

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เทคนิคการทดสอบเพื่อยืนยันระดับชั้นทางความร้อนของฉนวน
เครื่องจักรกลไฟฟ้าโดยการใช้แบบจำลองร่องสลิต

A TESTING TECHNIQUE TO DETERMINE THE THERMAL
CLASSIFICATION OF ELECTRICAL MACHINE INSULATION
USING MOTORETTE



เปี่ยมภูมิ สฤกษ์
PIAMPOOM SARIKPRUECK

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 60541
พิมพ์เดือน,ปี - 3 ก.ค. 2549

b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2548

ISBN 974-15-1535-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A TESTING TECHNIQUE TO DETERMINE THE THERMAL
CLASSIFICATION OF ELECTRICAL MACHINE INSULATION
USING MOTORETTE**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2005

ISBN 974-15-1535-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2005

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ เทคนิคการทดสอบเพื่อยืนยันระดับชั้นทางความร้อนของฉนวนเครื่องจักรกลไฟฟ้า
โดยการใช้แบบจำลองร่องสลีต

A TESTING TECHNIQUE TO DETERMINE THE THERMAL
CLASSIFICATION OF ELECTRICAL MACHINE INSULATION
USING MOTORETTE

ชื่อนักศึกษา นายเปี่ยมภูมิ สฤกษ์ฤกษ์
รหัสประจำตัว 45061005
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.พิชิต ถ้ายอง

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ชัยวุฒิ	นัทรอุทัย	
รศ.ศิริวัฒน์	โพธิเวชกุล	
รศ.มณฑล	ลีลาจินดาไกรฤกษ์	
ผศ.ดร.อานันท์วัฒน์	คุณากร	
รศ.พิชิต	ถ้ายอง	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 19 เมษายน 2548 เวลา 9.00-11.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-403)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(ผศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....18.....เดือน.....พฤษภาคม.....พ.ศ. 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เทคนิคการทดสอบเพื่อยืนยันระดับชั้นทางความร้อนของฉนวนเครื่องจักรกลไฟฟ้าโดยการใช้แบบจำลองร่องสลีต
นักศึกษา	นายเปี่ยมภูมิ สฤกษ์ฤกษ์
รหัสประจำตัว	45061005
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.พิชิต ถ้ายอง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอเทคนิคการทดสอบเพื่อยืนยันระดับชั้นทางความร้อนของฉนวนเครื่องจักรกลไฟฟ้าและทำนายอายุของระบบฉนวน โดยทำการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวน โดยใช้แบบจำลองร่องสลีต ซึ่งผ่านกระบวนการเร่งอายุทางความร้อน การให้ความเค้นทางกล การให้ความเค้นทางความชื้น วิจัยจุดสิ้นสุดอายุฉนวนโดยการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐานซึ่งจะบอกจุดสิ้นสุดอายุฉนวนได้จากการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้ารั่ว หลังจากนั้นนำจุดสิ้นสุดอายุฉนวนมาทำการวิเคราะห์ หาค่าคงที่ในสมการอาร์เรเนียสเพื่อทำนายอายุของระบบฉนวนที่ทำงานที่อุณหภูมิต่าง ๆ และพล็อตกราฟอาร์เรเนียสเปรียบเทียบกับกราฟอาร์เรเนียสที่ได้จากมาตรฐานเพื่อยืนยันระดับชั้นทางความร้อนระบบฉนวน ผลที่ได้เสนอกระบวนการทดสอบเพื่อยืนยันระดับชั้นทางความร้อนและทำนายอายุระบบฉนวนระดับชั้นทางความร้อน เอฟได้จริง

Thesis Title	A Testing Technique to Determine The Thermal Classification of Electrical Machine Insulation using Motorette
Student	Mr.Piampoom Sarikprueck
Student ID.	45061005
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2005
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Pichit Lumyong

ABSTRACT

This thesis presents a testing technique to determine the thermal classification of electrical machine insulation and predict life-time of an insulation system. The thermal ageing insulation system using motorette is carried out with process of thermal ageing. The process of the standard testing is combined with thermal ageing , mechanical stress, moisture stress and voltage testing. The end-life of the insulation system is observed by increasing of leakage current and is used to evaluate parameters of Arrhenius equation for predicting the life-time of the insulation system which operate at different temperatures. The results from testing of the end-life are employed in plotting of Arrhenius curve and are compared with standard Arrhenius curve to determine thermal classification of the insulation system. It is found that this method proposed in this thesis is able to determine the thermal classification and to predict life-time of thermal class F insulation system.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาของ รศ.พิชิต ถ้ายอง อาจารย์ที่ปรึกษาซึ่งช่วยให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ผู้วิจัย ซึ่งผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งต่อความอนุเคราะห์จากท่านเป็นอย่างมาก

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ชัชวาลิ ฉัตรอุทัย และ รศ.ศิริวัฒน์ โภธิเวชกุล กรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำและข้อชี้แนะ ให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ วิภู ศรีสืบสาย และอาจารย์กรรมชัย กัลยาศิริ อาจารย์ประจำโครงการภาควิชาชีพวิศวกรรมอุตสาหกรรม ที่ช่วยในการทำโครงสร้างแบบจำลองร่องสลีตให้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณ ศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรม ที่ให้ความช่วยเหลือในเครื่องมือสถานที่ และงบประมาณในการทำวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ประจำศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรมทุกท่าน ที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำในเรื่องต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณ นักศึกษาปริญญาตรีที่ทำโครงการที่เกี่ยวข้องกับเรื่องระบบขนวนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าทุกท่านที่ช่วยเหลือให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

ขอขอบพระคุณ บริษัทไทยฮิตาชิเอเนมาเมล บริษัทบูรพาการไฟฟ้า ในการให้ไปดูงานเพื่อนำมาใช้ในการปรับปรุงงานวิจัยนี้ให้ดียิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำแก่ผู้วิจัยเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติพี่น้องที่ให้กำลังใจ คำแนะนำ และความช่วยเหลือ ตลอดจนสนับสนุนในการทำวิจัยนี้ตลอดมา

สำหรับคุณค่าและประโยชน์อันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

เปี่ยมภูมิ สฤทพฤษ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	XVI
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
บทที่ 2 การเร่งอายุฉนวน	
2.1 บทนำ.....	4
2.2 การเร่งอายุระบบฉนวน.....	4
2.2.1 การเร่งอายุทางไฟฟ้า.....	5
2.2.2 การเร่งอายุทางความร้อน.....	7
2.2.3 การเร่งอายุทางกล.....	11
2.2.4 การเร่งอายุเนื่องจากผลทางสภาพแวดล้อม.....	13
2.2.5 การเร่งอายุจากหลายปัจจัย.....	14
บทที่ 3 กระบวนการทดสอบเพื่อหาค่าความคงทนทางความร้อนของระบบฉนวนสำหรับ เครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุน.....	17
3.1 บทนำ.....	17
3.2 ระดับชั้นทางความร้อนระบบฉนวน.....	17
3.3 กระบวนการทดสอบความคงทนทางความร้อน.....	18
3.3.1 รูปแบบกระบวนการทดสอบระบบฉนวนเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุน.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.2 วัสดุทดสอบ.....	18
3.3.2.1 โครงสร้างของวัสดุทดสอบ.....	18
3.3.2.2 จำนวนชิ้นงาน.....	18
3.3.2.3 คุณภาพของชิ้นงานและการทดสอบเบื้องต้น.....	19
3.3.3 โครงสร้างกระบวนการทดสอบ.....	19
3.3.3.1 หลักการโดยทั่วไป.....	19
3.3.3.2 อุณหภูมิการเร่งอายุและระยะเวลาของรอบย่อยการทดสอบ.....	19
3.3.3.3 ความหมายของการให้ความร้อน.....	20
3.3.4 รอบย่อยการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อน.....	21
3.3.5 รอบย่อยการวินิจฉัย.....	21
3.3.5.1 การทดสอบทางกล.....	21
3.3.5.2 การทดสอบทางความชื้น.....	21
3.3.5.3 การทดสอบทางแรงดันไฟฟ้า.....	22
3.3.5.4 การทดสอบการวินิจฉัยอื่น ๆ.....	22
3.3.6 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	22
บทที่ 4 กระบวนการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนระบบจนวนโดยใช้แบบจำลอง ร่องสล็อต.....	23
4.1 บทนำ.....	23
4.2 ขอบเขตการทดสอบ.....	23
4.3 วัสดุทดสอบ.....	23
4.3.1 โครงสร้างของวัสดุทดสอบ.....	23
4.3.1.1 วัสดุที่นำมาใช้.....	23
4.3.1.2 ขนาดของวัสดุตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ.....	24
4.3.1.3 โครงสร้าง.....	24
4.3.2 รายละเอียดของโครงสร้างแบบจำลองร่องสล็อต.....	24
4.3.3 ส่วนประกอบของแบบจำลองร่องสล็อต.....	27
4.3.4 การประกอบแบบจำลองร่องสล็อต.....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.5 จำนวนชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ.....	30
4.3.6 การตรวจคุณภาพก่อนการทดสอบ.....	30
4.3.7 การทดสอบเพื่อการวินิจฉัยเบื้องต้น.....	30
4.4 รอบย่อยการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อน.....	30
4.5 รอบย่อยการทดสอบเพื่อการวินิจฉัย.....	30
4.5.1 การทดสอบทางกล.....	30
4.5.2 การทดสอบทางความชื้น.....	31
4.5.2.1 ตู้อบไอน้ำ.....	31
4.5.2.2 ตู้อบไอน้ำสำหรับวัสดุทดสอบที่เย็นตัวลง (ที่อุณหภูมิห้อง)	31
4.5.3 การทดสอบทางแรงดันไฟฟ้า.....	33
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	35
5.1 บทนำ.....	35
5.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ.....	35
5.2.1 แบบจำลองร่องสลีต.....	35
5.2.2 ระบบฉนวน.....	35
5.2.3 ตู้อบความร้อน.....	37
5.2.4 โตะสั่น.....	38
5.2.5 ตู้อบความชื้น.....	39
5.2.6 อุปกรณ์การทดสอบทางแรงดันไฟฟ้า.....	39
5.3 ขั้นตอนการทดสอบ.....	41
5.4 ผลการทดสอบ.....	42
5.4.1 การทดสอบครั้งที่ 1.....	42
5.4.1.1 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน ที่อุณหภูมิการทดสอบ 225 ° C.....	42
5.4.1.2 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน ที่อุณหภูมิการทดสอบ 215 ° C.....	45
5.4.1.3 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน ที่อุณหภูมิการทดสอบ 205 ° C.....	48
5.4.5 การทดสอบครั้งที่ 2.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	60
5.5.1 การวินิจฉัยจุดสิ้นสุดอายุฉนวน.....	60
5.5.2 ค่าเฉลี่ยของจุดสิ้นสุดอายุฉนวน.....	65
5.5.3 การขึ้นชั้นระดับชั้นทางความร้อนระบบฉนวน.....	65
5.5.4 การหาค่าคงที่ของสมการอาร์รีเนียส.....	67
5.5.5 การหาค่าอายุของระบบฉนวน.....	69
บทที่ 6 บทสรุป.....	71
เอกสารอ้างอิง.....	74
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ข้อมูลผลการทดสอบ.....	75
ภาคผนวก ข วัสดุฉนวน.....	99
ภาคผนวก ค บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	115
ประวัติผู้เขียน.....	123

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ระดับชั้นทางความร้อนระบบฉนวน.....	17
3.2 อุณหภูมิแนะนำและรอบย่อยการเร่งอายุ.....	20
4.1 อุณหภูมิ ณ ส่วนต่าง ๆ ของตู้อบไอน้ำ.....	33
4.2 ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ.....	33
5.1 อุณหภูมิที่ทำการวัด ณ จุดต่าง ๆ ภายในตู้อบความร้อน.....	38
5.2 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ที่ทำการวัดภายในตู้อบความชื้น.....	39
5.3 แบบจำลองร่องสล็อตที่ใช้ในการทดสอบครั้งที่ 1.....	42
5.4 ค่าการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสล็อตที่ 1 อุณหภูมิการทดสอบ 225 ° C.....	61
5.5 ค่าการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสล็อตที่ 13 อุณหภูมิการทดสอบ 225 ° C ของการทดสอบครั้งที่ 2.....	61
5.6 จุดสิ้นสุดอายุฉนวนอุณหภูมิการทดสอบ 225 ° C.....	62
5.7 จุดสิ้นสุดอายุฉนวนอุณหภูมิการทดสอบ 215 ° C.....	62
5.8 จุดสิ้นสุดอายุฉนวนอุณหภูมิการทดสอบ 205 ° C.....	63
5.9 จุดสิ้นสุดอายุฉนวนอุณหภูมิการทดสอบ 225 ° C..การทดสอบครั้งที่ 2.....	63
5.10 จุดสิ้นสุดอายุฉนวนอุณหภูมิการทดสอบ 215 ° C..การทดสอบครั้งที่ 2.....	64
5.11 จุดสิ้นสุดอายุฉนวนอุณหภูมิการทดสอบ 205 ° C..การทดสอบครั้งที่ 2.....	64
5.12 ค่าเฉลี่ยของจุดสิ้นสุดอายุฉนวน.....	65
5.13 ค่าเฉลี่ยของจุดสิ้นสุดอายุฉนวน ของการทดสอบครั้งที่ 2.....	65
5.14 ค่าตัวแปรและค่าคงที่ของสมการอาร์รี่เนียสที่ได้จากมาตรฐาน.....	68
5.15 ค่าตัวแปรและค่าคงที่ของสมการอาร์รี่เนียสที่ได้จากการทดสอบ.....	68
5.16 ค่าตัวแปรและค่าคงที่ของสมการอาร์รี่เนียสที่ได้จากการทดสอบครั้งที่ 2.....	68
5.17 อายุของระบบฉนวนเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิ 180 °	69
ก1 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสล็อตที่ 1 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน.....	76
ก2 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสล็อตที่ 2 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน.....	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก3 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีตที่ 3 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน.....	76
ก4 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีตที่ 4 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน.....	76
ก5 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีตที่ 5 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน.....	77
ก6 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีตที่ 6 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน.....	77
ก7 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีตที่ 7 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน.....	77
ก8 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีตที่ 8 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน.....	77
ก9 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีตที่ 9 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน.....	78
ก10 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีตที่ 10 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน.....	78
ก11 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีตที่ 1 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน.....	78
ก12 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีตที่ 2 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน.....	78
ก13 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีตที่ 3 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน.....	79
ก14 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีตที่ 4 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน.....	79
ก15 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีตที่ 5 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน.....	79
ก16 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีตที่ 6 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน.....	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก17 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีตที่ 7 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน.....	80
ก18 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีตที่ 8 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน.....	80
ก19 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีตที่ 9 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน.....	80
ก20 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีตที่ 10 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน.....	80
ก21 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีตที่ 1 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน.....	81
ก22 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีตที่ 2 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน.....	81
ก23 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีตที่ 3 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน.....	81
ก24 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีตที่ 4 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน.....	81
ก25 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีตที่ 5 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน.....	82
ก26 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีตที่ 6 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน.....	82
ก27 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีตที่ 7 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน.....	82
ก28 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีตที่ 8 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน.....	82
ก29 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีตที่ 9 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน.....	83
ก30 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีตที่ 10 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน.....	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก31 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 1 รอบ ย่อยการทดสอบ 1 วัน.....	83
ก32 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 2 รอบ ย่อยการทดสอบ 1 วัน.....	83
ก33 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 3 รอบ ย่อยการทดสอบ 1 วัน.....	84
ก34 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 4 รอบ ย่อยการทดสอบ 1 วัน.....	84
ก35 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 5 รอบ ย่อยการทดสอบ 1 วัน.....	84
ก36 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 6 รอบ ย่อยการทดสอบ 1 วัน.....	84
ก37 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 7 รอบ ย่อยการทดสอบ 1 วัน.....	85
ก38 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 8 รอบ ย่อยการทดสอบ 1 วัน.....	85
ก39 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 9 รอบ ย่อยการทดสอบ 1 วัน.....	85
ก40 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 10 รอบ ย่อยการทดสอบ 1 วัน.....	85
ก41 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 11 รอบ ย่อยการทดสอบ 1 วัน.....	86
ก42 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 12 รอบ ย่อยการทดสอบ 1 วัน.....	86
ก43 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 13 รอบ ย่อยการทดสอบ 1 วัน.....	86
ก44 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 14 รอบ ย่อยการทดสอบ 1 วัน.....	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก45 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 15 รอบ ย่อยการทดสอบ 1 วัน.....	87
ก46 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 16 รอบ ย่อยการทดสอบ 1 วัน.....	87
ก47 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 17 รอบ ย่อยการทดสอบ 1 วัน.....	87
ก48 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 18 รอบ ย่อยการทดสอบ 1 วัน.....	87
ก49 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 19 รอบ ย่อยการทดสอบ 1 วัน.....	88
ก50 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 20 รอบ ย่อยการทดสอบ 1 วัน.....	88
ก51 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 1 รอบ ย่อยการทดสอบ 2 วัน.....	88
ก52 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 2 รอบ ย่อยการทดสอบ 2 วัน.....	88
ก53 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 3 รอบ ย่อยการทดสอบ 2 วัน.....	89
ก54 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 4 รอบ ย่อยการทดสอบ 2 วัน.....	89
ก55 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 5 รอบ ย่อยการทดสอบ 2 วัน.....	89
ก56 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 6 รอบ ย่อยการทดสอบ 2 วัน.....	89
ก57 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 7 รอบ ย่อยการทดสอบ 2 วัน.....	90
ก58 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 8 รอบ ย่อยการทดสอบ 2 วัน.....	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก59 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 9 รอบ ย่อยการทดสอบ 2 วัน.....	90
ก60 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 10 รอบ ย่อยการทดสอบ 2 วัน.....	90
ก61 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 11 รอบ ย่อยการทดสอบ 2 วัน.....	91
ก62 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 12 รอบ ย่อยการทดสอบ 2 วัน.....	91
ก63 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 13 รอบ ย่อยการทดสอบ 2 วัน.....	91
ก64 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 14 รอบ ย่อยการทดสอบ 2 วัน.....	91
ก65 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 15 รอบ ย่อยการทดสอบ 2 วัน.....	92
ก66 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 16 รอบ ย่อยการทดสอบ 2 วัน.....	92
ก67 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 17 รอบ ย่อยการทดสอบ 2 วัน.....	92
ก68 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 18 รอบ ย่อยการทดสอบ 2 วัน.....	92
ก69 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 19 รอบ ย่อยการทดสอบ 2 วัน.....	93
ก70 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 20 รอบ ย่อยการทดสอบ 2 วัน.....	93
ก71 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 1 รอบ ย่อยการทดสอบ 4 วัน.....	93
ก72 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 2 รอบ ย่อยการทดสอบ 4 วัน.....	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก73 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 3 รอบ ย่อยการทดสอบ 4 วัน.....	94
ก74 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 4 รอบ ย่อยการทดสอบ 4 วัน.....	94
ก75 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 5 รอบ ย่อยการทดสอบ 4 วัน.....	94
ก76 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 6 รอบ ย่อยการทดสอบ 4 วัน.....	94
ก77 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 7 รอบ ย่อยการทดสอบ 4 วัน.....	95
ก78 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 8 รอบ ย่อยการทดสอบ 4 วัน.....	95
ก79 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 9 รอบ ย่อยการทดสอบ 4 วัน.....	95
ก80 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 10 รอบ ย่อยการทดสอบ 4 วัน.....	95
ก81 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 11 รอบ ย่อยการทดสอบ 4 วัน.....	96
ก82 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 12 รอบ ย่อยการทดสอบ 4 วัน.....	96
ก83 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 13 รอบ ย่อยการทดสอบ 4 วัน.....	96
ก84 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 14 รอบ ย่อยการทดสอบ 4 วัน.....	96
ก85 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 15 รอบ ย่อยการทดสอบ 4 วัน.....	97
ก86 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 16 รอบ ย่อยการทดสอบ 4 วัน.....	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก87 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 17 รอบ ย่อยการทดสอบ 4 วัน.....	97
ก88 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 18 รอบ ย่อยการทดสอบ 4 วัน.....	98
ก89 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 19 รอบ ย่อยการทดสอบ 4 วัน.....	98
ก90 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 20 รอบ ย่อยการทดสอบ 4 วัน.....	98
ข1 คุณสมบัติของสารเอนาเมตชนิดต่างๆ	100
ข2 ระดับชั้นทางความร้อนฉนวนสำหรับสารโพลียูรีเทน.....	104
ข3 ระดับชั้นทางความร้อนฉนวนสำหรับสารไนลอน.....	104
ข4 ระดับชั้นทางความร้อนฉนวนสำหรับสารโพลีเอสเตอร์.....	105
ข5 คุณลักษณะของฟลูออโร โพลีเมอร์ฟิล์ม.....	108

สารบัญรูป

รูปที่	หน้าที่
2.1 การเร่งอายุของระบบฉนวนไฟฟ้า.....	4
2.2 ปัจจัยการเร่งอายุทางไฟฟ้าภายในและภายนอกของระบบฉนวน.....	6
2.3 ตัวอย่างการเร่งอายุทางไฟฟ้าระบบฉนวน.....	7
2.4 ปัจจัยการเร่งอายุทางความร้อนภายในและภายนอกของระบบฉนวน.....	8
2.5 ตัวอย่างการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวน.....	9
2.6 ปัจจัยการเร่งอายุทางกลภายในและภายนอกของระบบฉนวน.....	10
2.7 ตัวอย่างการเร่งอายุทางกลระบบฉนวน.....	11
2.8 ปัจจัยการเร่งอายุเนื่องจากผลทางสภาพแวดล้อมภายในและภายนอกของระบบฉนวน.....	12
2.9 ตัวอย่างการเร่งอายุเนื่องจากผลทางสภาพแวดล้อมระบบฉนวน.....	13
2.10 ตัวอย่างการเร่งอายุระบบฉนวนจากหลาย ๆ ปัจจัยเป็นลำดับเวลา.....	14
2.11 ความสัมพันธ์ของการเร่งอายุกับลำดับเวลาจากรูปที่ 2.10.....	15
2.12 ตัวอย่างการเร่งอายุระบบฉนวนจากหลาย ๆ ปัจจัยเป็นลำดับเวลาตัวอย่างที่ 2.....	15
2.13 ความสัมพันธ์ของการเร่งอายุกับลำดับเวลาจากรูปที่ 2.12.....	16
3.1 ตัวอย่างการนำผลการทดสอบมาพล็อตลงในกราฟสื่อการพิมพ์.....	23
4.1 ส่วนประกอบทั้งหมดของแบบจำลองร่องสลีตก่อนทำการประกอบ.....	26
4.2 ส่วนประกอบที่เป็นโลหะของเฟรมแบบจำลองร่องสลีต.....	26
4.3 แบบจำลองร่องสลีตที่ประกอบสมบูรณ์แล้ว.....	27
4.4 บล็อกไดอะแกรมของตู้อบไอน้ำสำหรับวัตถุทดสอบที่เย็นตัวลง.....	32
4.5 ตัวอย่างตู้อบไอน้ำสำหรับวัตถุทดสอบที่เย็นตัวลง.....	32
5.1 ส่วนประกอบของแบบจำลองร่องสลีต.....	35
5.2 ระบบฉนวนส่วนต่าง ๆ ที่นำมาทดสอบ.....	36
5.3 แบบจำลองร่องสลีตที่ใช้ในการทดสอบ.....	36
5.4 ตู้อบความร้อนที่ใช้ในการทดสอบ.....	37
5.5 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายในตู้อบความร้อน.....	37
5.6 โต้ะสั้น.....	38
5.7 ตู้อบความชื้น.....	39
5.8 วงจรการทดสอบทางแรงดันไฟฟ้า.....	40
5.9 การทดสอบทางแรงดันไฟฟ้า.....	40

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
5.10 ขั้นตอนการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อน.....	41
5.11 ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ 1 วัน ของแบบจำลองร่องสลีตที่ 1.....	43
5.12 ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ 1 วัน ของแบบจำลองร่องสลีตที่ 3.....	43
5.13 ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ 1 วัน ของแบบจำลองร่องสลีตที่ 5.....	44
5.14 ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ 1 วัน ของแบบจำลองร่องสลีตที่ 9.....	44
5.15 ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ 1 วัน ของแบบจำลองร่องสลีตที่ 10.....	45
5.16 ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ 2 วัน ของแบบจำลองร่องสลีตที่ 1.....	46
5.17 ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ 2 วัน ของแบบจำลองร่องสลีตที่ 2.....	46
5.18 ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ 2 วัน ของแบบจำลองร่องสลีตที่ 4.....	47
5.19 ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ 2 วัน ของแบบจำลองร่องสลีตที่ 9.....	47
5.20 ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ 2 วัน ของแบบจำลองร่องสลีตที่ 10.....	48
5.21 ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ 4 วัน ของแบบจำลองร่องสลีตที่ 2.....	49
5.22 ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ 4 วัน ของแบบจำลองร่องสลีตที่ 4.....	49
5.23 ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ 4 วัน ของแบบจำลองร่องสลีตที่ 5.....	50
5.24 ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ 4 วัน ของแบบจำลองร่องสลีตที่ 7.....	50
5.25 ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ 4 วัน ของแบบจำลองร่องสลีตที่ 8.....	51
5.26 ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดสอบครั้งที่ 2 ของรอบย่อยการทดสอบ 1 วัน ของแบบจำลอง ร่องสลีตที่ 2.....	52
5.27 ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดสอบครั้งที่ 2 ของรอบย่อยการทดสอบ 1 วัน ของแบบจำลอง ร่องสลีตที่ 4.....	53
5.28 ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดสอบครั้งที่ 2 ของรอบย่อยการทดสอบ 1 วัน ของแบบจำลอง ร่องสลีตที่ 13.....	53
5.29 ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดสอบครั้งที่ 2 ของรอบย่อยการทดสอบ 1 วัน ของแบบจำลอง ร่องสลีตที่ 16.....	54
5.30 ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดสอบครั้งที่ 2 ของรอบย่อยการทดสอบ 1 วัน ของแบบจำลอง ร่องสลีตที่ 20.....	54
5.31 ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดสอบครั้งที่ 2 ของรอบย่อยการทดสอบ 2 วัน ของแบบจำลอง ร่องสลีตที่ 3.....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
5.32 ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดสอบครั้งที่ 2 ของรอบย่อยการทดสอบ 2 วันของแบบจำลอง ร่องสลีตที่ 6.....	55
5.33 ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดสอบครั้งที่ 2 ของรอบย่อยการทดสอบ 2 วันของแบบจำลอง ร่องสลีตที่ 9.....	56
5.34 ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดสอบครั้งที่ 2 ของรอบย่อยการทดสอบ 2 วันของแบบจำลอง ร่องสลีตที่ 13.....	56
5.35 ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดสอบครั้งที่ 2 ของรอบย่อยการทดสอบ 2 วันของแบบจำลอง ร่องสลีตที่ 15.....	57
5.36 ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดสอบครั้งที่ 2 ของรอบย่อยการทดสอบ 4 วันของแบบจำลอง ร่องสลีตที่ 7.....	57
5.37 ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดสอบครั้งที่ 2 ของรอบย่อยการทดสอบ 4 วันของแบบจำลอง ร่องสลีตที่ 8.....	58
5.38 ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดสอบครั้งที่ 2 ของรอบย่อยการทดสอบ 4 วันของแบบจำลอง ร่องสลีตที่ 13.....	58
5.39 ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดสอบครั้งที่ 2 ของรอบย่อยการทดสอบ 4 วันของแบบจำลอง ร่องสลีตที่ 15.....	59
5.40 ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดสอบครั้งที่ 2 ของรอบย่อยการทดสอบ 4 วันของแบบจำลอง ร่องสลีตที่ 18.....	59
5.41 การเสื่อมสภาพของระบบฉนวนระหว่างการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้า.....	60
5.42 ระดับชั้นทางความร้อนระบบฉนวนตามมาตรฐานพร้อมทั้งขอบเขต.....	66
5.43 ระดับชั้นทางความร้อนระบบฉนวนจากการทดสอบ.....	66
5.44 กราฟการทำนายอายุระบบฉนวนเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของการทดสอบครั้งที่ 2.....	70

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

สาเหตุของการเสื่อมสภาพของระบบฉนวนเนื่องจากการเจอผลจากความเค้นทางความร้อนนั้นเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้อายุของระบบฉนวนลดลงและมีการนำเสนอค่าอายุกับอุณหภูมิในกราฟอาร์เรเนียส[1-2] แต่มิได้นำเสนอวิธีการทดสอบอย่างชัดเจน ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอการทดสอบโดยการเร่งอายุทางความร้อนแก่ระบบฉนวนที่ทำการทดสอบ ซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อขยับระยะเวลาในการหาหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้งานกับค่าอายุของระบบฉนวนนั้นได้ ซึ่งหากทำการทดสอบจนได้ความสัมพันธ์ดังกล่าวแล้วก็จะสามารถนำความสัมพันธ์นั้นไปใช้เพื่อทำการยืนยันระดับชั้นทางความร้อนของระบบฉนวนที่ทำการทดสอบ และทำการหาค่าอายุของระบบฉนวนที่ใช้งานที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้

ในการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวนนั้น ระบบฉนวนที่นำมาใช้ในการทดสอบเป็นระบบฉนวนที่ใช้จริงแต่การนำระบบฉนวนที่นำมาทดสอบพันลงบนแกนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าจริงนั้นจะยุ่งยากสำหรับการทดสอบ อีกทั้งยังสิ้นเปลืองกับแกนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าจริงนั้น ฉะนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอการทดสอบโดยการใช้แบบจำลองร่องสล็อตซึ่งเป็นการจำลองการใช้งานจริงของแกนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเพื่อลดความยุ่งยากในการทดสอบและประหยัดต่อการทดสอบ

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาค้นคว้าการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวนโดยการใช้แบบจำลองร่องสล็อตตามมาตรฐาน IEC 34-18-21[2] เป็นการทดสอบสำหรับระบบฉนวนที่มีการพันแบบไวร์วาวด์ (wire-wound winding) ซึ่งจะทำการทดสอบจำนวน 1 ระบบฉนวนโดยทำการทดสอบ 2 รอบการทดสอบ โดยรอบการทดสอบแรกเป็นการทดสอบเพื่อทำการหาแนวโน้มของผลการทดสอบส่วนในรอบการทดสอบที่ 2 นั้นเป็นการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในรอบการทดสอบแรก สุดท้ายจะทำการยืนยันระดับชั้นทางความร้อนระบบฉนวนและหาค่าอายุของระบบฉนวนที่ใช้งานที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากมาตรฐาน

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ดำเนินการศึกษาวิจัยโดยมีการกำหนดขั้นตอนรายละเอียดต่าง ๆ เป็นลำดับดังต่อไปนี้

บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเร่งอายุของระบบฉนวน ซึ่งมีปัจจัยทางความร้อน ปัจจัยทางกล ปัจจัยทางไฟฟ้า และปัจจัยทางสภาพแวดล้อม ซึ่งจะกล่าวถึงผลกระทบ

จากการเกิดปัจจัยเพียงปัจจัยเดียว และการเกิดผลกระทบในหลาย ๆ ปัจจัยกับระบบฉนวนพร้อม ๆ กัน

บทที่ 3 เป็นการกล่าวถึงการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวนตามมาตรฐาน IEC 34-18-1[3] ซึ่งจะกล่าวถึงขั้นตอนการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อน ตั้งแต่การเตรียมการทดสอบ ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ การทดสอบเพื่อการวินิจฉัย และการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

บทที่ 4 เป็นการกล่าวถึงการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวนโดยการใช้แบบจำลองร่องสลีตตามมาตรฐาน IEC 34-18-21 ซึ่งจะกล่าวถึงขั้นตอนการทดสอบทั้งหมด คือ การเตรียมระบบฉนวนที่ใช้ทำการทดสอบ การออกแบบแบบจำลองร่องสลีต ขั้นตอนการเร่งอายุทางความร้อน การทดสอบการปรับสภาพก่อนการวินิจฉัย โดยการทดสอบทางกล การทดสอบทางความชื้น และทำการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยโดยการทดสอบทางแรงดันไฟฟ้า

บทที่ 5 เป็นการนำเสนอการทดลองและผลการทดลอง โดยการทดลองจะทำการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวนโดยการใช้แบบจำลองร่องสลีต 3 รอบย่อยการทดสอบ และมีการทดสอบซ้ำเพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบในการทดสอบครั้งแรก สุดท้ายจะทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบ โดยแบ่งเป็นการวิเคราะห์ระดับชั้นทางความร้อนระบบฉนวนที่นำมาทดสอบโดยการเปรียบเทียบกับระดับชั้นทางความร้อนที่ได้จากมาตรฐาน และการวิเคราะห์อายุของระบบฉนวนเมื่อมีการใช้งานที่อุณหภูมิต่าง ๆ

บทที่ 6 เป็นการกล่าวถึงการสรุปผลงานวิจัยที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้ โดยการทำการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวนโดยการใช้แบบจำลองร่องสลีต พร้อมทั้งข้อเสนอแนะและวิจารณ์ผลการทดลองเพื่อการวิจัยต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

