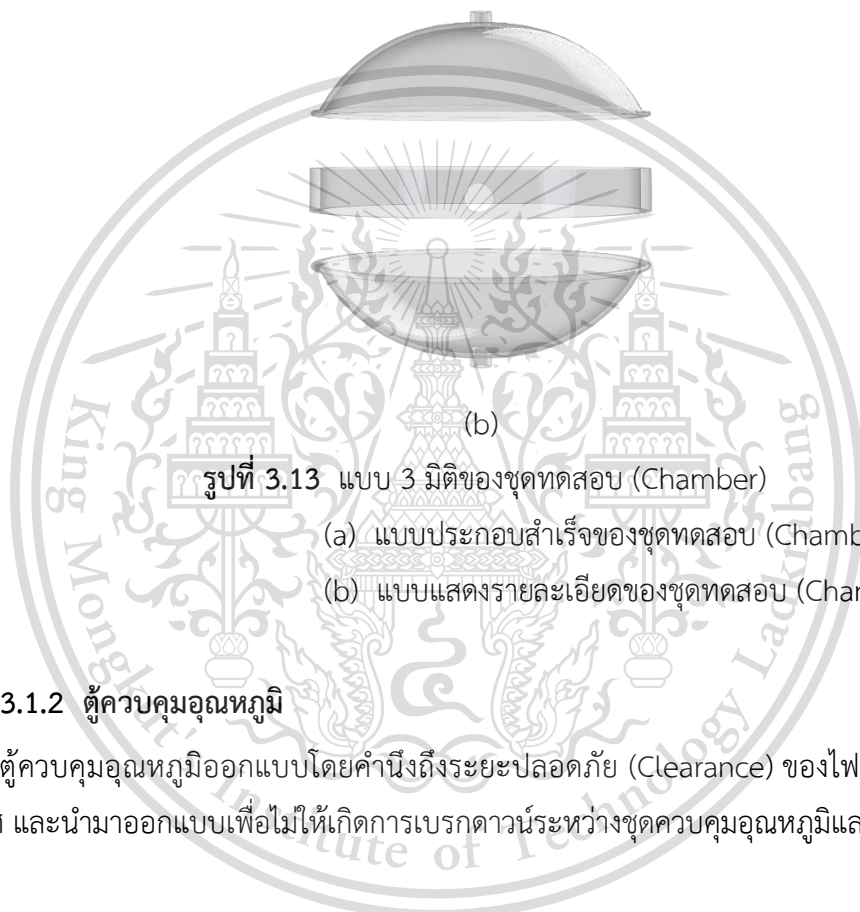
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 (a) แบบประกอบสำเร็จของอิเล็กโทรด
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 (b) แบบแสดงรายละเอียดของอิเล็กโทรด

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



(a)



(b)

รูปที่ 3.13 แบบ 3 มิติของชุดทดสอบ (Chamber)

(a) แบบประกอบสำเร็จของชุดทดสอบ (Chamber)

(b) แบบแสดงรายละเอียดของชุดทดสอบ (Chamber)

3.1.2 ตู้ควบคุมอุณหภูมิ

ตู้ควบคุมอุณหภูมิออกแบบโดยคำนึงถึงระยะปลอดภัย (Clearance) ของไฟฟ้าแรงดันสูงในอากาศ และนำมาออกแบบเพื่อไม่ให้เกิดการเบรกดาวนระหว่างชุดควบคุมอุณหภูมิและเซลล์ทดสอบ



รูปที่ 3.14 แบบ 3 มิติของตู้ควบคุมอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

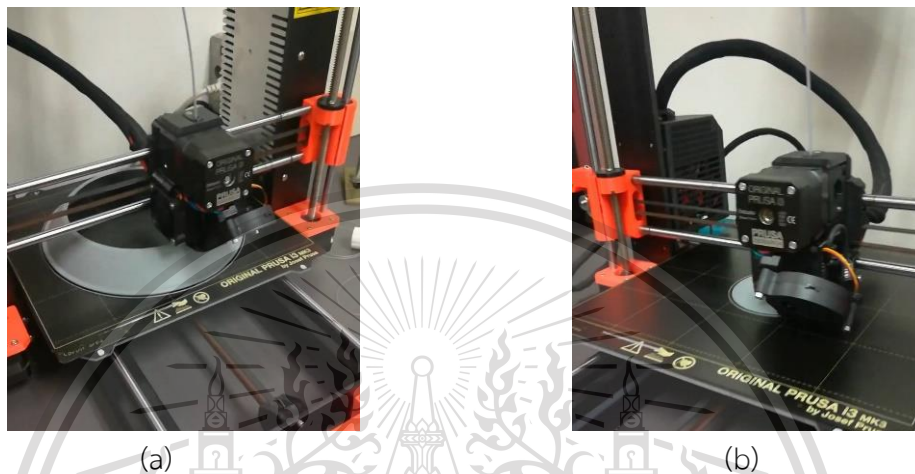
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

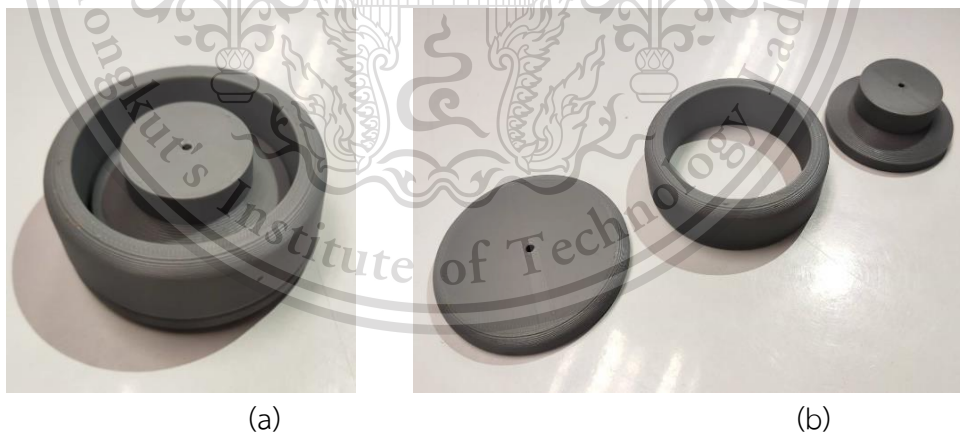
3.2 ผลการจำลอง

3.2.1 การจำลองชุดทดสอบด้วยการพิมพ์ 3 มิติ (3D Printer)

การจำลองชุดทดสอบด้วยการพิมพ์ 3 มิติ จัดทำขึ้นเพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของขนาดชุดเซลล์ทดสอบ โดยจำลองให้มีขนาดเล็กลงจากขนาดจริงของชุดเซลล์ทดสอบที่ออกแบบไว้เครื่องหนึ่ง



รูปที่ 3.15 ขณะทำการพิมพ์แบบจำลองชุดเซลล์ทดสอบด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ
(a) แบบจำลองชุดทดสอบ (Chamber)
(b) แบบจำลองอิเล็กทรอนิกส์

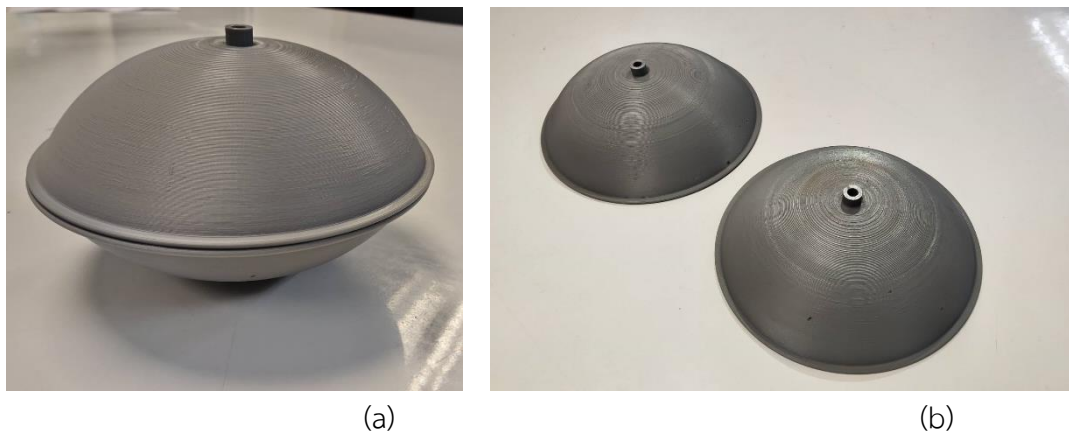


รูปที่ 3.16 แบบจำลอง 3 มิติของอิเล็กทรอนิกส์
(a) แบบประกอบสำเร็จของอิเล็กทรอนิกส์
(b) แบบแสดงรายละเอียดของอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.17 แบบจำลอง 3 มิติของชุดทดสอบ (Chamber)

(a) แบบประกอบสำเร็จของชุดทดสอบ (Chamber)

(b) แบบแสดงรายละเอียดของชุดทดสอบ (Chamber)

3.2.2 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า

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

ทำการจำลองผลโดยป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงตั้งแต่ 0-40 kV ให้กับตู้ที่ได้ออกแบบไว้ โดยแบ่งการจำลองออกเป็น 2 กรณี ดังนี้

- ชุดทดสอบที่อิเล็กโทรดอยู่ในฉนวนอากาศ
- ชุดทดสอบที่อิเล็กโทรดอยู่ในฉนวนน้ำมัน

เนื่องจากในเซลล์ทดสอบมีความสมมาตรจึงทำการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในรูปแบบ 2 มิติ ในระบบพิกัดทรงกระบอก (Cylindrical Coordinate) โดยใช้อุปกรณ์ที่ได้ทำการออกแบบในหัวข้อ 3.1.1 และใช้โปรแกรม Comsol Multiphysics ในการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศและฉนวนน้ำมันที่เกิดขึ้นจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ค่าต่าง ๆ ซึ่งได้ผลการจำลอง ดังนี้

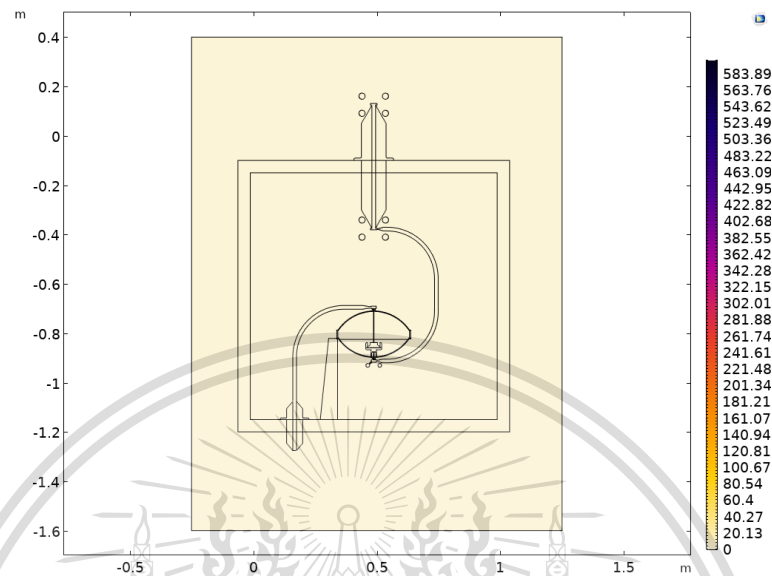
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

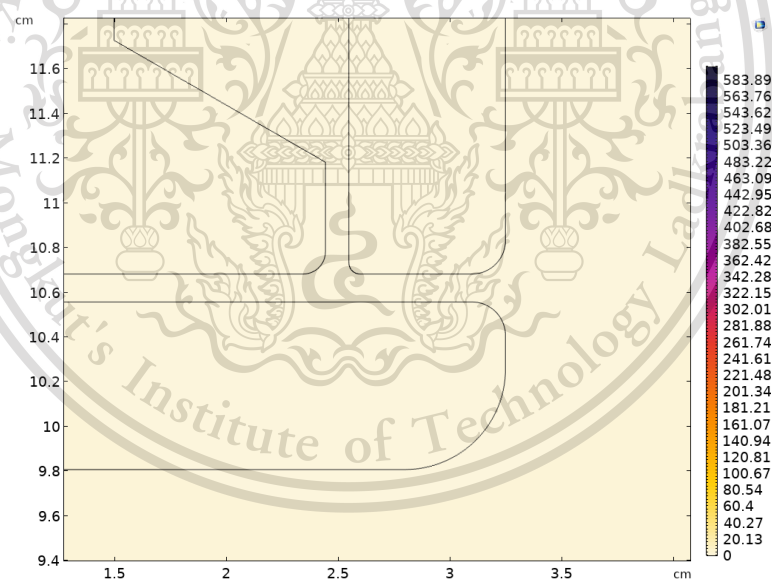
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศ

ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศที่ระดับแรงดัน 0 kV



(a)



(b)

รูปที่ 3.10 ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศที่ระดับแรงดัน 0 kV

(a) ภาพรวม

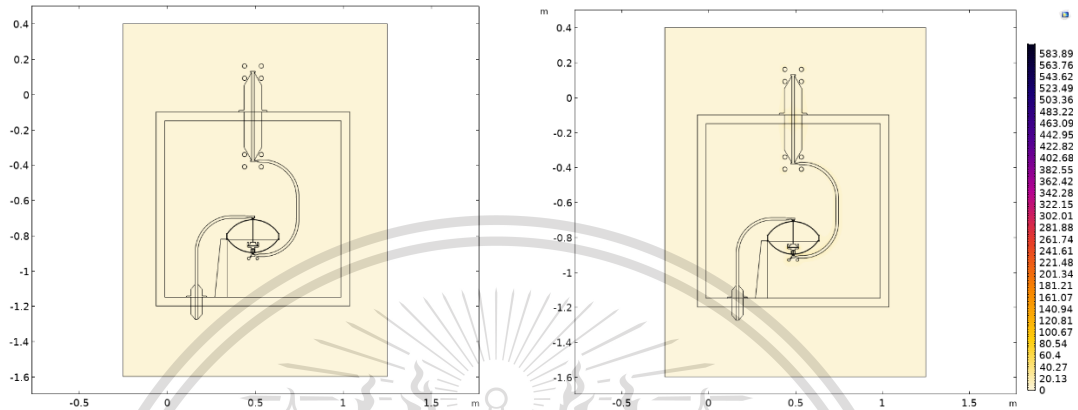
(b) ภาพขยายบริเวณอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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

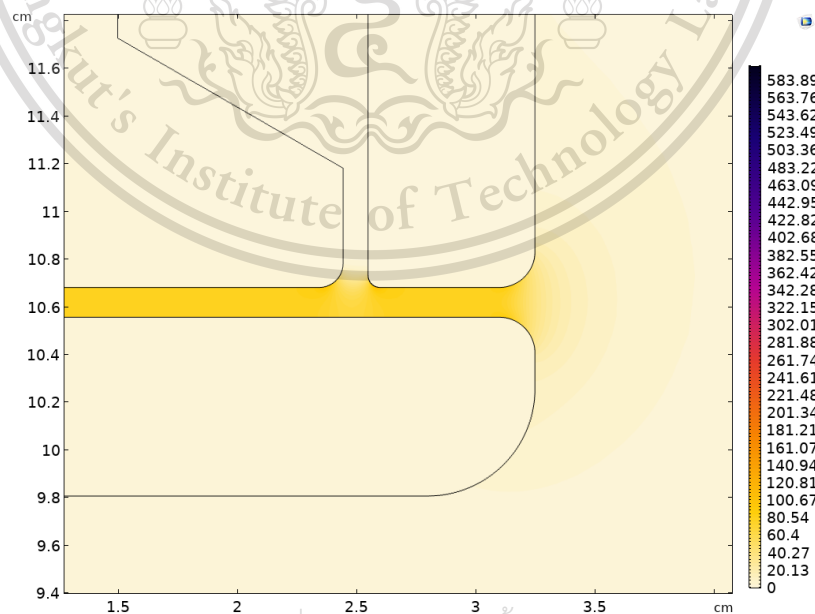


รูปที่ 3.11 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศ

(a) ที่ระดับแรงดัน 0 kV

(b) ที่ระดับแรงดัน 40 kV

ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศที่ระดับแรงดัน 10 kV



รูปที่ 3.12 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศที่ระดับแรงดัน 10 kV

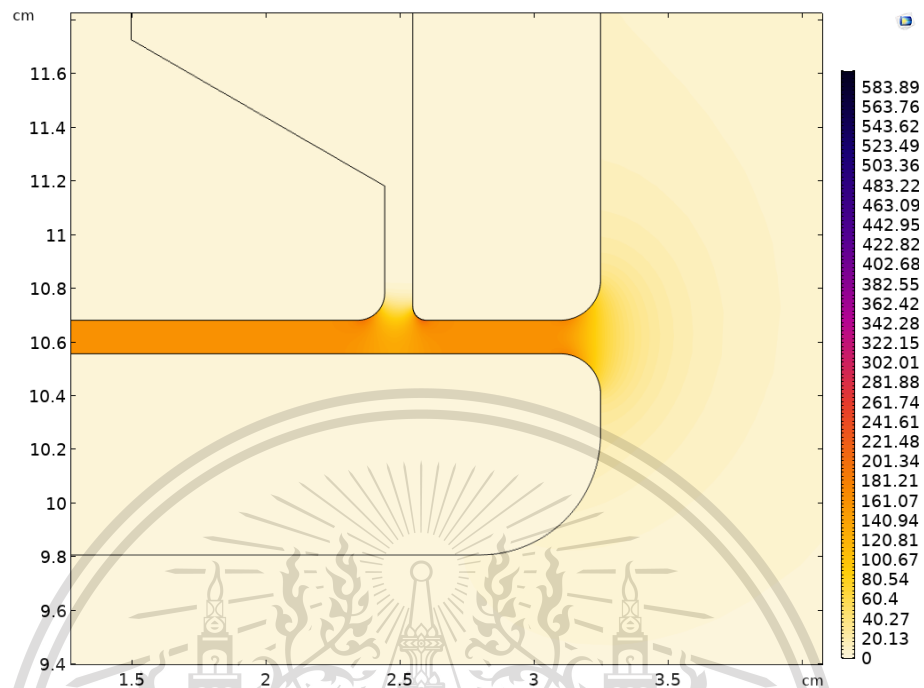
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำเพื่อการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