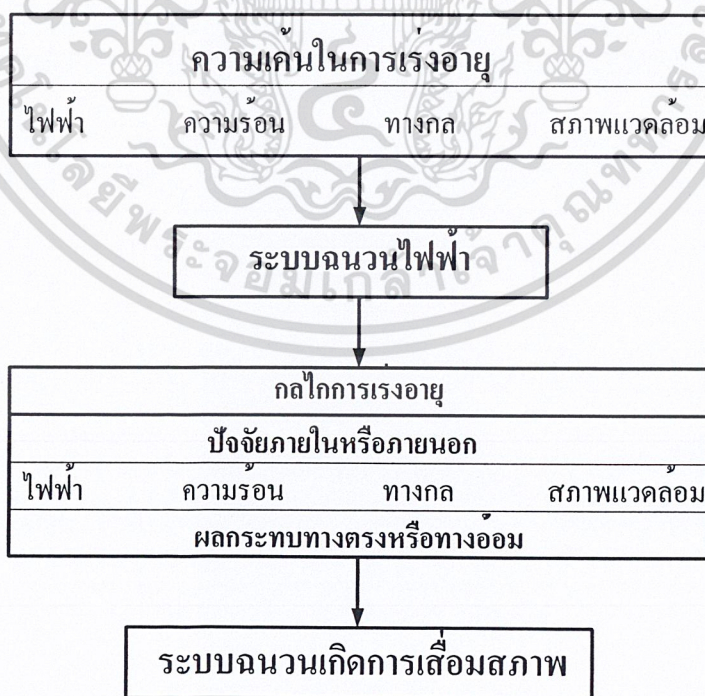
การเร่งอายุระบบฉนวน

2.1 บทนำ

การเสื่อมสภาพของระบบฉนวนสามารถเกิดขึ้นจากหลายปัจจัย เช่น ความเค้นทางความร้อน ความเค้นทางกล ความเค้นทางไฟฟ้า หรือผลจากสภาพแวดล้อม เป็นต้น แต่ละปัจจัยเป็นการเร่งอายุของระบบฉนวนแทบทั้งสิ้น ซึ่งจะทำให้อายุของระบบฉนวนนั้นสั้นลงลง โดยในบทนี้จะนำเสนอผลที่เกิดจากปัจจัยต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมา

2.2 การเร่งอายุระบบฉนวน[5]

การเร่งอายุหมายถึงการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรของคุณสมบัติความเป็นฉนวนของระบบฉนวนไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการถูกกระทำ โดยปัจจัยที่ส่งผลอาจเป็นปัจจัยเดียวหรือหลายปัจจัยรวมกันก็ได้ ความเค้นที่ทำให้เกิดการเร่งอายุนั้นอาจเกิดจากการเร่งอายุภายในหรือการเร่งอายุภายนอกของระบบฉนวนนั้น ซึ่งระบบฉนวนไฟฟ้าส่วนใหญ่การเร่งอายุภายนอกจะมีอิทธิพลเหนือกว่า เป็นเพราะว่าโดยปกติแล้วระบบฉนวนไฟฟ้านั้นอาจเกิดความไม่สมบูรณ์หรือการปนเปื้อนของสิ่งสกปรกได้ การเร่งอายุของระบบฉนวนทางไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเร่งอายุของระบบฉนวนไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดและระดับของสิ่งปนเปื้อนและส่วนของความไม่สมบูรณ์ในระบบฉนวนไฟฟ้าในหลายชนิดของอุปกรณ์ทางไฟฟ้า จะส่งผลทำให้สมรรถนะการใช้งานของอุปกรณ์นั้นลดลง ซึ่งการลดระดับของสิ่งปนเปื้อนและตรวจสภาพของระบบฉนวนไฟฟ้านั้นจะทำให้สมรรถนะการใช้งานของอุปกรณ์นั้นดีขึ้น

ปัจจัยความเค้นที่เกิดจาก ไฟฟ้า ความร้อน ทางกล หรือทางสภาพแวดล้อมนั้นจะส่งผลให้เกิดการเร่งอายุระบบฉนวนไฟฟ้าอันจะทำให้ระบบฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพในที่สุด ระหว่างการเร่งอายุในปัจจัยความเค้นหนึ่งนั้นอาจไม่ส่งผลกับระบบฉนวนไฟฟ้าในช่วงแรก แต่ในท้ายที่สุดแล้วก็จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอัตราการเสื่อมสภาพของระบบฉนวนนั้นเร็วขึ้น ซึ่งการเร่งอายุระบบฉนวนทางไฟฟ้า มีดังนี้

2.2.1 การเร่งอายุทางไฟฟ้า

การเร่งอายุทางไฟฟ้าเกิดได้จากทั้งแรงดันกระแสสลับ กระแสตรง หรือแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งจะทำให้เกิดผลต่าง ๆ ดังนี้

- ผลกระทบจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วน เมื่อความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าเฉพาะจุดมีค่ามากกว่าความคงทนต่อการเกิดการเบรกดาวน์ ในระบบฉนวนไฟฟ้า
- ผลจากการเกิดร่องรอย (electrical tracking)
- ผลจากการเกิดปรากฏการณ์ทรีอิง (electrical treeing)
- ผลจากปรากฏการณ์อิเล็กโทรไลซิส (electrolysis)
- ผลจากการเพิ่มอุณหภูมิอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของความสูญเสีย
- ผลจากการประจุ (charge injection)

รูปที่ 2.2 แสดงปัจจัยทั้งภายในและภายนอกของการเร่งอายุทางไฟฟ้า ความเค้นทางไฟฟ้าได้ถูกนำมาพิจารณาเป็นปัจจัยหลักในการเร่งอายุ ซึ่งสามารถยกตัวอย่างความเสื่อมสภาพของระบบฉนวนซึ่งเกิดจากปัจจัยการเร่งอายุทางไฟฟ้าได้ดังรูป 2.3 กล่าวคือ เมื่อระบบฉนวนเกิดการอัดประจุ จะทำให้เกิดช่องโหว่ หรือโพรงอากาศขึ้นอันจะทำให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วนให้เกิดความเสื่อมสภาพ หรืออาจจะส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ทรีอิงและทำให้ระบบฉนวนเกิดการเสียหาย

ในแต่ละระบบฉนวนทางไฟฟ้านั้นกระบวนการเสื่อมสภาพมีความซับซ้อนมากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงได้มีการพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการทำนายว่าปัจจัยในการเร่งอายุทางไฟฟ้ามีผลกระทบอย่างไรต่ออายุของระบบฉนวนทางไฟฟ้า ซึ่งความสัมพันธ์อย่างหนึ่งซึ่งเป็นสมการแปรผกผันระหว่างอายุและแรงดันไฟฟ้าเป็นไปดังสมการ 2.1

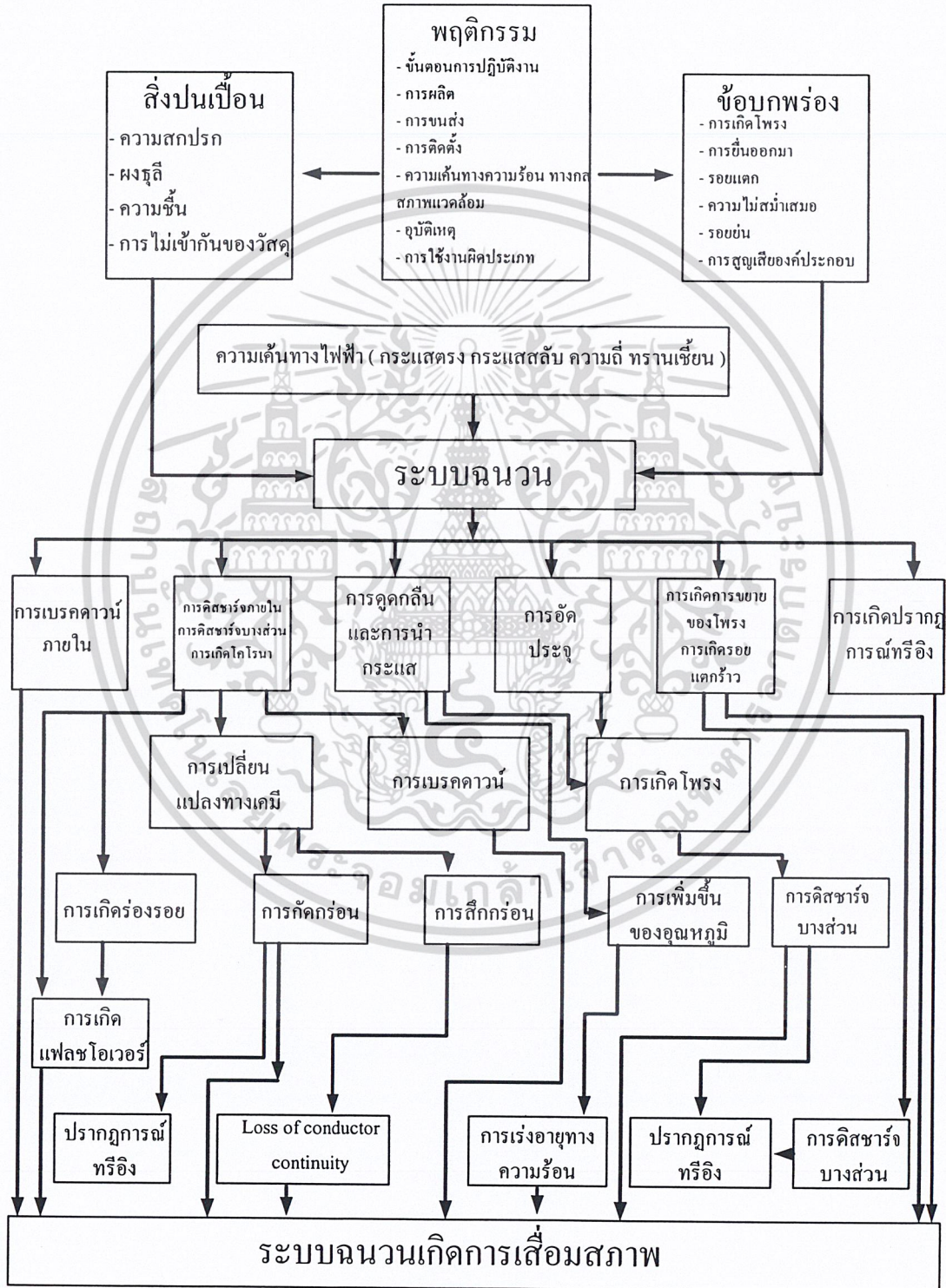
$$L \propto V^{-n} \quad (2.1)$$

เมื่อ L คือ อายุ (ชม.)

V คือ แรงดันไฟฟ้า (V)

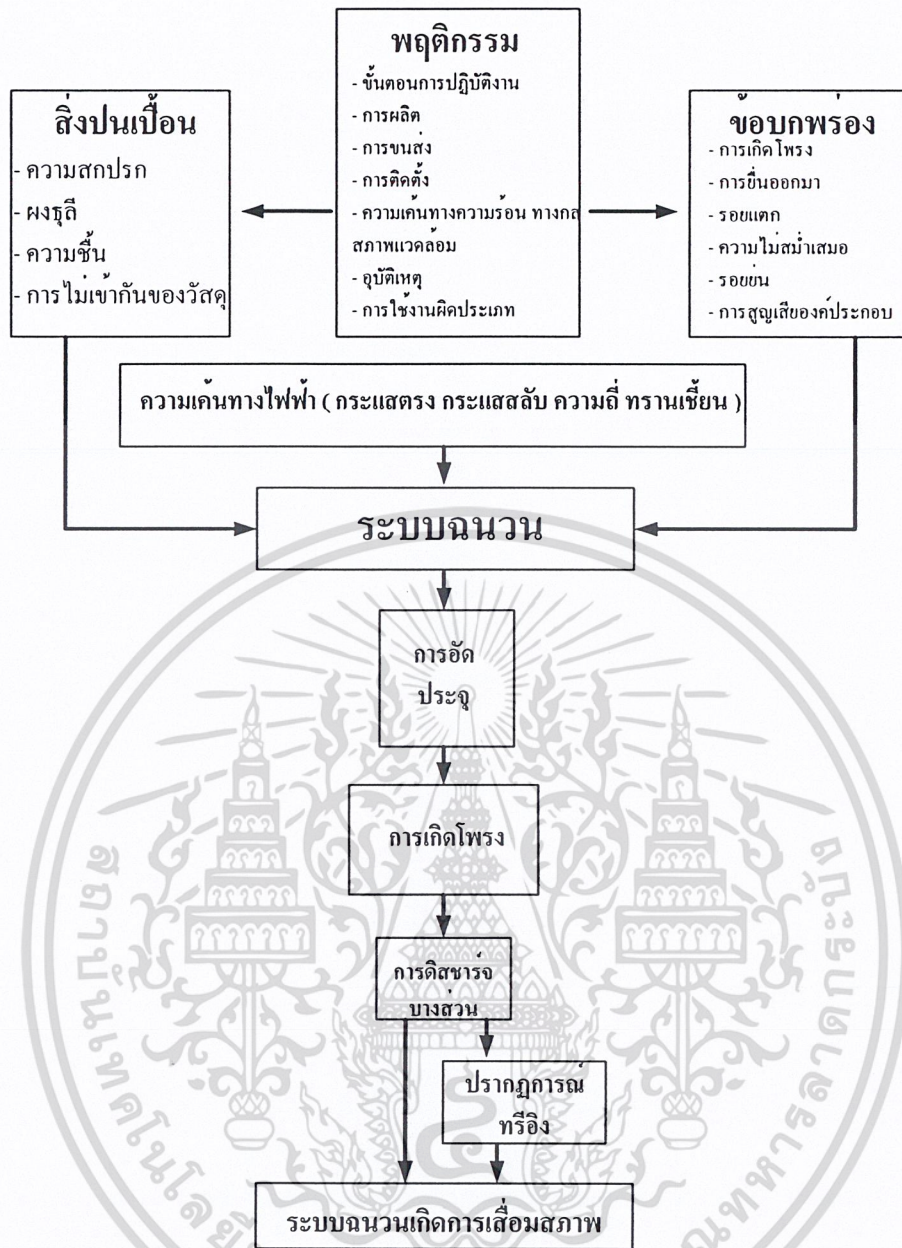
n คือ เลขชี้กำลังของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและอายุ

การเร่งอายุทางไฟฟ้าจะมีผลมากขึ้นหากมีการให้ความเค้นทางไฟฟ้าที่ความถี่สูงมากกว่าการใช้งานปกติ



รูปที่ 2.2 ปัจจัยการเร่งอายุทางไฟฟ้าภายในและภายนอกของระบบฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



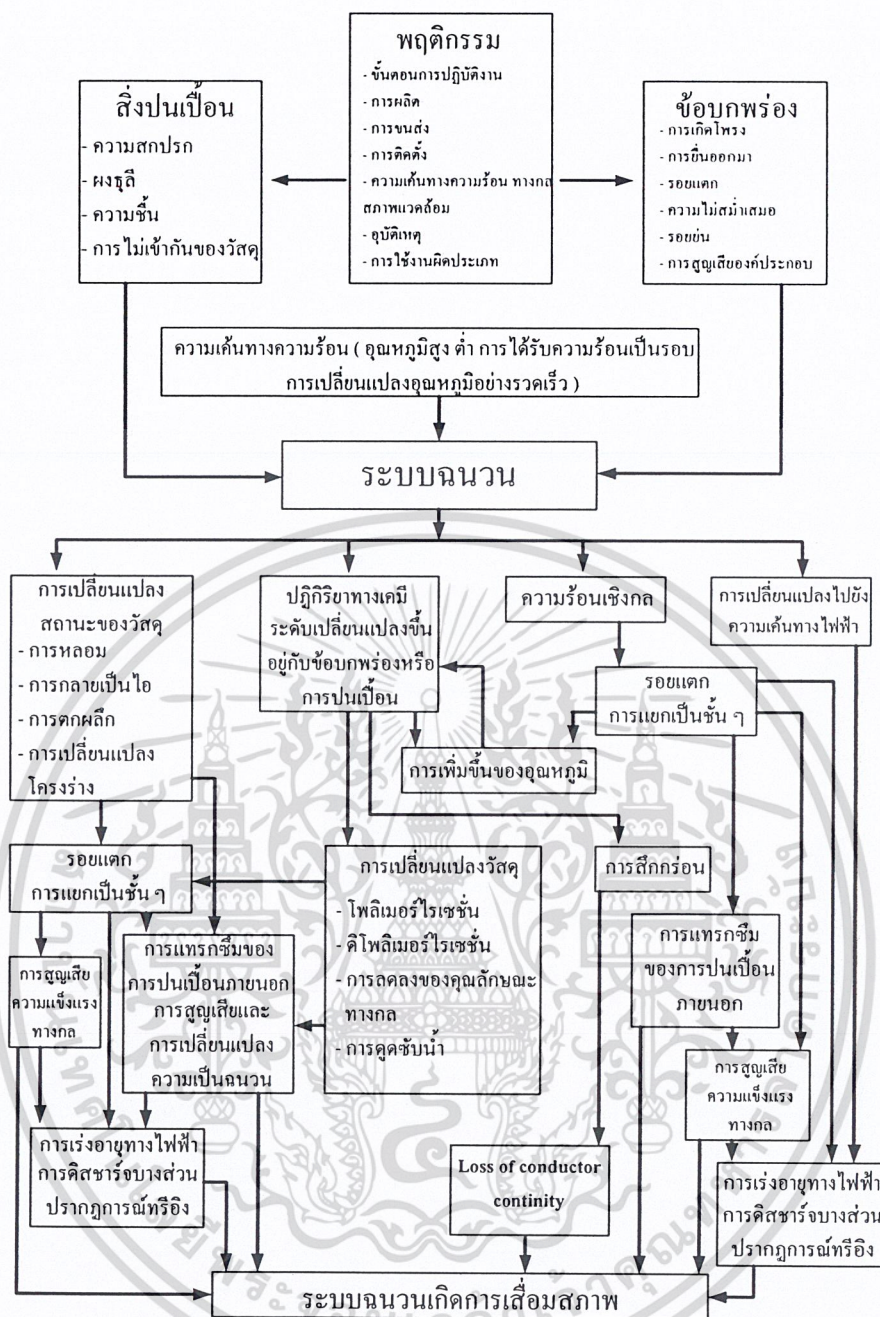
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างการเร่งอายุทางไฟฟ้าระบบฉนวน

2.2.2 การเร่งอายุทางความร้อน

การเร่งอายุทางความร้อนทำให้เกิดผลดังนี้

- กระบวนการในการเปลี่ยนแปลงค่าทางเคมี และฟิสิกส์ ตัวอย่างผลของการเสื่อมสภาพทางเคมี เช่น โพลีเมอไรเซชัน ดิโพลีเมอไรเซชัน เป็นต้น
- ผลกระทบเนื่องมาจากอุณหภูมิทางกลที่เป็นสาเหตุมาจากแรงที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน

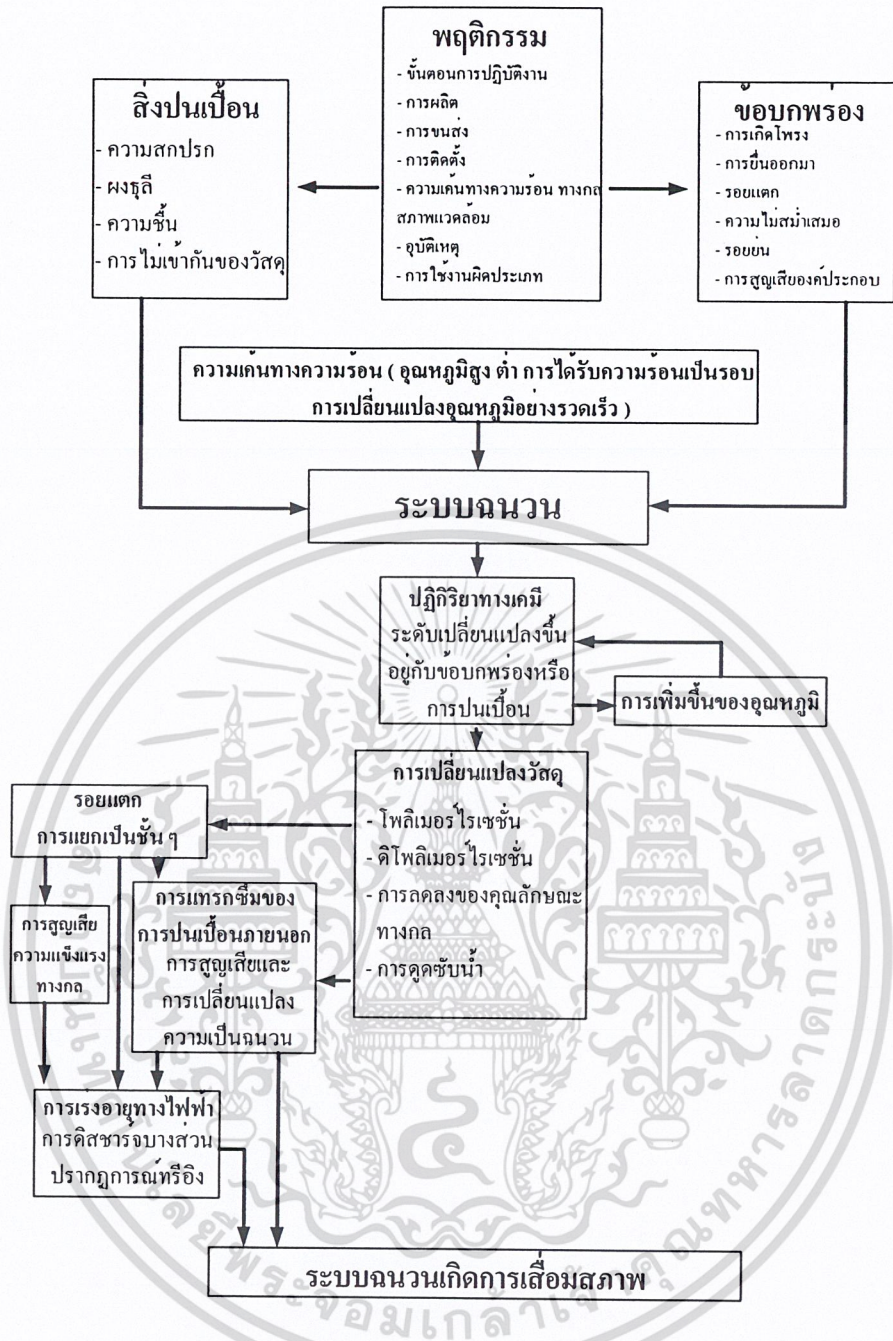
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ปัจจัยการเร่งอายุทางความร้อนภายในและภายนอกของระบบฉนวน

ปัจจัยทั้งภายในและภายนอกที่มีผลต่อการเร่งอายุทางความร้อนแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 และตัวอย่างการเสื่อมสภาพของระบบฉนวนซึ่งเกิดจากการเร่งอายุทางความร้อนแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 กล่าวคือ เมื่อระบบฉนวนได้รับการเพิ่มของอุณหภูมิจนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ซึ่งทำให้เกิดรอยแตกและมีการแทรกซึมจากสิ่งเจือปนภายนอก อันทำให้เกิดการฉีกขาดบางส่วน หรือการเกิดปรากฏการณ์ทริอิง อันทำให้ระบบฉนวนเกิดการเสียหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



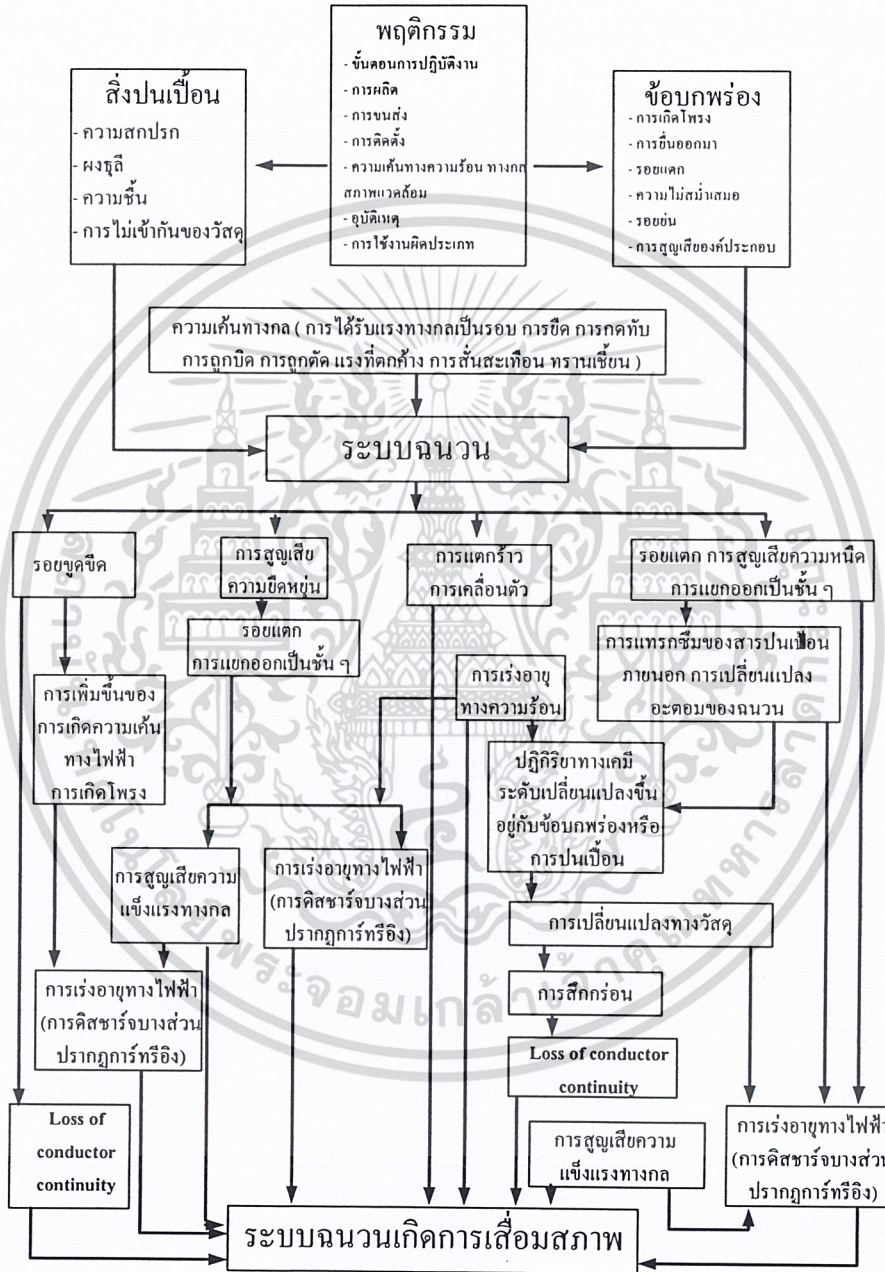
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวน

ระดับการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และฟิสิกส์ที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นสาเหตุหลักของการเร่งอายุทางความร้อน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางเคมีตามสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) เป็นดังสมการที่ 2.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าอายุของระบบฉนวนนั้นจะแปรผกผันกับอุณหภูมิสัมพัทธ์ที่ทำการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวนนั้น

$$L = A \exp\left(\frac{E}{kT}\right) \tag{2.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ L คือ อายุ (ชม.)
 A คือ ค่าคงที่
 E คือ พลังงานกระตุ้น (electron volts)
 k คือ ค่าคงที่โบลซ์แมน (Boltzmann constant =8.314 electron volts/K)
 T คือ อุณหภูมิสัมพัทธ์ (K)



รูปที่ 2.6 ปัจจัยการเร่งอายุทางกลภายในและภายนอกของระบบฉนวน

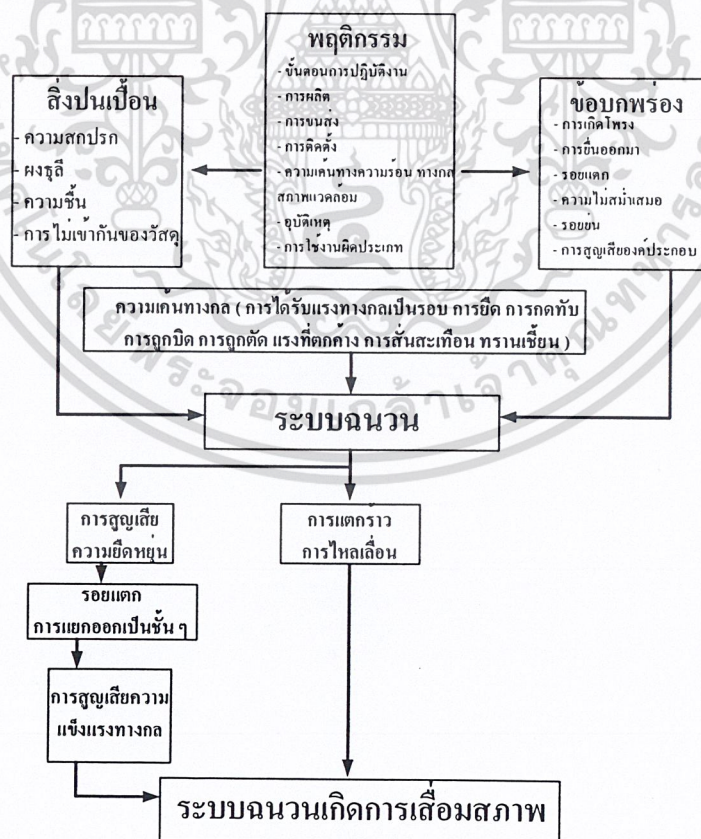
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 การเร่งอายุทางกล

การเร่งอายุทางกลจะทำให้เกิดผลต่าง ๆ ดังนี้

- การเสียดสีของส่วนที่เป็นฉนวนที่มีสาเหตุมาจากรอบของความเค้นทางกลระดับต่ำๆ จำนวนมาก
- ผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิทางกลที่เป็นสาเหตุมาจากแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน
- การปริแตกของฉนวนเนื่องจากความเค้นทางกลที่ระดับสูง
- การเกิดรอยร้าวเนื่องจากการเคลื่อนไหวที่สัมพันธ์กันระหว่างส่วนประกอบต่าง ๆ ของอุปกรณ์
- การค่อย ๆ เสื่อมลงของฉนวนภายใต้ความเค้นทางกลซึ่งมีผลของความเค้นทางไฟฟ้าและทางความร้อน

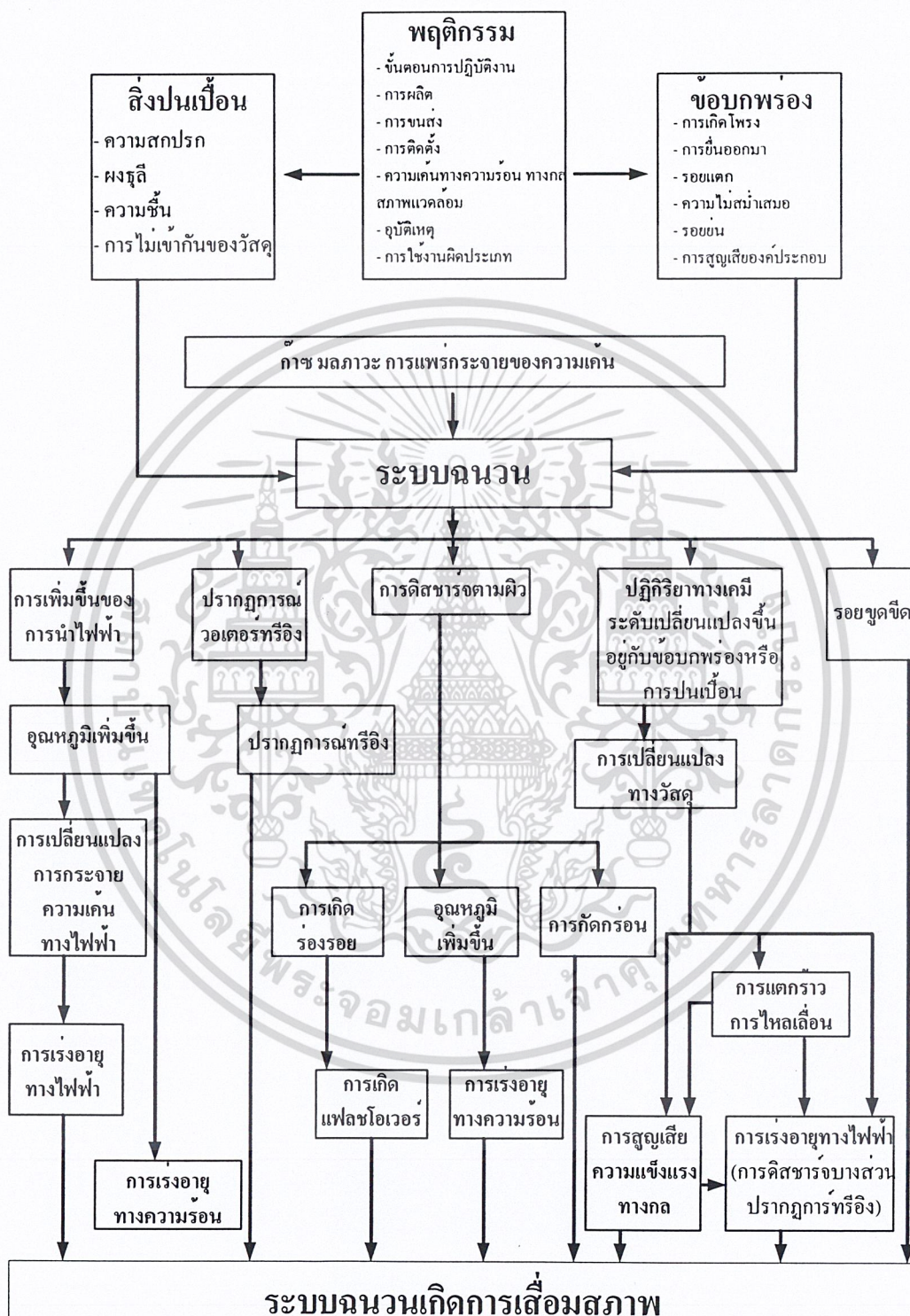
ปัจจัยทั้งภายในและภายนอกที่มีผลต่อการเร่งอายุทางกลแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 และตัวอย่างการเสื่อมสภาพของระบบฉนวนซึ่งเกิดจากการเร่งอายุทางกลแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 กล่าวคือ เมื่อระบบฉนวนได้รับความเค้นทางกล อาจทำให้เกิดรอยแตก รอยร้าวจนทำให้ระบบฉนวนเกิดความเสียหาย หรืออาจเกิดการเสื่อมสภาพความยืดหยุ่นของฉนวนก่อนจนเกิดรอยแตกร้าวจนทำให้ระบบฉนวนเกิดการเสียหาย



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการเร่งอายุทางกลระบบฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาที่ผ่านมาความเค้นทางกลจะแปรผกผันกับอายุของระบบฉนวน และหากทำการพล็อตความสัมพันธ์ดังกล่าวลงบนล็อกการิทึมกราฟ แล้วนั้นจะได้รับความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้น และหากมีผลของความถี่ทางกลเพิ่มขึ้นก็จะส่งผลกับอายุของระบบฉนวนนั้น ๆ

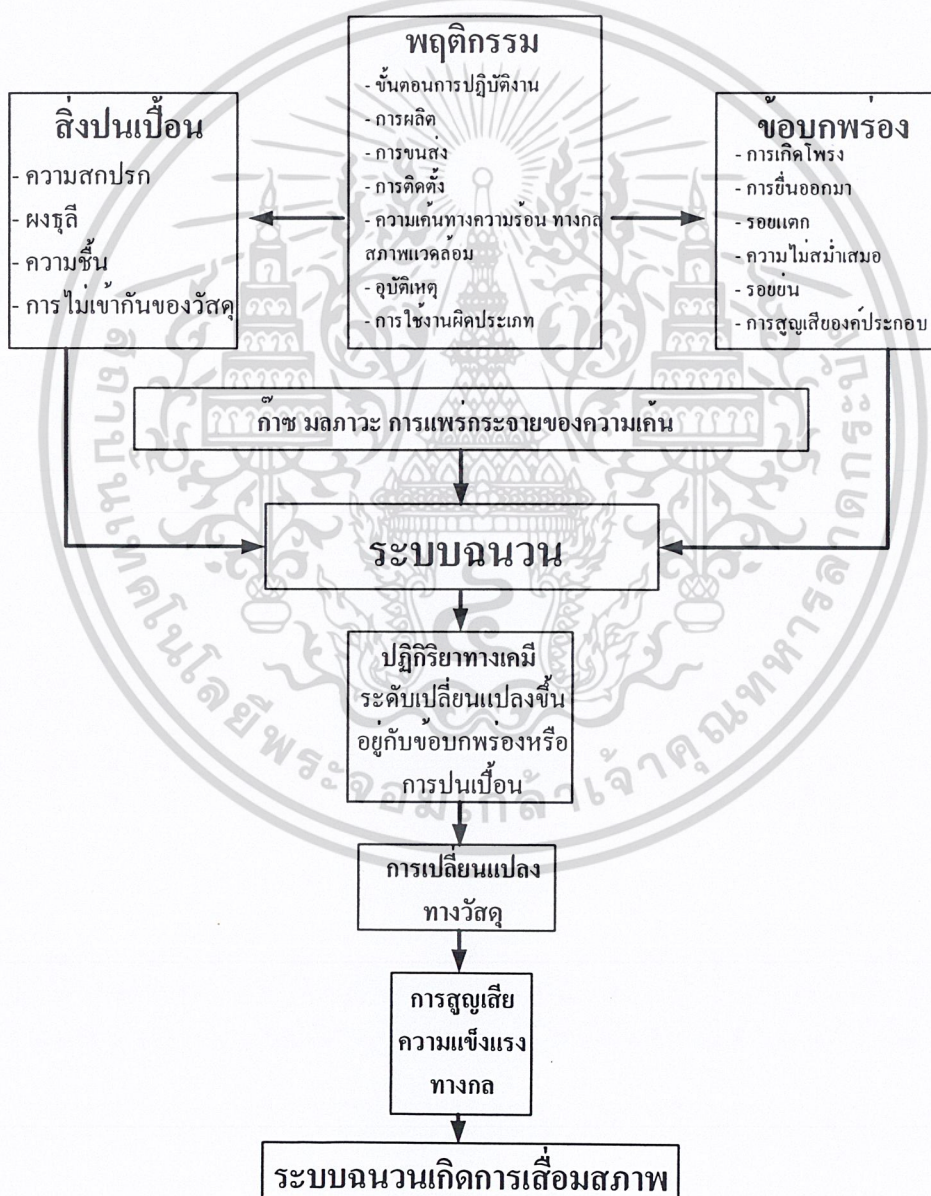


รูปที่ 2.8 ปัจจัยการเร่งอายุเนื่องจากผลทางสภาพแวดล้อมภายในและภายนอกของระบบฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 การเร่งอายุเนื่องจากผลทางสภาพแวดล้อม

การเร่งอายุเนื่องจากผลของสิ่งแวดล้อมนั้นจะประกอบด้วยการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาทางเคมี ภายใน ผลจากสิ่งแวดล้อมหรือการปนเปื้อนของฝุ่นละอองอันทำให้เกิดผลของพฤติกรรมทางไฟฟ้า เป็นต้น ปัจจัยทั้งภายในและภายนอกที่มีผลต่อการเร่งอายุเนื่องจากผลทางสภาพแวดล้อม แสดงได้ดังรูปที่ 2.8 และตัวอย่างการเสื่อมสภาพของระบบฉนวนซึ่งเกิดจากการเร่งอายุเนื่องจากผลทางสภาพแวดล้อมแสดงได้ดังรูปที่ 2.9 กล่าวคือ เมื่อระบบฉนวนได้รับผลจากสภาพแวดล้อมอาจเกิดปฏิกิริยาทางเคมีอันเนื่องมาจากการปนเปื้อน จนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของวัสดุอันทำให้เกิดการสูญเสียทางกลจนทำให้เกิดการเสียหายของระบบฉนวน



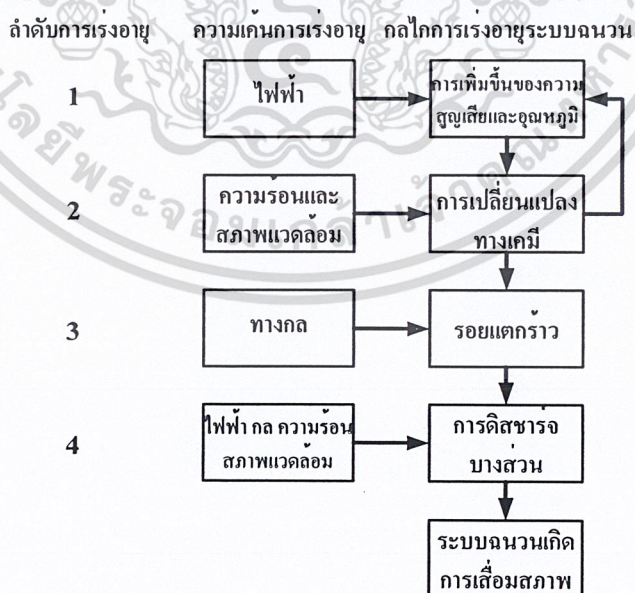
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการเร่งอายุเนื่องจากผลทางสภาพแวดล้อมระบบฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 การเร่งอายุจากหลายปัจจัย

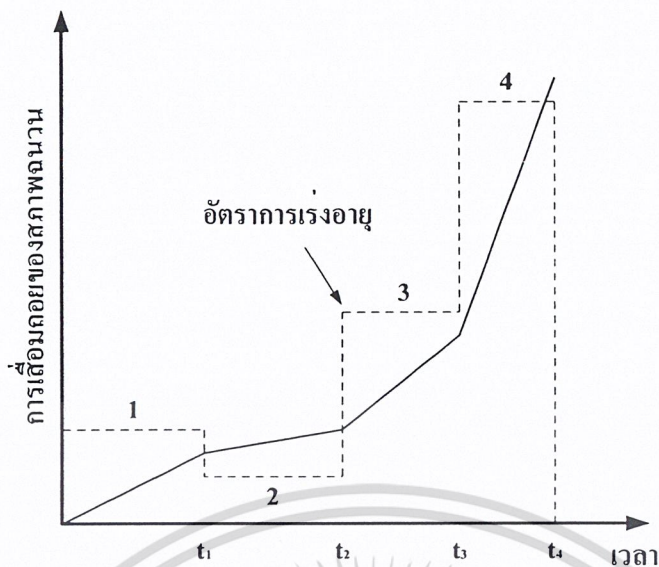
การเร่งอายุระบบฉนวนนั้นอาจเกิดจากปัจจัยการเร่งอายุปัจจัยเดียวซึ่งเป็นส่วนสำคัญต่อการเสื่อมสภาพของฉนวน หรืออาจเกิดจากหลายปัจจัยที่มีส่วนสำคัญต่อสภาพของระบบฉนวน ซึ่งปัจจัยการเร่งอายุนี้อาจมีผลกระทบรวมกันได้ ซึ่งกล่าวได้ว่าเป็นการกระทำรวมกันของความเค้น อาจจะเป็นการกระทำที่เสริมกันหรือหักล้างกันก็ได้ การเร่งอายุระบบฉนวนในทางปฏิบัตินั้นมีความซับซ้อนและการเสื่อมสภาพของระบบฉนวนนั้นมักมีสาเหตุมาจากการรวมกันของหลายปัจจัย แม้ว่าระบบฉนวนนั้นอาจเกิดการเสียหายเนื่องจากปัจจัยสำคัญเพียงปัจจัยเดียวก็ตาม

ยกตัวอย่างเช่น หากระบบฉนวนได้รับผลกระทบจากปัจจัยความเค้นทางไฟฟ้า ทางกล ทางความร้อน และสภาพแวดล้อมดังรูปที่ 2.10 ในขั้นแรกนั้นระบบฉนวนได้รับความเค้นทางไฟฟ้าซึ่งจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียไดอิเล็กตริก (dielectric loss) มากขึ้นซึ่งเป็นผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ณ จุดใดจุดหนึ่ง หรือหลาย ๆ จุด ในระบบฉนวนนั้น ในช่วงที่มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมินี้ระบบฉนวนได้รับความเค้นทางความร้อนและผลจากสภาพแวดล้อม ซึ่งจะทำให้ระบบฉนวนเกิดการเร่งการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในขั้นตอนที่ 2 โดยการเปลี่ยนแปลงทางเคมีนี้สามารถทำให้อัตราการเร่งอายุฉนวนเพิ่มมากขึ้นหรือลดลงก็ได้ และเมื่อคุณสมบัติทางกลของระบบฉนวนได้รับผลกระทบจนถึงระดับวิกฤตอันเนื่องมาจากได้รับความเค้นทางกลจนทำให้ระบบฉนวนเกิดรอยแตกหรือรอยแยกขึ้นในขั้นตอนที่ 3 ต่อมาเมื่อรอยแตกหรือรอยแยกนั้นมีขนาดใหญ่มากพอซึ่งจะทำให้เกิดการดิสซาร์จบางส่วนจนทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของระบบฉนวน รูปที่ 2.11 แสดงว่าอัตราการเร่งอายุนั้นจะไม่ขึ้นกับเวลาแต่จะขึ้นอยู่กับการให้ความเค้นซึ่งเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญในช่วงนั้น ๆ ซึ่งจะสามารถแสดงอีกตัวอย่างการเร่งอายุได้ดังรูปที่ 2.12 และ 2.13

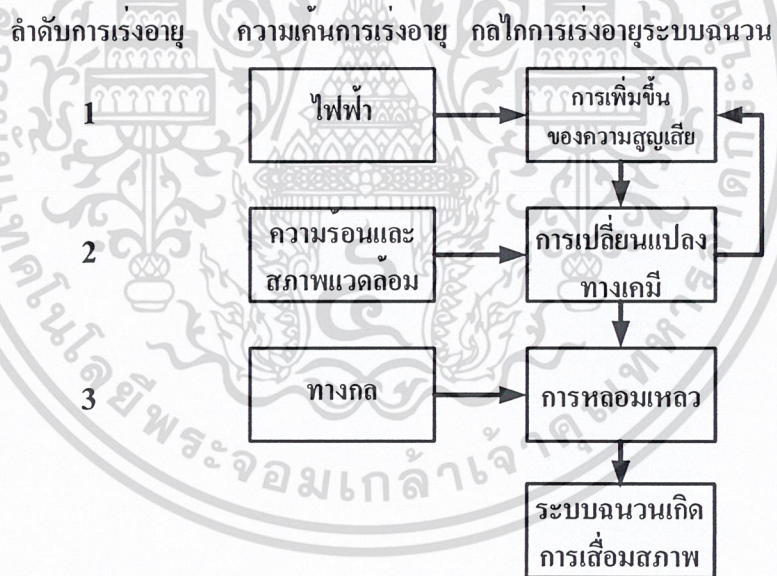


รูปที่ 2.10 ตัวอย่างการเร่งอายุระบบฉนวนจากหลาย ๆ ปัจจัยเป็นลำดับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

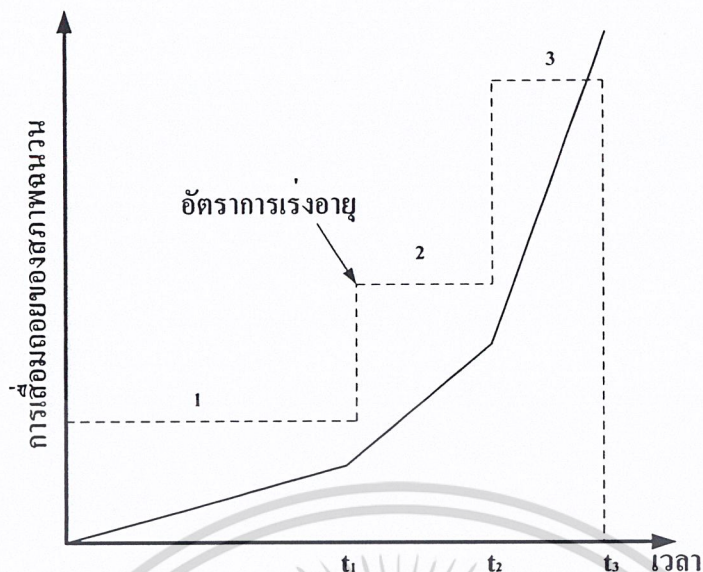


รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ของการเร่งอายุกับลำดับเวลาจากรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างการเร่งอายุระบบฉนวนจากหลาย ๆ ปัจจัยเป็นลำดับเวลาตัวอย่างที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ของการเร่งอายุกับลำดับเวลาจากรูปที่ 2.12

จากรูปที่ 2.12 เป็นการแสดงลำดับขั้นการเร่งอายุของระบบฉนวนในอีกลักษณะหนึ่ง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในขั้นตอนที่ 2 นั้นกลับไปทำให้เกิดการสูญเสียของไดอิเล็กตริกเพิ่มมากขึ้นในขั้นตอนที่ 1 ด้วย และจะส่งผลให้มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วจนนำไปสู่การหลอมเหลวของระบบฉนวนในขั้นตอนที่ 3 ซึ่งการสูญเสียความแข็งแรงทางกลนี้เพียงพอต่อการทำให้ระบบฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพได้ และมีอัตราการเร่งอายุที่รวดเร็วเนื่องจากผลของกระบวนการใน 2 ขั้นตอนแรก ซึ่งอัตราการเร่งอายุกับลำดับเวลาของตัวอย่างนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.13

บทที่ 3

กระบวนการทดสอบเพื่อหาค่าความคงทนทางความร้อน
ของระบบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุน

3.1 บทนำ

ทุกปัจจัยการเร่งอายุ เช่น ปัจจัยทางความร้อน ทางไฟฟ้า ทางกล และสภาพแวดล้อม มีผลกับค่าอายุระบบฉนวนในทุกชนิดเครื่องจักรกลไฟฟ้า ซึ่งในแต่ละปัจจัยจะส่งผลกับแต่ละชนิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าไม่เหมือนกัน โดยทั่วไปแล้วฉนวนในเครื่องจักรกลไฟฟ้าขนาดเล็กได้รับผลจากปัจจัยทางความร้อนและทางสภาพแวดล้อมมากกว่า ส่วนปัจจัยทางไฟฟ้าและปัจจัยทางกลจะส่งผลน้อยกว่า ในบทนี้จะนำเสนอกระบวนการทดสอบเพื่อหาค่าความคงทนทางความร้อนระบบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนตามมาตรฐาน IEC 34-18-1

3.2 ระดับชั้นทางความร้อนระบบฉนวน

ในการศึกษากระบวนการทดสอบเพื่อหาค่าความคงทนทางความร้อนระบบฉนวนนั้นจะต้องทราบระดับชั้นทางความร้อนระบบฉนวนเสียก่อน ซึ่งระดับชั้นทางความร้อนที่ใช้เป็นสากลแสดงได้ดังตารางที่ 3.1 โดยระบบฉนวนในแต่ละชนิดนั้นจะมีระดับชั้นทางความร้อนที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัสดุฉนวนที่ประกอบอยู่ (ภาคผนวก ข) ซึ่งในแต่ละระดับชั้นทางความร้อนนั้นจะมีการทดสอบตามกระบวนการทดสอบความคงทนทางความร้อนที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 3.1 ระดับชั้นทางความร้อนระบบฉนวน[6]

ระดับชั้นทางความร้อน	อุณหภูมิ (° C)
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
200	200
220	220
250	250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 กระบวนการทดสอบความคงทนทางความร้อน

วัตถุประสงค์ของการทดสอบความคงทนทางความร้อนระบบฉนวนนั้นเพื่อเป็นการจัดเตรียมข้อมูลสำหรับใช้จัดระดับชั้นทางความร้อนระบบฉนวนของระบบฉนวนใหม่ก่อนที่จะมีการนำระบบฉนวนนั้นไปใช้ ซึ่งกระบวนการทดสอบนี้เป็นการกล่าวถึงกระบวนการทดสอบโดยรวมของระบบฉนวนลักษณะต่างๆ ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุน ซึ่งกระบวนการทดสอบสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนนี้จะมีความซับซ้อนอันเนื่องมาจากระบบฉนวนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนนั้นมีความซับซ้อนนั่นเอง

3.3.1 รูปแบบกระบวนการทดสอบระบบฉนวนเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุน

เนื่องจากระบบฉนวนในเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนนั้นมีความซับซ้อนและมีอยู่หลายรูปแบบฉะนั้นในการทดสอบจึงมีรูปแบบการทดสอบใน 2 รูปแบบ คือ

- รูปแบบกระบวนการทดสอบสำหรับการพันแบบไวร์วาวด์ (wire wound winding) ซึ่งสามารถแบ่งรูปแบบการทดสอบเป็นหลายลักษณะ คือ การทดสอบมอเตอร์ การทดสอบโดยแบบจำลองร่องสลีต (motorette) การทดสอบสำหรับขดลวดในร่องสลีตที่สเตเตอร์ การทดสอบสำหรับการพันขดลวดสำหรับสร้างขั้ว (pole winding) การทดสอบสำหรับขดลวดในร่องสลีตที่โรเตอร์

- รูปแบบกระบวนการทดสอบสำหรับการพันแบบฟอร์มวาวด์ (form wound winding) ซึ่งเป็นการทดสอบสำหรับการพันขดลวดที่มีการทำเป็นรูปแบบสำเร็จก่อนที่มีการพันลงบนสเตเตอร์หรือโรเตอร์

3.3.2 วัสดุทดสอบ

3.3.2.1 โครงสร้างของวัสดุทดสอบ

วัสดุฉนวนและส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบควรมีการตรวจสอบสภาพของวัสดุและส่วนประกอบนั้น ๆ ก่อนที่จะนำมาทดสอบ ซึ่งส่วนประกอบต่างๆ ที่นำมาทดสอบนั้นควรมีลักษณะที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด เช่น ความหนาของฉนวน หรือระยะครีเพจ (creepage distance) เป็นต้น

3.3.2.2 จำนวนชิ้นงาน

จำนวนชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบควรมีมากพอสำหรับการหาค่าทางสถิติ สำหรับการหาค่าเฉลี่ยจากการเกิดการเสียหายในแต่ละอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบได้ เพื่อให้กระบวนการทดสอบมีความน่าเชื่อถือมากที่สุด

3.3.2.3 คุณภาพของชิ้นงานและการทดสอบเบื้องต้น

วัสดุฉนวนที่นำมาใช้ในการทดสอบนั้นควรมีการตรวจสอบเบื้องต้นในแต่ละชิ้นส่วน ก่อนที่จะนำมาประกอบเป็นชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ ภายหลังจากประกอบเรียบร้อยแล้วแต่ละชิ้นงานก็ควรมีการทดสอบเบื้องต้นก่อนที่จะนำมาใช้ในการทดสอบความคงทนทางความร้อน เช่น การวัดค่าความต้านทานฉนวน การวัดค่าคาปาซิเตอร์ การวัดค่าแรงดันเริ่มต้นสำหรับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน กระแสไฟฟ้ารั่วไหล การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้าสูง เป็นต้น

3.3.3 โครงสร้างกระบวนการทดสอบ

3.3.3.1 หลักการโดยทั่วไป

การหาค่าการเสื่อมลงของระบบฉนวนเนื่องมาจากการถูกเร่งอายุทางความร้อนอาจมีค่าที่ไม่เหมือนกันขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหรือส่วนของขดลวดที่สนใจ เช่น จุดสุดท้ายของการพัน (end winding) หรือส่วนของสล็อตที่ถูกฝังอยู่

ในหลาย ๆ กรณีประสบการณ์จะเป็นสิ่งที่บ่งชี้ที่ดีที่สุดสำหรับการวินิจฉัยหาค่าการเสื่อมลงทางอุณหภูมิและ โดยส่วนใหญ่แล้วการเปราะบางของระบบฉนวนนั้นจะถูกหาได้อย่างเห็นได้ชัดจากการถูกความเค้นทางกล ซึ่งนั่นจะทำให้เกิดรอยแตกขึ้นในระบบฉนวน อันทำให้การให้ความชื้นมีผลทำให้การวินิจฉัยโดยแรงดันไฟฟ้ามีผลในที่สุด

ในกรณีอื่น ๆ ความเค้นทางกล การให้ความชื้นและการทดสอบโดยการป้อนแรงดันไฟฟ้า อาจไม่ใช่วิธีที่ดีที่สุดสำหรับการวินิจฉัย ซึ่งอาจหาวิธีที่เหมาะสมในการวินิจฉัย เช่น การทดสอบทางไดอิเล็กตริก การวัดค่าการดิสชาร์จบางส่วน เป็นต้น เพื่อใช้ตรวจสอบคุณภาพของฉนวนเมื่อได้รับการเร่งอายุทางความร้อน

3.3.3.2 อุณหภูมิการเร่งอายุและระยะเวลาของรอบย่อยการทดสอบ

ในการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนนั้นถูกแนะนำให้ทำการทดสอบกับชิ้นงานอย่างน้อย 3 อุณหภูมิทดสอบ ซึ่งระดับชั้นทางความร้อนระบบฉนวนที่ใช้เป็นมาตรฐานแสดงได้ดังตารางที่ 3.1 โดยที่อุณหภูมิการเร่งอายุที่แนะนำและคาบเวลาของรอบย่อยการทดสอบในแต่ละรอบการเร่งอายุสำหรับระบบฉนวนแสดงได้ดังตารางที่ 3.2 ซึ่งระยะเวลาที่เหมาะสมสามารถปรับเปลี่ยนได้ และแต่ละรอบของการทดสอบที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่งนั้นควรมีรอบย่อยการทดสอบทั้งสิ้น 10 รอบย่อยการทดสอบ

เป็นที่ทราบกันดีว่าในระยะเวลาระหว่างมีการผลิตของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุน อาจมีความจำเป็นที่จะต้องมีการเปลี่ยนวัสดุหรือกระบวนการในการผลิตสำหรับเหตุผลทางเทคโนโลยีหรือจากเหตุผลทางการตลาด ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าหากมีการเปลี่ยนแปลงวัสดุแล้วค่าความคงทน

ของฉนวนจะเปลี่ยนไป ซึ่งในการทดสอบนั้นควรกระทำที่อุณหภูมิการทดสอบที่เหมือนกัน ซึ่งหากผลการทดสอบที่ได้มีลักษณะที่คล้ายคลึงกันแล้วก็จะสามารถยอมรับได้สำหรับการเปลี่ยนแปลงนั้น

ตารางที่ 3.2 อุณหภูมิแนะนำและรอบย่อยการเร่งอายุ[4]

ระดับชั้น ทาง ความร้อน	A	E	B	F	H	200	วันต่อรอบย่อย การทดสอบ (วัน)
อุณหภูมิ	170-180	185-195	195-205	220-230	245-255	265-275	1-2
แนะนำ	160-170	175-185	185-195	210-220	235-245	255-265	2-3
สำหรับการ	150-160	165-175	175-185	200-210	225-235	245-255	4-6
ทดสอบ	140-150	155-165	165-175	190-200	215-225	235-245	7-10
(°C)	130-140	145-155	155-165	180-190	205-215	225-235	14-21
	120-130	135-145	145-155	170-180	195-205	215-225	28-35
	110-120	125-135	135-145	160-170	185-195	205-215	45-60

3.3.3.3 ความหมายของการให้ความร้อน

แม้ว่าจะมีข้อเสียที่เด่นชัดอยู่ก็ตาม แต่จากประสบการณ์ที่ผ่านมาการให้ความร้อนโดยตู้อบความร้อนนั้นเป็นวิธีที่มีความสะดวกสบายมากที่สุด และยังเป็นวิธีที่ประหยัดด้วยสำหรับการหาค่าการเร่งอายุทางความร้อน ซึ่งการให้ความร้อนโดยการใช้ตู้อบความร้อนกับชิ้นงานที่นำมาทดสอบนั้นในความเป็นจริงแล้วบางส่วนของชิ้นงานอาจได้รับความร้อนที่ไม่เท่ากันซึ่งอาจจะมีค่าบางจุดที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่จุดใดจุดหนึ่ง (hotspot temperature) ฉะนั้นในการทดสอบภายในตู้อบให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุดควรมีการถ่ายเทที่เหมาะสม กล่าวคือ ที่อุณหภูมิที่ทำการทดสอบที่ต่ำกว่าอุณหภูมิ 180 °C ควรมีการควบคุมให้อุณหภูมิภายในตู้อบมีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 2 K หากทำการทดสอบที่อุณหภูมิตั้งแต่ 180 °C ถึงอุณหภูมิ 300 °C ควรมีการควบคุมให้อุณหภูมิภายในตู้อบมีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 3 K

อย่างไรก็ตามการให้ความร้อนโดยตู้อบอาจไม่สามารถทำได้ การทดสอบโดยการให้ความร้อนโดยตรงอาจเป็นการจำลองการทดสอบที่ใกล้เคียงและเหมาะสมกว่า เช่น การให้ความร้อนโดยตรงโดยวิธีการให้กระแสไฟฟ้า การทดสอบมอเตอร์โดยการเริ่มต้นและการหมุนย้อนกลับโดยการทดสอบเป็นคาบเวลา เป็นต้น

3.3.4 รอยย่อการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อน

การทดสอบการเร่งอายุทางความร้อน โดยการนำชิ้นงานทดสอบทำการทดสอบในตู้อบที่มีการระบายความร้อนอย่างเพียงพอ หรือมีระบบการพาความร้อนซึ่งจะเป็นการรักษารูปแบบของการให้อุณหภูมิแก่วัตถุทดสอบ วัตถุทดสอบควรมีการนำวัตถุทดสอบที่เย็นเข้าสู่ตู้อบที่มีความร้อนทันที เพื่อให้วัตถุนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงผลของการช็อคทางความร้อนในแต่ละรอบการทดสอบ ในทำนองเดียวกันวัตถุทดสอบควรนำออกจากตู้อบมาสู่อุณหภูมิห้อง โดยทันที เพื่อให้มีการเกิดรูปแบบการช็อคทางความร้อนของการได้รับความเย็นภายหลังจากการได้รับความร้อนแล้วนั่นเอง

3.3.5 รอยย่อของการวินิจฉัย

ภายหลังจากที่มีการทดสอบการเร่งอายุในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ ชิ้นงานที่ทำการทดสอบแต่ละชิ้นงานควรมีการทดสอบเพื่อการวินิจฉัย โดยลำดับดังนี้ คือ การให้ความเค้นทางกล การให้ความชื้น การทดสอบทางแรงดัน และการทดสอบอื่น ๆ ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม ซึ่งการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยในแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

3.3.5.1 การทดสอบทางกล

การให้ความเค้นทางกลเป็นการทดสอบที่ถูกแนะนำให้มีการทดสอบ เพื่อให้การทดสอบมีความใกล้เคียงกับการใช้งานจริงของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนมากที่สุด วิธีการทดสอบที่เหมาะสมและเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวาง คือการนำชิ้นงานไปทำการทดสอบกับโต๊ะสั่น และให้ทำการทดสอบประมาณ 1 ชั่วโมงที่ความถี่ของการเคลื่อนที่ 50 หรือ 60 เฮิร์ตซ์ หรือวิธีอื่น เช่น การให้การกระแทกหรือการงอซ้ำ ๆ กัน อาจมีการใช้ตามความเหมาะสม

การเริ่มหมุนหรือการกลับทางหมุนที่เป็นคาบเวลา อาจเป็นเทคนิคที่ถูกใช้สำหรับการให้ความเค้นทางกลแก่ขดลวดในเครื่องจักรกลไฟฟ้าจริง อย่างไรก็ตามการให้ความเค้นทางกลในลักษณะนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ทำการทดสอบ

3.3.5.2 การทดสอบทางความชื้น

ความชื้นในหลาย ๆ กรณีเป็นสาเหตุหลักที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของระบบฉนวน ซึ่งอาจเกิดความเสียหายในหลายกรณีเมื่อได้รับความเค้นทางไฟฟ้า การดูดซับความชื้นของฉนวนแข็งเป็นสาเหตุให้เกิดการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกและการลดค่าความต้านทานฉนวนด้วย ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความคงทนทางไฟฟ้า ความชื้นบนฉนวนนั้นเป็นการเพิ่มความสามารถในการตรวจสอบโดยการทดสอบทางแรงดันไฟฟ้า เช่น รอยแตกหรือโพรงอากาศในฉนวน แต่ในระหว่างการทดสอบทางความชื้นนี้ไม่ควรมีการทดสอบทางแรงดันไฟฟ้าให้กับชิ้นงานที่กำลังทำการทดสอบอยู่

การทดสอบในช่วงเวลา 2 วันเป็นการทดสอบที่สามารถเกิดความชื้นที่ผิวของฉนวนได้ ซึ่งเป็นสภาวะที่สามารถพบกันได้โดยทั่วไปในการใช้งานจริงของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้ค่าความต้านทานของฉนวนถึงจุดที่เหมาะสม

3.3.5.3 การทดสอบทางแรงดันไฟฟ้า

ในการตรวจสอบสภาวะของฉนวนและการตัดสินใจจุดสิ้นสุดของอายุฉนวน การให้แรงดันไฟฟ้าเป็นส่วนหนึ่งของรอบย่อยของการวินิจฉัย ขนาดและรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าที่ทำการทดสอบจะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ที่ใช้ทดสอบและขนาดของการใช้งานของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ส่วนค่าของความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ทำการทดสอบจะมีค่าระหว่าง 49 ถึง 62 เฮิร์ตซ์