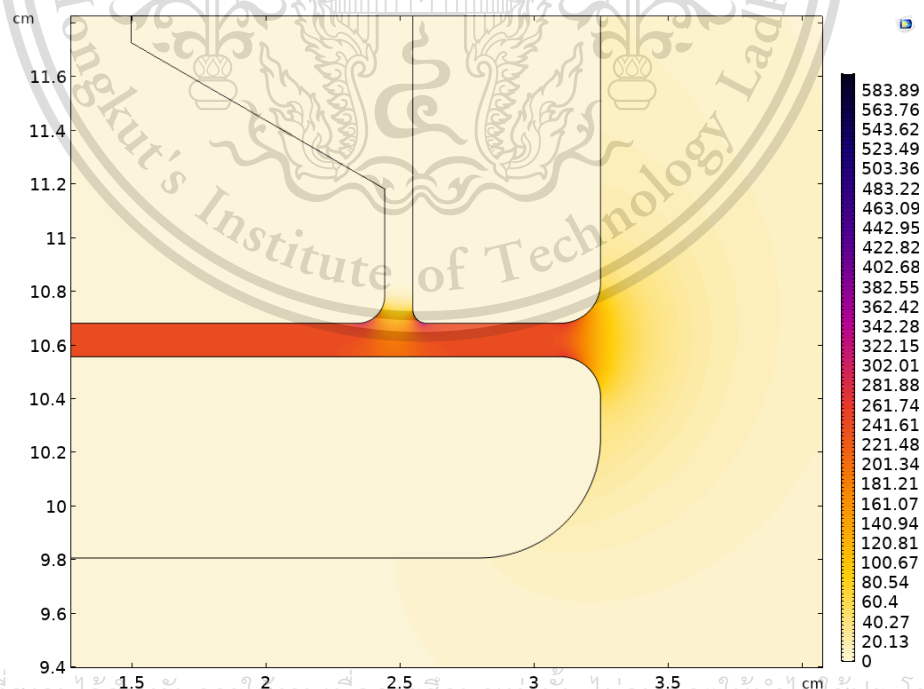
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศที่ระดับแรงดัน 20 kV



รูปที่ 3.13 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศที่ระดับแรงดัน 20 kV

ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศที่ระดับแรงดัน 30 kV



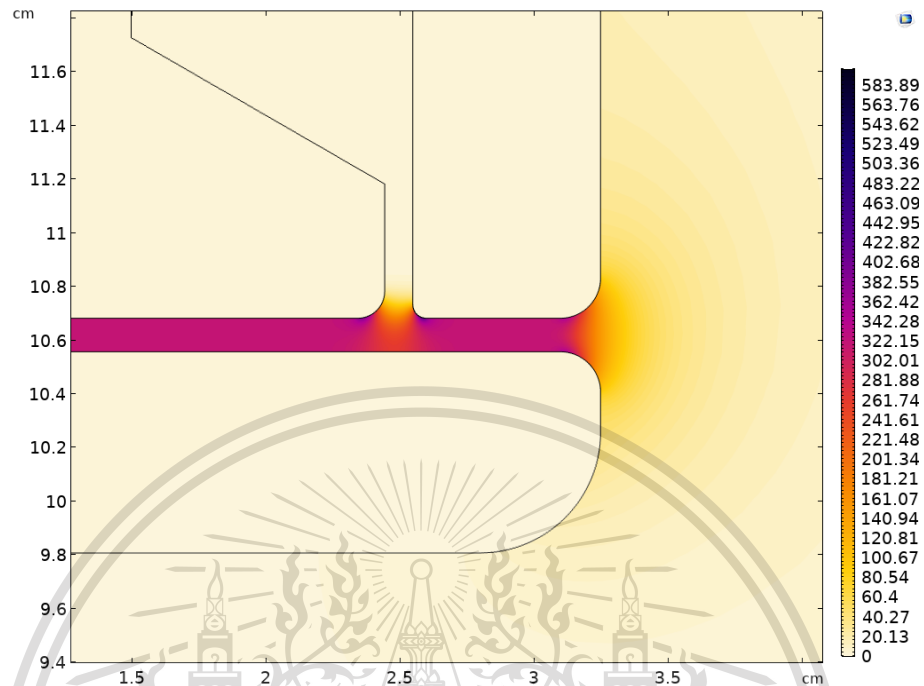
รูปที่ 3.14 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศที่ระดับแรงดัน 30 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

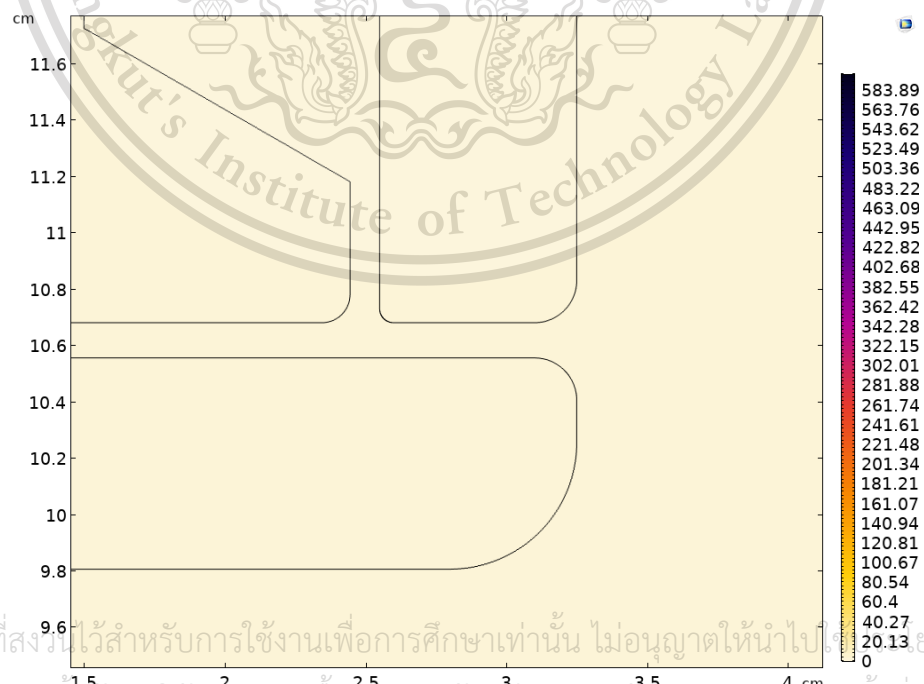
ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศที่ระดับแรงดัน 40 kV



รูปที่ 3.15 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศที่ระดับแรงดัน 40 kV

การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนน้ำมัน

ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนน้ำมันที่ระดับแรงดัน 0 kV



รูปที่ 3.16 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนน้ำมันที่ระดับแรงดัน 0 kV

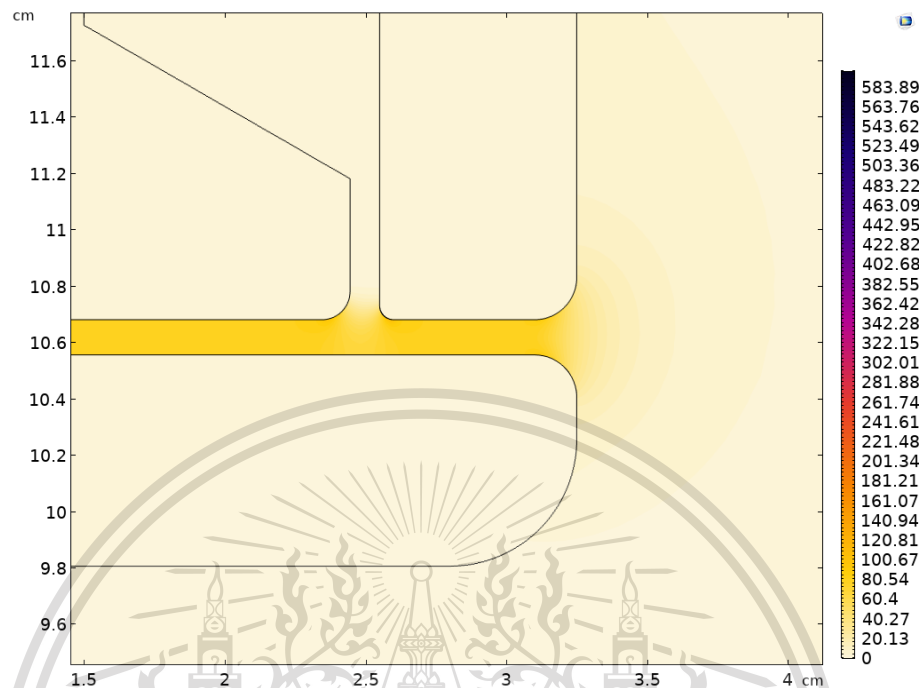
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไป

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น กรุณาอย่าปรับแก้เนื้อหา และค่าต่างๆ รวมถึงเนื้อหาเอกสารหรือการนำเนื้อหาไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

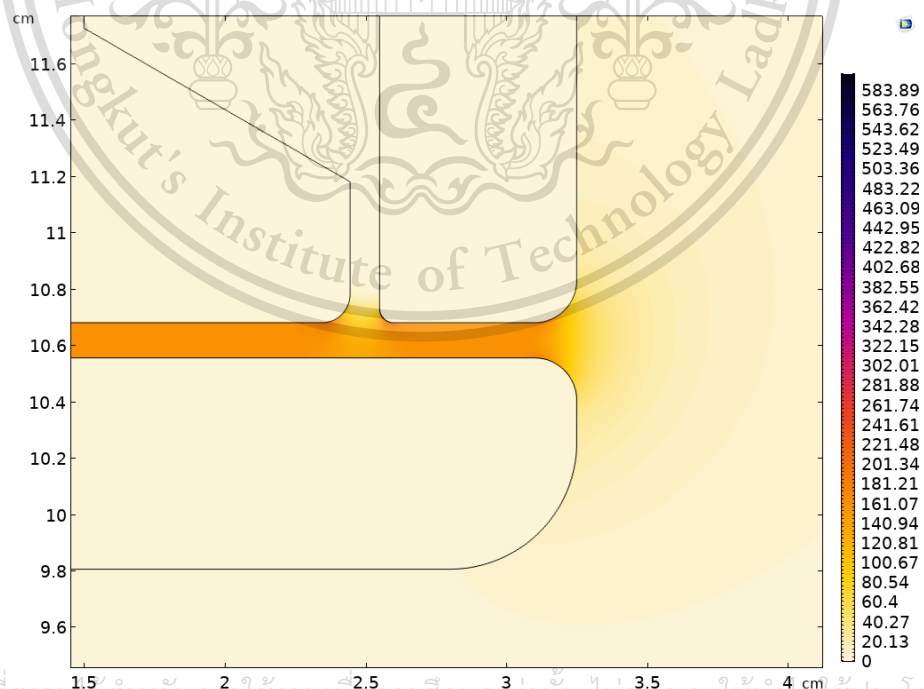
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนน้ำมันที่ระดับแรงดัน 10 kV



รูปที่ 3.17 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนน้ำมันที่ระดับแรงดัน 10 kV

ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนน้ำมันที่ระดับแรงดัน 20 kV



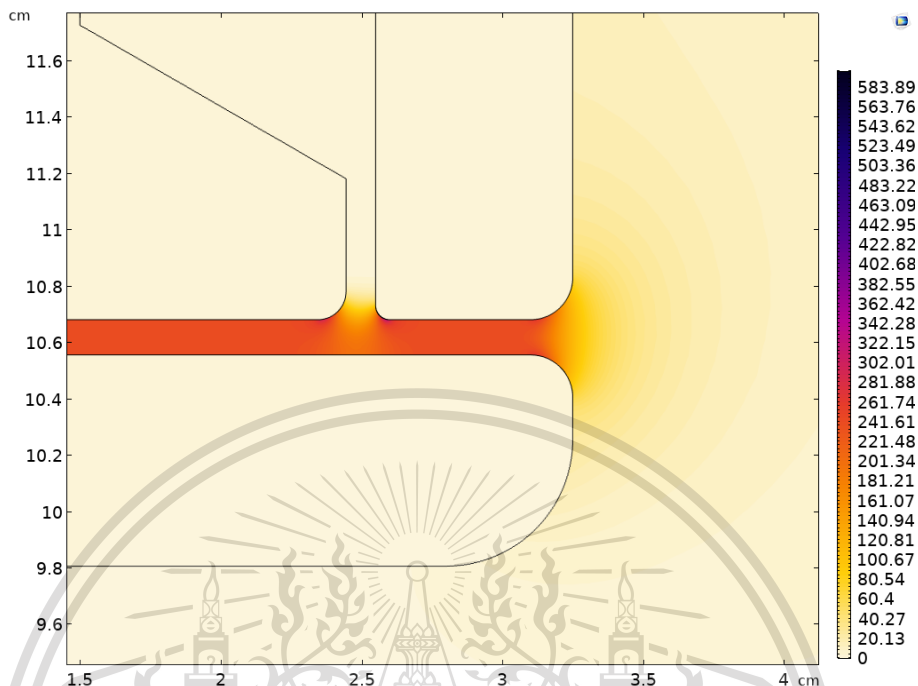
รูปที่ 3.18 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนน้ำมันที่ระดับแรงดัน 20 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

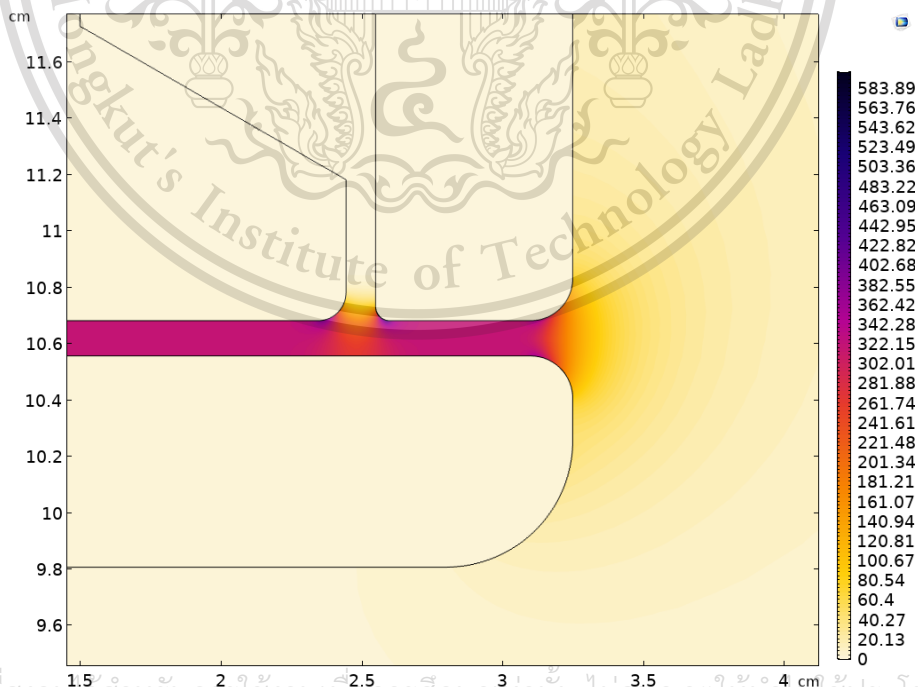
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนน้ำมันที่ระดับแรงดัน 30 kV



รูปที่ 3.19 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนน้ำมันที่ระดับแรงดัน 30 kV

ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนน้ำมันที่ระดับแรงดัน 40 kV



รูปที่ 3.20 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนน้ำมันที่ระดับแรงดัน 40 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 3.1 ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศและฉนวนน้ำมัน

ระดับแรงดัน (kV)	ค่าเฉลี่ยความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณอิเล็กโทรด (kV/cm)	
	ฉนวนอากาศ	ฉนวนน้ำมัน
0	0	0
10	109.264	109.244
20	218.527	218.488
30	327.791	327.731
40	437.054	436.975

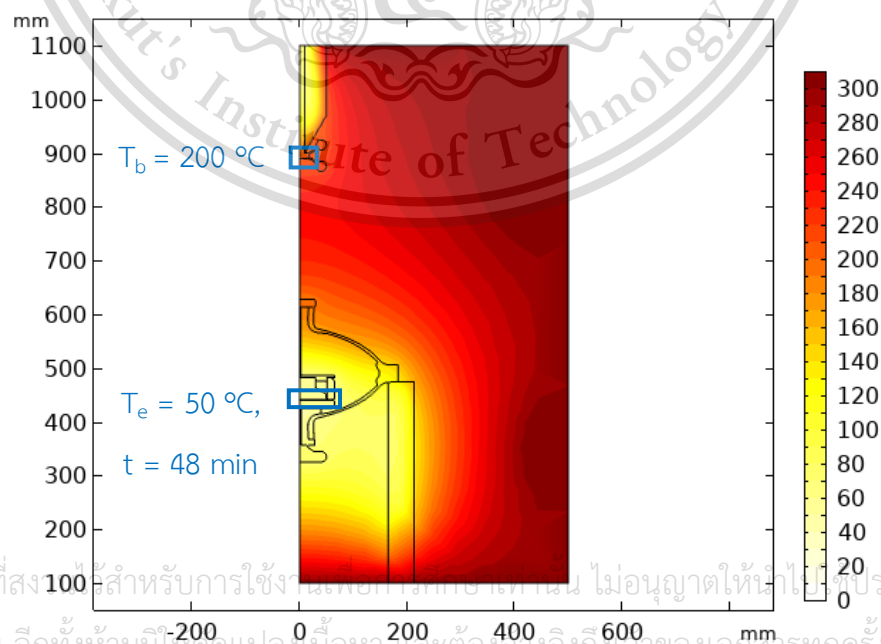
3.2.3 การจำลองการกระจายความร้อน

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

การจำลองการกระจายความร้อนจึงจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการกระจายความร้อนจากตู้ไปยังฉนวนและอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยแบ่งการจำลองเป็น 2 ส่วน ดังนี้