การทดสอบแรงดันไฟฟ้าอาจมีการทดสอบระหว่างขดลวดกับเฟรม การทดสอบระหว่างขดลวดกับขดลวด การทดสอบระหว่างรอบต่อรอบของขดลวด และการทดสอบระหว่างเส้นลวดกับเส้นลวด แล้วแต่ความเหมาะสม ถ้ามีการทดสอบทางความชื้น การทดสอบทางแรงดันไฟฟ้าจะทำการทดสอบเมื่อฉนวนยังคงเปียกอยู่ภายหลังได้รับการทดสอบทางความชื้นแล้ว

การทดสอบทางแรงดันไฟฟ้านี้ไม่ได้มีส่วนทำให้ค่าอายุของระบบฉนวนนั้นลดลงแต่อย่างใด แต่ควรมีการระมัดระวังการเกิดทรานเซียน (transient) หรือการเกิดเซิร์จ (surge) อันจะส่งผลให้ค่าของอายุระบบฉนวนนั้นลดลงเนื่องจากผลทางแรงดันไฟฟ้า

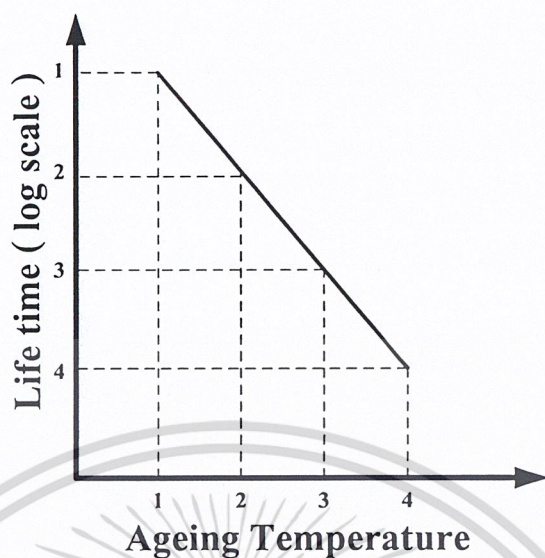
การเกิดการเสียหายในส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบฉนวนนั้นเป็นการบ่งชี้ถึงจุดสิ้นสุดอายุฉนวน ซึ่งจุดบ่งชี้ อาจสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ทำการวัด หรือการเกิดความร้อนหรือควันขึ้นในระบบฉนวน แต่หากเกิดการรวบไฟตามผิวนั้นอาจไม่ถือเป็นการเกิดการเสียหายของระบบฉนวนจนทำให้ระบบฉนวนนั้นถึงจุดสิ้นสุดของอายุ

3.3.5.4 การทดสอบการวินิจฉัยอื่นๆ

ในสภาวะการทำงานที่แตกต่างกันของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ทำให้การทดสอบเพื่อการวินิจฉัยอื่นๆ อาจมีการทดสอบซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเหมาะสม เช่น การทดสอบความต้านทานฉนวน การทดสอบลอสแทนเจน (loss tangent) การทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนอาจเป็นการทดสอบเพื่อให้เห็นการเสื่อมสภาพของฉนวนก่อนที่จะเกิดการเสียหายขึ้นในระบบฉนวน

3.3.6 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบจุดสิ้นสุดอายุของฉนวนในแต่ละชิ้นงานทดสอบ ณ ที่อุณหภูมิทดสอบต่างๆ ถูกนำมาพล็อตลงในกราฟล็อกการิทึม (logarithm) ซึ่งเป็นค่าระหว่างแกน x คือค่าอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ และแกน y เป็นอายุของฉนวน เพื่อทำการหากราฟการถดถอยของอายุในระบบฉนวนที่นำมาทดสอบ ซึ่งสามารถตัวอย่างดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างการนำผลการทดสอบมาพล็อตลงในกราฟล็อกการิทึม

จากรูปที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนที่อุณหภูมิที่ 1 แล้วได้ค่าอายุจากการคำนวณและนำไปพล็อตลงในกราฟล็อกการิทึม เมื่อเปรียบเทียบกับการทดสอบที่อุณหภูมิที่ 2 ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่มากกว่าแล้วจะได้ค่าอายุลดลงและเมื่อทำในกราฟล็อกการิทึมแล้วจะได้กราฟอยู่ในลักษณะเส้นตรง

บทที่ 4

กระบวนการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวน โดยใช้แบบจำลองร่องสลีต

4.1 บทนำ

การทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนนั้นมีอยู่หลายแบบด้วยกัน ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอการทดสอบโดยใช้แบบจำลองร่องสลีตตามมาตรฐาน IEC 34-18-21 เป็นชิ้นงานสำหรับทดสอบ ซึ่งเป็นการทดสอบสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีการพันแบบไวร์วาวด์ สำหรับการทดสอบโดยวิธีนี้มีความสะดวกกว่าการนำเครื่องจักรกลไฟฟ้าทั้งตัวไปทดสอบ และสามารถหาค่าอายุและตัดสินระดับชั้นทางความร้อนระบบฉนวนได้เช่นกัน

4.2 ขอบเขตของการทดสอบ

การทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวนโดยใช้แบบจำลองร่องสลีตตามมาตรฐาน IEC 34-18-21 เป็นวัตถุประสงค์นั้นจะทำการทดสอบโดยอ้างอิงมาตรฐาน IEC 34-18-1 ซึ่งในการทดสอบจะประกอบด้วยหลายรอบการทดสอบ ซึ่งแต่ละรอบการทดสอบจะประกอบด้วย

- รอบย่อยการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อน
- รอบย่อยการทดสอบเพื่อการวินิจฉัย ซึ่งจะประกอบด้วย การทดสอบทางกล การทดสอบทางความชื้น และการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้า

4.3 วัตถุประสงค์

4.3.1 โครงสร้างของวัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการทดสอบนี้ จะใช้โครงสร้างแบบจำลองร่องสลีตที่ได้ทำการออกแบบ และรูปแบบระบบฉนวนที่ถูกทดสอบ ซึ่งแบบจำลองร่องสลีตที่ทำขึ้นรูปมานั้นควรมีความใกล้เคียงกับระบบฉนวนจริงที่มีการประกอบเสร็จแล้ว ซึ่งเป็นการจำลองระบบฉนวนที่มีการพันแบบไวร์วาวด์ ซึ่งมีรายละเอียดของแบบจำลองร่องสลีตดังนี้

4.3.1.1 วัสดุที่นำมาใช้

- ส่วนประกอบที่เป็นโลหะ (นอกเหนือจากส่วนที่นำไฟฟ้า) โลหะสเตนเลส
- อินซูลเตอร์หรือเทอมินอล เซรามิกหรือวัสดุอื่นๆที่ทนต่ออุณหภูมิสูงๆได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ขดลวดและวัสดุที่เป็นฉนวน เมื่อนำมาใช้หรือพิจารณาเลือกมาใช้ให้ใช้ตามการใช้งานในเครื่องจักรกล

4.3.1.2 ขนาดของวัสดุตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

ขนาดของวัสดุตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบควรประมาณขนาดที่ใช้ตามการใช้งานในเครื่องจักรกล ระยะครีปเอจ (creepage distance) ความหนาของวัสดุที่ใช้เป็นฉนวน และที่ว่างอากาศควรเหมือนหรือใกล้เคียงกับการใช้งานในเครื่องจักรกล

4.3.1.3 โครงสร้าง

ขดลวดสองขดถูกใส่เข้าไปในคู่อรงสล็อตที่เหมือนกันซึ่งเป็นส่วนประกอบที่จำเป็นของแบบจำลองร่องสล็อต ร่องสล็อตถูกสร้างจากแผ่นสแตนเลสในรูปแบบโดยประมาณและถูกยึดอยู่บนฐานของแบบจำลองร่องสล็อต เทอมินอลทั้ง 4 ชิ้นจะถูกยึดอยู่บนฐานของแบบจำลองร่องสล็อต ดังรูปที่ 4.3 แสดงแบบจำลองร่องสล็อตที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์

ขดลวดทั้งสองขดนั้น ได้จากการพันด้วยลวดตัวนำสองเส้นขนานกัน จำนวนรอบควรจะมีประมาณให้พอดีกับร่องสล็อต โดยให้เหมือนกับการใช้งานในเครื่องจักรกล และขดลวดทั้งสองขดถูกต่อเข้ากับเทอร์มินอลเพื่อให้ง่ายในการทดสอบแรงดันระหว่างขดลวดกับกราวด์, ระหว่างขดลวดกับขดลวด และระหว่างรอบต่อรอบขดลวด

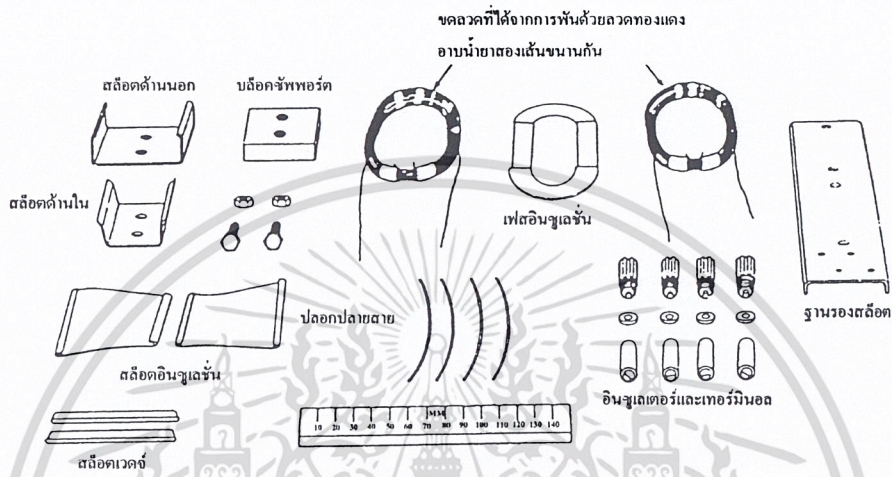
แบบจำลองร่องสล็อตไม่สามารถจำลองผลกระทบจากกระบวนการผลิตจริง เช่น เทคนิคในการพันขดลวด เนื่องจากผลกระทบจากกระบวนการผลิตนั้นมีค่าน้อยมาก แบบจำลองร่องสล็อตอาจจะประกอบด้วยมือเพราะง่ายและสะดวก

4.3.2 รายละเอียดของโครงสร้างแบบจำลองร่องสล็อต

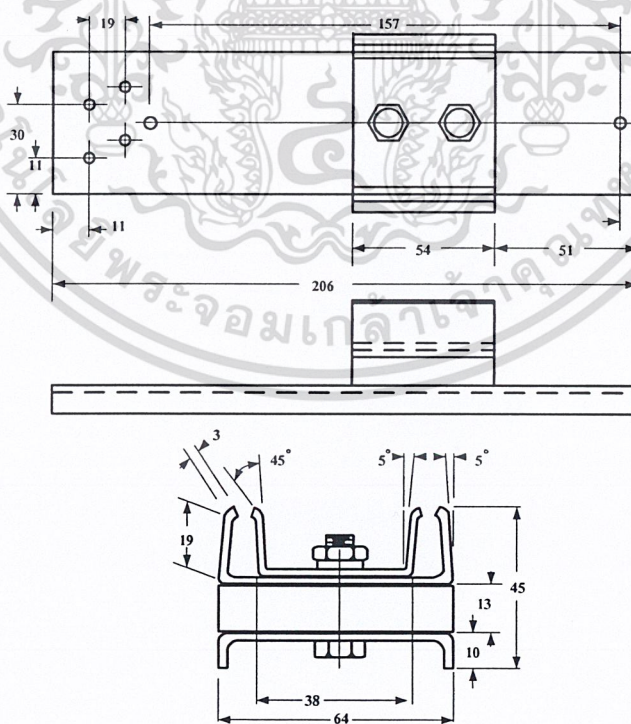
ในห้องทดสอบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบของแบบจำลองร่องสล็อตที่กำหนดไว้ อาจจะทำขึ้นเพื่อปรับปรุงหรือเพื่อให้สะดวกมากยิ่งขึ้นที่จะสร้างเป็นวัตถุทดสอบ อย่างไรก็ตามถ้าประสบการณ์ที่ผ่านมาในการหาค่าระดับชั้นความร้อนฉนวน ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ หากการออกแบบแบบจำลองร่องสล็อตไม่มีความใกล้เคียงกับความเป็นจริง ฉะนั้น โครงสร้างของแบบจำลองร่องสล็อตที่ได้แสดงรายละเอียดนี้ควรปฏิบัติตามอย่างพิถีพิถัน ประสบการณ์ได้แสดงให้เห็นว่าเพียงการพิถีพิถันในการออกแบบและการเตรียมแบบจำลองร่องสล็อตจะมีผลต่อวัสดุตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งสามารถนำไปทดสอบในห้องทดสอบที่ต่างกันด้วยผลกระทบที่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้

การออกแบบแบบจำลองร่องสล็อตซึ่งมีการนำมาใช้กันเมื่อหลายปีมาแล้วในห้องทดสอบที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลกระทบที่ทำให้เปลี่ยนแปลงได้ง่าย

รูปแสดงรายละเอียดแบบจำลองร่องสลีตมีดังนี้ รูปที่ 4.1 แสดงส่วนประกอบทั้งหมดของแบบจำลองร่องสลีตก่อนทำการประกอบรวมทั้งวัสดุที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าขดลวดและส่วนประกอบที่เป็นโลหะ รูปที่ 4.2 แสดงส่วนประกอบที่เป็นโลหะของเฟรม และฐานของแบบจำลองร่องสลีตก่อนทำการประกอบ รูปที่ 4.3 แสดง แบบจำลองร่องสลีตที่ประกอบสมบูรณ์แล้ว

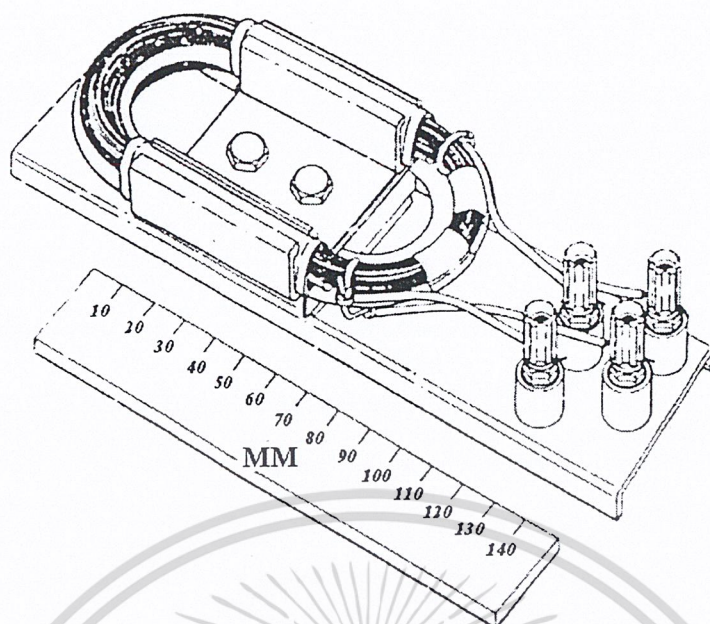


รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบทั้งหมดของแบบจำลองร่องสลีตก่อนทำการประกอบ



รูปที่ 4.2 ส่วนประกอบที่เป็นโลหะของเฟรมแบบจำลองร่องสลีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แบบจำลองร่องสลิตที่ประกอบสมบูรณ์แล้ว

แบบจำลองร่องสลิตที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์แล้วก็จะประกอบด้วยฐานโลหะรองรับที่มีความแข็งแรงสำหรับยึดเทมปิลที่ทำจากโพซีเลนหรือวัสดุอื่น ๆ ที่เหมาะสม และยึดร่องสลิตทั้งสองที่ประกอบขึ้นมาจากแผ่นโลหะภายในและภายนอก ฐานรองรับมีไว้สำหรับแขวนแบบจำลองร่องสลิตขณะทำการทดสอบการสั้นสะเทือน ร่องสลิตที่นำมาใช้ได้สะดวกจะทำมาจากแผ่นโลหะสแตนเลส ร่องสลิตที่ประกอบขึ้นภายในจะบรรจุขดลวดสองขด โดยมีฉนวนกันระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรม (slot insulation) ฉนวนกันระหว่างขดลวดทั้งสอง (phase insulation) และยึดให้ติดอยู่กับที่ด้วยลิ้ม (slot wedges) ส่วนประกอบเหล่านี้เป็นส่วนที่เหมือนกันกับที่ใช้ในมอเตอร์ขดลวดแต่ละขดนั้นได้จากการพันลวดตัวนำสองเส้นขนานกัน ดังนั้นการทดสอบแรงดันระหว่างลวดตัวนำกับลวดตัวนำสามารถทำการทดสอบได้ การพันขดลวดของเครื่องจักรกลนั้นสามารถพันลงในแบบที่ต้องการได้เมื่อมีความเหมาะสมแล้ว โครงสร้างและกระบวนการในการสร้างอาจจะถูกปรับปรุงจำลองให้ตรงกับความต้องการในการนำไปใช้

4.3.3 ส่วนประกอบของแบบจำลองร่องสลิต

- ลวดตัวนำขนาด 1.12 มิลลิเมตร หุ้มด้วยแผ่นฟิล์มหนา
- ฉนวนกันระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรม (slot insulation) แผ่นฉนวนหนา 0.25 มิลลิเมตรตัดออกมาเพื่อทำเป็นม้วน โดยมีความกว้างทั้ง 4 ด้าน 70 มิลลิเมตรและพับขอบ 2 ด้านเข้ามาด้านละ 3.2 มิลลิเมตร สุดท้ายด้านทั้งสองจะเหลือความยาวด้านละ 64 มิลลิเมตร และมีส่วนที่ยื่นออกมาจากขอบสลิต 4.8 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ฉนวนกันระหว่างขดลวดทั้งสอง (phase insulation) แผ่นฉนวนบาง 0.25 มิลลิเมตร ประกอบด้วยส่วนที่เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความยาว 75 มิลลิเมตร กว้าง 64 มิลลิเมตร และมีช่องว่างตรงกลางซึ่งมีความกว้าง 38 มิลลิเมตร เมื่อวัดจากจุดกึ่งกลางทำให้เหลือขอบกว้าง 13 มิลลิเมตร สำหรับส่วนที่เป็นส่วนโค้งที่ต่อกับด้านกว้างของสี่เหลี่ยมผืนผ้าทั้งสองด้านตัดส่วนโค้ง โดยใช้ด้านกว้างทั้งสองด้านของสี่เหลี่ยมผืนผ้า 64 มิลลิเมตรเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของขอบนอก และตัดส่วนโค้งที่เป็นขอบในซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 มิลลิเมตร คือวัดจากจุดกึ่งกลางของสี่เหลี่ยมผืนผ้า

- ลิ่ม (slot wedge) ลิ่มสำหรับยึดขดลวดให้อยู่กับที่ ตัดออกมาจากชิ้นที่มีลักษณะเป็นรูปตัว B โดยควรตัดให้มีความกว้าง 9.5 มิลลิเมตร และยาว 76 มิลลิเมตร ส่วนปลายด้านหนึ่งของลิ่มควรทำให้กลมเล็กน้อยเพื่อให้มั่นใจได้ว่าสามารถใส่เข้าไปในสล๊อตได้ง่าย

- ปลอกปลายสาย (sleeving) ปลอกปลายสายที่เป็นฉนวนมีขนาดและความยาวพอดีที่จะหุ้มปลายสายของขดลวดที่ยื่นออกมาจากจุดกึ่งกลางของสล๊อตเพื่อแบ่งขดลวดทั้งสองขดต่อเข้ากับเทอมินอล

- เชือก (tie cord) มีความยาวพอดีที่จะใช้มัดขดลวดกับปลายสายของขดลวดเข้าด้วยกัน

- เทปพันขดลวด เทปที่มีระดับทางไฟฟ้ากว้าง 13 มิลลิเมตร

- วาร์นิชหรือเรซินที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้า

วัสดุทั้งหมดที่กล่าวไปข้างต้นเป็นส่วนประกอบของระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ

4.3.4 การประกอบแบบจำลองร่องสล๊อต

- การพันขดลวด ขดลวดแต่ละขดควรมีการพันที่แน่น โดยมีรูปร่างคล้ายรูปไข่ ด้านที่ขนานกันมีความยาว 64 มิลลิเมตร และห่างกัน 44 มิลลิเมตร ส่วน โค้งของรูปไข่เป็นครึ่งวงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 44 มิลลิเมตร ขดลวดแต่ละขดประกอบด้วยเส้นลวดตัวนำ 2 เส้นด้วยมีจำนวน 20 รอบ (40 แท่งตัวนำ) เมื่อใส่ขดลวดทั้งสองลงในร่องสล๊อต นั่นก็หมายความว่าในแต่ละร่องสล๊อตจะมีลวดตัวนำ 80 แท่ง และได้ส่วนปลายสายของขดลวดแต่ละขดออกมา 4 เส้น และปลายสายด้านใดด้านหนึ่งของลวดตัวนำเส้นเดียวกันจะถูกตัดออกโดยเหลือความยาวสั้นละ 5 มิลลิเมตรออกมาจากขดลวดใกล้กับตรงกลางด้านหนึ่งของครึ่งวงกลม ส่วนที่เหลือ 5 มิลลิเมตรนี้ จะถูกพันให้อยู่กับที่ด้วยเทปพันขดลวดซึ่งเป็นปลายสายที่ไม่ได้นำไปต่อกับเทอมินอล โดยพันห่างกันอย่างน้อยที่สุด 5 มิลลิเมตร และส่วนของปลายสาย 2 เส้นที่เหลือออกมาจากขดลวดจะมีการใส่ปลอกปลายสายปลายสายและปลอกปลายสายจะถูกมัดเข้าด้วยกันด้วยเชือก โดยแสดงในรูปที่ 4.3

- การทำความสะอาดและประกอบชิ้นส่วนที่เป็นโลหะ ก่อนที่จะทำการประกอบชิ้นส่วนที่เป็นโลหะของแบบจำลองร่องสล๊อตแต่ละชิ้นจะถูกจุ่มลงในตัวทำละลายที่ประกอบด้วยโทลูอีนและแอลกอฮอล์สังเคราะห์ในอัตราส่วนที่เท่ากันเป็นเวลาอย่างน้อยที่สุด 30 นาที เมื่อนำแต่ละชิ้นส่วนออกจากตัวทำละลาย และล้างออกด้วยตัวทำละลายบริสุทธิ์แล้วเช็ดให้แห้งด้วยผ้าสำลี

ส่วนประกอบที่เป็นโลหะของแบบจำลองร่องสลีตควรประกอบด้วยความระมัดระวังเพื่อให้มั่นใจว่าตรงส่วนที่เป็นร่องสลีตมีระยะห่างเท่ากันและด้านทั้งสองขนานกัน เพื่อความง่ายในการประกอบให้ตัดชิ้นไม้ที่มีขนาดเท่ากับความกว้างของร่องสลีต และเพื่อให้สลีตอยู่ตรงกลางควรวางชิ้นไม้ในร่องสลีตก่อนที่จะทำการอัดน้ำให้แน่น

- การใส่ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรม ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรมจะถูกตัดออกมาแล้วม้วนให้พอดีกับร่องสลีต และให้มีส่วนของฉนวนยื่นออกมาจากขอบร่องสลีตด้านละ 5 มิลลิเมตร ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรมจะถูกใส่เข้าไปในร่องสลีตอย่างระมัดระวังเพื่อให้ส่วนของฉนวนที่ยื่นออกมาจากขอบร่องสลีตแต่ละด้านเท่ากัน

- การใส่ขดลวด ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรมจะถูกม้วนออกมาเหนือส่วนที่มีลักษณะคล้ายพื้นปลาตรงด้านบนของร่องสลีตเพื่อให้มั่นใจว่าขดลวดจะไม่ถลอกเมื่อใส่ลงไป ในร่องสลีต ใส่ขดลวดขดล่างลงในร่องสลีตให้ปลายสายที่ไม่ต่อกับเทอมินอลอยู่ด้านล่างส่วนที่ใช้ต่อกับเทอมินอลอยู่ด้านบน หลังจากใส่ขดลวดขดล่างแล้ว ใส่ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองและระมัดระวังในการใส่เพื่อให้มั่นใจว่าฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองปิดทับขดลวดขดล่างทั้งหมด ถ้าฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองมีขนาดใหญ่มาก ขอบของฉนวนจะถูกพับขึ้นไปทางด้านบนของร่องสลีต ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองจะต้องมีขนาดและวางในตำแหน่งที่แน่ใจว่าปิดทับขดลวดด้านล่างทั้งหมด ปลายของขดลวดขดล่างจะต้องวางในแนวราบเพื่อหลีกเลี่ยงการทำให้ขอบของฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองเสียหาย การใส่ขดลวดขดบนก็ทำในลักษณะเดียวกันกับการใส่ขดลวดขดล่างแต่ปลายที่ไม่ได้ต่อกับเทอมินอลอยู่ด้านบน และส่วนที่ใช้ต่อกับเทอมินอลด้านล่าง จัดขอบของขดลวดขดบนให้อยู่ในตำแหน่งเดียวกับขดลวดขดล่างเพื่อให้แน่ใจว่าลวดตัวนำของขดลวดขดบนไม่เลื่อนออกมานอกฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสอง

- การต่อปลายสายกับเทอมินอล ปลายสายจะต้องวัดขนาดให้พอดีที่จะต่อเข้ากับเทอมินอล ปอกส่วนปลายของปลายสายออก 13 มิลลิเมตร แล้วทำการบัดกรีก่อนที่จะต่อเข้ากับเทอมินอล ปลายสายของขดลวดขดล่างต่อ เข้ากับเทอมินอลที่อยู่ด้านใน ส่วนปลายสายของขดลวดขดบนต่อเข้ากับเทอมินอลที่อยู่ด้านนอก ถ้าขดลวดที่ใส่เข้าไปในฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรม เกิดเลื่อนให้ใส่ลิ่มเข้าไปโดยให้อยู่บนฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรม

- การทดสอบทางไฟฟ้า วัดความต้านทานของขดลวดถ้าต้องการ และแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการวัดความต้านทานได้แนะนำไว้ หากพบว่าขดลวดผ่านการทดสอบ ก็ทำการชุบวารินิชหรือเรซินที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนทางไฟฟ้า

- การชุบวารินิชหรือเรซิน นำยารินิชหรือเรซินควรมีการนำมาใช้ในลักษณะเดียวกันกับที่ใช้ในเครื่องจักรกลทั่วไป

- การติดตั้งแบบจำลองร่องสลีต แบบจำลองร่องสลีตควรบรรจุอยู่ในภาชนะ ซึ่งภาชนะนั้นจะต้องมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรองรับน้ำหนัก แบบจำลองร่องสลีตจำนวน 10 ชิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ 20 ชั้นในกรณีทดสอบพร้อมกัน โดยที่ภาชนะนั้นต้องมีระยะห่างระหว่างแบบจำลองร่องสลีตที่เพียงพอต่อการไหลเวียนของอากาศ และขนาดของภาชนะนั้นควรที่จะสามารถนำเข้าสู่ตู้อบตู้อบความชื้นและไต่ระดับได้

4.3.5 จำนวนชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ

จำนวนแบบจำลองร่องสลีตอย่างน้อย 10 ชิ้นควรถูกทำการทดสอบที่แต่ละอุณหภูมิทดสอบ สำหรับแต่ละระบบฉนวนที่ทำการทดสอบ

4.3.6 การตรวจสอบคุณภาพก่อนการทดสอบ

ก่อนที่จะเริ่มการทดสอบรอบย่อยของการเร่งอายุทางความร้อน ควรมีการทดสอบเพื่อทำการตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงานที่นำมาทดสอบ โดยสามารถตรวจสอบได้ดังนี้

- การตรวจสอบด้วยสายตา
- การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 34-1[5]
- การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ขนาด 400 V ระหว่างตัวนำกับตัวนำซึ่งควรมีค่าของกระแสไม่เกิน 50 mA

4.3.7 การทดสอบเพื่อการวินิจฉัยเบื้องต้น

ภายหลังการทดสอบเพื่อทำการตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงานที่นำมาทดสอบ การทดสอบเพื่อการวินิจฉัยควรมีการทดสอบเพื่อสังเกตว่ามีความผิดปกติกับระบบฉนวนที่นำมาทดสอบหรือไม่

4.4 รอบย่อยการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อน

รอบย่อยการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวน อาจมีการใช้ตู้อบความร้อนในการให้ความร้อนแก่วัตถุทดสอบ ซึ่งอุณหภูมิและระยะเวลาในแต่ละรอบย่อยการทดสอบแสดงได้ดังตาราง ที่ 3.2 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับระดับชั้นทางความร้อนระบบฉนวนตามตารางที่ 3.1 ซึ่งแบบจำลองร่องสลีตควรมีการใส่เข้าไปโดยตรงภายในตู้อบทันที และมีการนำแบบจำลองร่องสลีตออกจากตู้อบมาสู่อุณหภูมิห้องทันทีภายหลังทำการเร่งอายุทางความร้อนในแต่ละรอบย่อยการเร่งอายุ และในการลดผลของความแตกต่างของอุณหภูมิในแต่ละแบบจำลองร่องสลีตภายในตู้อบความร้อน ฉะนั้นในการทดสอบแต่ละรอบย่อยการทดสอบนั้นควรมีการสลับเปลี่ยนที่ระหว่างแบบจำลองร่องสลีตในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ

4.5 รอบย่อยการทดสอบเพื่อการวินิจฉัย

4.5.1 การทดสอบทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในแต่ละรอบย่อยการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อน ภายหลังจากทำให้เย็นภายใต้ อุณหภูมิห้องแล้ว แต่ละแบบจำลองร่องสล้อตควรมีการทดสอบด้วยการให้ความเค้นทางกลบนโต๊ะ สั่นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งแบบจำลองร่องสล้อตนั้นควรมีการติดตั้งเพื่อให้เกิดแรงทางกลทำให้มีการ เคลื่อนที่ในมุมที่ทำให้เกิดการสั่นบริเวณจุดสิ้นสุดของการพันของขดลวด ซึ่งในการทดสอบให้มีการ สั่นนั้นจะไม่มีทดสอบทางด้านแรงคั้นเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ซึ่งค่าของของการสั่นนั้นจะให้มี ค่า 0.2 มม. ที่ความถี่ 60 Hz หรือ 0.3 มม.ที่ความถี่ 50 Hz ถ้าความเค้นที่ทำการทดสอบไม่ได้ ตามที่กำหนดนั้นให้มีการรายงานในผลการทดสอบ

4.5.2 การทดสอบทางความชื้น

การทดสอบทางแรงดันไฟฟ้าควรมีการทำการทดสอบอย่างน้อย 48 ชั่วโมง ซึ่งควรมีการ ทำให้ชิ้นงานมีความเปียกชื้น และไม่มีทดสอบทางแรงดันไฟฟ้าในระหว่างการทดสอบทาง ความชื้นนี้ ซึ่งรายละเอียดของตู้อบความชื้นที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้

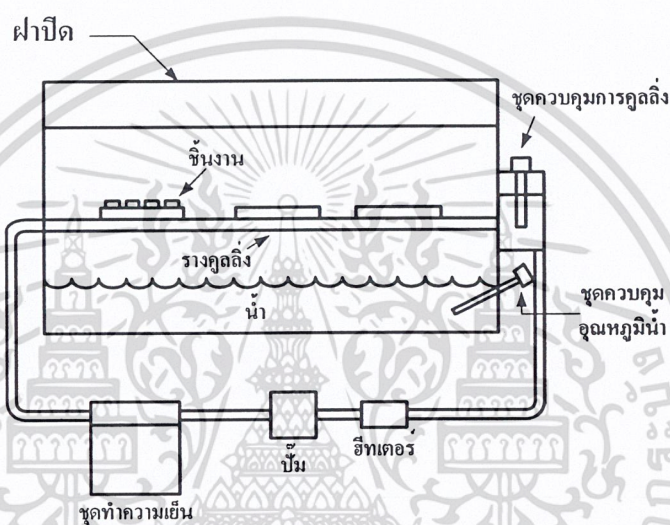
4.5.2.1 ตู้อบความชื้น

สภาพบรรยากาศภายในตู้อบความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 เปอร์เซ็นต์จะมีไอน้ำมาเกาะ บริเวณผนังของตู้อบความชื้น ถาดที่รองรับน้ำจะมีเครื่องทำความร้อนจุ่มอยู่เพื่อให้ความร้อนแก่น้ำ ให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 5 ถึง 10 องศาเซลเซียสจากอุณหภูมิห้อง ฝาครอบของตู้อบความชื้นควรมี การฉนวนและไม่ควรมีความลาดเอียงเพื่อป้องกันการหยดของหยดน้ำลงบนวัตถุทดสอบ ภาชนะ ของตู้อบความชื้นควรสร้างด้วยวัสดุที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อน ควรหลีกเลี่ยงจุดต่อที่ไม่ใช่ โลหะ ฝาเปิดควรสร้างให้มีขอบยื่นออกมาเพื่อที่จะให้ความชื้นที่อยู่รอบ ๆ ฝาเปิดถ่ายเทเข้าสู่ภายใน ตู้อบ

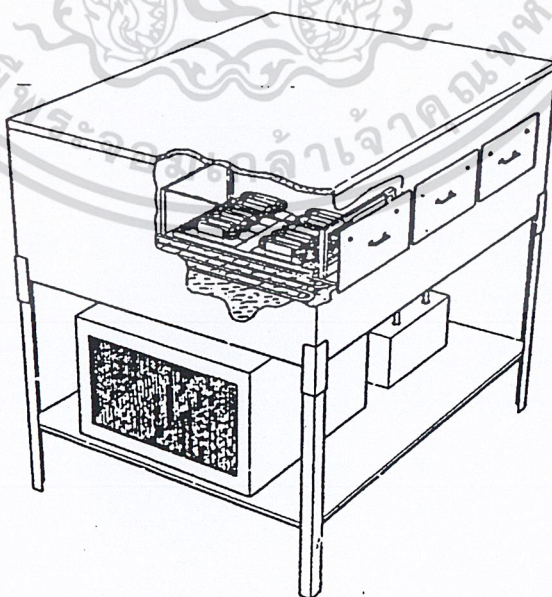
4.5.2.2 ตู้อบความชื้นสำหรับวัตถุทดสอบที่ยื่นตัวลง (ที่อุณหภูมิห้อง)

ฐานของวัตถุทดสอบควรติดตั้ง โดยให้ตัววัตถุทดสอบยื่นกว่าอากาศที่อยู่รอบ ๆ เพื่อให้ แน่ใจว่าระบบฉนวนมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดที่ทำให้เกิดไอน้ำของอากาศ รูปที่ 4.4 แสดงบล็อก ไดอะแกรมการสร้างตู้อบความชื้น ภาชนะที่ใส่วัตถุทดสอบอยู่ในลิ้นชักของตู้อบความชื้นซึ่งแสดง อยู่ในรูปที่ 4.5 โดยถูกทำให้เย็นโดยตัวทำความเย็น (น้ำ) ตัวทำความเย็นเป็นตัวควบคุมอุณหภูมิให้ คงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งซึ่งได้กำหนดไว้โดยให้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของวัตถุทดสอบกับ อุณหภูมิของอากาศที่อยู่ภายในตู้อบ ทำให้มีไอน้ำเกาะที่วัตถุทดสอบ ความแตกต่างนี้ไม่ขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิห้องที่เปลี่ยนแปลง เมื่อถาดรองรับน้ำและตัวทำความเย็นเป็นตัวควบคุมอุณหภูมิและมี ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของวัตถุทดสอบกับอุณหภูมิของอากาศที่อยู่ภายในตู้อบนี้ถูกจำกัด ด้วยปริมาตรของตู้อบความชื้น

การควบคุมอุณหภูมิต้องระวังเหตุการณ์การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิห้องจนถึงระดับเดียวกันกับอุณหภูมิน้ำ ซึ่งความร้อนที่สูญเสียให้แก่ภาชนะที่ให้ความเย็นแก้วทดสอบสามารถทดแทนได้ โดยการให้ความร้อนแก่น้ำ ซึ่งก็จะทำให้เกิดความสมดุลของอุณหภูมิทั่วทั้งตู้อบความชื้นตามที่กำหนด ถ้าอุณหภูมิห้องลดลงจนต่ำกว่าภาชนะที่ให้ความเย็นแก้วทดสอบสามารถควบคุมอุณหภูมิได้โดยการให้ความร้อนแก่น้ำโดยเครื่องทำความร้อน เพื่อให้มีความชัดเจนยิ่งขึ้นในการมีไอน้ำเกิดขึ้น ซึ่งก็คือการทำงานร่วมกันของการให้ความร้อนและความเย็นแก่ระบบเพื่อให้เกิดความสมดุล ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งต่อการควบคุมอุณหภูมิของตู้อบความชื้นภายในตู้อบ ซึ่งค่าของอุณหภูมิ ณ ส่วนต่าง ๆ ของตู้อบความชื้นแสดงได้ดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.4 บล็อกไดอะแกรมของตู้อบความชื้นสำหรับวัตถุทดสอบที่เย็นตัวลง



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างตู้อบความชื้นสำหรับวัตถุทดสอบที่เย็นตัวลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิ ณ ส่วนต่าง ๆ ของตู้อบความชื้น

ตำแหน่งของตู้อบความชื้น	อุณหภูมิ (° C)
อุณหภูมิในน้ำ	30
อุณหภูมิชิ้นงานทดสอบ	24
อุณหภูมิภายในตู้อบความชื้น (25 มม. เนื้อเยื่อแบบจำลองร่องสลีต)	25
จุดกึ่งกลางภายใต้ฝาปิดตู้อบความชื้น	28-29

4.5.3 การทดสอบทางแรงดันไฟฟ้า

ในการตรวจสอบสภาพชิ้นงานที่ทำการทดสอบ และตัดสินใจการมาถึงของจุดสิ้นสุดอายุของระบบฉนวนที่ทำการทดสอบ จะทำโดยการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่กำลังภายหลังได้รับการทดสอบทางความชื้นแล้ว ซึ่งระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบขึ้นอยู่กับชนิดของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบนั้น ใช้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้าพิกัดใช้งานเท่าใด ซึ่งสามารถแสดงค่าระดับแรงดันไฟฟ้าแนะนำที่ใช้ในการทดสอบได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้ในการทดสอบ

พิกัดแรงดันไฟฟ้าใช้งาน (V)	แรงดันไฟฟ้าตามความถี่กำลังแนะนำสำหรับใช้ทดสอบ (V)		
	การทดสอบระหว่าง ขดลวดกับเฟรม	การทดสอบระหว่าง ขดลวดกับขดลวด	การทดสอบระหว่างรอบ ต่อรอบของขดลวด
110-400	400	400	110 ± 10
401-660	660	660	110 ± 10
661-1000	ภายใต้การตัดสินใจ	ภายใต้การตัดสินใจ	ภายใต้การตัดสินใจ

การทดสอบทางแรงดันไฟฟ้านั้นการทดสอบระหว่างเฟรม และการทดสอบระหว่างขดลวดกับขดลวดนั้นจะใช้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขอบเขตการใช้งานจริงของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบ ส่วนการทดสอบด้วยระดับแรงดันไฟฟ้าอื่นนั้นขึ้นอยู่กับประสบการณ์ในการทดสอบ และควรมีรายงานในผลการทดสอบ

การป้อนแรงดันไฟฟ้านั้นควรป้อนเป็นเวลานาน 10 นาทีสำหรับแต่ละชิ้นงานซึ่งควรเริ่มต้นการทดสอบในระหว่างรอบต่อรอบของขดลวดหลังจากนั้นทำการทดสอบระหว่าง ขดลวดกับขดลวด และสุดท้ายทำการทดสอบระหว่างขดลวดกับเฟรม ซึ่งควรมีอุปกรณ์ป้องกันเชิงป้องกันวงจรทดสอบด้วย

สำหรับการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยอื่น ๆ และวิเคราะห์ข้อมูลที่ทำให้การทดสอบนั้นสามารถ
ดูได้ในบทที่ 3 และการวิเคราะห์ผลการทดสอบจะกล่าวถึงในบทที่ 5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

5.1 บทนำ

ในบทนี้จะนำเสนอ ขั้นตอนการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวน โดยการ ใช้แบบจำลองร่องสลีตตามมาตรฐาน IEC 34-18-21 ผลการทดสอบจากการทดสอบ 3 รอบย่อยการทดสอบทั้ง 2 รอบการทดสอบ การวิเคราะห์ผลการทดสอบเพื่อทำการยืนยันระดับชั้นทางความร้อนระบบฉนวนที่นำมาทดสอบ และการทำนายอายุระบบฉนวนที่นำมาทดสอบด้วย

5.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

5.2.1 แบบจำลองร่องสลีต

ในการทำโครงสร้างแบบจำลองร่องสลีตเพื่อใช้ในการทดสอบนั้น จะใช้สแตนเลสแผ่นขนาดความหนา 1.5 มม. เพื่อใช้ในการทำส่วนประกอบต่าง ๆ ของแบบจำลองร่องสลีตตามมาตรฐาน IEC 34-18-21 ซึ่งส่วนประกอบต่าง ๆ ประกอบด้วยฐานร่องสลีต สลีสตัด้านใน สลีสตัด้านนอก และ บล็อกซีพพอร์ต แสดง ได้ดังรูปที่ 5.1

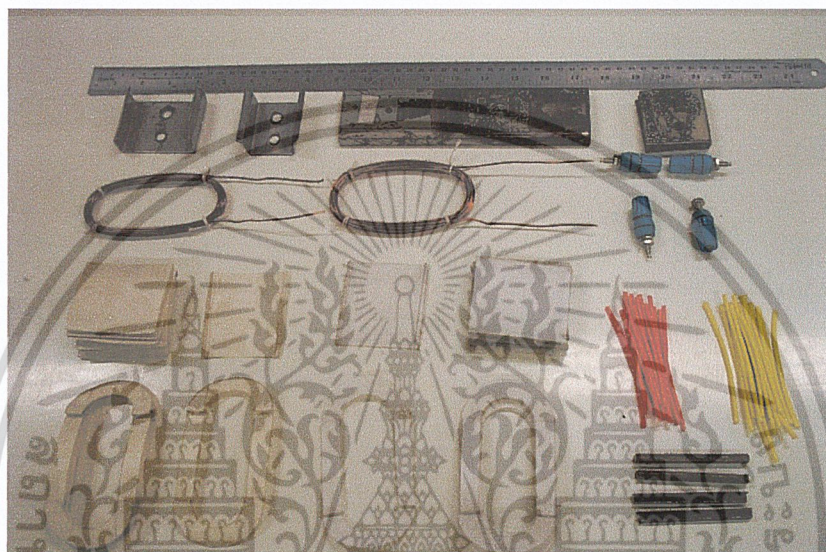


รูปที่ 5.1 ส่วนประกอบของแบบจำลองร่องสลีต

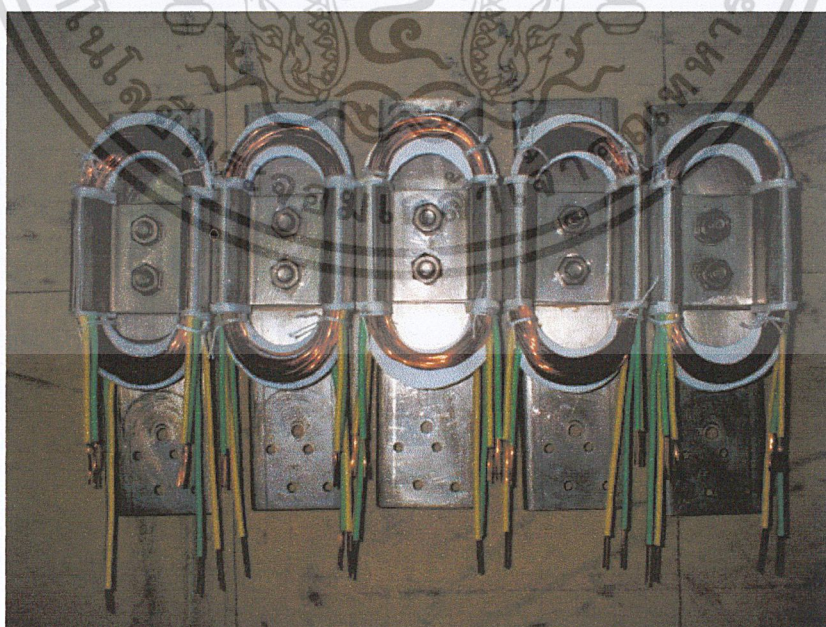
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 ระบบฉนวน

ระบบฉนวนส่วนต่างๆ ที่นำมาทดสอบนั้นประกอบด้วย ลวดทองแดงอาบน้ำยา เบอร์ SWG 18 กระจายฉนวน โนเม็กซ์ (Nomex) ความหนา 0.3 มม. ท่อร้อยสายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม. ด้ายสำหรับพันลวด วาร์นิชเบอร์ F-1600 ซึ่งส่วนประกอบต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 5.2 และเมื่อทำการประกอบเป็นแบบจำลองร่องสลีตที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว จะแสดงได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.2 ระบบฉนวนส่วนต่างๆ ที่นำมาทดสอบ

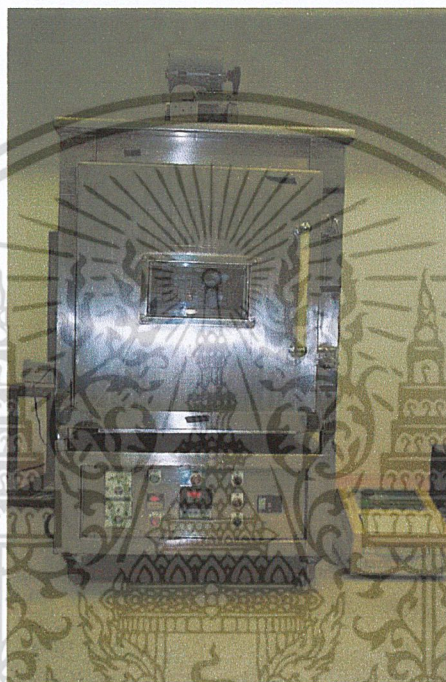


รูปที่ 5.3 แบบจำลองร่องสลีตที่ใช้ในการทดสอบ

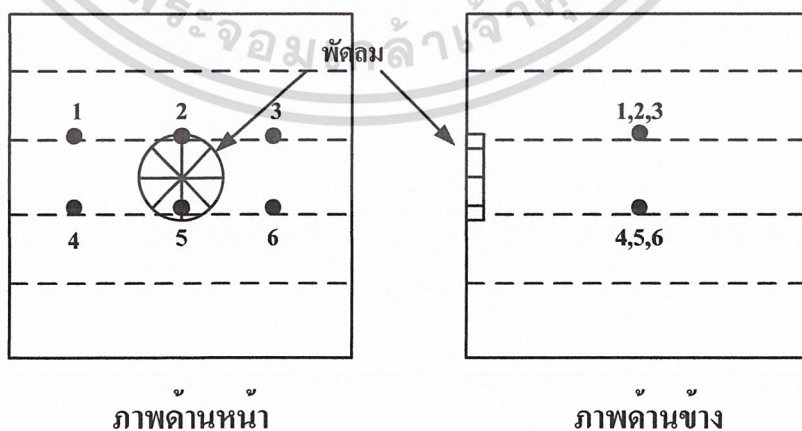
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกวีเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3 ตู้อบความร้อน

ในวิทยานิพนธ์นี้การให้ความร้อนแก่วัตถุทดสอบจะกระทำโดยตู้อบความร้อน ซึ่งอาศัยหลักการให้ความร้อนและมีพัดลมในการทำให้อากาศภายในเกิดการหมุนเวียนเพื่อให้อุณหภูมิภายในตู้อบความร้อนในแต่ละตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงมากที่สุด ซึ่งรูปที่ 5.4 แสดงตู้อบความร้อนที่ใช้ในการทดสอบ และรูปที่ 5.5 แสดงตำแหน่งต่าง ๆ ที่ทำการวัดค่าอุณหภูมิต่าง ๆ ภายในตู้อบความร้อน และตารางที่ 5.1 แสดงค่าอุณหภูมิที่ทำการวัด ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในตู้อบ



รูปที่ 5.4 ตู้อบความร้อนที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 5.5 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายในตู้อบความร้อน

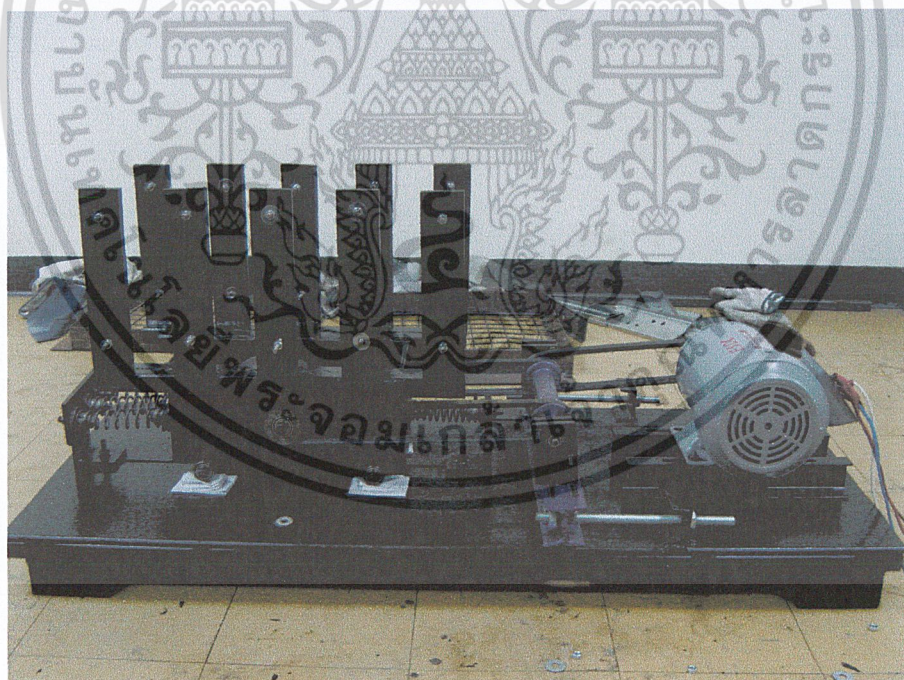
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 อุณหภูมิที่ทำการวัด ณ จุดต่าง ๆ ภายในตู้อบความร้อน

ตำแหน่งการวัด	อุณหภูมิที่วัดได้ (° C)
ตู้อบแสดง	225.0
1	225.4
2	225.5
3	224.4
4	225.6
5	224.5
6	224.6

5.2.4 โตะสั่น

โตะสั่นที่ใช้ในการทดลอง แสดงได้ดังรูปที่ 5.6 ซึ่งสามารถทำให้เกิดการสั่นสะเทือนขนาด 0.3 มม. ที่ความถี่ 50 Hz โดยอาศัยการขับเคลื่อนของมอเตอร์ผ่านทางลูกเบี้ยว ซึ่งลูกเบี้ยวจะส่งกำลังผ่านสายพาน ไปยังเพลาและจะขับเคลื่อนสปริงให้เกิดการสั่นอีกต่อหนึ่ง

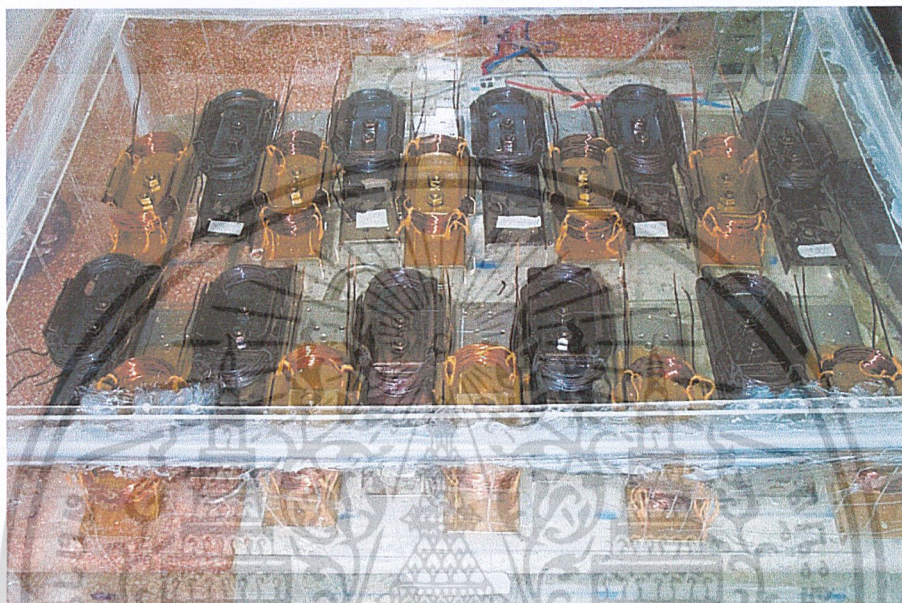


รูปที่ 5.6 โตะสั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.5 ตู้อบความชื้น

การทำงานของตู้อบความชื้นที่ใช้ในการทดลองนั้นแสดงดังรูปที่ 5.7 ซึ่งจะให้ขดลวดความร้อนให้ความร้อนแก่น้ำ ทำให้เกิดไอน้ำและความชื้นภายในตู้อบความชื้น และมีตัวควบคุมอุณหภูมิเพื่อทำการรักษาอุณหภูมิน้ำให้อยู่ที่ 30°C ซึ่งอุณหภูมิ ณ จุดต่าง ๆ ภายในตู้อบความชื้นแสดงได้ดังตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.7 ตู้อบความชื้น

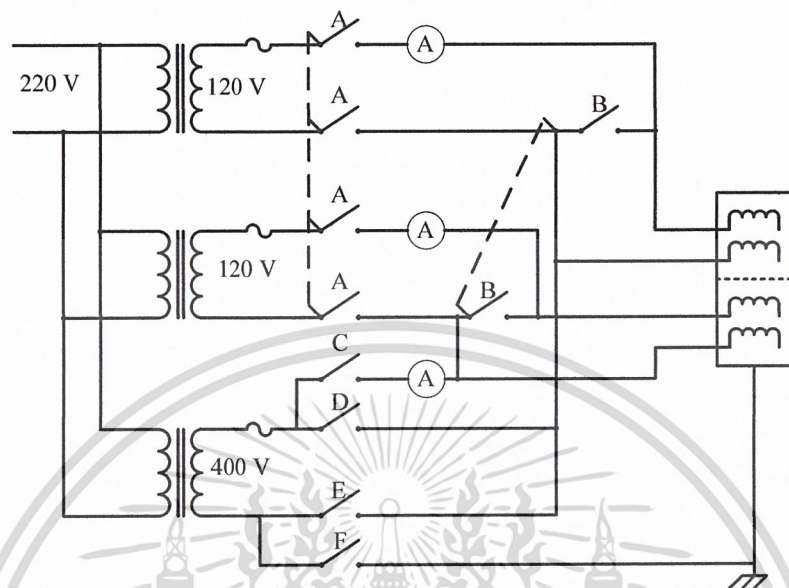
ตารางที่ 5.2 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ที่ทำการวัดภายในตู้อบความชื้น

ตำแหน่งของตู้อบไอน้ำ	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)
อุณหภูมิน้ำ	30.8
อุณหภูมิชิ้นงานทดสอบ	24.5
อุณหภูมิภายในตู้อบความชื้น (จุดกึ่งกลางภายใต้ฝาปิดตู้อบไอน้ำ)	29.6

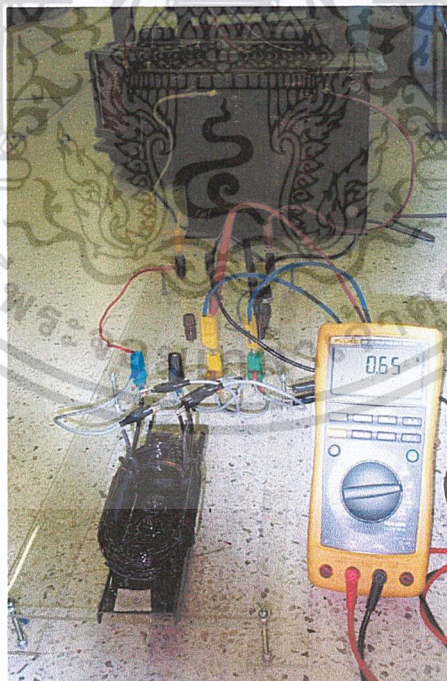
5.2.6 อุปกรณ์การทดสอบแรงดันไฟฟ้า

ในการทดสอบแรงดันไฟฟ้าจะทำการทดสอบ ระหว่างรอบต่อรอบของขดลวดซึ่งจะใช้ขนาดแรงดันไฟฟ้า 110 V ส่วนการทดสอบระหว่างขดลวดกับขดลวด และการทดสอบระหว่าง

ขดลวดกับเฟรมนั้นจะใช้ขนาดแรงดันไฟฟ้า 400 V ซึ่งมีวงจรที่ใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 5.8 และแสดงการทดสอบทางแรงดันไฟฟ้าจริงดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.8 วงจรการทดสอบทางแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 5.9 การทดสอบทางแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

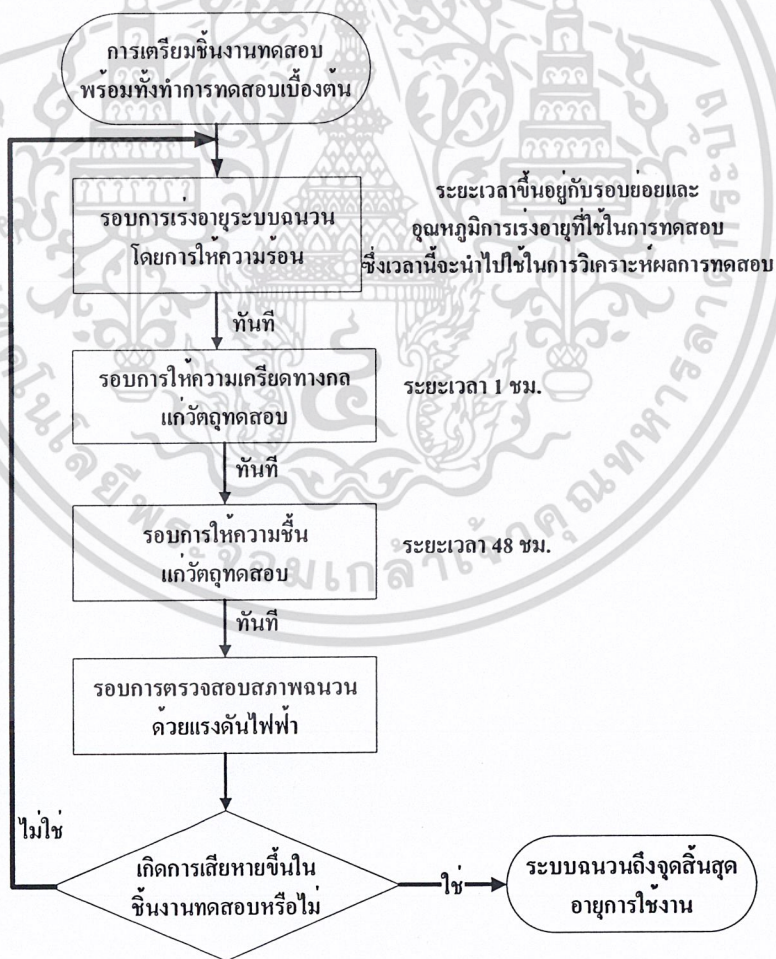
5.3 ขั้นตอนการทดสอบ

ขั้นตอนการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวนโดยการให้แบบจำลองร่องสล็อต นั้นจะเริ่มทำการทดสอบโดยการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยเบื้องต้น หลังจากนั้นจะทำการทดสอบรอบย่อยการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อน เสร็จแล้วทำการทดสอบการให้ความเค้นทางกล การให้ความชื้นและทำการวินิจฉัยจุดสิ้นสุดอายุฉนวนโดยการทดสอบทางแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะทำการทดสอบทั้งหมด 10 รอบย่อยการทดสอบ และทำการทดสอบทั้งสิ้น 3 รอบการทดสอบ ที่ 3 อุณหภูมิ คือ

- 1) รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน ที่อุณหภูมิการทดสอบ 225 °C
- 2) รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน ที่อุณหภูมิการทดสอบ 215 °C
- 3) รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน ที่อุณหภูมิการทดสอบ 205 °C

โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีการทดสอบซ้ำขั้นตอนการทดสอบข้างต้นอีกทั้ง 3 รอบการทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดสอบ ซึ่งขั้นตอนการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนแสดงได้ดังรูปที่

5.10



รูปที่ 5.10 ขั้นตอนการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบจะนำเสนอการทดสอบทั้งสิ้น 2 รอบการทดสอบ ซึ่งจะมีการทดสอบในการทดสอบแรก และการทดสอบครั้งที่ 2 ซึ่งใน 2 รอบการทดสอบนี้ จะทำการทดสอบทั้งสิ้น 3 รอบย่อยการทดสอบ ซึ่งมีผลการทดสอบเป็นดังนี้

5.4.1 การทดสอบครั้งที่ 1

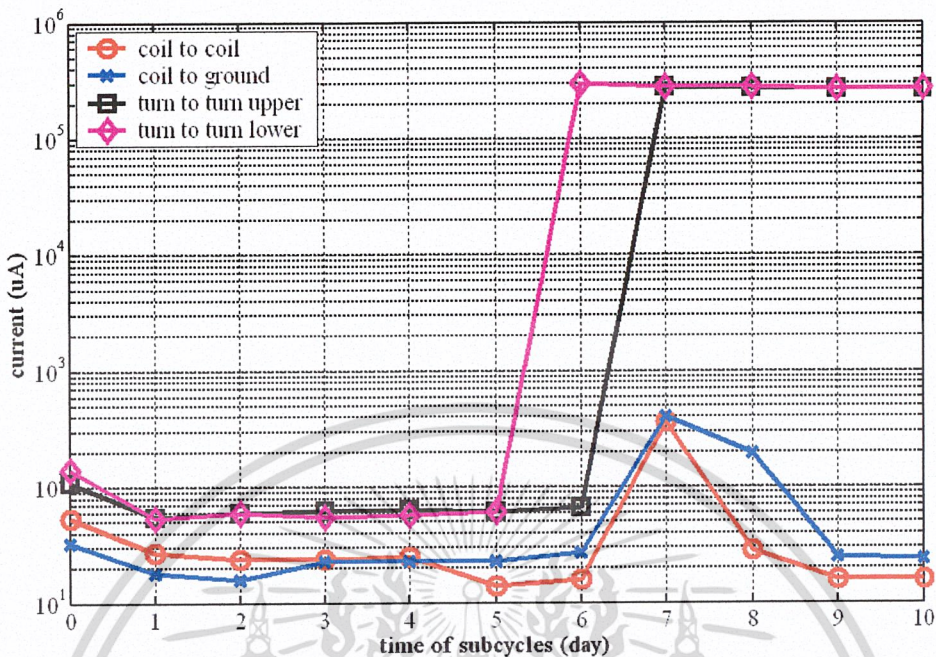
ในการทดสอบครั้งที่ 1 นั้นจะทำการทดสอบกับแบบจำลองร่องสลีตทั้งสิ้น 10 ชิ้น และมีรูปแบบของระบบฉนวนดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 แบบจำลองร่องสลีตที่ใช้ในการทดสอบครั้งที่ 1

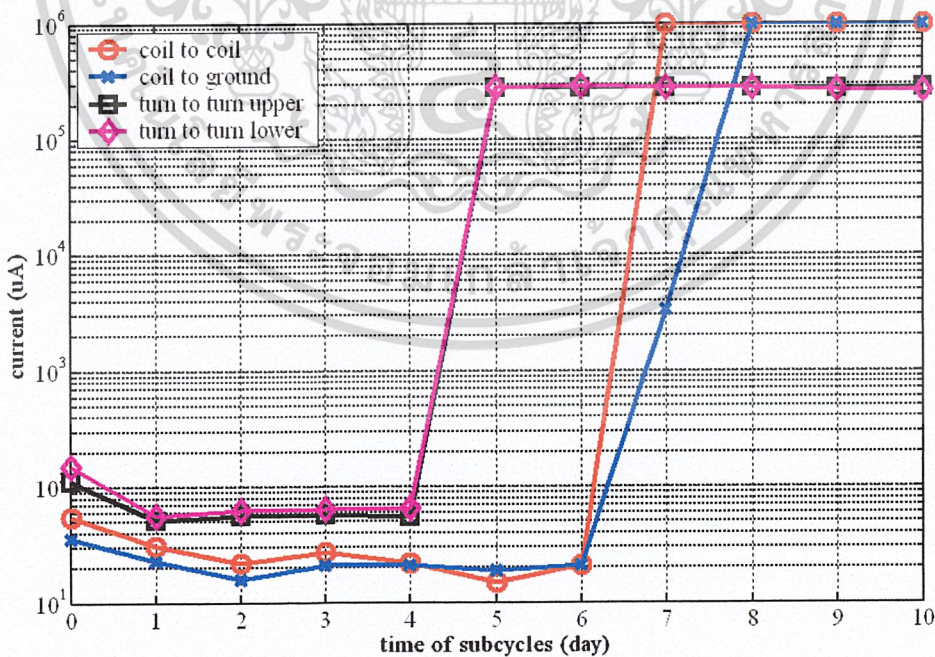
แบบจำลอง ร่องสลีต	ขดลวด อาบนํ้ายา	ฉนวน ระหว่างเฟส
m1	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 1
m2	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 1
m3	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2
m4	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2
m5	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 1
m6	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 1
m7	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 1
m8	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 2
m9	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 2
m10	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 2

5.4.1.1 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน ที่อุณหภูมิการทดสอบ 225 °C

ผลการทดสอบจะแสดงถึงค่าการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ 1 วัน ซึ่งตัวอย่างผลการทดสอบทางแรงดันไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีตต่าง ๆ ในรอบย่อยการทดสอบ 1 วัน ที่อุณหภูมิการทดสอบ 225 °C สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.11 ถึง 5.15