3.2.3.1 การจำลองการกระจายความร้อนในอากาศ

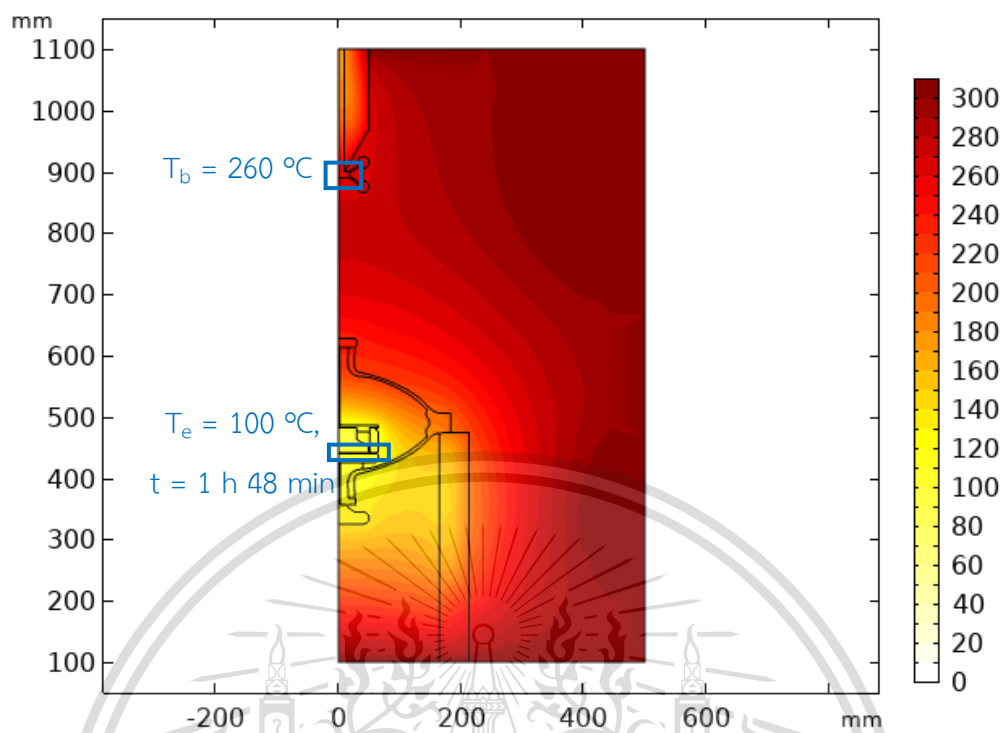
ผลการจำลองการกระจายความร้อนในอากาศที่อุณหภูมิทั้งหมด 5 อุณหภูมิ ได้แก่ 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียส



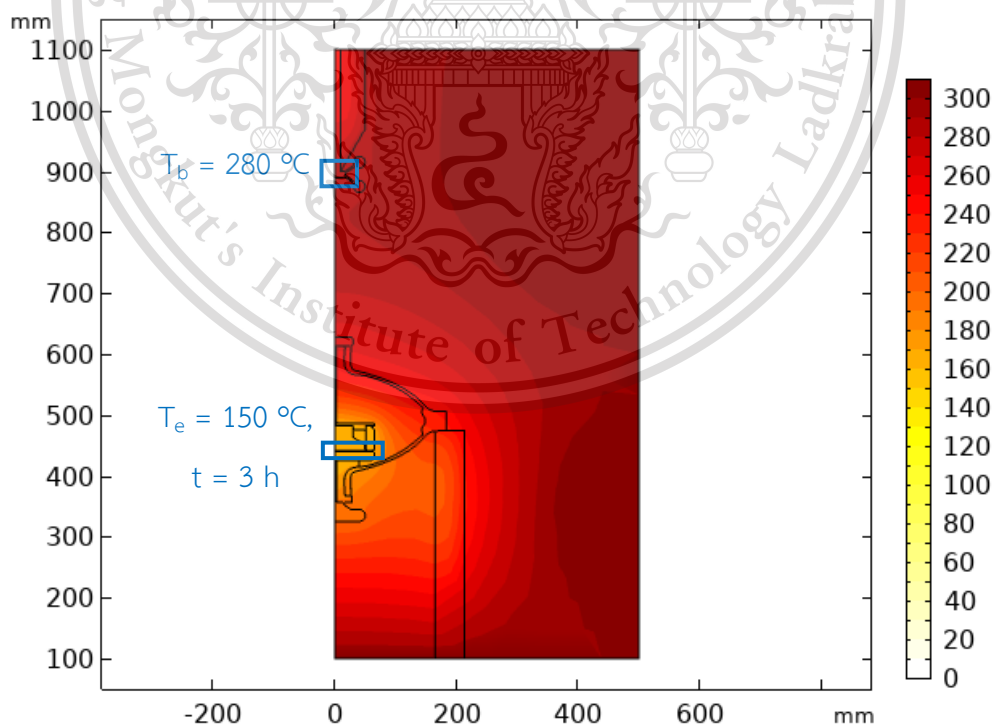
รูปที่ 3.21 การจำลองการกระจายความร้อนในอากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.22 การจำลองการกระจายความร้อนในอากาศที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

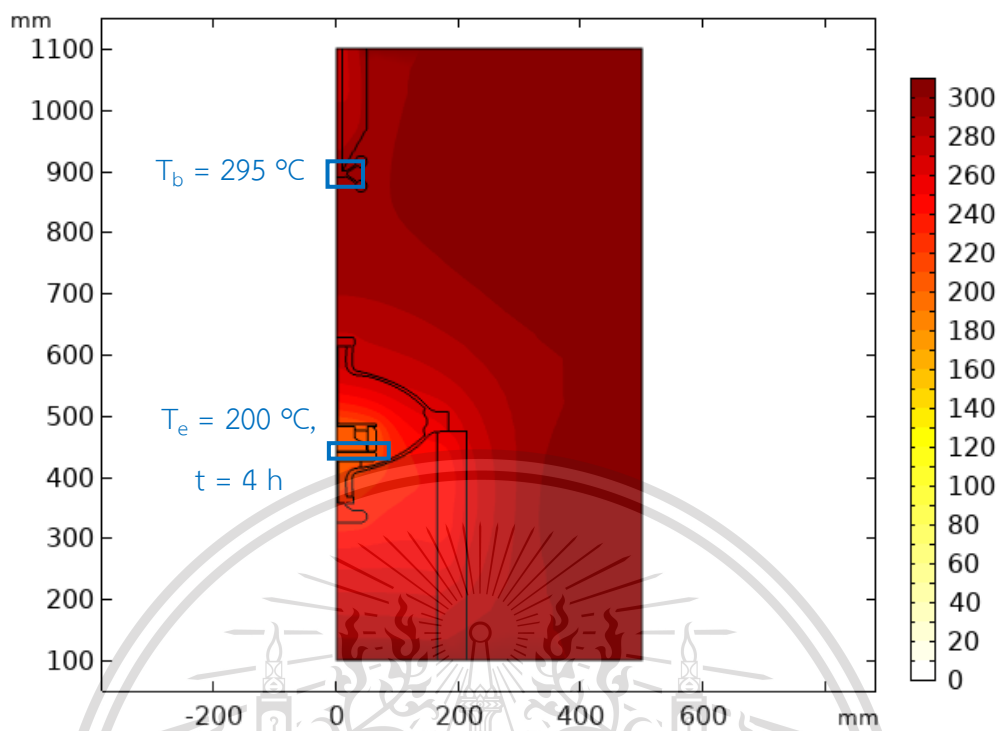


รูปที่ 3.33 การจำลองการกระจายความร้อนในอากาศที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

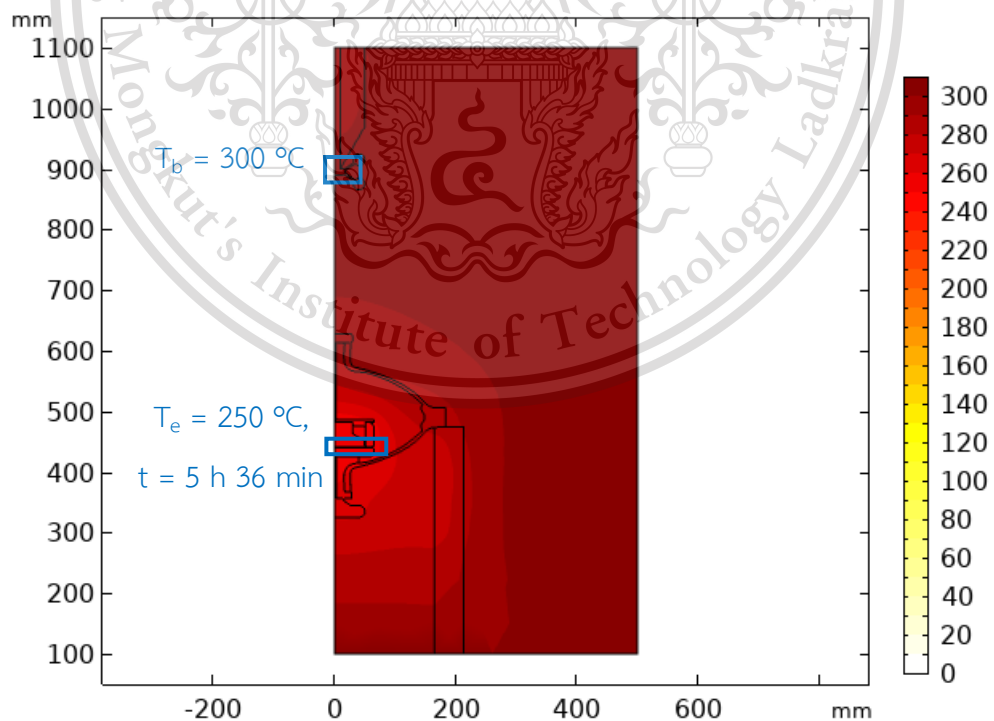
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เชิงพาณิชย์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.34 การจำลองการกระจายความร้อนในอากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

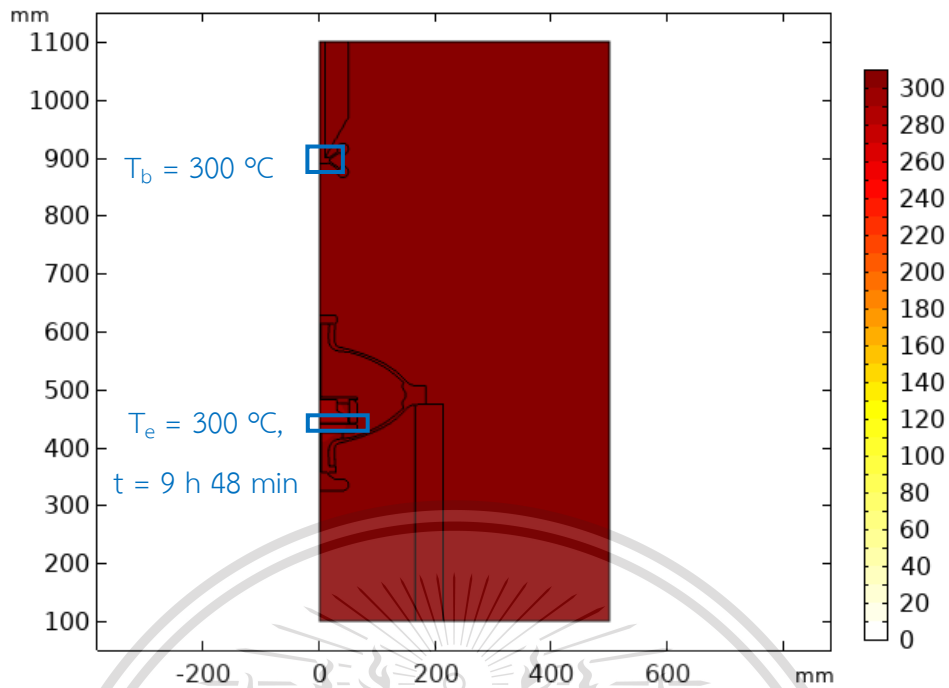


รูปที่ 3.35 การจำลองการกระจายความร้อนในอากาศที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

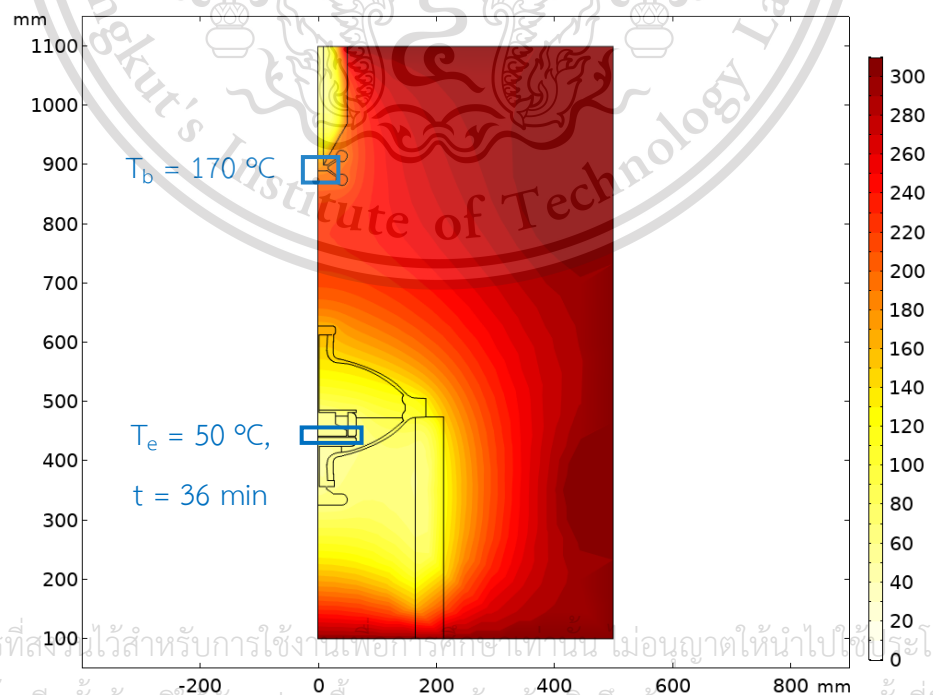


รูปที่ 3.36 การจำลองการกระจายความร้อนในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

3.2.3.2 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวนหลายชนิดต่าง ๆ

การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวนหลายชนิด Mineral Oil

ผลการจำลองการกระจายความร้อนในฉนวนชนิด Mineral Oil ที่อุณหภูมิ ทั้งหมด 5 อุณหภูมิ ได้แก่ 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียส



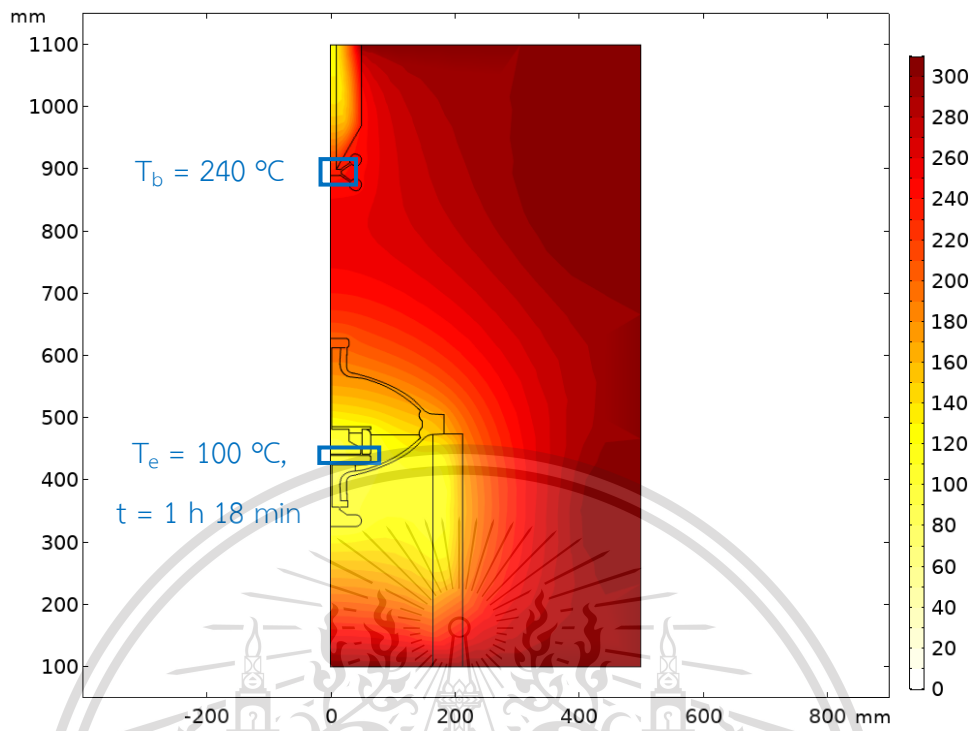
รูปที่ 3.37 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวน Mineral Oil ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

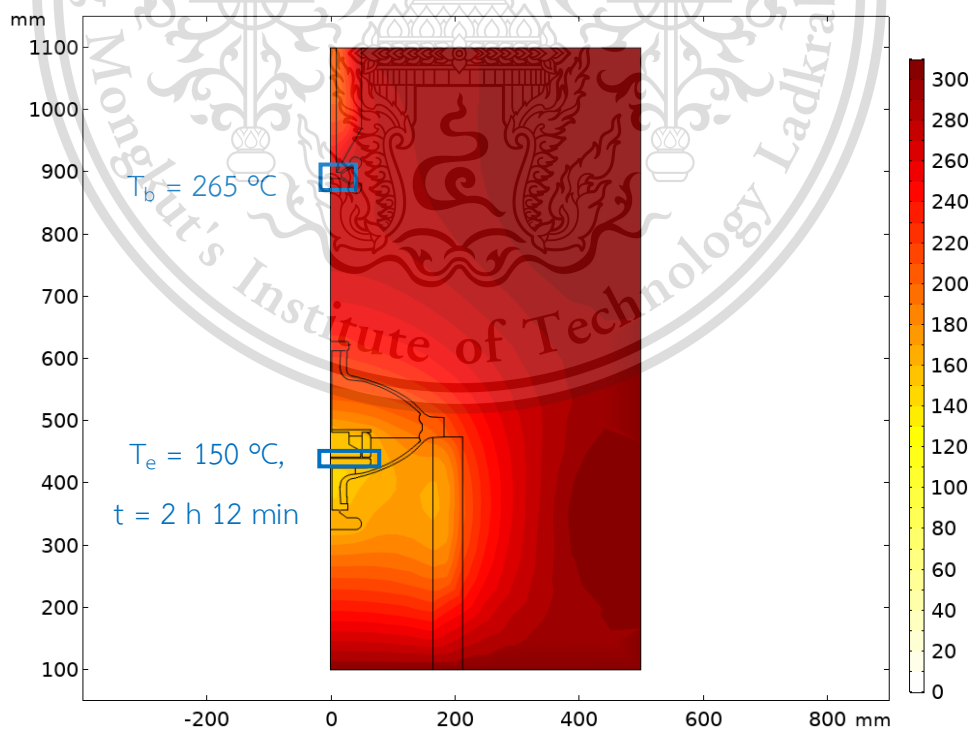
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลีวทั้งหมดเป็นของคนเราไม่ต้องอ้างถึงถึงค่าของเอกสารหรือร่างที่อนุญาตนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.38 การจำลองการกระจายความร้อนในถนนวน Mineral Oil ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส