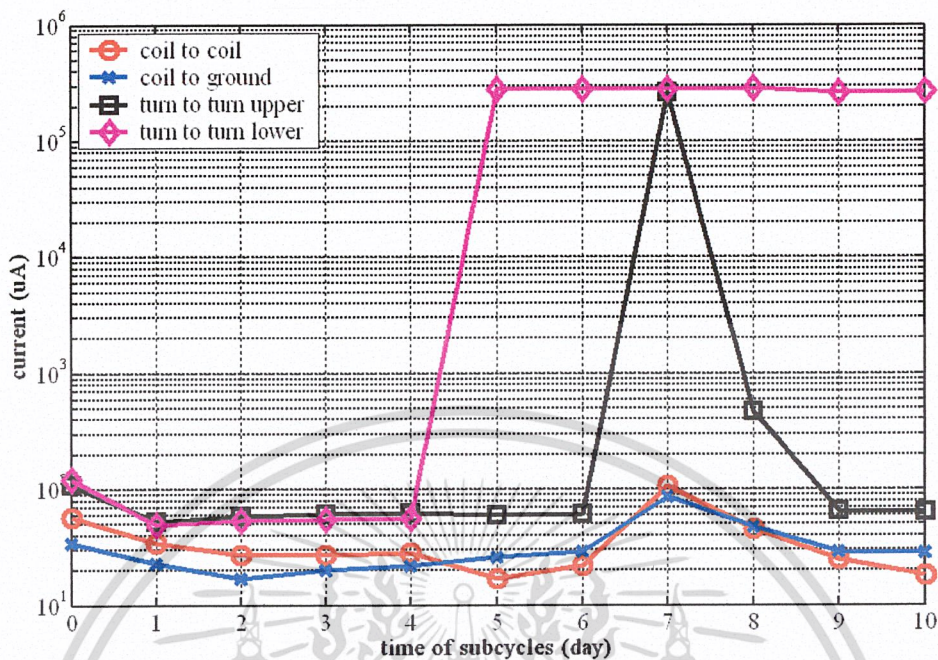


รูปที่ 5.11 ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ 1 วัน ของแบบจำลองร่องสลีตที่ 1

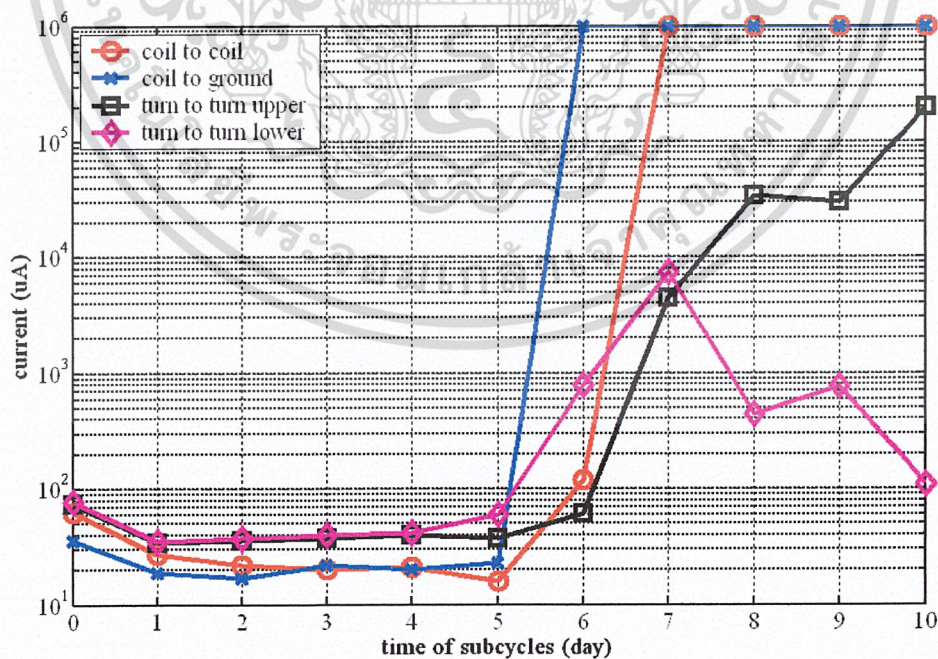


รูปที่ 5.12 ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ 1 วัน ของแบบจำลองร่องสลีตที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



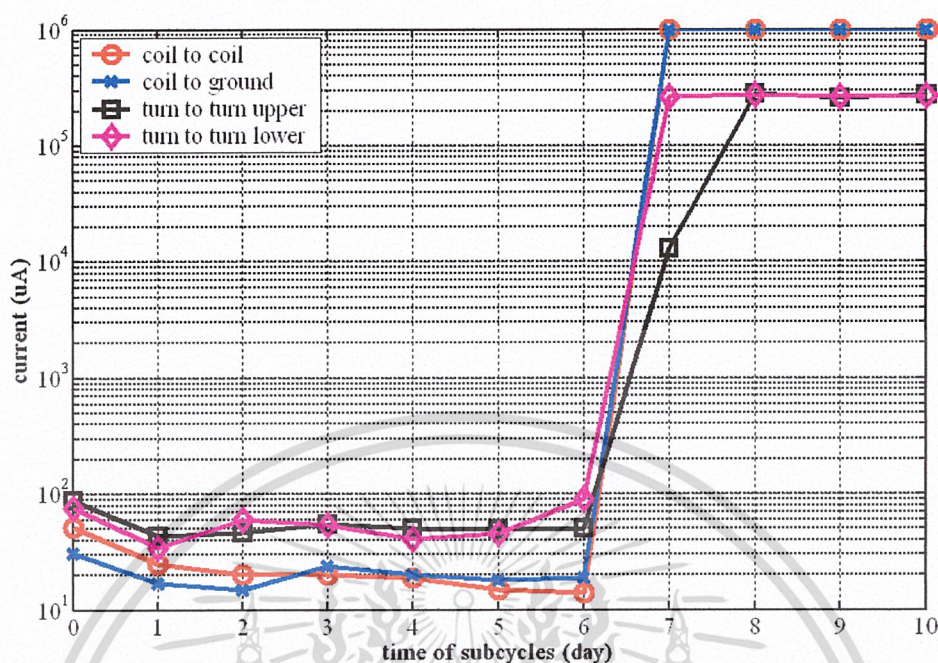
รูปที่ 5.13 ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ 1 วัน ของแบบจำลองร่องสลอตที่ 5



รูปที่ 5.14 ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ 1 วัน ของแบบจำลองร่องสลอตที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

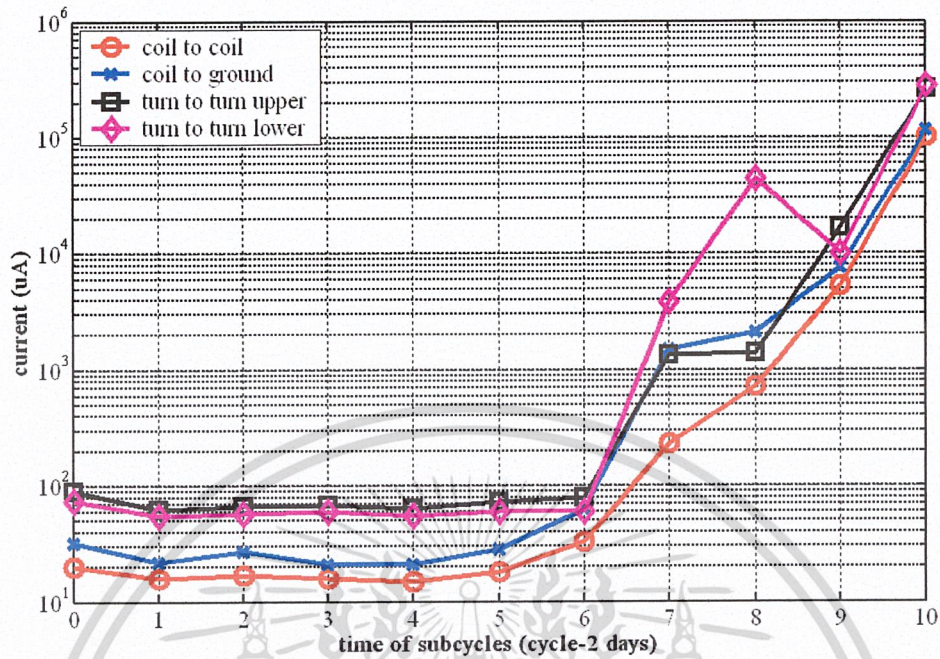


รูปที่ 5.15 ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ 1 วัน ของแบบจำลองร่องสลีตที่ 10

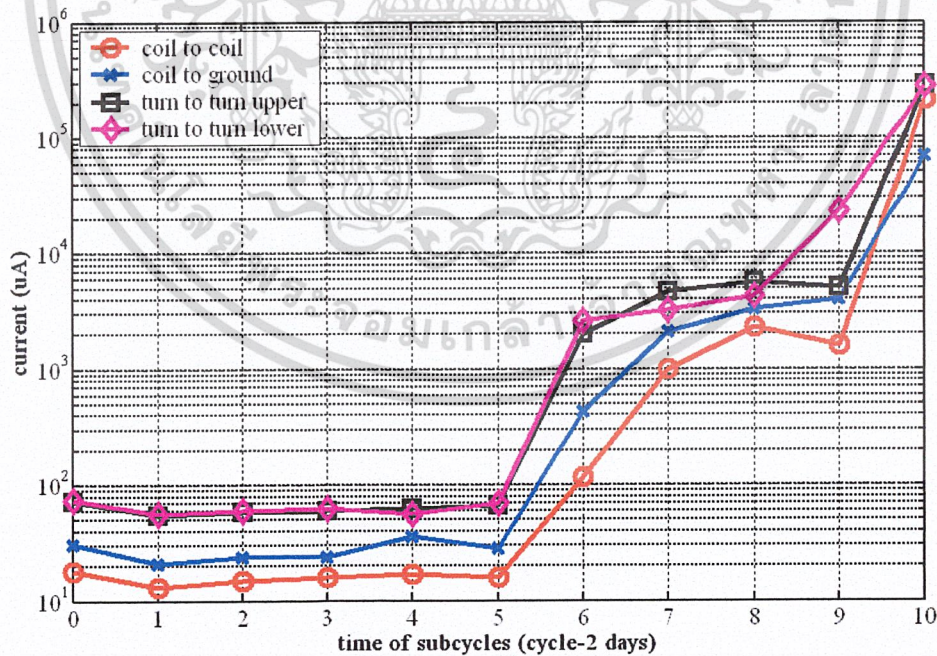
จากผลการทดสอบในรูปที่ 5.11 ถึง รูปที่ 5.15 นั้นจะเห็นได้ว่าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบมีค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในลักษณะที่แตกต่างกันหลายรูปแบบของแบบจำลองร่องสลีต เช่นในรูปที่ 5.11 และ 5.13 นั้นจะเห็นได้ว่า การทดสอบระหว่างขดลวดกับขดลวด และการทดสอบระหว่างขดลวดกับกราวด์ไม่มีค่าการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าอย่างมากในทันทีทันใด แต่ในรูปที่ 5.12 และ 5.15 นั้น จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าอย่างมากในทันทีทันใดทั้ง 4 การทดสอบ ส่วนในรูปที่ 5.14 นั้นจะเห็นได้ว่ามีค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในรูปแบบการเพิ่มขึ้นเป็นขั้น ๆ ของการทดสอบแบบรอบต่อรอบของขดลวดบน เป็นต้น

5.4.1.2 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน ที่อุณหภูมิการทดสอบ 215 °C

ผลการทดสอบจะแสดงถึงค่าการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ 2 วัน ซึ่งตัวอย่างผลการทดสอบทางแรงดันไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีตต่าง ๆ ในรอบย่อยการทดสอบ 2 วัน ที่อุณหภูมิการทดสอบ 215 °C สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.16 ถึง 5.20

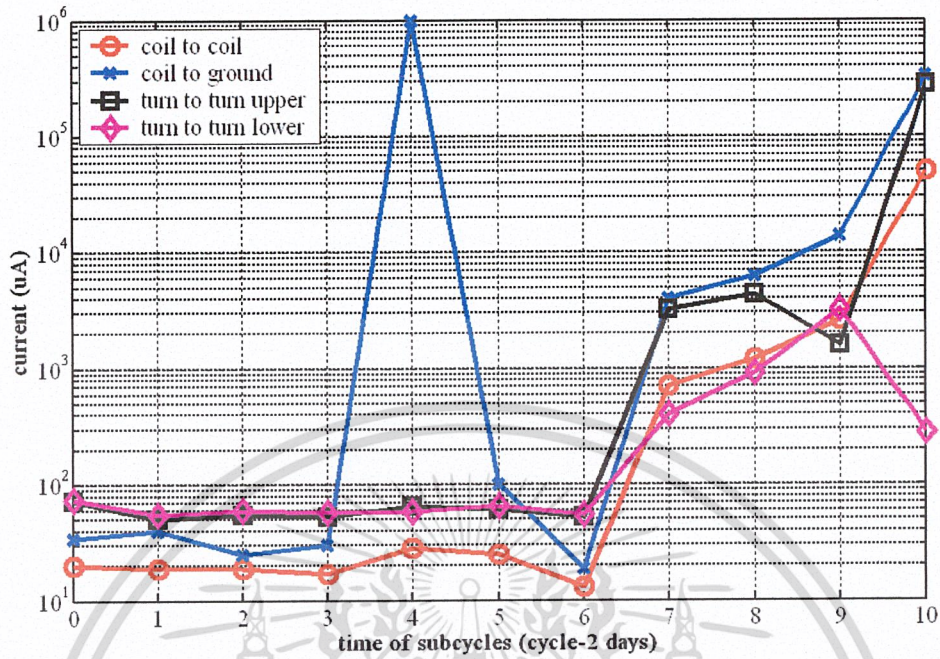


รูปที่ 5.16 ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ 2 วัน ของแบบจำลองร่องสลีตที่ 1

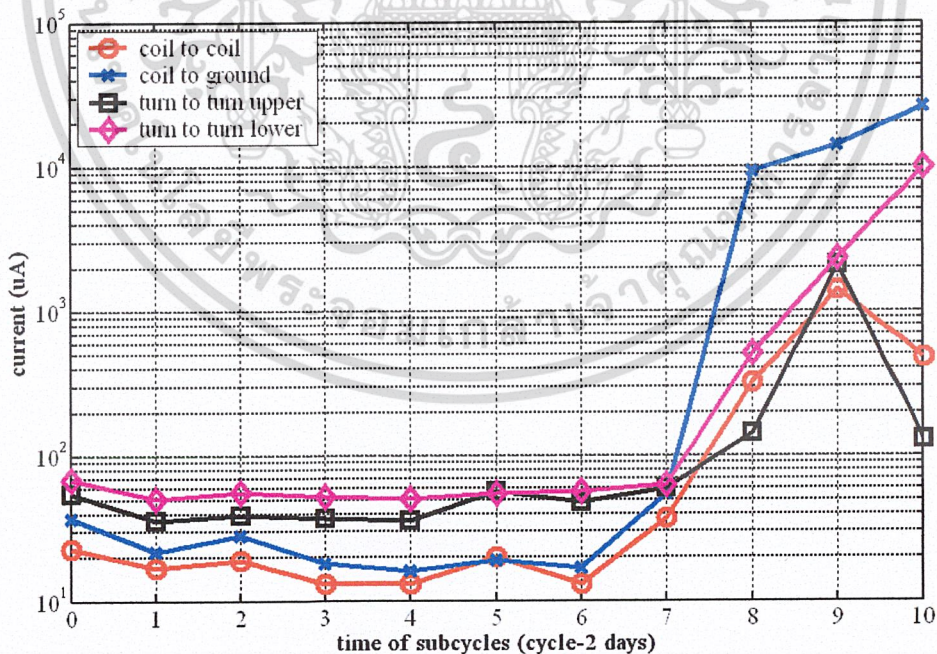


รูปที่ 5.17 ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ 2 วัน ของแบบจำลองร่องสลีตที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

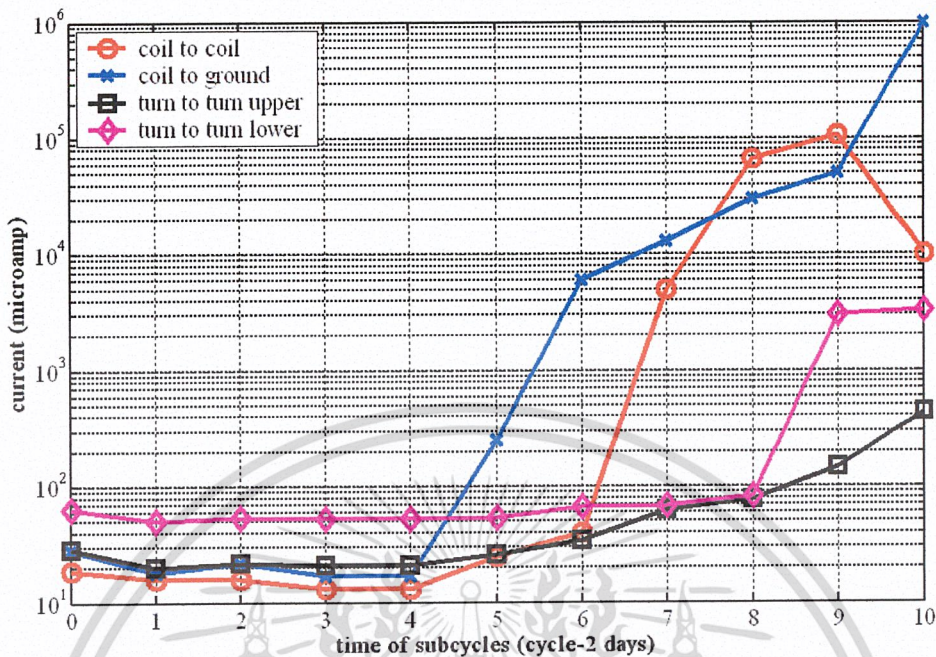


รูปที่ 5.18 ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ 2 วัน ของแบบจำลองร่องสลิตที่ 4



รูปที่ 5.19 ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ 2 วัน ของแบบจำลองร่องสลิตที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

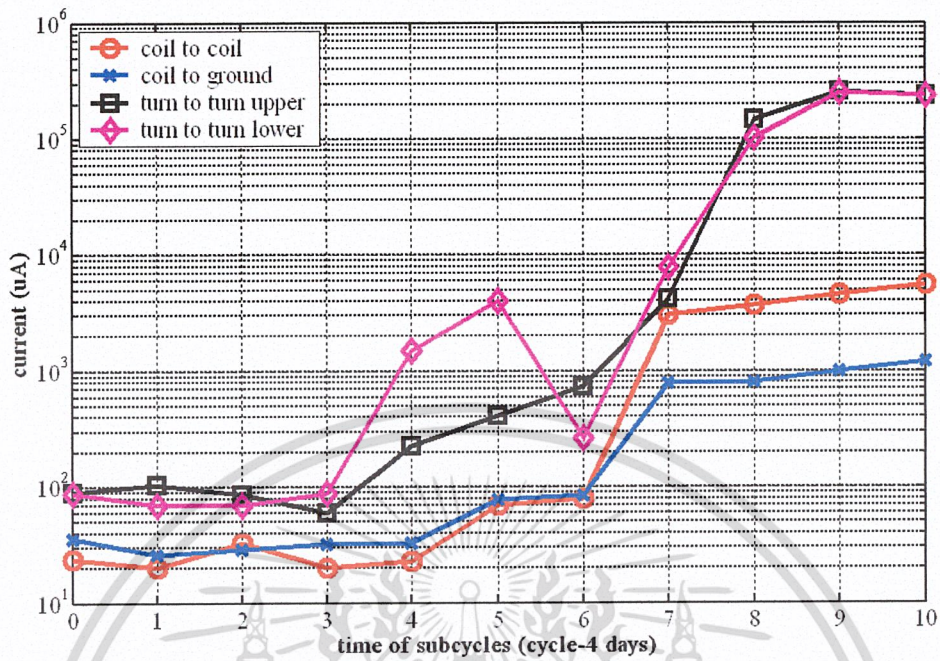


รูปที่ 5.20 ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ 2 วัน ของแบบจำลองร่องสลีตที่ 10

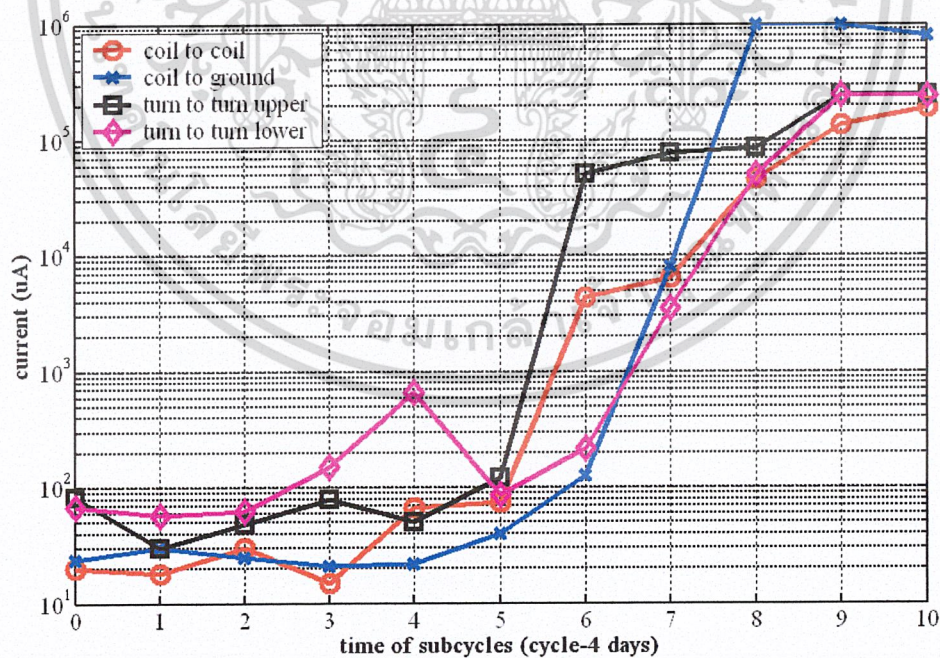
จากผลการทดสอบในรูปที่ 5.16 ถึง รูปที่ 5.20 นั้นจะเห็นได้ว่าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบมีค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในลักษณะที่แตกต่างกันหลายรูปแบบของแต่ละแบบจำลองร่องสลีตเช่นเดียวกับการทดสอบในรอบย่อยการทดสอบ 1 วัน เช่นในรูปที่ 5.16 และ 5.17 นั้นจะเห็นได้ว่า มีค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในรูปแบบการเพิ่มขึ้นเป็นขั้น ๆ ของการทดสอบทั้ง 4 การทดสอบ ส่วนในรูปที่ 5.18 นั้นจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าในทันทีทันใดของการทดสอบระหว่างขดลวดกับกราวด์ทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงในรอบย่อยการทดสอบที่ 3-5 ส่วนในรูปที่ 5.19 และรูปที่ 5.20 มีการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในทันทีทันใดในลักษณะเพิ่มขึ้น เป็นต้น

5.4.1.3 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน ที่อุณหภูมิการทดสอบ 205 ° C

ผลการทดสอบจะแสดงถึงค่าการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ 4 วัน ซึ่งตัวอย่างผลการทดสอบทางแรงดันไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีตต่าง ๆ ในรอบย่อยการทดสอบ 4 วัน ที่อุณหภูมิการทดสอบ 205 ° C สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.21 ถึง 5.25

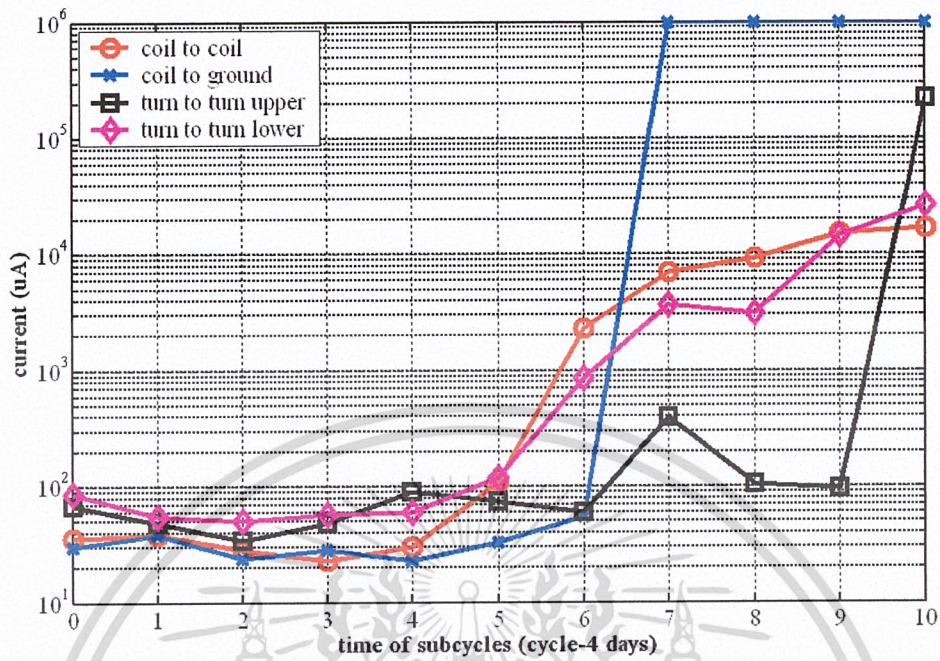


รูปที่ 5.21 ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ 4 วัน ของแบบจำลองร่องสลิตที่ 2

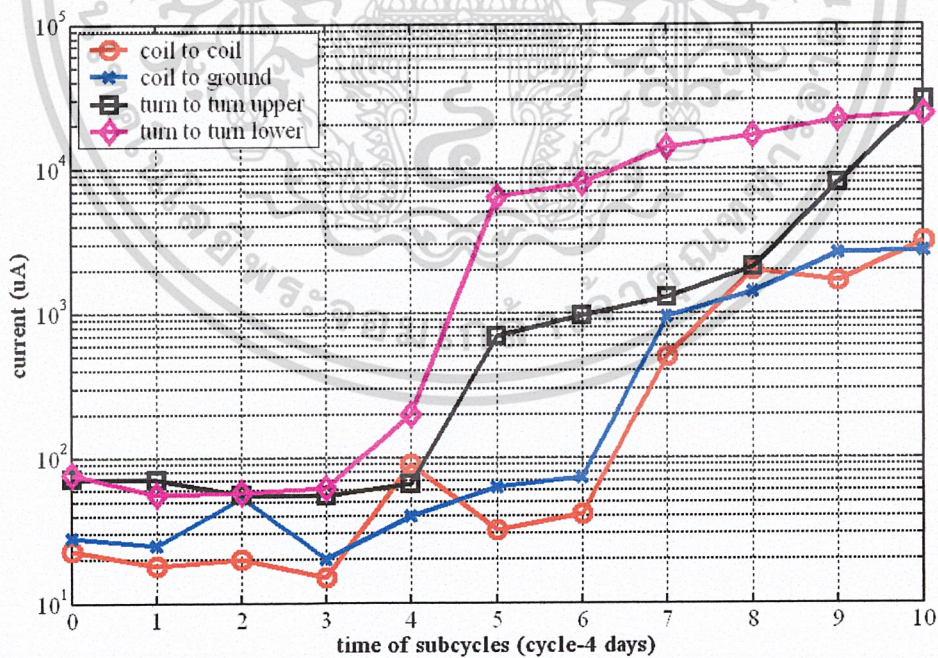


รูปที่ 5.22 ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ 4 วัน ของแบบจำลองร่องสลิตที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

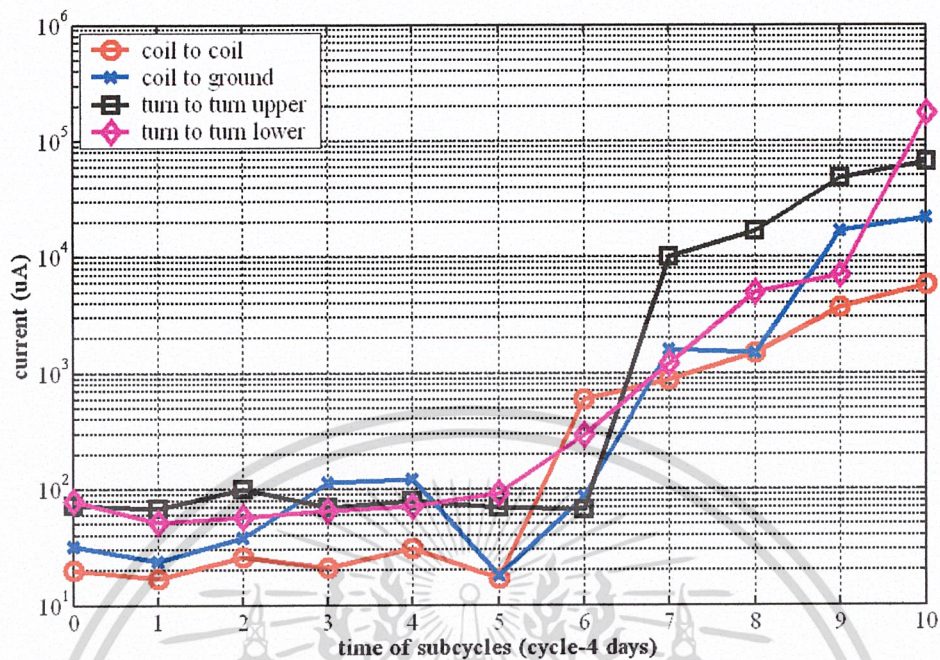


รูปที่ 5.23 ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ 4 วัน ของแบบจำลองร่องสลีตที่ 5



รูปที่ 5.24 ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ 4 วัน ของแบบจำลองร่องสลีตที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



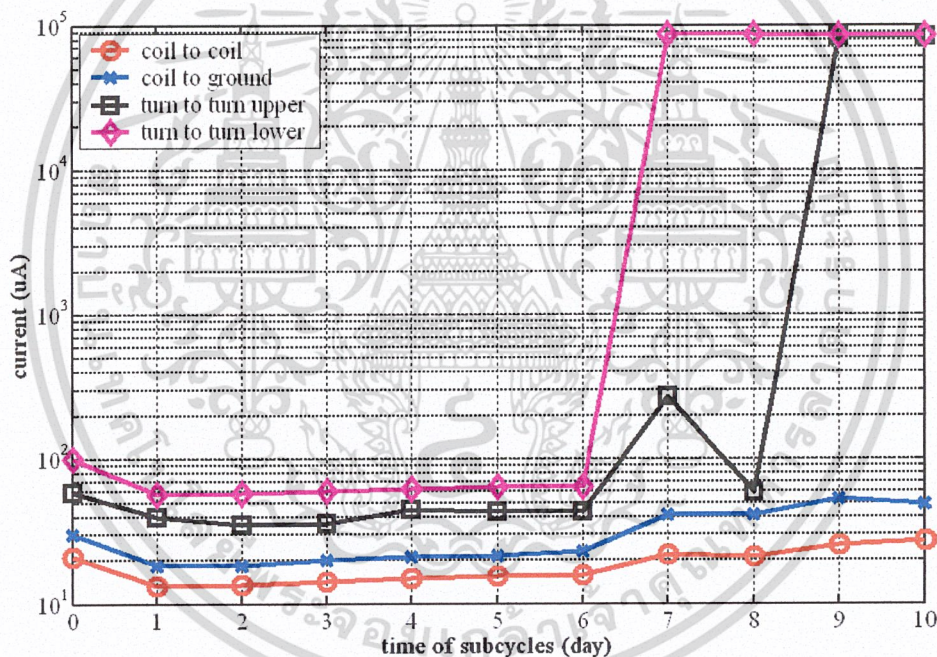
รูปที่ 5.25 ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ 4 วัน ของแบบจำลองร่องสลีตที่ 8

จากผลการทดสอบในรูปที่ 5.21 ถึง รูปที่ 5.25 นั้นจะเห็นได้ว่าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ 4 วัน มีค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในลักษณะที่แตกต่างกันหลายรูปแบบของแต่ละแบบจำลองร่องสลีต เช่นเดียวกับการทดสอบในรอบย่อยการทดสอบ 1 วันและ 2 วัน