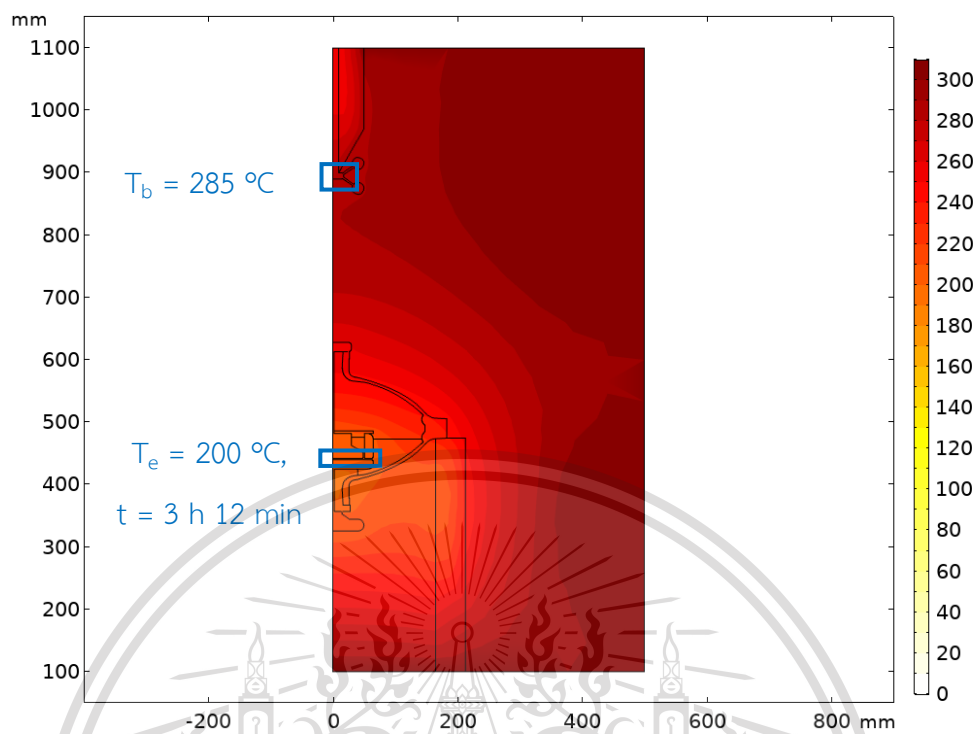
รูปที่ 3.39 การจำลองการกระจายความร้อนในถนนวน Mineral Oil ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของบริษัทฯ เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่ให้ผู้ใดนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

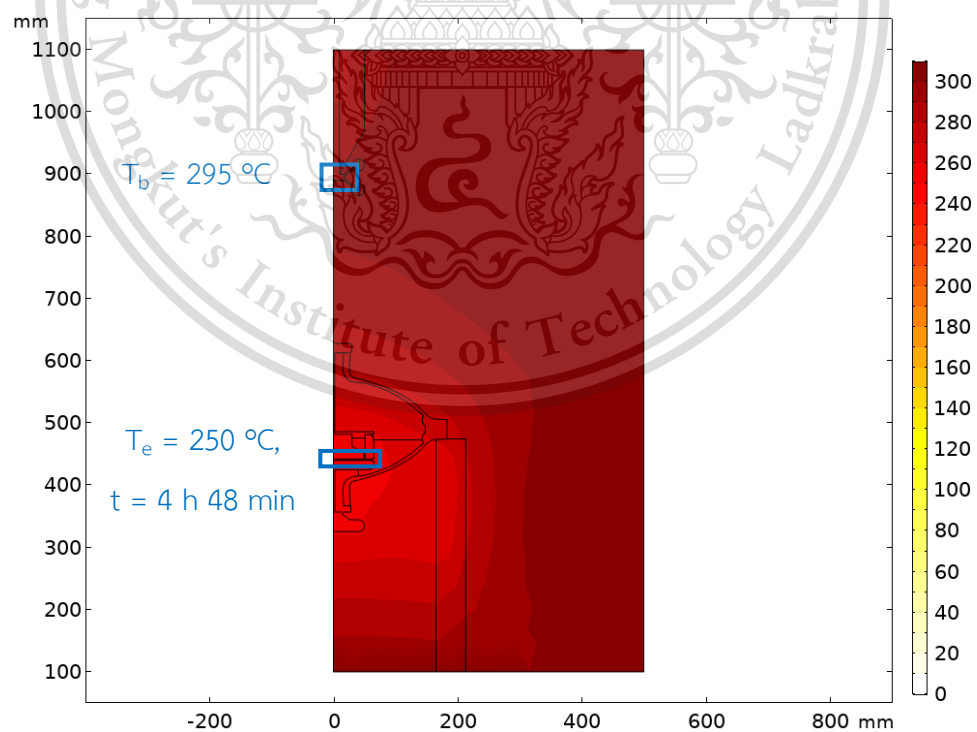
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.40 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวน Mineral Oil ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส



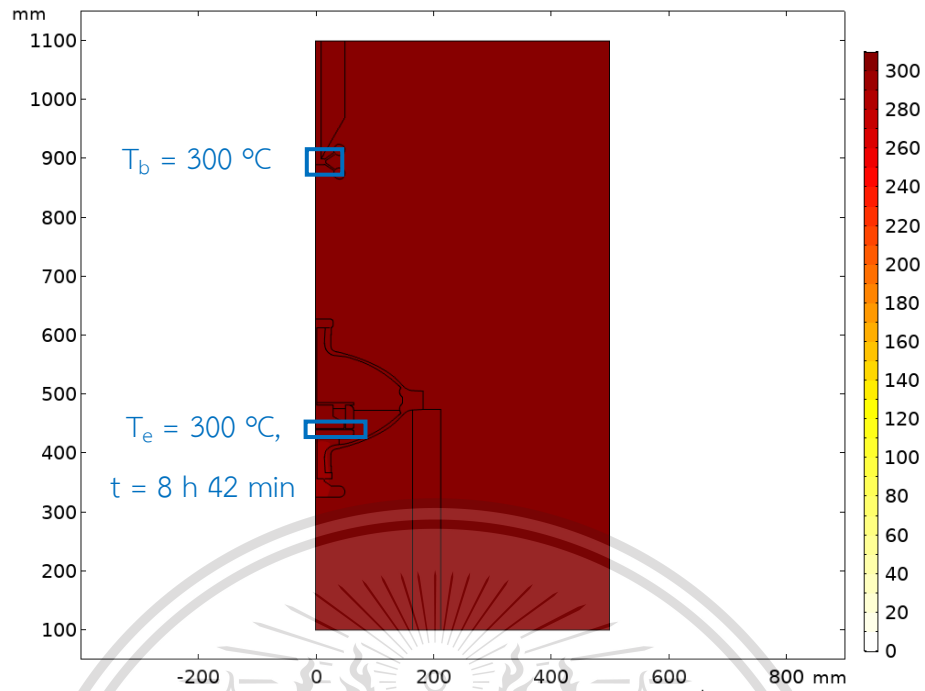
รูปที่ 3.41 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวน Mineral Oil ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อจำหน่ายหรือใช้เพื่อประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

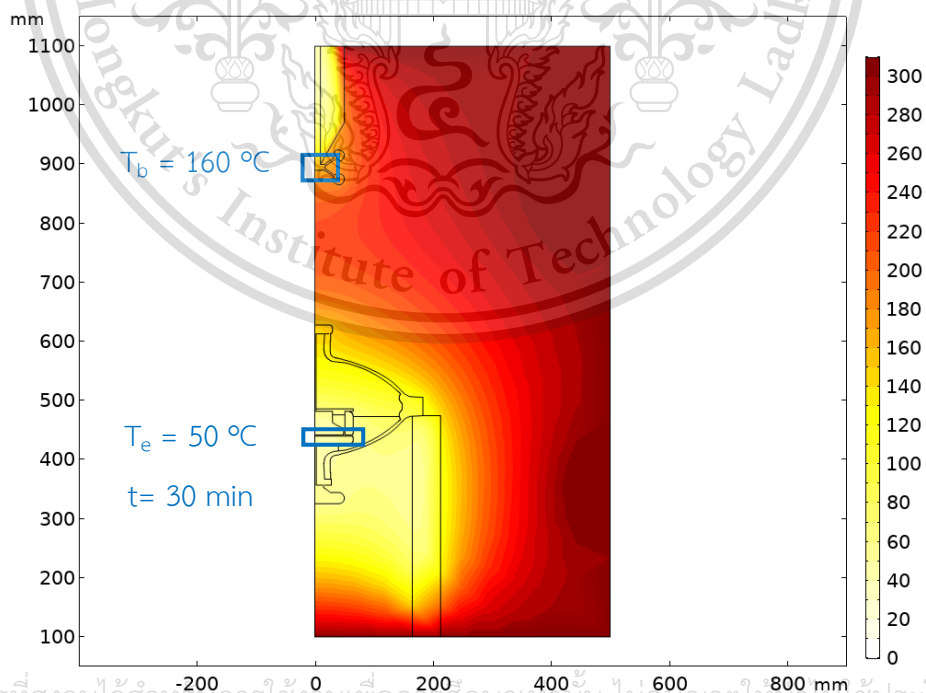
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.42 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวน Mineral Oil ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวนเหลวชนิด FR3

ผลการจำลองการกระจายความร้อนในฉนวนชนิด FR3 ที่อุณหภูมิ ทั้งหมด 5 อุณหภูมิ ได้แก่ 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียส

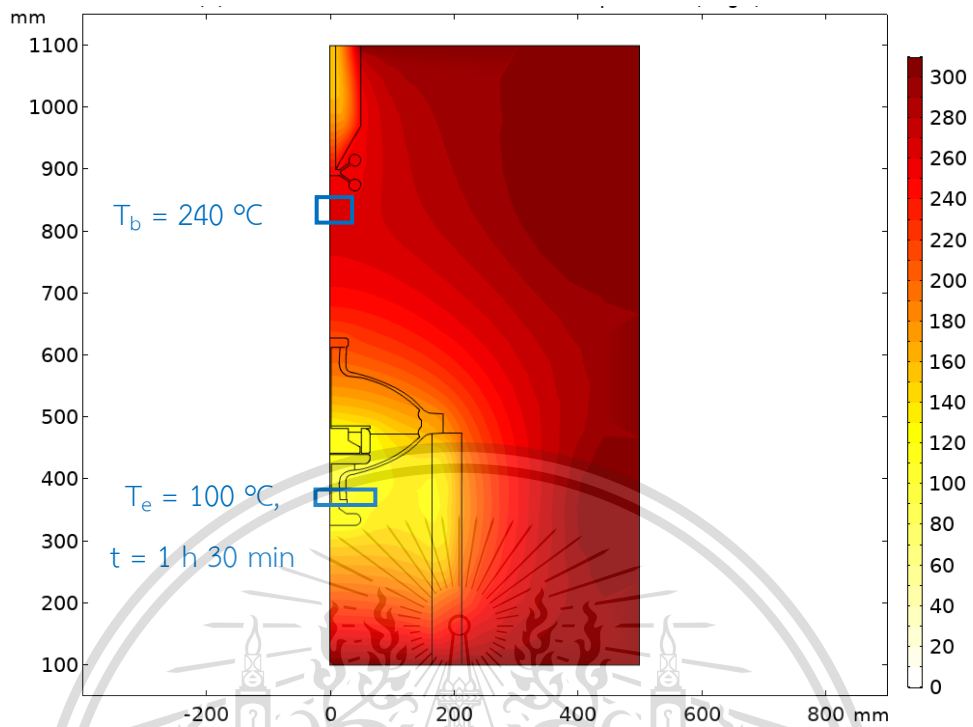


รูปที่ 3.43 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวนชนิด FR3 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

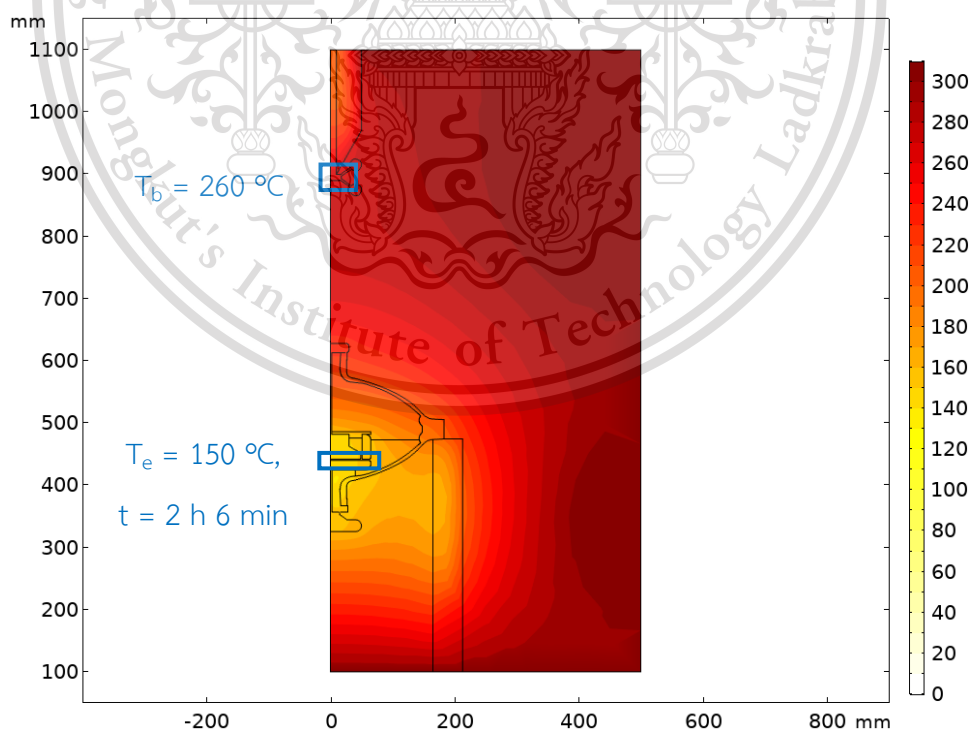
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.44 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวนชนิด FR3 ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

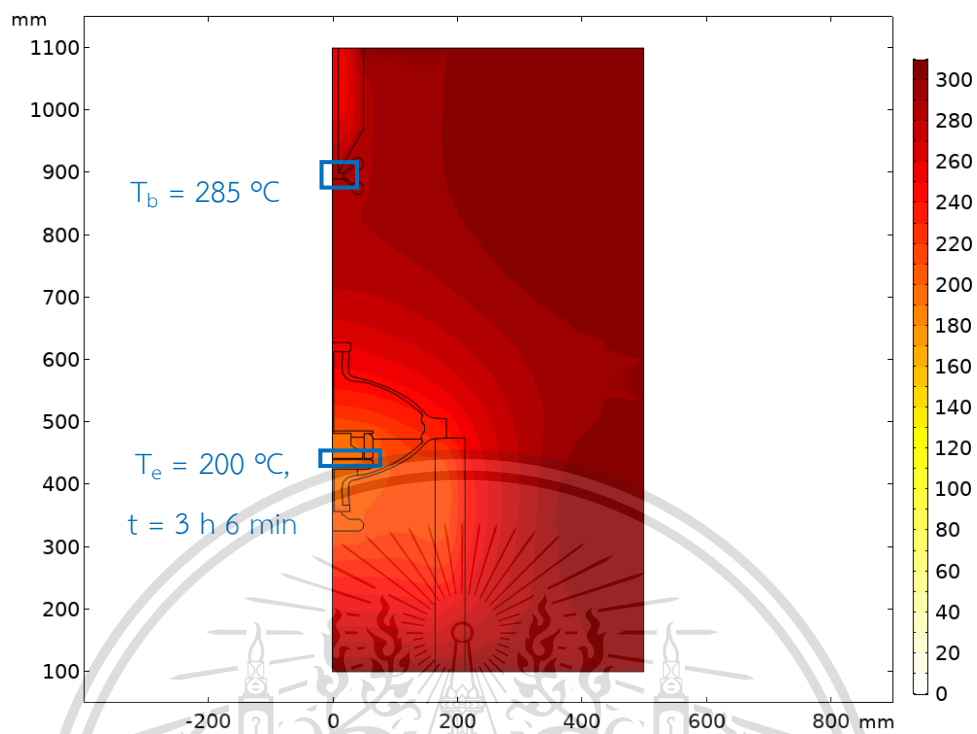


รูปที่ 3.45 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวนชนิด FR3 ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

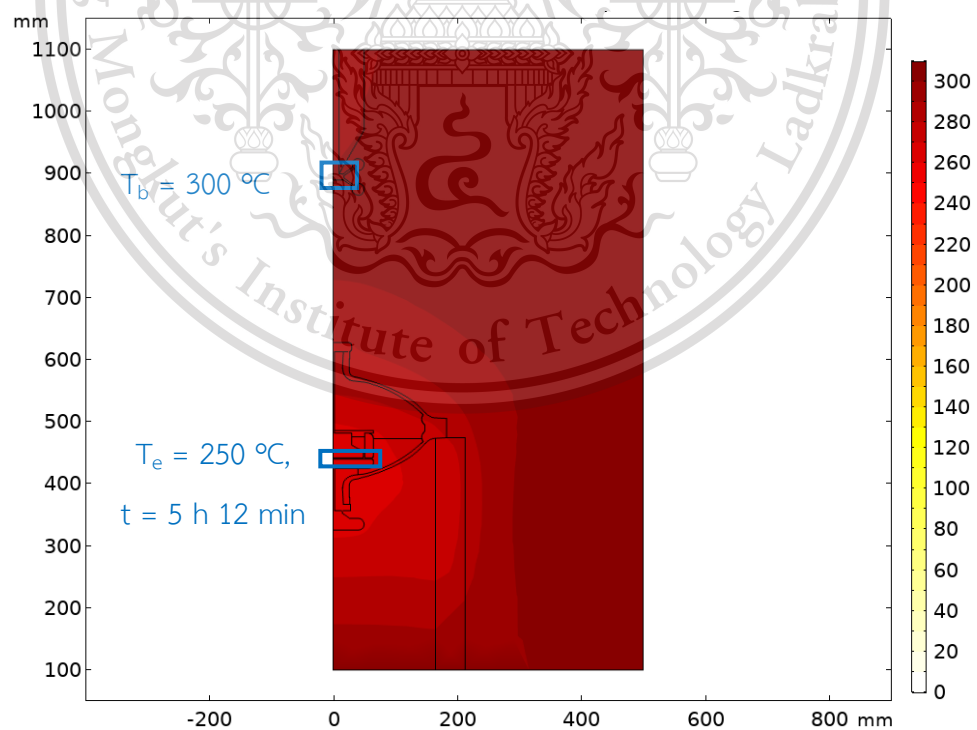
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิใช่เพื่อใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.46 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวนชนิด FR3 ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