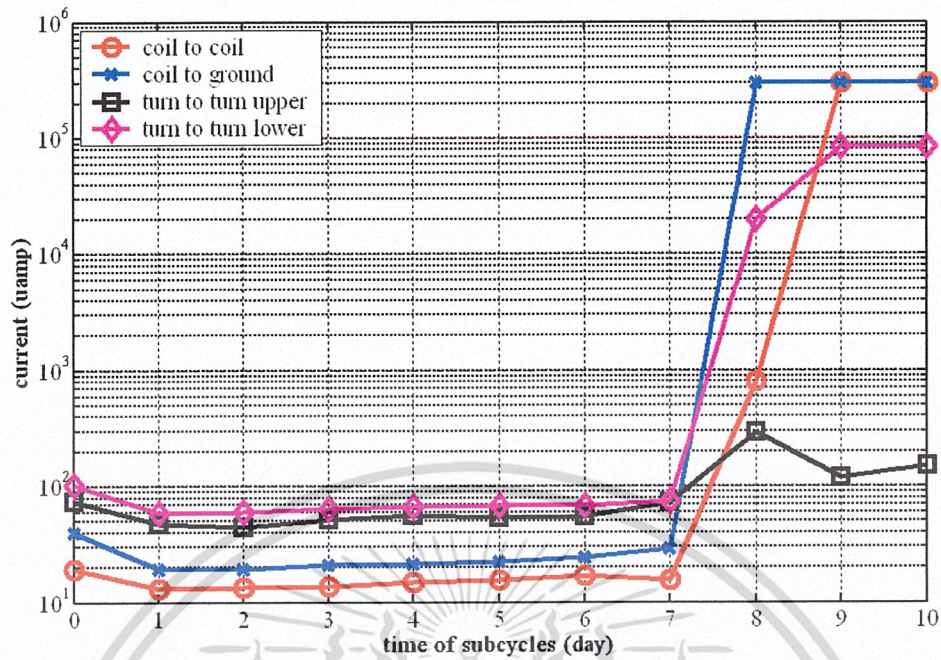
จากรูปที่ 5.11 ถึง 5.25 เป็นการแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบของการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้าระหว่างขดลวดกับขดลวด การทดสอบระหว่างขดลวดกับกราวด์ การทดสอบระหว่างรอบต่อรอบของขดลวดบน และการทดสอบระหว่างรอบต่อรอบของขดลวดล่าง ของรอบย่อยการทดสอบ 1 วัน 2 วัน และ 4 วันตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่ากระแสไฟฟ้าแนวโน้มที่เปลี่ยนแปลงมากขึ้นในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ ซึ่งในแต่ละแบบจำลองร่องสลีตอาจมีค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าไม่เท่ากัน และจะมีค่าเปลี่ยนแปลงมากขึ้นทันทีทันใดในบางการทดสอบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อได้รับรอบย่อยการเร่งอายุทางความร้อนแล้วจะทำให้มีค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้านั้นเอง

5.4.2 การทดสอบครั้งที่ 2

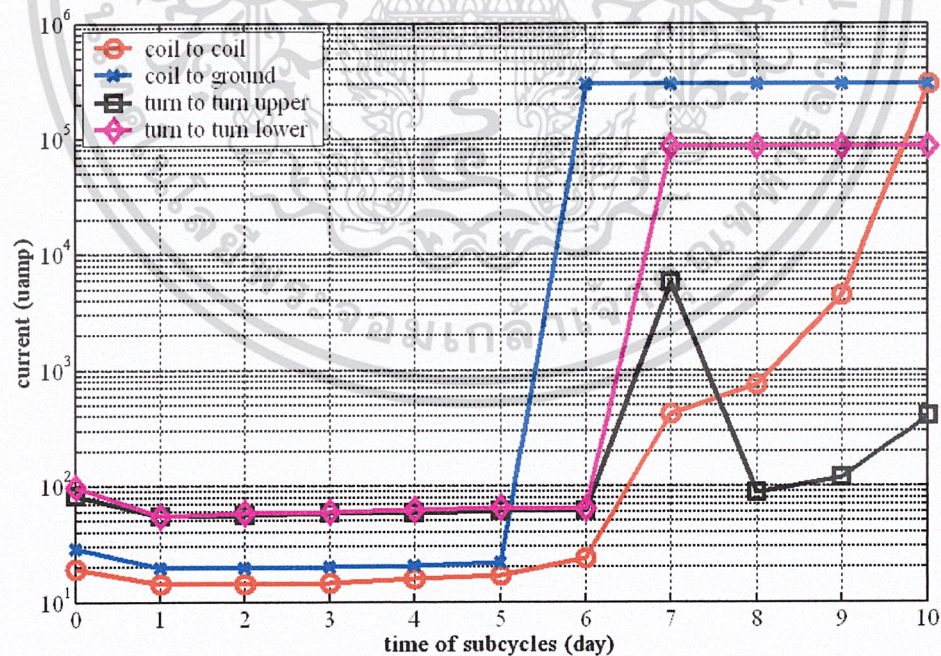
การทดสอบครั้งที่ 2 นั้นเป็นการทดสอบเพื่อดูแนวโน้มผลการทดสอบที่ได้ทำการทดสอบมาแล้วในรอบการทดสอบแรก และเป็นการบ่งบอกถึงความแม่นยำของการทดสอบตามกระบวนการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวน โดยการใช้แบบจำลองร่องสลีตที่ได้ทำการทดสอบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งในการทดสอบครั้งที่ 2 นั้นจะใช้ชุดลดเอนาเมลชนิดที่ 1 และกระดาษฉนวนซึ่งเป็นฉนวนระหว่างเฟสชนิดที่ 2 โดยใช้แบบจำลองร่องสลีตทั้งหมด 20 ชั้นเพื่อความมั่นใจสำหรับผลการทดสอบที่ได้ ซึ่งตัวอย่างผลการทดสอบที่รอบย่อยการทดสอบ 1 วันของแบบจำลองร่องสลีตต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 5.26 ถึง 5.30 และที่รอบย่อยการทดสอบ 2 วันแสดงได้ดังรูปที่ 5.31 ถึง 5.35 และที่รอบย่อยการทดสอบ 4 วันแสดงได้ดังรูปที่ 5.36 ถึง 5.40



รูปที่ 5.26 ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดสอบครั้งที่ 2 ของรอบย่อยการทดสอบ 1 วันของแบบจำลองร่องสลีตที่ 2

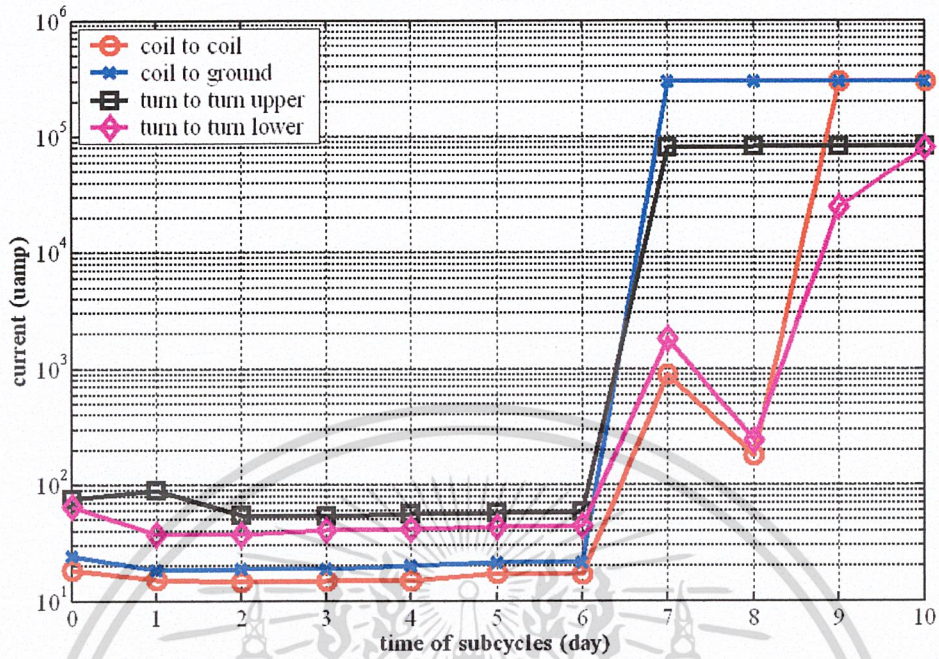


รูปที่ 5.27 ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดสอบครั้งที่ 2 ของรอบย่อยการทดสอบ 1 วันของแบบจำลอง ร่องสลีตที่ 4

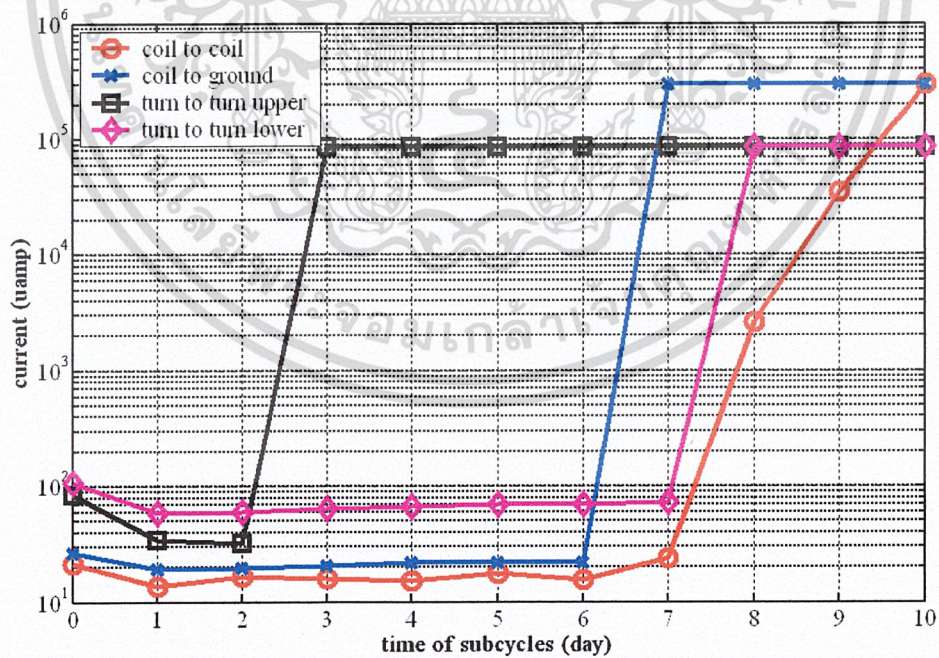


รูปที่ 5.28 ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดสอบครั้งที่ 2 ของรอบย่อยการทดสอบ 1 วันของแบบจำลอง ร่องสลีตที่ 13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



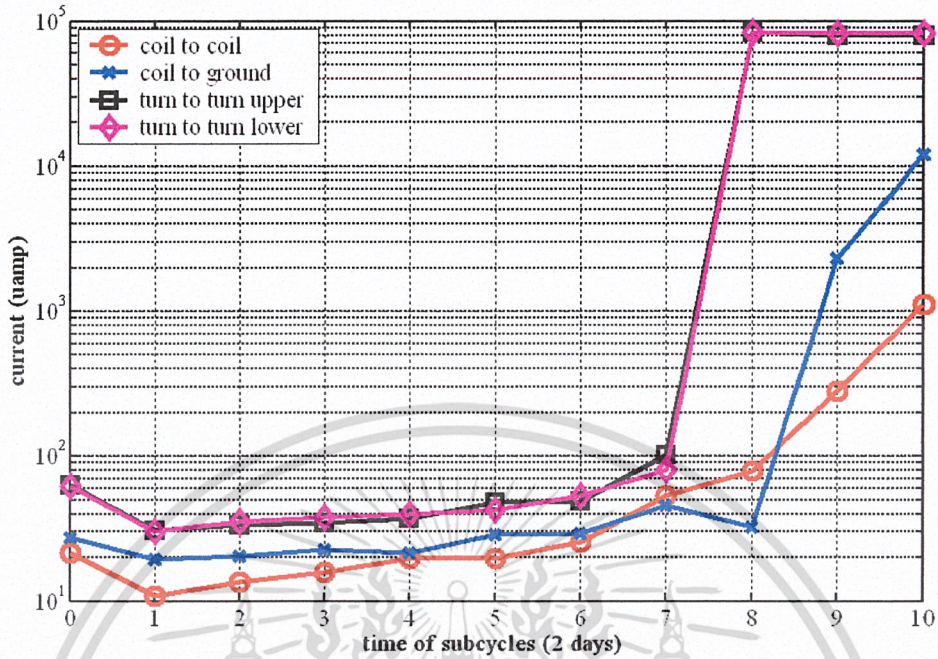
รูปที่ 5.29 ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดสอบครั้งที่ 2 ของรอบย่อยการทดสอบ 1 วันของแบบจำลอง ร่องสลอตที่ 16



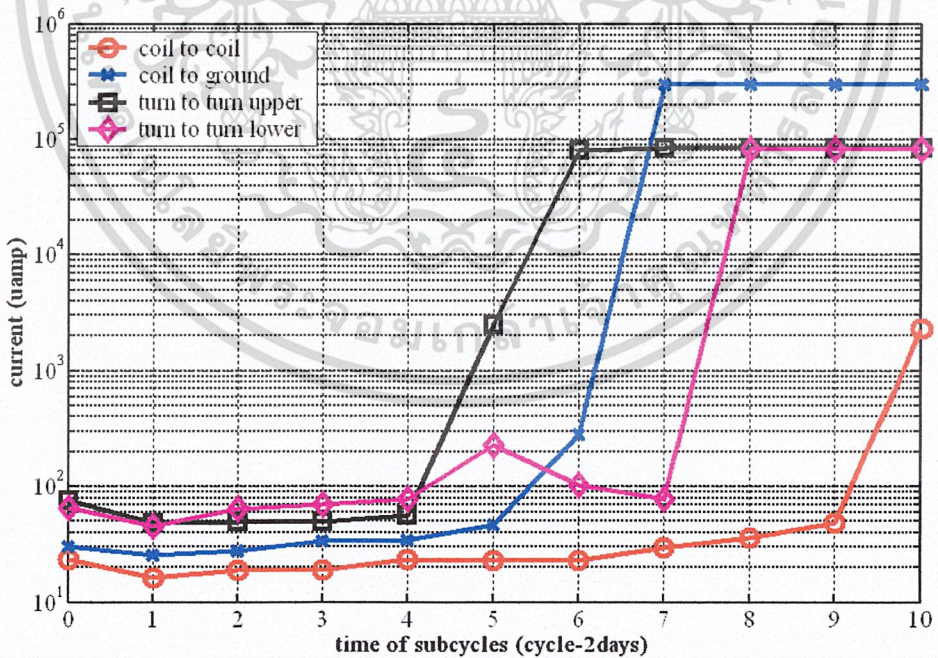
รูปที่ 5.30 ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดสอบครั้งที่ 2 ของรอบย่อยการทดสอบ 1 วันของแบบจำลอง ร่องสลอตที่ 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบครั้งที่ 2 การทดสอบรอบย่อยการทดสอบ 2 วันที่อุณหภูมิการทดสอบ 215 °C

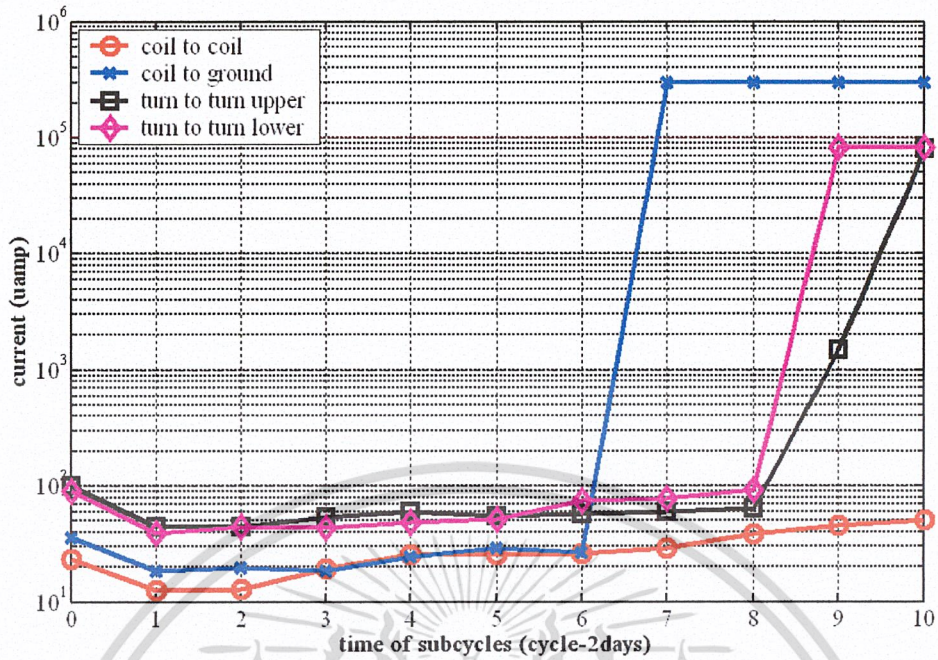


รูปที่ 5.31 ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดสอบครั้งที่ 2 ของรอบย่อยการทดสอบ 2 วันของแบบจำลอง ร่องสลีตที่ 3

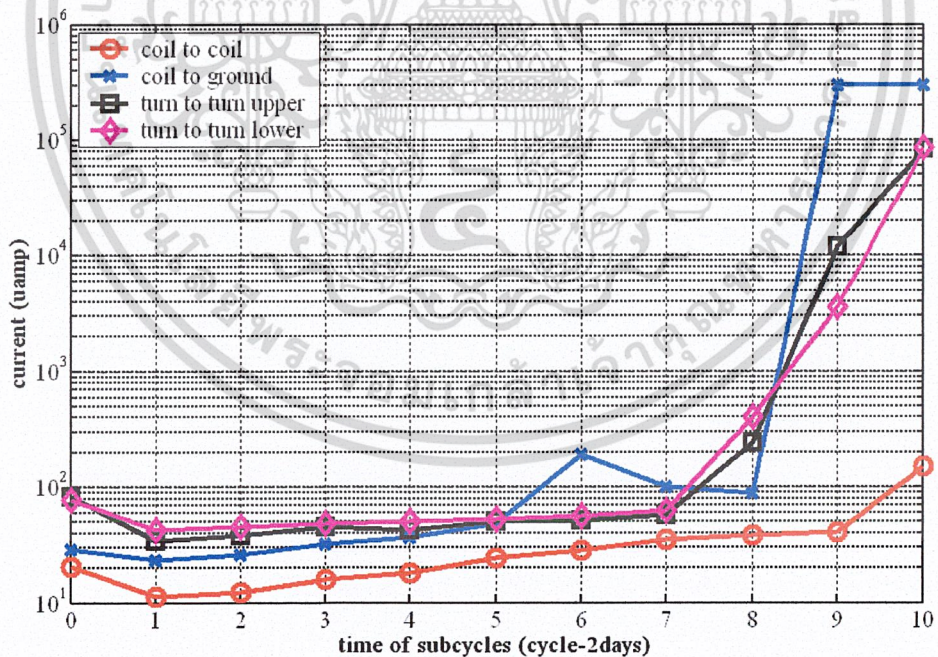


รูปที่ 5.32 ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดสอบครั้งที่ 2 ของรอบย่อยการทดสอบ 2 วันของแบบจำลอง ร่องสลีตที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

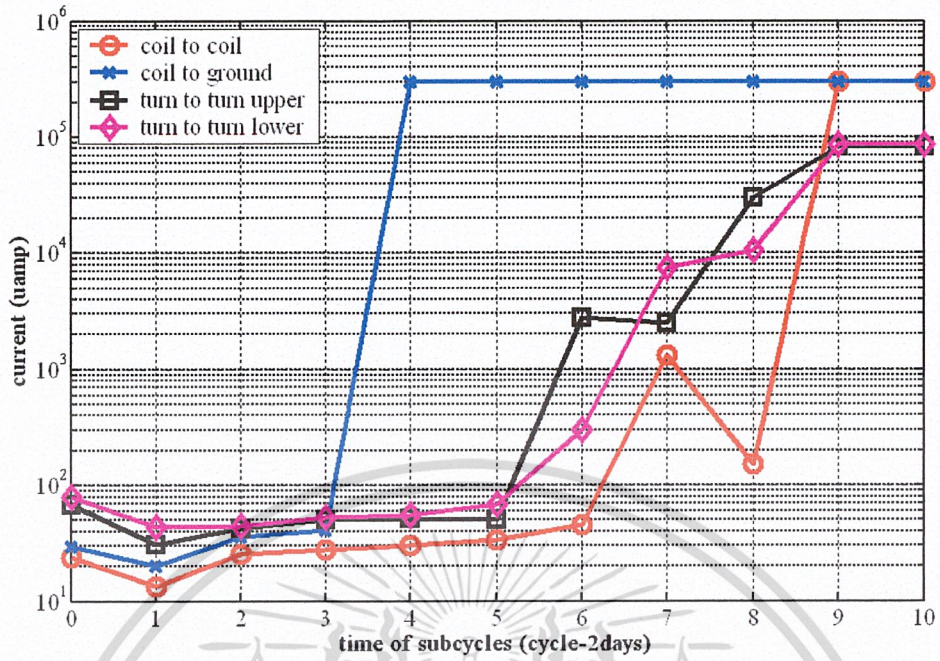


รูปที่ 5.33 ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดสอบครั้งที่ 2 ของรอบย่อยการทดสอบ 2 วันของแบบจำลอง ร่องสลีตที่ 9



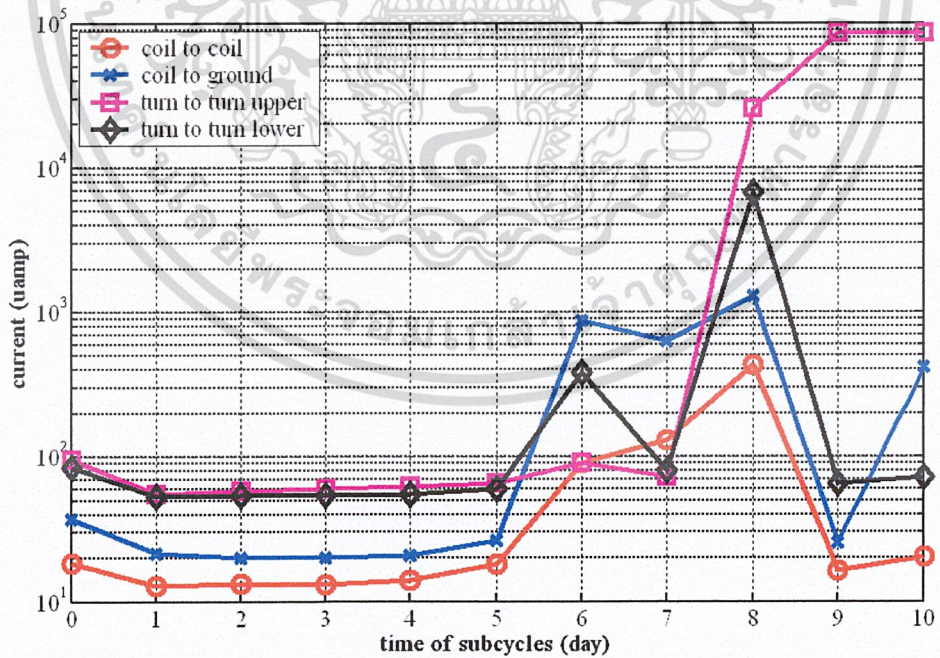
รูปที่ 5.34 ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดสอบครั้งที่ 2 ของรอบย่อยการทดสอบ 2 วันของแบบจำลอง ร่องสลีตที่ 13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



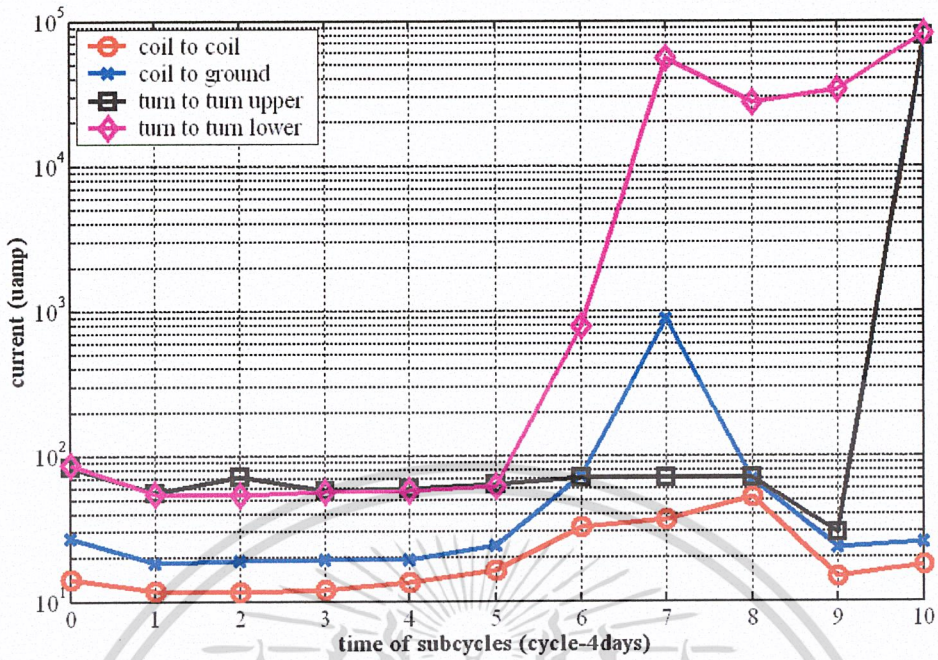
รูปที่ 5.35 ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดสอบครั้งที่ 2 ของรอบย่อยการทดสอบ 2 วันของแบบจำลอง ร่องสลีตที่ 15

ผลการทดสอบครั้งที่ 2 การทดสอบรอบย่อยการทดสอบ 4 วัน ที่อุณหภูมิการทดสอบ 205 °C

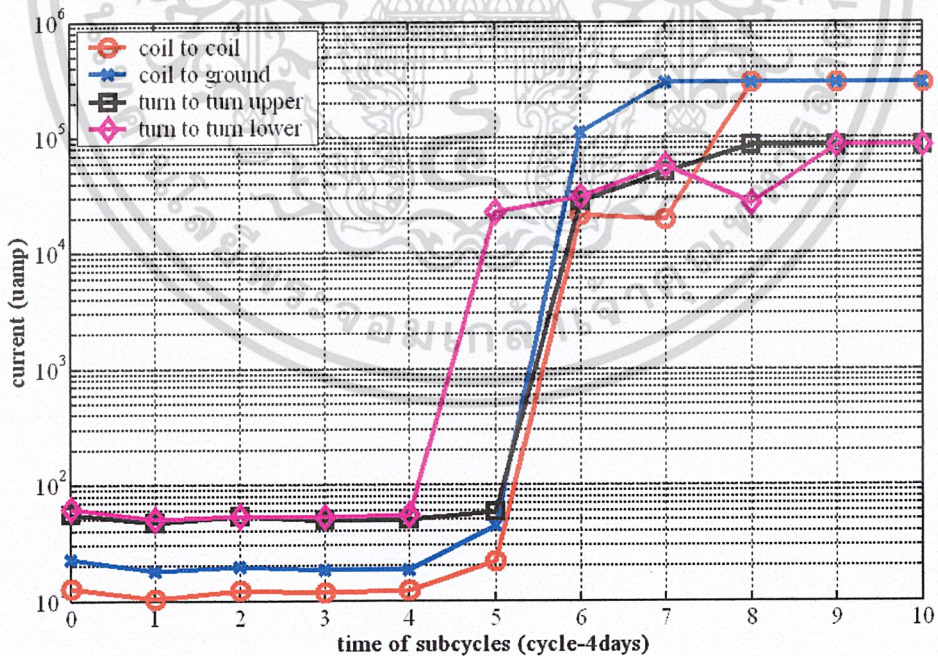


รูปที่ 5.36 ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดสอบครั้งที่ 2 ของรอบย่อยการทดสอบ 4 วันของแบบจำลอง ร่องสลีตที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

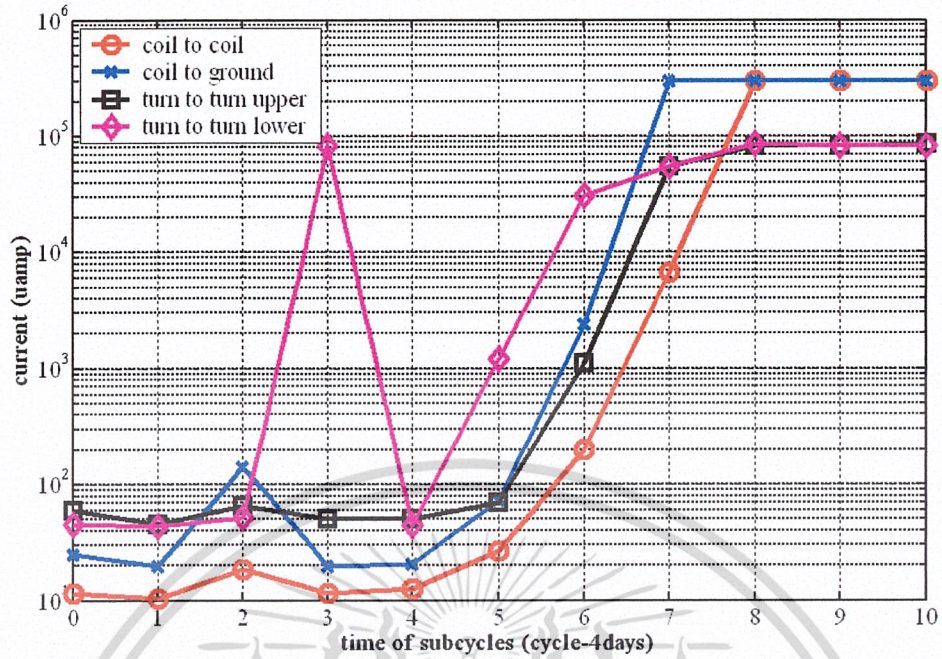


รูปที่ 5.37 ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดสอบครั้งที่ 2 ของรอบย่อยการทดสอบ 4 วันของแบบจำลอง ร่องสลิตที่ 8

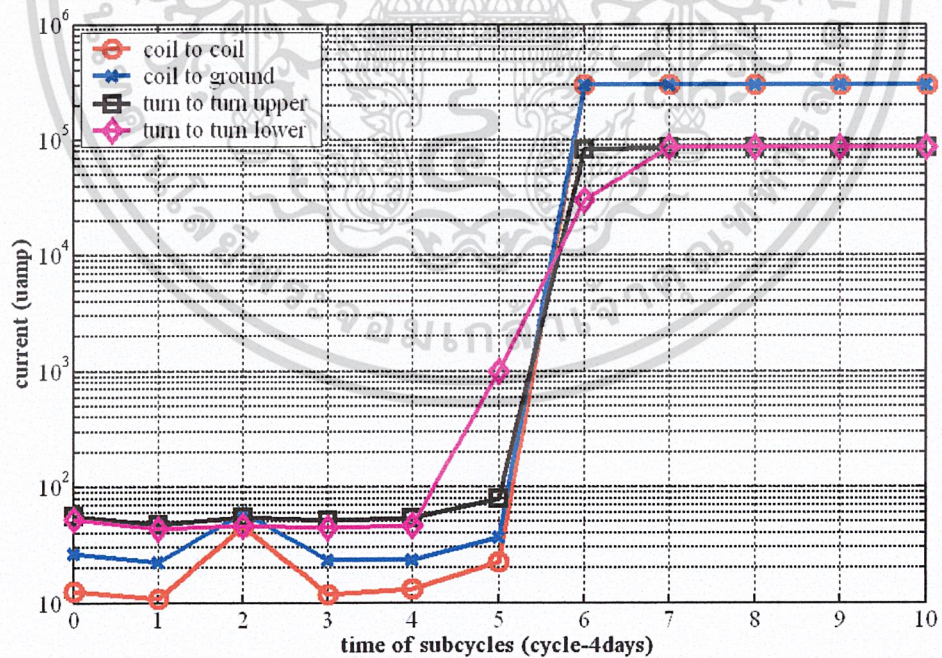


รูปที่ 5.38 ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดสอบครั้งที่ 2 ของรอบย่อยการทดสอบ 4 วันของแบบจำลอง ร่องสลิตที่ 13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.39 ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดสอบครั้งที่ 2 ของรอบย่อยการทดสอบ 4 วันของแบบจำลอง ร่องสลีตที่ 15



รูปที่ 5.40 ค่ากระแสไฟฟ้าในการทดสอบครั้งที่ 2 ของรอบย่อยการทดสอบ 4 วันของแบบจำลอง ร่องสลีตที่ 18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

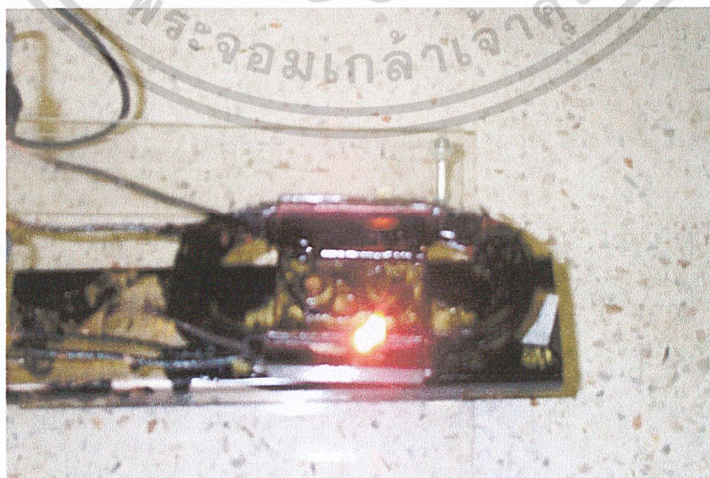
รูปที่ 5.26 ถึง 5.40 เป็นการแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อย การทดสอบของการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้าระหว่างขดลวดกับขดลวด การทดสอบระหว่างขดลวดกับกราวด์ การทดสอบระหว่างรอบต่อรอบของขดลวดบน และการทดสอบระหว่างรอบต่อรอบของขดลวดล่าง ของรอบย่อยการทดสอบ 1 วัน 2 วัน และ 4 วันของการทดสอบครั้งที่ 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่ากระแสไฟฟ้าแนวโน้มที่เปลี่ยนแปลงมากขึ้นในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ ซึ่งในแต่ละแบบจำลองร่องสลีตอาจมีค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าไม่เท่ากัน เช่นเดียวกับการทดสอบในครั้งที่ 1