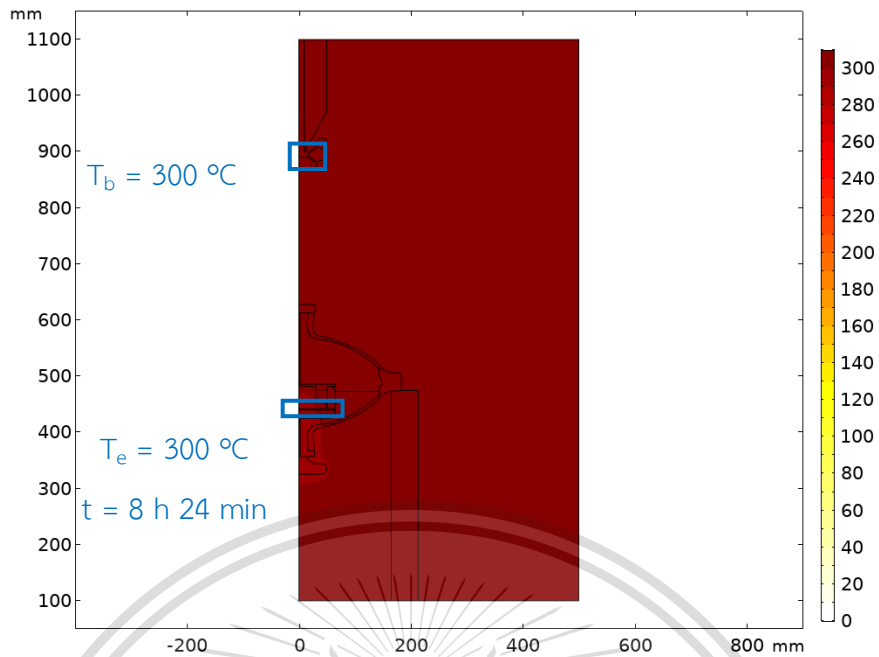


รูปที่ 3.47 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวนชนิด FR3 ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

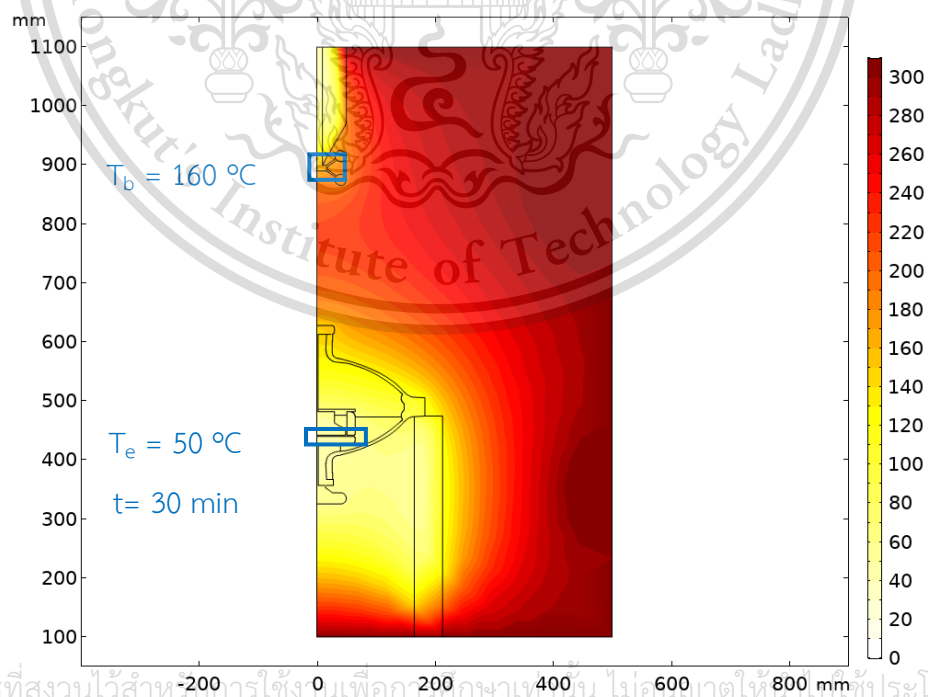
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.48 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวนชนิด FR3 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวนเหลวชนิด Silicone Oil

ผลการจำลองการกระจายความร้อนในฉนวนชนิด Silicone Oil ที่อุณหภูมิ ทั้งหมด 5 อุณหภูมิ ได้แก่ 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียส



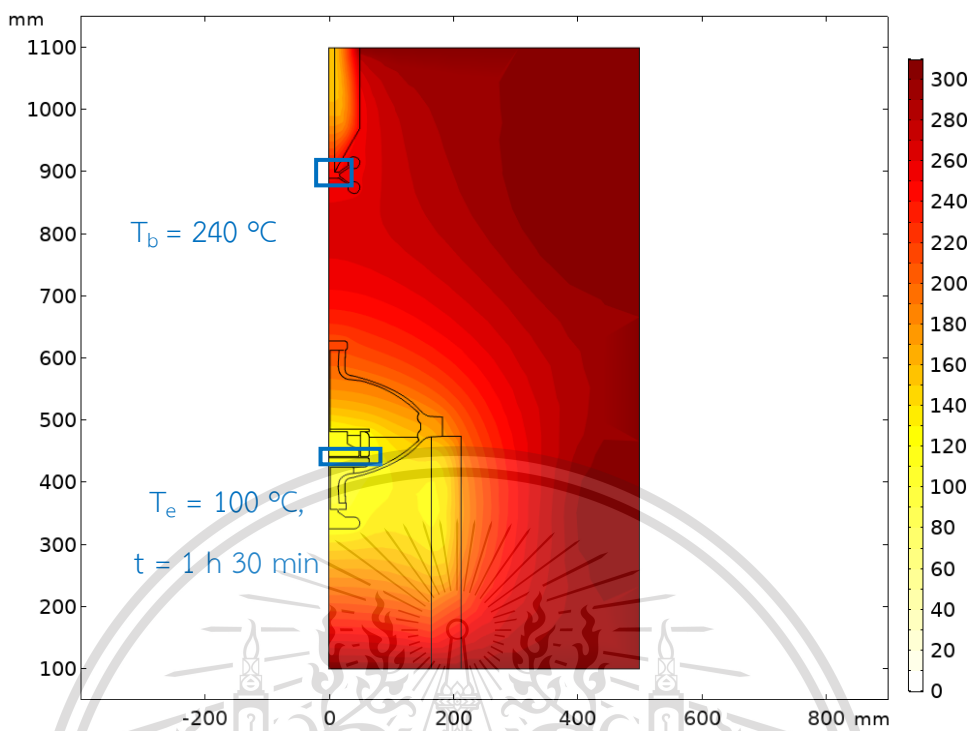
รูปที่ 3.49 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวน Silicone Oil ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ผู้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

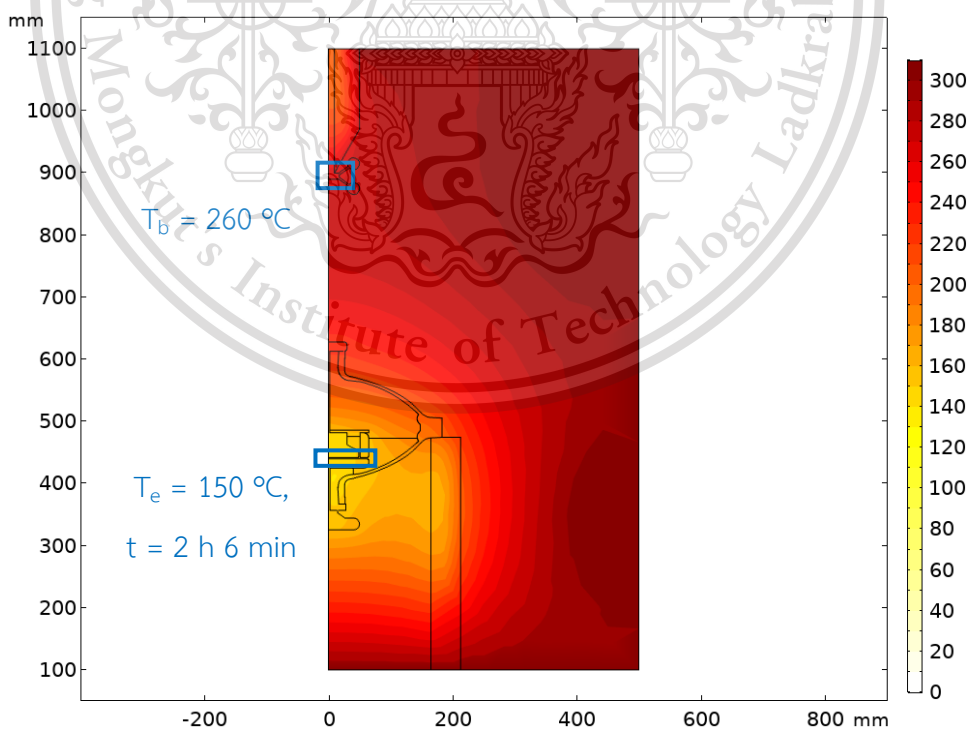
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.50 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวน Silicone Oil ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส



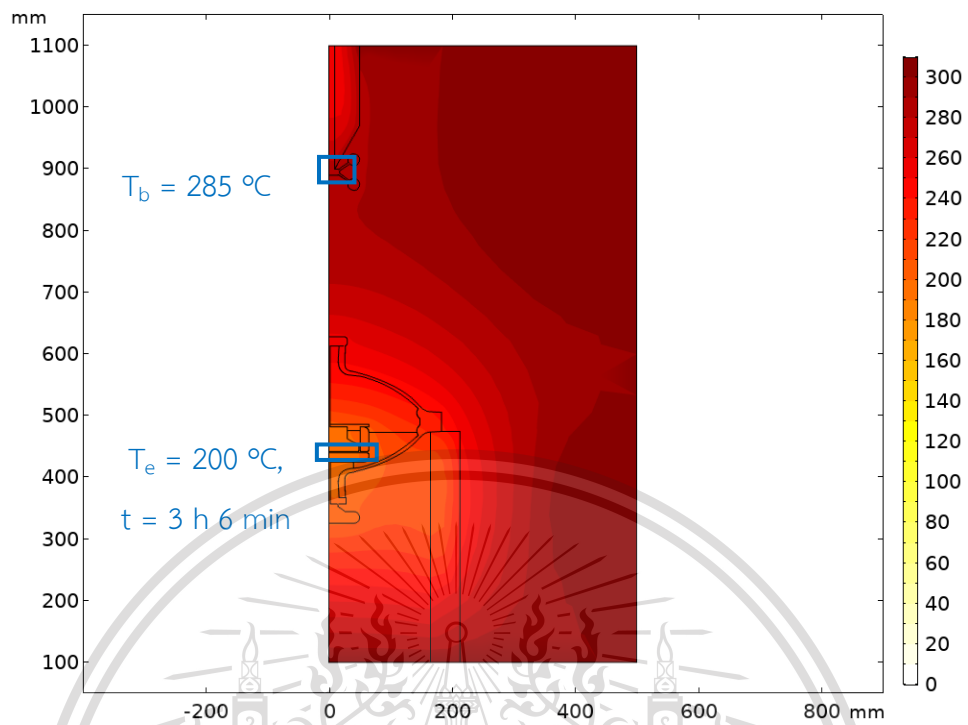
รูปที่ 3.51 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวน Silicone Oil ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

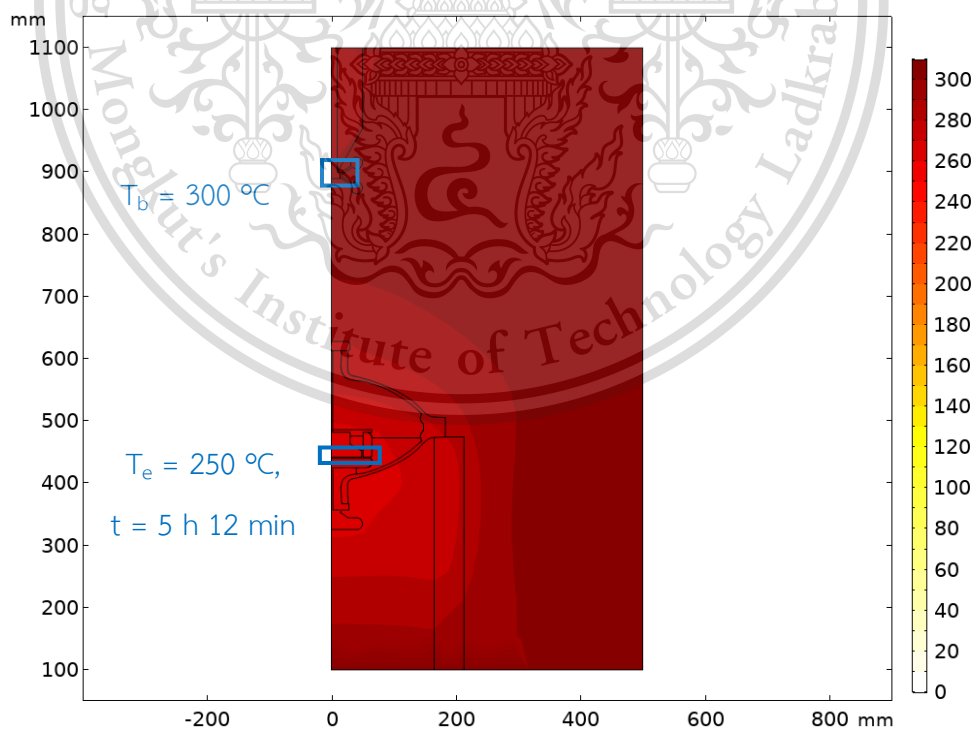
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.52 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวน Silicone Oil ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส



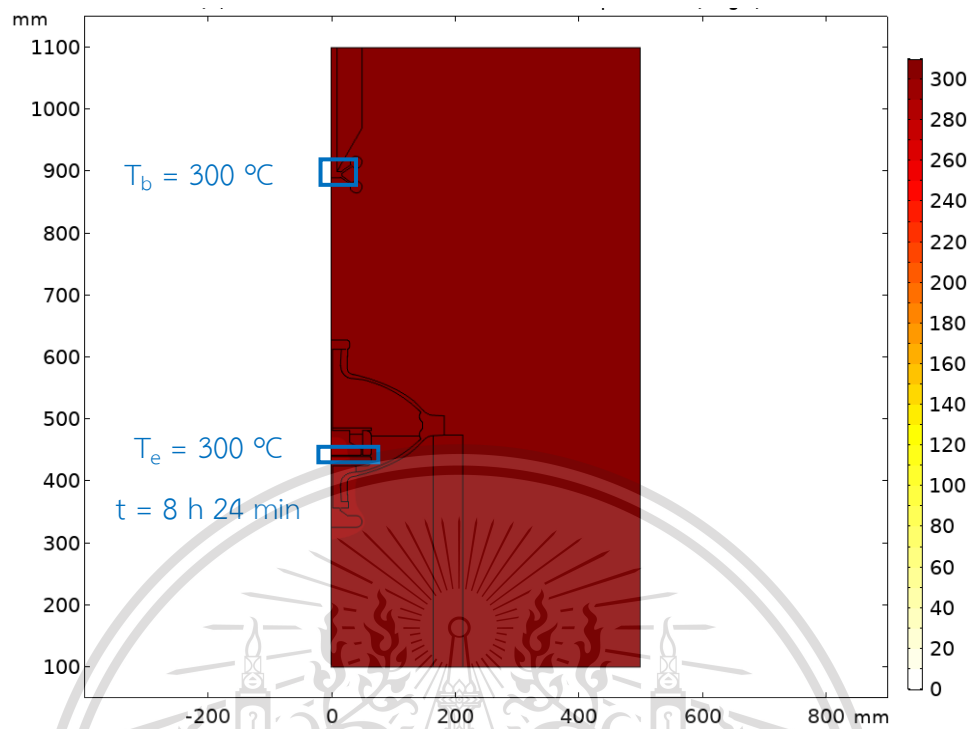
รูปที่ 3.53 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวน Silicone Oil ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.54 การจำลองการกระจายความร้อนในฉนวน Silicone Oil ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

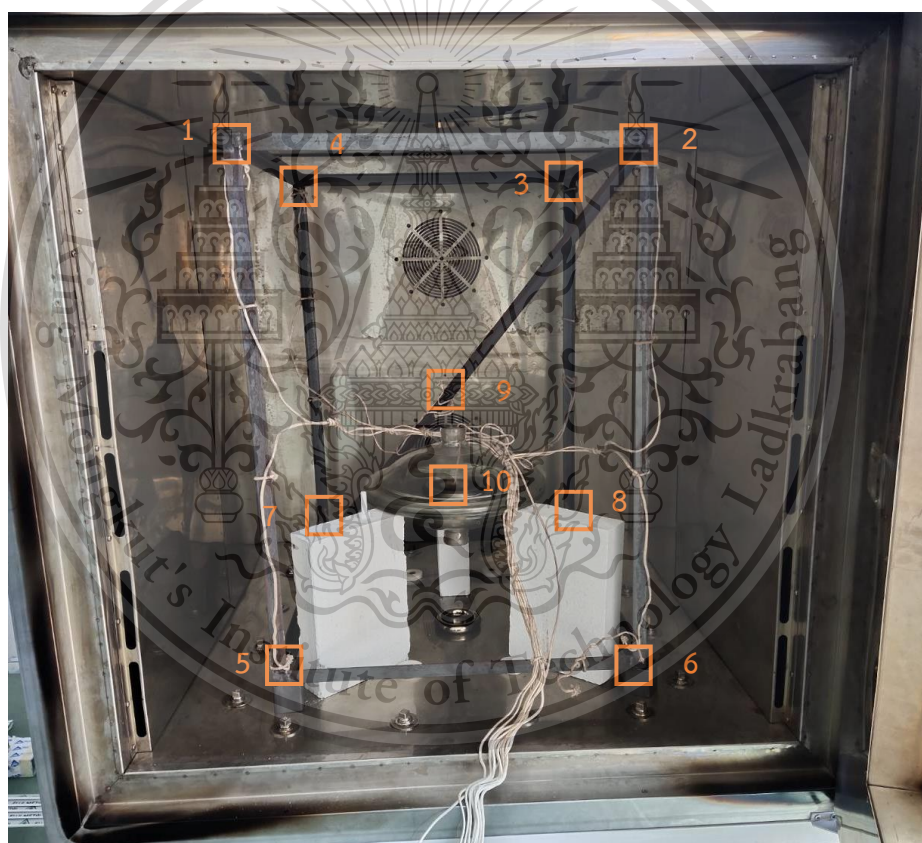
บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การทดสอบการกระจายความร้อนของตู้ควบคุมอุณหภูมิ

การทดสอบการกระจายความร้อนของตู้ควบคุมความร้อน ทำโดยการจัดวางโครงเหล็กเพื่อติดตั้ง Thermocouple ที่มุมต่าง ๆ ภายในตู้ ดังที่แสดงในรูปที่ 4.1 ตั้งค่าอุณหภูมิที่ 350 องศาเซลเซียส และ บันทึกค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ และเวลาที่เข้าสู่อุณหภูมิที่กำหนด ได้ผลดังตารางที่ 4.1

□ : ตำแหน่งติดตั้ง Thermocouple (ทั้งหมด 10 จุด)



รูปที่ 4.1 ตำแหน่งติดตั้ง Thermocouple ทั้ง 10 จุด

หมายเหตุ: หมายเลข 1-4 บริเวณมุมโครงเหล็กแต่ละมุมด้านบน

หมายเลข 5-8 บริเวณมุมโครงเหล็กแต่ละมุมด้านล่าง

หมายเลข 9 บริเวณกึ่งกลางของโครงเหล็ก

หมายเลข 10 บริเวณช่องว่างภายในอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.1 เวลาที่เข้าสู่อุณหภูมิตั้งค่าที่ตำแหน่งหมายเลข 1-10

อุณหภูมิที่จุดอ้างอิง (หน้าตู้) (°C)	เวลาที่เข้าสู่อุณหภูมิตั้งค่า (min)	อุณหภูมิที่ตำแหน่งหมายเลข (°C)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
36.9	0	37.3	37.4	37.8	37.2	35.8	36.1	36	36.6	35.8	36
55.6	16	64.8	64.8	66.9	63.6	49.4	49.8	48.3	52.1	57.3	35.7
100.5	20	122.5	124.1	120.6	115.7	85.6	84.9	79.7	91.6	105.5	36.5
148.2	24	175	180.9	176.3	167.3	125	123.4	116	135.3	156.7	37.9
201.0	29	223.4	233.6	223.9	221.1	171.1	171.1	164	182.1	208.9	40.3
254.4	35	268.8	279.5	273.4	265	219	219.6	211.1	229	254.6	45.3
301.2	46	298.3	302.6	303	295.5	268.1	264.7	261.4	270.6	292.7	60.8
300.6	219	279.6	280.8	279.5	279.6	269.9	269.4	269.8	270.9	280	250.5



รูปที่ 4.2 ขณะทำการติดตั้ง Thermocouple



รูปที่ 4.3 ขณะติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

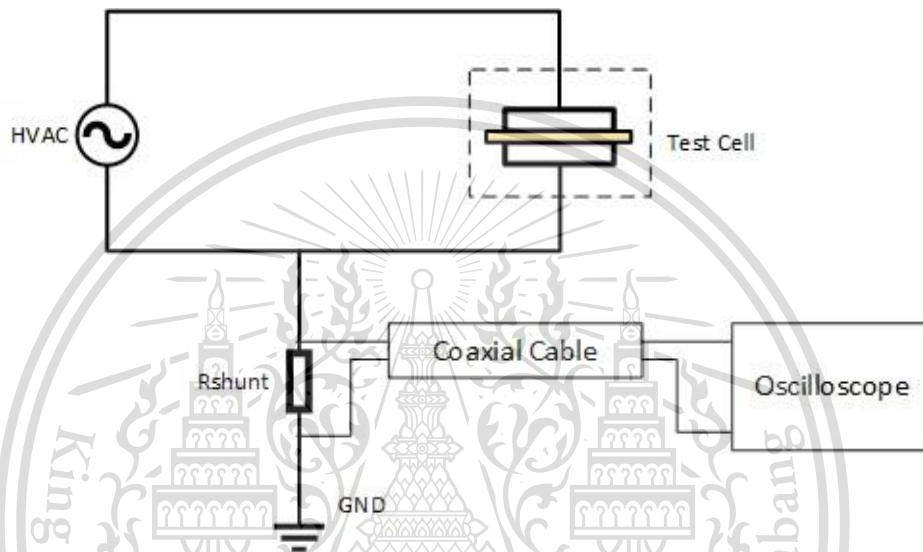
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.2 การทดลองเพื่อวัดกระแสตามผิวของกระดาศที่แช่ในน้ำมัน

สร้างชุดอุปกรณ์เพื่อวัดกระแสรั่วไหลตามผิวของกระดาศที่แช่ในน้ำมัน เพื่อทดสอบการทำงานของตู้อบความร้อนและเป็นฉนวนของกระดาศ โดยต่อวงจรดังรูปที่ 4.4 (นำกระดาศแช่ในน้ำมันบรรจุในวงจรถดสอบ) จ่ายแรงดันเริ่มต้นที่ 1 kV โดยเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก (80% ของแรงดันทดสอบ) แล้วค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อถึงที่ระดับแรงดันทดสอบสังเกตแรงดันที่เกิดขึ้นบริเวณตัวต้านทาน บันทึกค่า แล้วนำมาคำนวณหากระแสรั่วไหล ($V=IZ$) ได้ผลดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.4 วงจรการทดลองเพื่อวัดกระแสรั่วไหลตามผิวของกระดาศที่แช่ในน้ำมัน

ตารางที่ 4.2 กระแสรั่วไหลตามผิวของกระดาศที่แช่ในน้ำมัน

แรงดันทดสอบ (kV)	แรงดันตกคร่อม R (V)	กระแสรั่วไหล (mA)
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		

ไม่สามารถทำการทดลองได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ 9 การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมี 10 ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.2 กระแสรั่วไหลตามผิวของกระดาศที่แช่น้ำมัน (ต่อ)

แรงดันทดสอบ (kV)	แรงดันตกคร่อม R (V)	กระแสรั่วไหล (mA)
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		
22		
23		
24		
25		
26		
27		
28		
29		
30		

หมายเหตุ: เนื่องจากสถานการณ์โควิด-19 ทำให้ทางสถาบันและทางบริษัทเอกชน ประกาศไม่ให้เข้าพื้นที่ เบื้องต้นทางคณะผู้จัดทำได้จัดเตรียมอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง และออกแบบการทดลองไว้แล้ว แต่ไม่สามารถเข้าไปดำเนินการต่อได้ด้วยสถานการณ์ดังกล่าว จึงไม่มีผลการทดลองในตารางนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ผลการทดสอบการกระจายความร้อนของตู้ควบคุมอุณหภูมิ

จากการทดสอบการกระจายความร้อนภายในตู้โดยใช้อากาศเป็นฉนวน พบว่าเวลาที่อุณหภูมิของตู้และอิเล็กทรอนิกส์เข้าสู่ 300 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลที่ได้จากการจำลองความร้อน ในหัวข้อ 3.2.3 การจำลองการกระจายความร้อน ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบเวลาที่อุณหภูมิของตู้และอิเล็กทรอนิกส์เข้าสู่ 300 องศาเซลเซียส ระหว่างการจำลองผลการทดลอง และผลการทดลองจริง

อุณหภูมิที่กึ่งกลางอิเล็กทรอนิกส์ (°C)	เวลาที่ใช้	
	การจำลองผล	การทดสอบจริง
50	48 นาที	42 นาที
100	1 ชั่วโมง 48 นาที	1 ชั่วโมง 10 นาที
150	3 ชั่วโมง	1 ชั่วโมง 35 นาที
200	4 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง 17 นาที
250	5 ชั่วโมง 36 นาที	3 ชั่วโมง 40 นาที
300	9 ชั่วโมง 48 นาที	-

5.1.2 การทดลองเพื่อวัดกระแสตามผิวของกระดาศที่แช่น้ำมัน

ไม่สามารถทำการทดลองได้ เนื่องจากสถานการณ์โรคระบาด โควิด-19

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

1. สถานการณ์โรคระบาด โควิด-19 ทำให้ทางมหาวิทยาลัย รวมถึงบริษัทเอกชนที่ทางนักศึกษาได้ขออนุญาตติดต่อไปเพื่อใช้พื้นที่สำหรับการทดลอง มีประกาศไม่ให้เข้าใช้พื้นที่ ทำให้การดำเนินงานตามแผนการดำเนินงานที่เตรียมไว้ ไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้
2. ระยะเวลาที่ใช้ในการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในตู้จากผลการทดลองจริงมีค่าที่ต่างจากผลที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ได้จากการจำลองการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

5.3 ข้อเสนอในการพัฒนาต่อ

1. สำหรับผู้ที่สนใจและต้องการศึกษาสามารถนำไปออกแบบการทดลอง และทำการทดลองเพื่อต่อยอดได้
2. เพื่อความแม่นยำของการจำลองผลอาจจำเป็นต้องศึกษาปัจจัยที่มีผลเกี่ยวข้องกับการแผ่ความร้อนเพิ่มเติมเพื่อให้ผลที่ได้จากการจำลองและผลการทดลองจริง มีค่าที่ใกล้เคียงกันมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำรววย สัจจ์สะอาด, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**, พิมพ์ครั้งที่ 4, กรุงเทพฯ, โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2561.
- [2] Yunus A.Cengel, and Afshin J.Ghajar, **Heat And Mass Transfer: Fundamental & Applications**, 5th Ed., McGraw-Hill Education, 2015.
- [3] Dipl.Ing. Gerfrid Newesely, "Transformer cooling - The impact of oil viscosity on the performance", **Electric Energy T&D Magazine Doble Conference 2005.**, 2005.
- [4] CIGRE A2/D1.41, "HVDC Transformer Insulation:Oil Conductivity", **CIGRE Report.**, 2016.
- [5] Yuan Li, Qiaogen Zhang, Yi Zhao, Tonglei Wang Guangqi Liu, Ke Wang, "The Influence of Temperature on Partial Discharges and Wormhole Effect of Oil-paper Insulation under DC Voltage", **Electrical Insulation Conference (EIC).**, 2017.
- [6] Jompatara Siriworachanyadee, Sakda Maneerot, Phethai Nimsanong, Prakob Kitchaiya, Norasage 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).**, 2019.
- [7] M. Krins, H. Borsi, E. Gockenbach "Influence of Carbon Particles on the Breakdown and Partial Discharge Inception Voltage of Aged Mineral Based Transformer oil", **International Conference on Dielectric Materials Measurements & Applications**, 1996.
- [8] 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).**, 2013.
- [9] IEC 60076-3, Power transformers – Insulation levels, Dielectric tests and external clearances in air.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การออกแบบและประกอบสร้างชุดทดสอบทางไฟฟ้าของฉนวนเหลว
Design and Assembly Electrical Test Cell for Liquid Insulators
เสนอคณะกรรมการการสอบวิชาโครงการงานวิศวกรรม 2
Manuscript Preparation Guideline for Papers Submitted to Project 2 Final Test

เกียรติศักดิ์ วงศ์พานิช¹ ณัฐพล โนนนาแซง¹ พิษญา เสียงโส¹ และวราพรหม ชำนาญธรรม¹
¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 1 ซอย ลลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-Mail: 60010102@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

ปริญญาโทฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและประกอบสร้างชุดทดสอบทางไฟฟ้าของฉนวนเหลว ซึ่งชุดทดสอบและวิธีการทดสอบฉนวนสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในงานด้านไฟฟ้าแรงดันสูงมีอยู่มากมายในปัจจุบัน เช่น การทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงด้วยวิธีการ dielectric breakdown testing เป็นต้น แต่ในหลายๆวิธีการยังไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบได้ ซึ่งอุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของฉนวน ในปริญญาโทฉบับนี้ จะกล่าวถึงการออกแบบอุปกรณ์ทดสอบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและจ่ายแรงดันสูงได้ โดยออกแบบอุปกรณ์ทดสอบ กำเนิดจากผลการจำลองของความเครียดสนามไฟฟ้าและการกระจายของอุณหภูมิภายในตู้ ซึ่งจะช่วยให้การออกแบบผู้ทดสอบทำได้ง่ายขึ้น

คำสำคัญ: ฉนวนเหลว, การออกแบบ, ความเครียดสนามไฟฟ้า, การถ่ายโอนความร้อน

Abstract

The purpose of this thesis is to design and assembly the electrical test cell for liquid insulators. There are several methods and test kits available for insulation testing in high-voltage equipment such as dielectric breakdown testing, etc., Despite that, but many methods are unable to control the Test temperature where the temperature is one of the factors affecting the degradation of the insulation. Therefore, this thesis discusses the design of test equipment capable of controlling temperature and supplying high-voltage electricity based on the simulation results of electric field stress and heat transfer inside the oven.

Keywords: Liquid Insulation, Design, Electrical Field Stress, Heat Transfer

1. บทนำ

ในปัจจุบันระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีการใช้งานหม้อแปลงในการเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นหรือต่ำลงเพื่อส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังผู้บริโภคราย ทำให้หม้อแปลงจัดเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญต่อระบบไฟฟ้าเป็นอย่างมาก

ฉนวนในหม้อแปลงที่นิยมใช้กันส่วนมากในปัจจุบันคือการใช้กระดาษอัดร่วมกับการใช้ฉนวนหม้อแปลง ซึ่งฉนวนแข็งจะไม่นิยมนำมาทดสอบความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าเนื่องจากเมื่อเกิดการเสื่อมสภาพจะไม่สามารถปรับปรุงให้กลับคืนสู่สภาพเดิมได้ จึงมักทดสอบโดยใช้ฉนวนหม้อแปลงเพื่อบ่งชี้ถึงความสามารถในการคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าและสามารถใช้เป็นสื่อที่จะแสดงถึงความผิดปกติภายในของอุปกรณ์ได้ และเพื่อให้การทำงาน ของหม้อแปลงมีประสิทธิภาพ ยืดอายุการใช้งาน และมีความปลอดภัยในการใช้งานจึงควรมีการตรวจสอบสภาพและการบำรุงรักษาฉนวนหม้อแปลงอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งการทดสอบฉนวนหม้อแปลงมีหลายวิธี วิธีการที่ง่ายที่สุดและประหยัดค่าใช้จ่ายที่สุด คือวิธีการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวน (Dielectric Breakdown Voltage Test) และ โดยปกติฉนวนควรมีค่าแรงดันเบรกดาวน์ไม่ต่ำกว่า 30 kV

โดยทั่วไปการทดสอบดังกล่าวจะทำการทดสอบโดยไม่ได้อุณหภูมิปัจจัยภายนอก เช่น อุณหภูมิหรือการสั่นของชุดทดสอบในหม้อแปลง ซึ่งปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อการสูญเสียสภาพความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงได้เช่นกัน ทางคณะผู้จัดทำจึงได้ออกแบบชุดควบคุมอุณหภูมิสำหรับรับการทดสอบฉนวนเหลวขึ้นเพื่อศึกษาและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีผลต่อการสูญเสียสภาพความเป็นฉนวนในฉนวนเหลว

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวเชิงการค้ำ [1]

การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนเหลวนั้นยังไม่มีทฤษฎีที่สามารถนำมารองรับได้แบบแน่นอนเนื่องจากการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนเหลวนั้นมีปัจจัยหลายอย่างที่ส่งผล อาจแบ่งออกได้เป็น 2 แนวคิดหลัก คือ แนวคิดที่หนึ่ง สมมติให้ฉนวนเหลวเป็นเนื้อเดียวกันตลอด และอธิบายการเกิดเบรกดาวน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ความในลักษณะเดียวกันกับกลไกเบรกความในแก๊ส ส่วนอีกแนวคิดได้อธิบายการเกิดเบรกความในจนวนเหลวที่เกิดจากสิ่งเจือปน หรือฟองแก๊ส โดยสรุปคือยังไม่มีแนวคิดที่สามารถอธิบายปรากฏการณ์การเบรกความในได้ทุกกรณี อย่างไรก็ตามการเกิดเบรกความในจนวนเหลวซึ่งการก่อเกิดได้จากสาเหตุดังต่อไปนี้

การเกิดโพรงและฟองแก๊ส (cavitation breakdown) ซึ่งมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่น้อยกว่าจนวนเหลว ซึ่งจะเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดเบรกความในจนวนเหลวได้

การเกิดสิ่งเจือปนของของแข็ง เป็นต้นเหตุทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าในของเหลวเพิ่มขึ้นเฉพาะจุด และสามารถก่อให้เกิดการเบรกความในจนวนเหลวได้

2.2 กลไกของการถ่ายเทความร้อน (Mechanism of heat transfer) [2]

การถ่ายเทความร้อน คือ การส่งผ่านพลังงานความร้อนซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ดังนั้น เมื่อใดก็ตามที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้นในตัวกลางหรือระหว่างตัวกลางการถ่ายเทความร้อนมักจะเกิดขึ้นได้ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี

2.3 ผลกระทบจากความหนืดในการระบายความร้อนภายในหม้อแปลง [3]

โดยทั่วไปการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดและปริมาณของน้ำมันหม้อแปลง, ลักษณะของแผงระบายความร้อน, การติดตั้งพัดลมระบายความร้อน ฯลฯ

ยกตัวอย่างในหม้อแปลงชนิดน้ำมันที่ถูกออกแบบมาเพื่อระบายความร้อนโดยอากาศภายนอก (หรือตามมาตรฐาน IEC เรียกว่า ONAN) จะพิจารณาที่อุณหภูมิของของเหลวเป็นหลัก เช่น ความหนืดของน้ำมัน จะส่งผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในหม้อแปลง ซึ่งความหนืดหรืออัตราการไหลของของเหลวสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 1. ความเร็วการไหล (Flow Speed) สามารถหาได้จากสมการ Frictional Resistance ดังนี้

$$W = \frac{\Delta p \times d^2 \times g}{32 \times l \times \nu} \times \frac{1}{v} \quad (2.1)$$

กล่าวโดยสรุปคือ หากน้ำมันมีความหนืดยิ่งน้อยเท่าใด อัตราไหลของน้ำมันจะยิ่งสูงขึ้นเท่านั้น และประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนก็จะสูงขึ้นไปด้วย

2. Heat Exchange Factor

การแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นจะเกิดขึ้นระหว่างพื้นที่ผิวของขดลวดและน้ำมัน ซึ่งปัจจัยนี้จะมาช่วยในการปรับปรุงคุณลักษณะด้านความหนืด

ของของเหลว ซึ่งในที่นี้จะใช้เลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number) ในการบอกลักษณะการไหลดังนี้

$$RE = \frac{w \times d}{\nu} \quad (2.2)$$

โดยที่ RE < 2300 จะเป็นการไหลแบบ Laminar

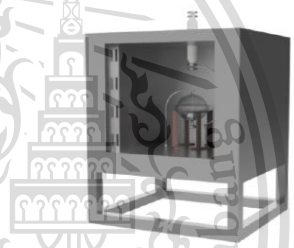
RE > 2300 จะเป็นการไหลแบบ Turbulent

ซึ่งหากการไหลของน้ำมันเป็นแบบ Turbulent จะส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนจะทำได้ดีกว่าการไหลแบบ Laminar

3. การออกแบบและการจำลองการทดลอง

3.1 การออกแบบชุดควบคุมอุณหภูมิสำหรับการทดสอบจนวนเหลว

ชุดควบคุมอุณหภูมิสำหรับการทดสอบจนวนเหลวจะแบ่งการออกแบบเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ชุดเซลล์ทดสอบและตู้ควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 3.1 ชุดควบคุมอุณหภูมิสำหรับการทดสอบจนวนเหลว

3.1.1 ชุดเซลล์ทดสอบ

ชุดเซลล์ทดสอบออกแบบโดยอ้างอิงจากรายงานของ CEGRE เรื่อง HVDC Transformer Insulation: Oil Conductivity [4] กล่าวถึงลักษณะของเซลล์ทดสอบรวมถึงวิธีการทดสอบการนำไฟฟ้าของจนวนเหลว 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

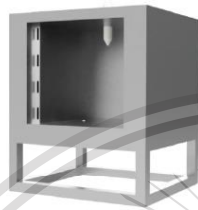
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.1.2 ตู้ควบคุมอุณหภูมิ

ตู้ควบคุมอุณหภูมิออกแบบโดยคำนึงถึงระยะปลอดภัย (Clearance) ของไฟฟ้าแรงดันสูงในอากาศ และนำมาออกแบบเพื่อไม่ให้เกิดการเบรกดาวน์ระหว่างชุดควบคุมอุณหภูมิและเซลล์ทดสอบ



รูปที่ 3.3 แบบ 3 มิติของตู้ควบคุมอุณหภูมิ

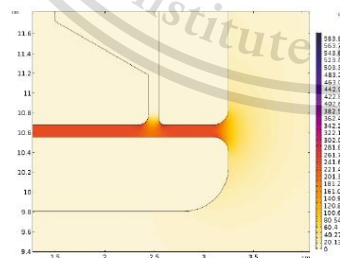
3.2 ผลการจำลอง

3.2.1. ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า

ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในจำนวนอากาศและจำนวนน้ำมันที่ระดับแรงดัน 10,20,30 และ 40 kV เป็นดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในจำนวนอากาศและจำนวนน้ำมัน

ระดับแรงดัน (kV)	ค่าเฉลี่ยความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณอิเล็กโทรด (kV/cm)	
	จำนวนอากาศ	จำนวนน้ำมัน
0	0	0
10	109.264	109.244
20	218.527	218.488
30	327.791	327.731
40	437.054	436.975



รูปที่ 3.14 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในจำนวนอากาศที่ระดับแรงดัน 30 kV

3.2.2 ผลการจำลองการกระจายความร้อน

ผลการจำลองการกระจายความร้อนในจำนวนหลายชนิดต่าง ๆ โดยกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 35 °C ได้ผลการจำลองดังตารางที่

ตารางที่ 3.2 ผลการจำลองการกระจายความร้อนในจำนวนหลายชนิดต่าง ๆ เทียบกับเวลา

อุณหภูมิที่อิเล็กโทรด (°C)	เวลา (ชั่วโมง:นาที)			
	Air	Mineral	FR3	Silicone
50	0:48	0:36	0:30	0:30
100	1:48	1:18	1:18	1:30
150	3:00	2:18	2:12	2:06
200	4:00	3:12	3:12	3:06
250	5:36	4:54	4:48	5:12
300	9:48	8:42	8:42	8:24

4.สรุป

4.1 สรุปผลการทดลอง

4.1.1 ผลการทดสอบการกระจายความร้อนของตู้ควบคุมอุณหภูมิ

จากการทดสอบการกระจายความร้อนภายในตู้โดยใช้อากาศเป็นฉนวน พบว่าเวลาที่อุณหภูมิของตู้และอิเล็กโทรดเข้าสู่ 300 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลที่ได้จากการจำลองความร้อน ในหัวข้อ 3.2.3 การจำลองการกระจายความร้อน ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบเวลาที่อุณหภูมิของตู้และอิเล็กโทรดเข้าสู่ 300 องศาเซลเซียส ระหว่างการจำลองผลการทดลอง และผลการทดลองจริง

อุณหภูมิที่ถึงกลางอิเล็กโทรด (°C)	เวลาที่ใช้	
	การจำลองผล	การทดลองจริง
50	48 นาที	42 นาที
100	1 ชั่วโมง 48 นาที	1 ชั่วโมง 10 นาที
150	3 ชั่วโมง	1 ชั่วโมง 35 นาที
200	4 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง 17 นาที
250	5 ชั่วโมง 36 นาที	3 ชั่วโมง 40 นาที
300	9 ชั่วโมง 48 นาที	-

4.1.2 การทดลองเพื่อวัดกระแสตามผิวของกระดาษที่เขื่อน้ำมัน

ไม่สามารถทำการทดลองได้ เนื่องจากสถานการณ์โรคระบาด โควิด-19

4.2 ปัญหาและอุปสรรค

1. สถานการณ์โรคระบาดโควิด-19 ทำให้ทางมหาวิทยาลัย รวมถึงบริษัทเอกชนที่ทางนักศึกษาได้ขออนุญาตติดต่อไปเพื่อใช้พื้นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สำหรับการทดลอง มีประกาศไม่ให้ใช้พื้นที่ ทำให้การดำเนินงานตามแผนการดำเนินงานที่เตรียมไว้ไม่สามารถสำเร็จลงได้

2. ระยะเวลาที่ใช้ในการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในตู้จากผลการทดลองจริงมีค่าที่ต่างจากผลที่ได้จากการจำลอง

4.3 ข้อเสนอในการพัฒนาต่อ

1. สำหรับผู้ที่สนใจและต้องการศึกษาสามารถนำไปออกแบบการทดลอง และทำการทดลองเพื่อต่อยอดได้
2. เพื่อความแม่นยำของการจำลองผลจำเป็นต้องศึกษาปัจจัยที่มีผลเกี่ยวข้องกับการแก่ความร้อนเพิ่มเติมเพื่อให้ผลที่ได้จากการจำลองและผลการทดลองจริง มีค่าที่ใกล้เคียงกันมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ผศ. ดร. ชีรัช เวียงทอง และรองศาสตราจารย์ ดร. นวเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงงานมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจสอบและชี้จุดบกพร่องจนนำไปสู่การแก้ไขปริญญานิพนธ์นี้ จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ บริษัท ไทยทราฟไฟ แมนูแฟคเจอร์ จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการจัดหาน้ำมันหม้อที่จะนำมาใช้ในการทดสอบขอขอบคุณ บริษัท ไทยโพลีเมอร์ ทรัพย์หลาย จำกัด ที่ได้ให้คำปรึกษาเรื่องวัสดุต่างๆ ที่เหมาะสมควรแก่การใช้เป็นฉนวนความร้อนและฉนวนไฟฟ้า ตลอดจนการให้ส่วนลดในการจัดสร้างอุปกรณ์ต่างๆ ภายในตู้ และขอขอบคุณ บริษัท เซเอส-เอส-เอส จำกัด ที่ได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการจัดทำตู้อบความร้อน ตลอดจนการให้ส่วนลดในการจัดทำได้ขอขอบคุณกมลภิศ มาอินจัน และคุณชนาฉัตร รัชกษพันธ์ พี่ๆ ป.โท ที่ให้ความช่วยเหลือและแก้ปัญหาในการทดสอบด้วยดีมาโดยตลอด

เอกสารอ้างอิง

- [1] สิววย สังข์สะอาด, วิศวกรรม ไฟฟ้าแรงสูง, พิมพ์ครั้งที่ 4, กรุงเทพฯ, โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2561.
- [2] Yunus A.Cengel, and Afshin J.Ghajar, Heat And Mass Transfer: Fundamental & Applications, 5th Ed., McGraw-Hill Education, 2015.
- [3] Dipl.Ing. Gerfrid Newesely, "Transformer cooling - The impact of oil viscosity on the performance", Electric Energy T&D Magazine Doble Conference 2005., 2005.
- [4] CIGRE A2 / D1 . 4 1 , "HVDC Transformer Insulation:Oil Conductivity", CIGRE Report., 2016.
- [5] Yuan Li, Qiaogen Zhang, Yi Zhao, Tonglei Wang Guangqi Liu, Ke Wang, "The Influence of Temperature on Partial Discharges and

Wormhole Effect of Oil-paper Insulation under DC Voltage", Electrical Insulation Conference (EIC), 2017.

- [6] Jompata Siriworachanyadee, Sakda Maneerot, Phethai Nimsanong, Prakob Kitchaiya, Norasage 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), 2019.
- [7] M. Krins, H. Borsi, E. Gockenbach "Influence of Carbon Particles on the Breakdown and Partial Discharge Inception Voltage of Aged Mineral Based Transformer oil", International Conference on Dielectric Materials Measurements & Applications, 1996.
- [8] IEC 60076-3, Power transformers – Insulation levels, Dielectric tests and external clearances in air.

ประวัติผู้เขียน



นายเกียรติศักดิ์ วงศ์ธานี
เกิดวันที่ 3 ธันวาคม 2541 ภูมิสำเนา จังหวัด กรุงเทพมหานคร ศึกษาในระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายฉัตรพล ไนนานแซง
เกิดเมื่อวันที่ 4 มกราคม 2542 ภูมิสำเนาเดิม จังหวัด บึงกาฬ ศึกษาในระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นางสาวพิชญา เสี่ยงโส
เกิดวันที่ 26 มีนาคม 2541 ภูมิสำเนา จังหวัด กรุงเทพมหานคร ศึกษาในระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นางสาววรพรม ชานาชรรม
เกิดเมื่อวันที่ 17 มิถุนายน 2541 ภูมิสำเนา จังหวัด มหาสารคาม ศึกษาในระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

The 8th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD 2020)

Test Chamber Designed with Temperature Control for Partial Discharge and Polarization and Depolarization Current Testing

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

Nitouch Panoon
Design and Engineering
Consulting Service Center
National Science and
Technology Development
Agency (NSTDA)
Pathum Thani, Thailand
nitouch@nstda.or.th

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

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

Abstract—This paper presents the temperature-controlled test chamber for Partial Discharge and Polarization and Depolarization Current test of dielectric liquid including impregnated pressboards with the various conditions. Besides, the temperature of the test specimen is controlled between room temperature to 300°C. The temperature distribution in the test chamber was simulated. Besides, the electric field stress at the electrodes were simulated. Furthermore, different kinds of sensors such as a thermocouple, gas sensors, and so on were designed to be equipped within the test chamber. From the simulated result, both electric field stress and temperature distribution were in the given conditions.

Keywords—mineral oil, ester, partial discharge, polarization and depolarization current, electrical field stress, heat dissipation

I. INTRODUCTION

Two types of insulation that commonly used in transformers are solid insulations such as the pressboards and papers. Different kinds of liquid insulations are used in the transformers such as mineral oil, natural ester, synthetic ester and silicone oil. The insulation condition is needed to be assessed and maintained for staying good performance and safety. For example, the pressboard needs to be measured the conductivity, and the mineral oil needs to be assessed the Partial Discharge (PD) and the Breakdown Voltage (BD). For the research works, most insulation condition testing have been performed in the test chamber. This paper proposed the test chamber designed for insulation testing under different electric field stress. Moreover, the electric field stress in combined with a given temperature controlled.

II. THEORY

A. Partial Discharge Testing of Mineral Oil and Pressboards

Partial discharge (PD) is an important topic for assessing the quality of the power transformer according to IEC 60076-3 [1]. The PD measurement test. Moreover, partial discharge inception voltage (PDIV) testing can be also performed with each type of the insulation. For liquid insulation, the needle-sphere electrode is used to investigate PDIV of the insulating liquid whereas plane - plane electrodes or rod - plane electrodes can be used to investigated the PDIV and/or PD of the liquid impregnated pressboards. Fig. 1 shows the simple test circuit for PDIV experiment.

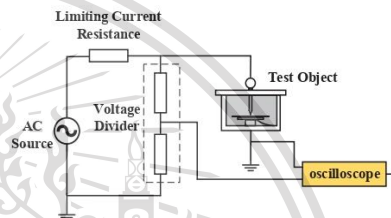


Fig. 1. PDIV Testing circuit

B. Polarization and Depolarization Current Method

Polarization and depolarization current (PDC) measurement is one of the non-destructive testing method applied for diagnostic testing of the transformer insulation. When a DC voltage of V_c is applied across the insulation specimen for a period of t_p and the resulting current i_p (polarization current) is measured. Then, the specimen is short circuited for a period of t_d after the applied voltage is removed (t_p is regularly equal to t_d) and the current i_d (depolarization current) is also measured. Fig. 2 below illustrates the PDC test diagram.

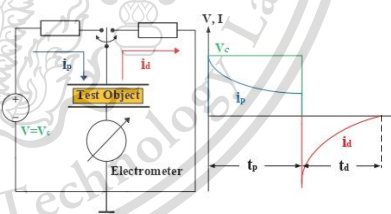


Fig. 2. PDC measurement circuit and principle of polarization and depolarization current measurement [2].

C. The Relation between Temperature and PDC

The increasing oil temperature inside the transformer causes the increase in the polarization and depolarization current due to the rise of free electron energy inside the insulating material by temperature. Therefore, the free electrons with rising energy can move freely under the electric field much easier, resulting in conductivity current or polarization current increases.

D. The Relation between Temperature and PDIV

The PDIV of the insulation liquid decreased when the liquid temperature inside the transformer increase, as a result of the easier of electron generation and the higher probability of electron collision. Fig. 3 below shows the example of PD and breakdown voltage of the insulating liquid with various temperatures.

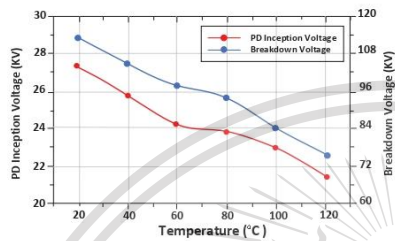


Fig. 3. PDIV under different temperatures [3].

III. EXPERIMENTAL DETAILS

To design the test chamber for insulation testing under different electric field stress with a given temperature controlled, the design procedure is divided into two sections, the test cell and the temperature controllable chamber.

A. The Test Cell

There are two types of electrode used in the test cell. The needle - plane electrodes were designed for PDIV test with the 10 μm, 20 μm and 40 μm tip radius needles and 75 mm diameter of the plane electrode. For PDC measurement of the insulating liquid, the electrode was designed according to [4].

Figures below represent the needle - plane electrodes for PDIV testing and plane - plane electrodes for PDC testing.

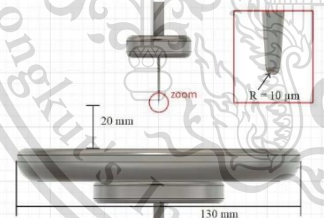


Fig. 4. Electrodes for PDIV test.

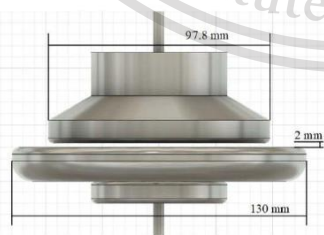


Fig. 5. Electrode for PDC test.

B. The Temperature Controlled Chamber

The temperature controllable chamber was designed by which the consideration of the clearance distance of the high voltage and other parts was needed to be considered to prevent the flashover between the temperature controller and the wall of the test chamber. In this paper, the appropriate dimensions of the chamber for PDIV test and PDC test are studied as shown in Fig. 6.

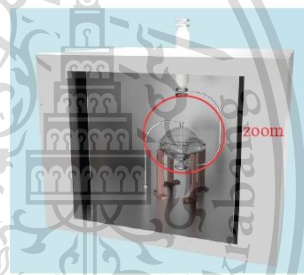
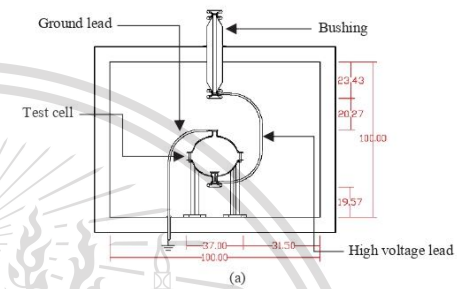


Fig. 6. The temperature controllable chamber a) test chamber dimension, b) designed test chamber, c) test cell with PDIV test electrode and d) test cell with PDC electrode.

IV. EXPERIMENTAL RESULTS

The simulation results is divided to 2 parts, the electrical field stress and the heat dissipation.

A. Electrical Field Stress Simulation

The simulation results of electric field stress with 4 internal dimensions of chamber and the specified electrodes were as follows.

1) PDIV test electrodes

Examples of the electric field stress at the needle tip with a 100 volt application where the chamber dimension is $100 \times 100 \times 100 \text{ cm}^3$.

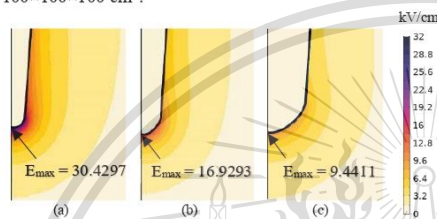


Fig. 7. Electric field stress at the needle tip-plane electrode in the chamber with the dimension of $100 \times 100 \times 100 \text{ cm}^3$.

- (a) 10 μm tip radius needle
(b) 20 μm tip radius needle
(c) 40 μm tip radius needle

2) PDC test electrodes

Electric field stress at the PDC test electrode with a 100 volt application where the chamber dimension is $100 \times 100 \times 100 \text{ cm}^3$.

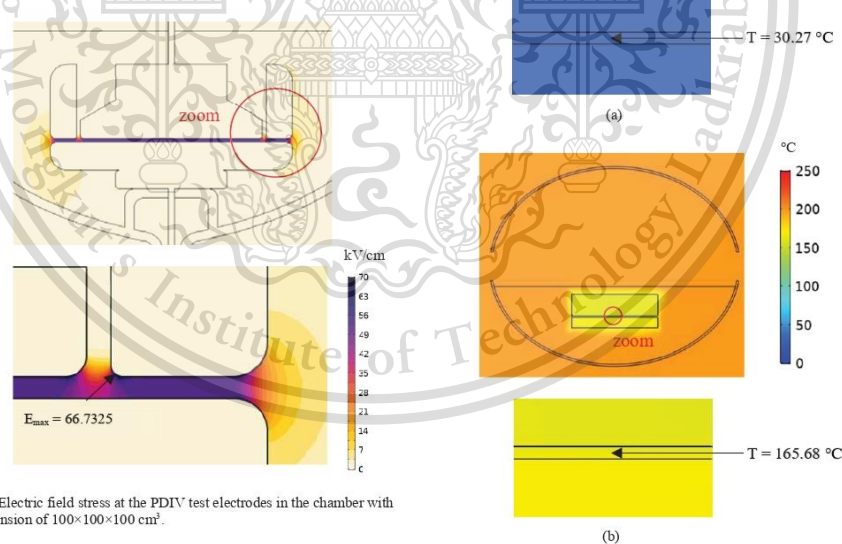


Fig. 8. Electric field stress at the PDIV test electrodes in the chamber with the dimension of $100 \times 100 \times 100 \text{ cm}^3$.

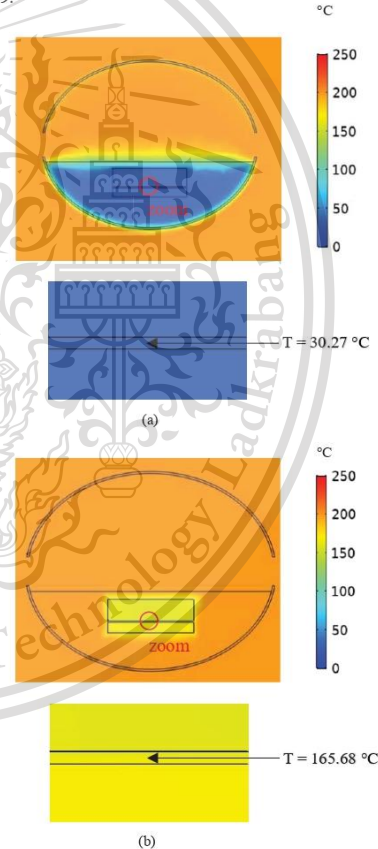
Table 1 below shows the electric field stress of the specified electrodes installed within the 4 different chamber dimensions.

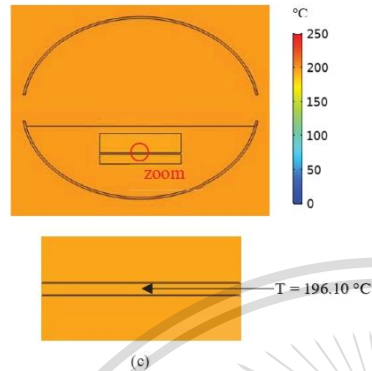
TABLE I. THE MAXIMUM ELECTRIC FIELD STRESS (E_{max}) AT THE TIP OF PDIV TEST ELECTRODES OR THE EDGE OF THE PDC TEST ELECTRODES WITH VARIOUS CHAMBER DIMENSIONS

Chamber Dimension ($D \times D \times D$) (cm^3)	Maximum Electrical Field Stress (E_{max}) (kV/cm)			
	PDIV (100 V)			PDC (10 kV)
	10 μm	20 μm	40 μm	
D = 80	30.5	17.0	9.5	66.7
D = 100	30.4	16.9	9.4	66.7
D = 120	30.4	16.9	9.4	66.7
D = 140	30.4	16.9	9.4	66.7

B. Heat Dissipation Simulation

The simulation results of heat dissipation inside the Chamber at different temperatures, where the Chamber dimension is $100 \times 100 \times 100 \text{ cm}^3$. Heat dissipation inside the chamber at the given temperatures after applying heat source at initial temperature $200 \text{ }^\circ\text{C}$ are demonstrated in Fig. 9.





[4] CIGRE A2/D1.41, "HVDC Transformer Insulation: Oil Conductivity," CIGRE Report, pp. 88-90, 2016.
 [5] M. Krins, H. Borsi, and E. Gockenbach, "Influence of Carbon Particles on the Breakdown and Partial Discharge Inception Voltage of Aged Mineral Based Transformer oil," *International Conference on Dielectric Materials Measurements & Applications, University of Hamover, Germany*, September 1996.
 [6] N. F. Kasri, M. A. M. Piah, A. A. Suleiman, N. A. M. Jamal, 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, June 2013.

Fig. 9. Heat dissipation inside the chamber at initial temperature 200 °C
 (a) Heat dissipation at 1 minute (T = 30.27 °C)
 (b) Heat dissipation at 15 minutes (T = 165.68 °C)
 (c) Heat dissipation at the equilibrium state 36 minutes (T = 196.10 °C)

TABLE II. HEAT DISSIPATION INSIDE THE CHAMBER WITH DIFFERENT INITIAL TEMPERATURE AND EQUILIBRIUM TIME

Initial Temperature (°C)	Temperature at center of test electrode in equilibrium state (°C)	Period to equilibrium state (minutes)
T _i = 100	98.58	40
T _i = 150	147.12	38
T _i = 200	196.10	36
T _i = 300	294.00	36

CONCLUSION

From the simulation test results, the designed test chamber (100×100×100 cm³) with temperature control for Partial Discharge and Polarization and Depolarization Current testing provide the theoretical electric field stress. Moreover, the time to approach equilibrium state of the given temperatures for the experiment is acceptable.

ACKNOWLEDGMENT

This paper was immensely supported by all staff from Electrical engineering department, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, who provided insight and expertise that greatly assisted the paper. We would also like to show our gratitude to Mr. Kiattisak Vongphanich, Mr. Natthaphol Nonnacheng, Miss. Worapan Chamnantham and Miss. Pitchaya Siangsai for their huge effort to implement this research.

REFERENCES

[1] IEC 60076-3, "Power transformers – Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air,"
 [2] J. Sirworachanyadee, 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.
 [3] 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," *Electrical Insulation Conference (EIC)*, Baltimore, USA, June 2017.

The Study and Analysis of Oil-immersed Power Transformer by Using Artificial Neural Network for Designing Program Apply in the Industry of Testing Oil-immersed Transformers

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

Phop Chanchaoensook
 Electrical Engineering Dept.,
 Faculty of Engineering
 King Mongkut's Institute of
 Technology Ladkrabang
 Bangkok, Thailand
 kephop@kmitl.ac.th

Chisanucha Bunnag
 Electrical Engineering Dept.,
 Faculty of Engineering
 King Mongkut's Institute of
 Technology Ladkrabang
 Bangkok, Thailand
 59010332@kmitl.ac.th

Achirawit Suwantaeesuk
 Electrical Engineering Dept.,
 Faculty of Engineering
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 Bangkok, Thailand
 59011474@kmitl.ac.th

Kiattisak Vongphanich
 Electrical Engineering Dept.,
 Faculty of Engineering
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 Bangkok, Thailand
 60010102@kmitl.ac.th

Abstract—This research presents the study and analysis of faults in the oil-immersed transformer. Abnormalities can be analyzed from the Dissolved Gas Analysis (DGA) test. The oil has a variety of compounds such as hydrocarbons, oxygen, nitrogen and hydrogen. The amount of gas in oil has distinctive characteristics that can indicate abnormalities in different types. This program is developed based on according to standard IEEE Std C57.104TM - 2019. This program is designed to detect for defects in oil-immersed transformers by using artificial neural networks (Artificial Neural Network: ANN). The program using MATLAB programs is prepared for maintenance planning and supports applications from basic learning to industrial sector.

Keywords—DGA, Neural network, Matlab, GUI, Roger ratio, Doernenburg ratio, Duval Triangle and App designers.

I. INTRODUCTION

At present, oil plays an important role in the oil insulating transformer system. Transformers oil are used as insulation and cooling in high voltage systems, which can prevent short-circuits of oil immersed transformers. The quality of oil is an important factor that is used to analyze and evaluate the performance of transformers using DGA Status monitoring program initially and using 3 test procedures, Roger ratio, Doernenburg ratio and Duval Triangle, to analyze abnormal results that may occur such as Local heating in oil, Partial discharges, and Arcing.

The program is designed to analyze oil immersed problems transformer using Matlab programs using the Artificial Neural Network (ANN), which is a branch of Artificial Intelligence (AI) that uses system simulations of the human brain. This program uses the conversion function (Transfer Function) to find the relationship between the input data processed into output.

II. ANALYSIS OF OIL TRANSFORMER

A. Process for Analyzing Transformers Faults

1) DGA Status method is determined by the concentration ratio of oxygen and nitrogen, divided into 3 conditions.

- a) DGA Status 1 are considered as probably normal
- b) DGA Status 2 are considered as possibly suspicious and warrant additional investigation.
- c) DGA Status 3 are considered as probably suspicious, the transformer should be placed under increased surveillance and additional transformer testing is recommended.

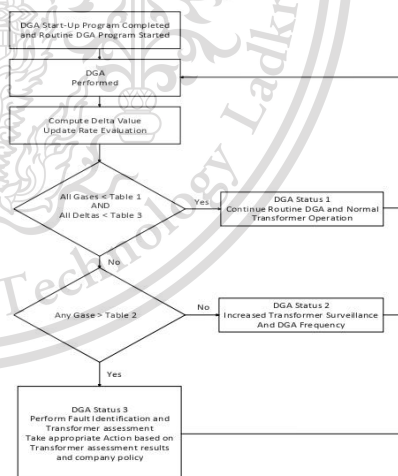


Fig. 1. DGA interpretation flow chart.

2) Doernenburg ratios method is applied for the proposed program.

Analyze according to Fig. 1. and Table I shows the limit concentrations of dissolved gas.

TABLE I. CONCENTRATIONS OF DISSOLVED GAS

Key Gas	Concentrations (ppm)
H ₂	100
CH ₄	120
C ₂ H ₄	50
C ₂ H ₂	35
C ₂ H ₆	1
CO	350

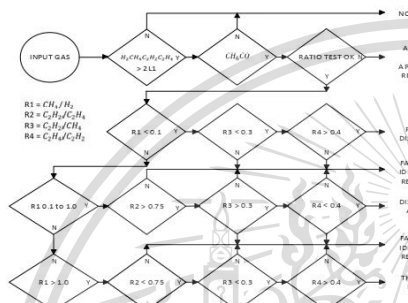


Fig. 2. Doernenburg ratios method flow chart.

3) Roger ratios method is who used to detect the problem in transformer

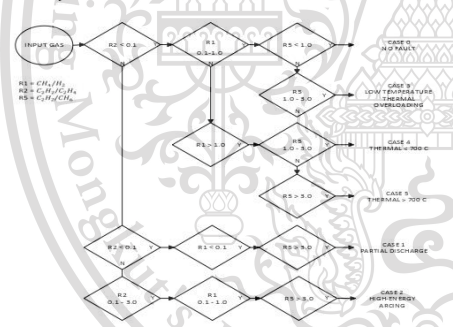


Fig. 3. Roger ratios method flow chart

4) Duval Triangle method
Duval triangle uses three gases corresponding to the increasing energy content or temperature of faults: methane (CH₄), ethylene (C₂H₄) and acetylene (C₂H₂). On each side of the triangle are plotted the relative percentages of these three gases.

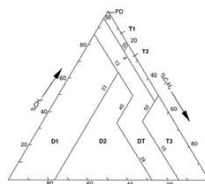


Fig. 4. Duval Triangle method.

B. Principles of Operation of Artificial Neural Networks

The artificial neural network has the same structure and processing as the brain of human which adapts to the response of information entered with the rules of learning. The artificial neural network consists of 5 components: input, output, weights, summation function and transfer functions

C. App Designer

App Designer is a web application in MATLAB that allows users to create applications on their own. Users can drag and drop application components with the GUI design and can share users' applications using Matlab Drive or creating a standalone desktop or with web apps of Matlab compiler.

D. GUI (Graphic User Interface)

GUI is a user interface using symbols. It is the design of a computer program to interact with users by using Icon, images and other symbols. To represent the various features of the program, allowing users to easily work and faster.

III. SOFTWARE STRUCTURE

Figure below shows the flow chart of the proposed software.

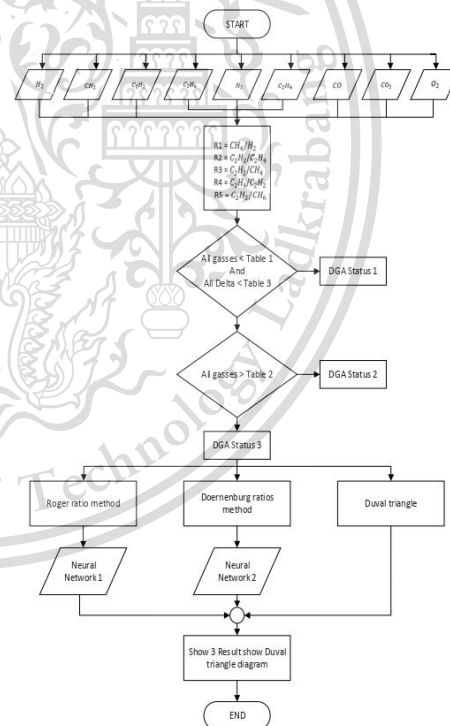


Fig. 5. Procedure for checking gas by ratio and analyzing gas values according to the table.

IV. TRAINING PROCEDURES

Training procedures are divided into three steps as following.

Step 1: Take the Dissolved gas analysis (DGA) results from the annual inspection of the working conditions of the transformers from the company's policy. The data are then organized within the Workspace software matlab.

Step 2: Enable the Neural Fitting (nftool) function via the nstart command. Select the organized data to determine the input and the target of the network and select the amount of data used in the Train Network. These data will be divided into 3 data sets such as Training, Validation and Test. For the Neural Network to create this information 70%, 15% and 15% respectively and select hidden layers for neuron as 100 layers.

Choose Bayesian Regularization training which can reduce the problem of overfit of the data set and suitable for the nature of the data that has a small amount of output. Take the data from those trainings to check the results through Regression to see if the trainings of this set of data are effective enough to continue to use. If the value is close to 1, then it is considered effective at an acceptable level.

Step 3: After getting the information from the train, both are sufficiently effective. Recording Network can be used to write programs to run in a Flowchart on.

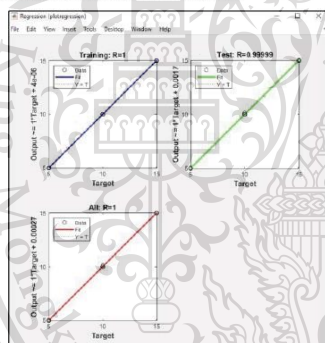


Fig. 6. Roger ratio training

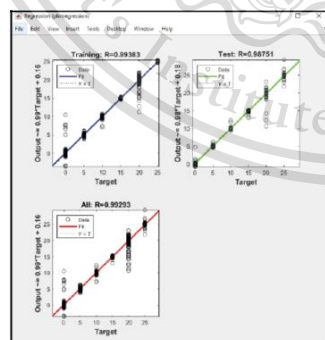


Fig. 7. Doemenburg ratio training.

V. ACCURACY TESTING OF TESTING OF PROGRAM FOR TESTING THE FAULTS OF OIL-INSULATED TRANSFORMER BY ANALYZING THE COMPOUND VALUES OCCURRING IN THE OIL

TABLE II. SHOWS THE EFFICIENCY OF EACH DGA INTERPRETATION METHOD APPLIED IN THE PROPOSED TECHNIQUE

Analysis	Fault	Website	Program	Accuracy
Doemenburg Ratios Method	Thermal Decomposition	3	0	0
	Corona (Low intensity PD)	-	-	-
	Arcing (high intensity PD)	1	1	100
	Normal	27	17	63
	Undefine	8	5	62.5
Roger Ratios Method	Low energy density arcing - PD	0	2	-
	Arcing - High energy discharge	2	2	100
	Low temperature thermal	2	2	100
	Thermal < 700	-	-	-
	Thermal > 700	9	4	44.44
	Unit normal	17	8	47.05
	Undefine	14	5	35.71
Duval Triangles	Partial Discharge (PD)	9	5	55.55
	Discharges of low energy or partial discharges of sparking type (D1)	2	0	0
	Discharge of high energy (D2)	2	2	100
	Thermal fault t<300 C (T1)	8	8	100
	Thermal fault 300 C < t < 700 C (T2)	3	3	100
	Thermal fault t>700 C (T3)	14	14	100
	Mix of thermal and Electrical faults (DT)	2	2	100

VI. DGA ANALYST PROGRAM AND RESULT

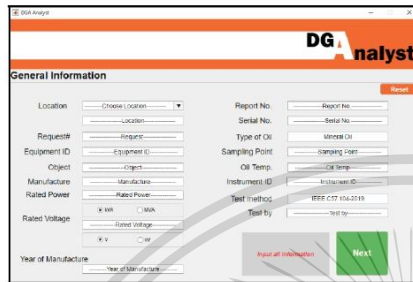


Fig. 8. General Information.

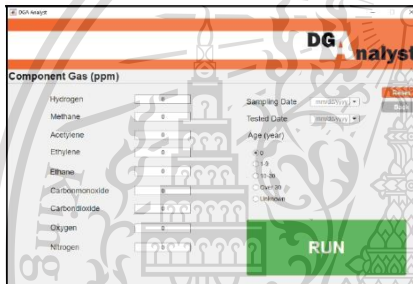


Fig. 9. Component Gas.



Fig. 10. Result.

highest accuracy percentage of 85%, followed by Doernenburg ratio method with accuracy percentage at 58.97%. The method with the lowest percentage accuracy is Roger ratio method with the accuracy at 52.27%.

However, due to the limited amount of data used in the test, the test results may be inaccurate, causing the percentage of accuracy to be lower than it should be.

ACKNOWLEDGMENT

The paper was supported by Mr. Kasidis Marinjhon and Mr. Chananut Rakkaphan staff of Electrical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL). The authors gratefully acknowledged the support of all DGA data from Tirathai Public Company Limited.

REFERENCES

- [1] T. Committee, I. Power, and E. Society, IEEE Std. C57.104TM-2019 (Revision of IEEE Std C57.104-2008), IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, vol. 2019, no. November, 2019.
- [2] T. Committee, I. Power, and E. Society, IEEE Std. C57.104TM-2008 (Revision of IEEE Std C57.104-1991), IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, vol. 2008, no. February, 2009.
- [3] Howard Demuth and Mark Beale, Neural Network Toolbox For Use with MATLAB, United States, The Math Works Inc., 2004.
- [4] Phil Kim (2017) MATLAB Deep Learning: With Machine Learning, Neural Networks and Artificial Intelligence, Seoul, Soul-tukpyolsi, Korea.

VII. SUMMARY

This research designed and developed a program for analyzing the faults of oil-insulated transformers, with a focus on the increasing gas content in the oil which applying artificial neural network to MATLAB program that was analyzed by using DGA results to train the program in the ratio analysis Roger and Doernenburg ratio. By using the test data of transformers from a private company to test the created program also test the accuracy with an acceptable program with the standards IEEE C57.104 and IEC 60599 to support.

From the accuracy test of the transformer fault testing program, it is found that Duval Triangle method has the

ประวัติผู้เขียน



นายเกียรติศักดิ์ วงศ์พานิช

เกิดวันที่ 3 ธันวาคม 2541 ภูมิลำเนา จังหวัด กรุงเทพมหานคร

ศึกษาระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนสารวิทยา

ศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายณัฐพล โนนนาแซง

เกิดเมื่อวันที่ 4 มกราคม 2542 ภูมิลำเนาเดิม จังหวัดบึงกาฬ

ศึกษาระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนพรเจริญวิทยา

ศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นางสาวพิชญา เสียงใส

เกิดวันที่ 26 มีนาคม 2541 ภูมิลำเนา จังหวัด กรุงเทพมหานคร

ศึกษาระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนสตรีศรีอยุธยา

ศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นางสาววรรณ ชำนาญธรรม

เกิดเมื่อวันที่ 17 มิถุนายน 2541 ภูมิลำเนา จังหวัดมหาสารคาม

ศึกษาระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนพยุภคภูมิวิทยาคาร

ศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.