จากผลการทดสอบในรูปที่ 5.26 ถึง รูปที่ 5.40 นั้นจะเห็นได้ว่าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบของแต่ละแบบจำลองร่องสลีต มีค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในลักษณะที่แตกต่างกันหลายรูปแบบทั้ง รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน 2 วัน และ 4 วัน เช่น มีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทันทีทันใดดังรูปที่ 5.26 5.27 และ 5.40 หรืออาจมีการเปลี่ยนแปลงไฟฟ้าของกระแสที่เป็นขั้น ๆ ดังรูปที่ 5.35 และ 5.37 หรืออาจมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าทันทีทันใดในลักษณะที่เพิ่มขึ้นและลดลง ดังรูปที่ 5.28 และ 5.39 เป็นต้น

5.5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

5.5.1 การวินิจฉัยจุดสิ้นสุดอายุฉนวน

การวินิจฉัยจุดสิ้นสุดอายุฉนวนสำหรับการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวนตามมาตรฐาน IEC 34-18-21 นั้นจะสังเกตจากค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในแต่ละรอบย่อยการทดสอบซึ่งจะต้องมั่นใจว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าที่ลดลงในรอบย่อยถัดมา หรือสังเกตจากประกายไฟ หรือควันที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 5.41



รูปที่ 5.41 การเสื่อมสภาพของระบบฉนวนระหว่างการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 ค่าการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีตที่ 1 อุณหภูมิการทดสอบ

225 ° C

รอบย่อย	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
กระแสไฟฟ้า(μA)											
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	54	27	24	24	25	14	16	360	28	16	16
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	33	18	16	23	23	23	27	400	196	25	24
ระหว่างรอบต่อรอบ ของขดลวดบน	110	55	60	62	64	61	66	280 $\times 10^3$	275 $\times 10^3$	270 \times 10^3	270 \times 10^3
ระหว่างรอบต่อรอบ ของขดลวดล่าง	141	54	60	55	58	61	300 $\times 10^3$	280 $\times 10^3$	280 $\times 10^3$	269 $\times 10^3$	276 $\times 10^3$

จากผลการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวนของแบบจำลองร่องสลีตที่ 1 ของอุณหภูมิการทดสอบ 225 ° C ดังตารางที่ 5.4 จะวินิจฉัยได้ว่า ระบบฉนวนเกิดการเสียหาย ณ รอบย่อยการทดสอบที่ 6 เนื่องจากค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในการทดสอบรอบต่อรอบของขดลวดล่างนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นทันทีทันใดอย่างมาก ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ระบบฉนวนเกิดการเสียหายที่ 5.5 รอบ

ตารางที่ 5.5 ค่าการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีตที่ 13 อุณหภูมิการทดสอบ

225 ° C ของการทดสอบครั้งที่ 2

รอบย่อย	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
กระแสไฟฟ้า(μA)											
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	19.3	14.1	14.2	14.6	16.0	17.0	23.6	420	750	4.5 $\times 10^3$	300 $\times 10^3$
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	28.6	19.5	19.6	20.0	20.5	21.8	300 $\times 10^3$	300 $\times 10^3$	300 $\times 10^3$	300 $\times 10^3$	300 $\times 10^3$
ระหว่างรอบต่อรอบ ของขดลวดบน	82.7	55.0	56.5	58.5	58.8	61.4	61.5	5.8 $\times 10^3$	88.0	120	400
ระหว่างรอบต่อรอบ ของขดลวดล่าง	98.5	54.9	58.7	60.2	62.7	65.0	64.4	85 $\times 10^3$	85 $\times 10^3$	85 $\times 10^3$	85 $\times 10^3$

การเร่งอายุทางความร้อนของแบบจำลองร่องสลีตที่ 13 อุณหภูมิการทดสอบ 225 ° C ของการทดสอบครั้งที่ 2 ดังตารางที่ 5.5 วินิจฉัยได้ว่าระบบฉนวนเกิดการเสียหาย ณ รอบย่อยการทดสอบที่ 6 เนื่องจาก ค่าการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าในการทดสอบระหว่างขดลวดกับกราวด์มีค่าเพิ่มขึ้นทันทีทันใดอย่างมาก ซึ่งสรุปได้ว่าระบบฉนวนเกิดการเสียหายที่ รอบ 5.5 ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดสิ้นสุดอายุฉนวนที่รอบย่อยการทดสอบต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 5.6 ถึง 5.11

ตารางที่ 5.6 จุดสิ้นสุดอายุฉนวนอุณหภูมิการทดสอบ 225 °C

แบบจำลองร่องสลีต	รอบ	ชม.
1	5.5	132
2	6.5	156
3	4.5	108
4	6.5	156
5	4.5	108
6	2.5	60
7	6.5	156
8	4.5	108
9	5.5	132
10	6.5	156

ตารางที่ 5.7 จุดสิ้นสุดอายุฉนวนอุณหภูมิการทดสอบ 215 °C

แบบจำลองร่องสลีต	รอบ	ชม.
1	6.5	312
2	5.5	264
3	4.5	216
4	6.5	312
5	5.5	264
6	5.5	264
7	6.5	312
8	4.5	216
9	7.5	360
10	5.5	264

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.8 จุดสิ้นสุดอายุจนวนอุณหภูมิการทดสอบ 205 ° C

แบบจำลองร่องสลีต	รอบ	ชม.
1	3.5	336
2	3.5	336
3	4.5	432
4	5.5	528
5	5.5	528
6	5.5	528
7	4.5	432
8	6.5	624
9	4.5	432
10	4.5	432

ตารางที่ 5.9 จุดสิ้นสุดอายุจนวนอุณหภูมิการทดสอบ 225 ° C การทดสอบครั้งที่ 2

แบบจำลองร่องสลีต	รอบ	ชม.	แบบจำลองร่องสลีต	รอบ	ชม.
1	8.5	204	11	7.5	180
2	6.5	156	12	2.5	60
3	8.5	204	13	5.5	132
4	7.5	180	14	8.5	204
5	9.5	228	15	6.5	156
6	6.5	156	16	6.5	156
7	8.5	204	17	7.5	180
8	8.5	204	18	8.5	204
9	8.5	204	19	8.5	204
10	2.5	60	20	2.5	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.10 จุดสิ้นสุดอายุฉนวนอุณหภูมิการทดสอบ 215 ° C การทดสอบครั้งที่ 2

แบบจำลองร่องสล็อต	รอบ	ชม.	แบบจำลองร่องสล็อต	รอบ	ชม.
1	6.5	312	11	3.5	168
2	5.5	264	12	5.5	264
3	7.5	360	13	8.5	408
4	4.5	216	14	5.5	264
5	8.5	408	15	3.5	168
6	4.5	216	16	4.5	216
7	7.5	360	17	5.5	264
8	4.5	216	18	9.5	456
9	6.5	312	19	8.5	408
10	9.5	456	20	7.5	360

ตารางที่ 5.11 จุดสิ้นสุดอายุฉนวนอุณหภูมิการทดสอบ 205 ° C การทดสอบครั้งที่ 2

แบบจำลองร่องสล็อต	รอบ	ชม.	แบบจำลองร่องสล็อต	รอบ	ชม.
1	7.5	720	11	9.5	912
2	9.5	912	12	3.5	336
3	8.5	816	13	4.5	432
4	5.5	528	14	9.5	912
5	9.5	912	15	5.5	528
6	7.5	720	16	4.5	432
7	7.5	720	17	4.5	432
8	6.5	624	18	5.5	528
9	5.5	528	19	4.5	432
10	6.5	624	20	5.5	528

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.2 ค่าเฉลี่ยของจุดสิ้นสุดอายุฉนวน

ในการวิเคราะห์ระดับชั้นทางความร้อนระบบฉนวนตามมาตรฐาน IEC 34-18-21 นั้น จะต้องทำการหาค่าเฉลี่ยของจุดสิ้นสุดอายุฉนวนที่ได้ทำการทดสอบมาแล้วตามสมการที่ 5.1

$$\bar{L} = \sum_{i=1}^N L_i \quad (5.1)$$

เมื่อ \bar{L} คือ ค่าอายุฉนวนเฉลี่ย (ชม.)

L_i คือ ค่าอายุฉนวนของแบบจำลองร่องสลีตที่ i (ชม.)

i คือ แบบจำลองร่องสลีต

N คือ จำนวนแบบจำลองร่องสลีตที่ใช้ทดสอบ

ซึ่งจากการหาค่าเฉลี่ยของจุดสิ้นสุดอายุฉนวนจากการทดสอบทั้งหมดสามารถแสดงได้ดัง ตารางที่ 5.12 ถึง 5.13

ตารางที่ 5.12 ค่าเฉลี่ยของจุดสิ้นสุดอายุฉนวน

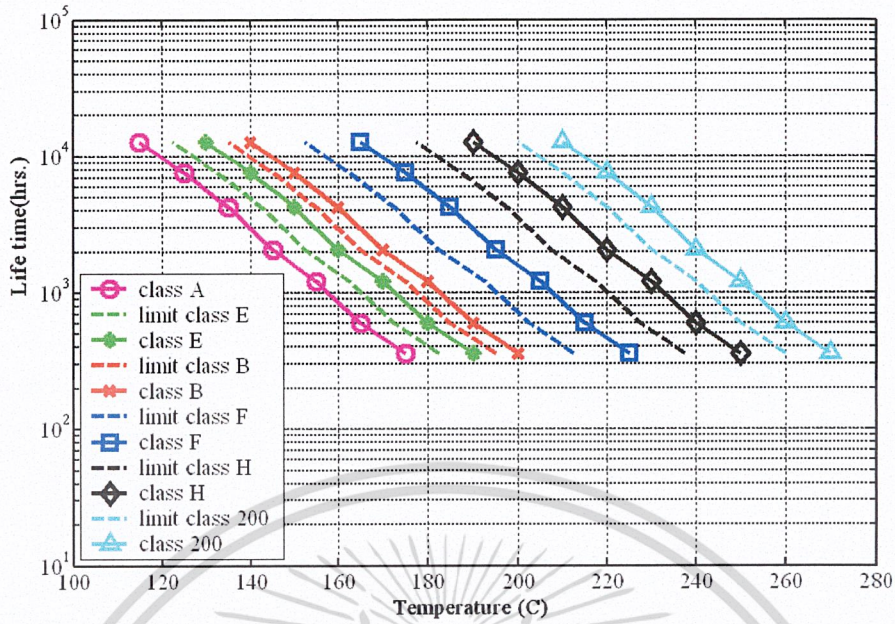
อุณหภูมิทดสอบ (° C)	ค่าเฉลี่ยอายุ (รอบ)	ค่าเฉลี่ยอายุ (ชม.)
225	5.3	127.2
215	5.8	278.4
205	4.8	460.8

ตารางที่ 5.13 ค่าเฉลี่ยของจุดสิ้นสุดอายุฉนวน ของการทดสอบครั้งที่ 2

อุณหภูมิทดสอบ (° C)	ค่าเฉลี่ยอายุ (รอบ)	ค่าเฉลี่ยอายุ (ชม.)
225	7.95	166.8
215	6.35	304.8
205	6.55	628.8

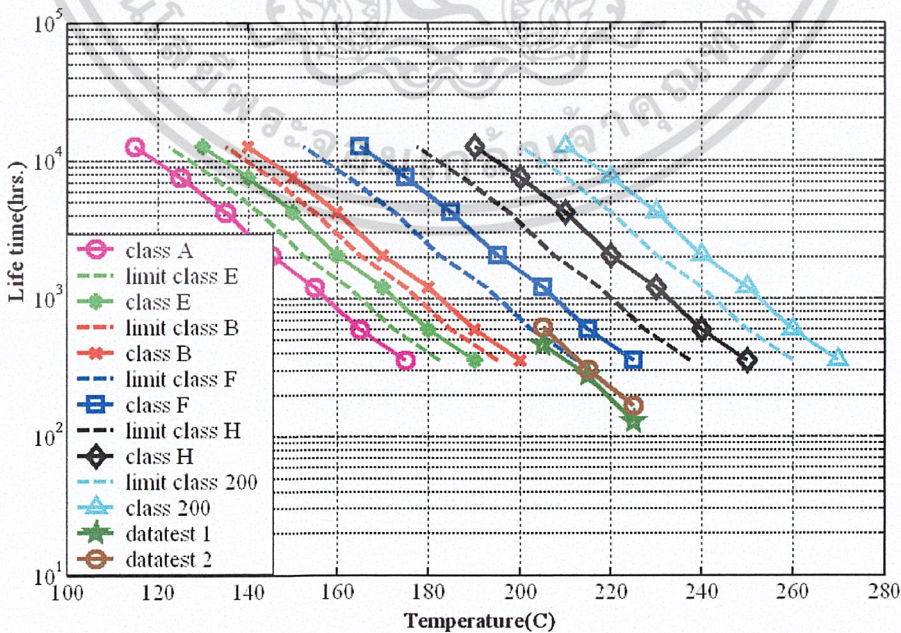
5.5.3 การยืนยันระดับชั้นทางความร้อนระบบฉนวน

ในการยืนยันระดับชั้นทางความร้อนระบบฉนวน จะนำตารางที่ 3.2 จากมาตรฐาน IEC 34-18-1 มาพล็อตในกราฟล็อกการิทึมและหาขอบเขตบนและขอบเขตล่างเพื่อจัดระดับชั้นทางความร้อนตามมาตรฐานได้ดังรูป ที่ 5.42



รูปที่ 5.42 ระดับชั้นทางความร้อนระบบฉนวนตามมาตรฐานพร้อมทั้งขอบเขต

เมื่อนำค่าเฉลี่ยของจุดสิ้นสุดอายุที่ได้จากการทดสอบทั้งการทดสอบในครั้งแรก และการทดสอบครั้งที่ 2 มาพล็อตลงในรูปที่ 5.42 จะได้รูปที่ 5.43 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าระบบฉนวนที่นำมาทดสอบนั้นจะมีแนวโน้มที่ไปในทางเดียวกันทั้ง 2 การทดสอบเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟออร์ริเนียสและระดับชั้นทางความร้อนระบบฉนวนในการทดสอบครั้งที่ 2 จะมีค่ามากกว่าขอบเขตล่างของระดับชั้นทางความร้อน F เล็กน้อย



รูปที่ 5.43 ระดับชั้นทางความร้อนระบบฉนวนจากการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับกิจการงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.4 การหาค่าคงที่ของสมการอาร์เรเนียส

การเร่งอายุทางความร้อนทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของอายุของระบบฉนวนดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีตามสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) เป็นไปตามสมการ 5.2

$$L = A \exp\left(\frac{E}{kT}\right) \quad (5.2)$$

เมื่อ L คือ อายุ (ชม.)

A คือ ค่าคงที่

E คือ พลังงานกระตุ้น (electron volts)

k คือ ค่าคงที่โบลท์ซแมน (Boltzman constant=8.314 electron volts/K)

T คือ ค่าอุณหภูมิสัมพัทธ์ (K)

จากสมการอาร์เรเนียสจะเห็นได้ว่าค่าอายุของฉนวนจะแปรผกผันกับค่าอุณหภูมิสัมพัทธ์ตามสมการเอ็กโปเนนเชียล จากสมการที่ 5.2 ทำการ \log ทั้ง 2 ข้างของสมการได้

$$\log L = \log A + \log \exp\left(\frac{E}{kT}\right) \quad (5.3)$$

$$\log L = \log A + \frac{E}{2.303kT} \quad (5.4)$$

จากสมการที่ 5.4 จะเห็นได้ว่าสมการอยู่ในรูปสมการเส้นตรงดังสมการที่ 5.5

$$y = a + bx \quad (5.5)$$

เมื่อ $y = \log L$

$x = \frac{1}{273+T}$ เพื่อเปลี่ยนค่าอุณหภูมิจาก °C เป็น K

$a = \log A$

$b = \frac{E}{2.303k}$

และสามารถหาตัวแปร a, b ได้ดังสมการที่ 5.6 และ 5.7 ซึ่งจะทำให้สามารถหาค่าคงที่ A, E ได้ในที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a = \frac{\sum y - b \sum x}{N} \quad (5.6)$$

$$b = \frac{N \sum (xy) - (\sum x)(\sum y)}{N \sum (x^2) - (\sum x)^2} \quad (5.7)$$

เมื่อ N คือ จำนวนแบบจำลองร่องสล็อตที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด
ซึ่งจากสมการที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนั้น จะสามารถหาค่าตัวแปรและค่าคงที่ของสมการอาร์
รีเนียสจากระดับชั้นทางความร้อนที่ได้จากมาตรฐานได้จากตารางที่ 3.2 ซึ่งสามารถหาค่าได้ดัง
ตารางที่ 5.14 และสามารถหาค่าตัวแปรและค่าคงที่ของสมการอาร์รีเนียสจากการทดสอบได้ดัง
ตารางที่ 5.15 และ ตารางที่ 5.16

ตารางที่ 5.14 ค่าตัวแปรและค่าคงที่ของสมการอาร์รีเนียสที่ได้จากมาตรฐาน

ข้อมูล	จำนวน ระดับชั้น A	จำนวน ระดับชั้น E	จำนวน ระดับชั้น B	จำนวน ระดับชั้น F	จำนวน ระดับชั้น H	จำนวน ระดับชั้น 200
b	4575.8701626893	4912.1494240221	5142.9222128466	5733.0736413830	6375.8255983667	6905.8720199694
a	-7.6400190785	-8.0365486550	-8.3008514005	-8.9388891872	-9.621853778	-10.1500534320
A	2.291×10^{-8}	9.193×10^{-9}	5.002×10^{-9}	1.151×10^{-9}	2.3886×10^{-10}	7.079×10^{-11}
E	87614.83	94053.614	98472.258	109771.982	122078.846	132227.712

ตารางที่ 5.15 ค่าตัวแปรและค่าคงที่ของสมการอาร์รีเนียสที่ได้จากการทดสอบ

ข้อมูล	ผลการทดสอบ
b	6731.4501509195
a	-11.4030229468
A	3.95×10^{-12}
E	128888.0319

ตารางที่ 5.16 ค่าตัวแปรและค่าคงที่ของสมการอาร์รีเนียสที่ได้จากการทดสอบครั้งที่ 2

ข้อมูล	ผลการทดสอบ
b	7005.267043
a	-11.88064957
A	1.32×10^{-12}
E	134130.8428

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.5 การหาค่าอายุของระบบฉนวน

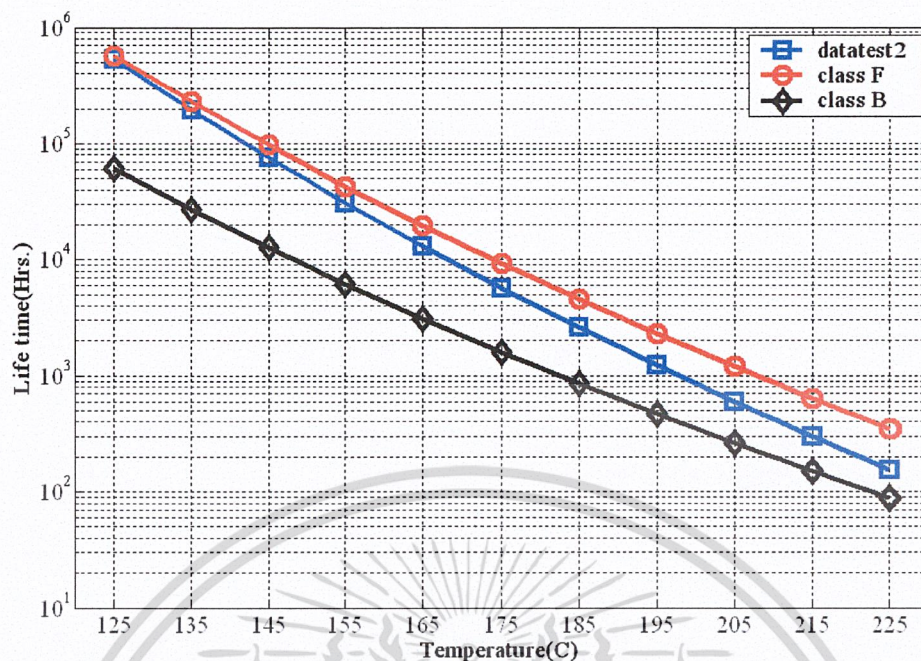
เมื่อได้ค่าคงที่ของสมการอาร์เรเนียสที่ได้จากมาตรฐานและจากการทดสอบดังตารางที่ 5.14 ถึง 5.16 แล้ว จะสามารถหาค่าอายุของระบบฉนวนที่ได้กล่าวถึงเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยการคำนวณค่าจากสมการอาร์เรเนียส เช่น ตารางที่ 5.17 เป็นการคำนวณค่าอายุของระบบฉนวนเมื่อทำงานที่อุณหภูมิ 180 °C

ตารางที่ 5.17 อายุของระบบฉนวนเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิ 180 °C

ระบบฉนวน	X	y	$anti\log y$ (ชม.)	อายุ (ปี)
การทดสอบครั้งที่ 1	2.21×10^{-3}	3.47348	2974.97	0.34
การทดสอบครั้งที่ 2	2.21×10^{-3}	3.60099	3990.20	0.46
ระดับชั้น A	2.21×10^{-3}	2.47265	296.93	0.03
ระดับชั้น E	2.21×10^{-3}	2.81930	659.63	0.07
ระดับชั้น B	2.21×10^{-3}	3.06500	1161.47	0.14
ระดับชั้น F	2.21×10^{-3}	3.73120	5385.22	0.77
ระดับชั้น H	2.21×10^{-3}	4.46872	29425.29	4.50
ระดับชั้น 200	2.21×10^{-3}	5.11192	129396.86	21.85

จากตารางที่ 5.17 จะเห็นได้ว่าในการใช้งานของระบบฉนวนระดับชั้นทางความร้อนต่าง ๆ เช่น ระดับชั้นทางความร้อน F เมื่อใช้งานที่ 180 °C จะใช้งานได้เพียง 0.77 ปี และในการทดสอบครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 จะได้ 0.34 และ 0.46 ปีตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้เป็นจริงเมื่อเทียบกับระดับชั้นทางความร้อนที่ได้ยืนยันแล้วข้างต้นว่าระดับชั้นทางความร้อนระบบฉนวนที่นำมาทดสอบนั้นจะต่ำกว่าระดับชั้นทางความร้อน F เล็กน้อย หรือว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบฉนวนระดับชั้นทางความร้อน H เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิ 180 °C นั้นซึ่งเป็นอุณหภูมิที่มาตรฐานกำหนดก็จะสามารถใช้งานได้ 4.5 ปี

เมื่อนำค่าคงที่ที่ได้จากสมการอาร์เรเนียสจากการทดสอบครั้งที่ 2 ซึ่งเป็นการทดสอบที่ระบุระบบฉนวนเพียงระบบเดียวทั้ง 20 ชิ้นงานส่วนการทดสอบครั้งที่ 1 เป็นการนำระบบฉนวนหลาย ๆ แบบมาทำการทดสอบจึงไม่นำมาทำนายอายุของระบบฉนวนเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิต่าง ๆ มาพล็อตกราฟอาร์เรเนียสเพื่อทำนายอายุของระบบฉนวนเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.44



รูปที่ 5.44 กราฟการทำนายอายุระบบฉนวนเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของการทดสอบครั้งที่ 2

จากรูปที่ 5.44 เป็นการทำนายอายุของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบในการทดสอบครั้งที่ 2 ซึ่งเป็นการนำระบบฉนวนที่ประกอบด้วยขดลวดอบน้ำยาชนิดที่ 1 และ กระจกฉนวนชนิดที่ 2 โดยจะทำนายอายุระบบฉนวน ตั้งแต่อุณหภูมิ 125 °C จนถึง 225 °C ยกตัวอย่างเมื่อระบบฉนวนทำงานที่อุณหภูมิ 155 °C จะมีอายุประมาณ 30458.17 ชม. หรือหากทำงานที่อุณหภูมิ 135 °C จะมีอายุประมาณ 194674.70 ชม. เป็นต้น

บทที่ 6

บทสรุป

6.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวนเครื่องจักรกลไฟฟ้าโดยการใช้แบบจำลองร่องสลีตตามมาตรฐาน IEC Std 34-18-21 เพื่อใช้ในการยืนยันระดับชั้นทางความร้อนระบบฉนวนที่นำมาทดสอบ และสามารถทำการทำนายอายุของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้อีกด้วย โดยการจัดทำแบบจำลองร่องสลีตและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบแสดงไว้ในบทที่ 4 และผลการทดลองแสดงไว้ในบทที่ 5

6.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ตู้อบความร้อนที่ใช้ในการทดสอบสามารถปรับอุณหภูมิการทดสอบได้ถึง 400°C ซึ่งสามารถทำการทดสอบการเร่งอายุระบบฉนวนได้ถึงระดับชั้นความร้อน 200 จากตารางที่ 5.1 แสดงอุณหภูมิภายในตู้อบความร้อนจะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างของอุณหภูมิ $\pm 1\text{K}$ จากหน้าจอแสดงผลของตู้อบความร้อน ซึ่งตามมาตรฐานระบุไว้ที่ $\pm 3\text{K}$ เมื่อทำการทดสอบที่ 180°C ถึง 300°C

โต๊ะสั่นสามารถทำการสั่นได้ที่ระยะประมาณ 0.3 มม. ที่ความถี่ 50 Hz ตามลักษณะของลูกเบี้ยวที่มาจับเพลลาของมอเตอร์ไฟฟ้า 4 pole ที่ความถี่ 50 Hz ซึ่งตรงกับมาตรฐานระบุ

ตู้อบความชื้นสามารถควบคุมอุณหภูมิน้ำได้ที่ 30°C และสามารถมีอุณหภูมิโดยรอบภายในตู้อบความชื้นใกล้เคียงกับค่าที่มาตรฐานกำหนด ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 4.1 และ 5.2

6.3 การทดลอง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 รอบการทดสอบหลัก ซึ่งในแต่ละรอบการทดสอบประกอบด้วย รอบการทดสอบทั้งสิ้น 3 รอบการทดสอบ ประกอบด้วยรอบย่อยการทดสอบ 1 วันทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 225°C รอบย่อยการทดสอบ 2 วันทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 215°C และรอบย่อยการทดสอบ 4 วัน ซึ่งทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 205°C ซึ่งแต่ละรอบการทดสอบมีรอบย่อยการทดสอบทั้งสิ้น 10 รอบย่อยการทดสอบ โดยในรอบการทดสอบหลักครั้งแรกเป็นการทดสอบเพื่อศึกษาขั้นตอนการทดสอบและแนวโน้มของผลการทดสอบ ในขณะที่การทดสอบหลักรอบที่ 2 นั้นเป็นการทดสอบซ้ำเพื่อยืนยันความถูกต้องของกระบวนการทดสอบการเร่งอายุที่ได้ศึกษามา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้าของรอบการทดสอบครั้งที่ 1 นั้นแสดงไว้ในรูปที่ 5.11-5.25 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ และอาจมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมากหากระบบจนวนเกิดการเสื่อมสภาพ โดยในแต่ละรอบย่อยการทดสอบและแต่ละแบบจำลองร่องสลีตมีแนวโน้มที่ไปในทางเดียวกัน ในบางกรณีหากมีการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าอย่างมากแล้วค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าลดลงในรอบย่อยการทดสอบต่อไปแสดงว่าระบบจนวนเกิดความผิดปกติแต่ไม่เสื่อมสภาพอย่างแท้จริง ให้ทำการทดสอบจนกระทั่งระบบจนวนเกิดการเสื่อมสภาพอย่างแท้จริง

เมื่อทำการทดสอบในครั้งที่ 2 ตัวอย่างผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 5.26- 5.40 จะเห็นได้ว่าผลการทดสอบในการทดสอบครั้งแรกและการทดสอบในครั้งที่ 2 นั้นมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบย่อยการทดสอบที่ใกล้เคียงกัน

6.4 การยืนยันระดับชั้นทางความร้อนระบบจนวน

จากผลการทดสอบทั้ง 2 รอบการทดสอบนั้นจะทำการหาจุดสิ้นสุดอายุจนวนเมื่อทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าในการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้าของการทดสอบระหว่างขดลวดกับขดลวด การทดสอบระหว่างขดลวดกับกราวด์ การทดสอบระหว่างรอบต่อรอบของขดลวด ซึ่งหากระบบจนวนที่นำมาทดสอบมีค่าความผิดปกติอย่างใดอย่างหนึ่งแสดงว่าเกิดการเสื่อมสภาพของระบบจนวนที่นำมาทดสอบนั้นซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างการวินิจฉัยจุดสิ้นสุดอายุจนวนได้ดังตารางที่ 5.4 และ 5.5 และจุดสิ้นสุดอายุจนวนที่ได้จากการทดสอบทั้ง 2 รอบการทดสอบแสดงได้ดังตาราง 5.6 ถึง 5.11 และสามารถหาค่าเฉลี่ยของจุดสิ้นสุดอายุจนวนได้ดังตารางที่ 5.12 และ 5.13 และเมื่อนำจุดสิ้นสุดอายุจนวนทั้ง 2 รอบการทดสอบมาพล็อตในรูปที่ 5.43 แล้วจะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกล่าวคือ ถ้าอุณหภูมิใช้งานลดลงก็จะทำให้อายุจนวนมีค่ามากขึ้นนั่นเอง

การยืนยันระดับชั้นทางความร้อนระบบจนวนนั้นซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะอาศัยกราฟอาร์รี่เนียสมาใช้ในการตัดสินใจระดับชั้นทางความร้อนระบบจนวนที่นำมาทดสอบ ซึ่งกราฟอาร์รี่เนียสมาตราฐานพร้อมทั้งขอบเขตสามารถหาได้จากตารางที่ 3.2 ซึ่งเป็นการแสดงค่าเฉลี่ยของอายุที่ระดับชั้นทางความร้อนเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งจะทำให้สามารถหาขอบเขตล่างของแต่ละระดับชั้นทางความร้อนได้ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.42 และการตัดสินใจระดับชั้นทางความร้อนระบบจนวนจากการทดสอบนั้นจะสังเกตได้จากรูปที่ 5.43 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ระบบจนวนที่นำมาทดสอบในการทดสอบครั้งที่ 2 นั้นนั้นอยู่ในระดับมากกว่าขอบเขตล่างของระดับชั้นทางความร้อน F เล็กน้อย ส่วนในการทดสอบครั้งที่ 1 จะไม่ตัดสินใจระดับชั้นทางความร้อนระบบจนวนเนื่องจากมีการนำระบบจนวนที่แตกต่างกันมาทดสอบใน 10 แบบจำลองร่องสลีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.5 การทำนายอายุระบบฉนวน

การทำนายอายุระบบฉนวนจะอาศัยสมการอาร์เรเนียสซึ่งแสดงไว้ในสมการที่ 5.2 ในการวิเคราะห์ โดยจะทำการหาค่าคงที่ของสมการตามขั้นตอนที่ระบุไว้ในข้อ 5.5.4 โดยค่าคงที่ของระบบฉนวนตามมาตรฐานที่ระดับชั้นทางความร้อนต่าง ๆ แสดงได้ดังตารางที่ 5.14 ซึ่งสามารถหาค่าเหล่านี้ได้จากตารางที่ 3.2 และจากผลการทดสอบทั้ง 2 ครั้งการทดสอบสามารถหาค่าคงที่ของสมการอาร์เรเนียสได้ดังตารางที่ 5.15 และ 5.16 ตามลำดับ และเมื่อนำไปทำการหาค่าอายุของระบบฉนวนเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิต่าง ๆ นั้นก็สามารถทำได้โดยการคำนวณค่าในสมการอาร์เรเนียสนั้นเอง ซึ่งในตารางที่ 5.17 เป็นการหาค่าอายุของระบบฉนวนต่าง ๆ เมื่อทำการใช้งานที่อุณหภูมิ 180 °C ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้งการทดสอบในรอบการทดสอบแรกและรอบการทดสอบที่ 2 นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าต่ำกว่าของระดับชั้นทางความร้อน F แต่มากกว่าระดับชั้นความร้อน B ซึ่งจะตรงกับการขึ้นชั้นระดับชั้นทางความร้อนที่กล่าวมาข้างต้น ส่วนตัวอย่างการทำนายค่าอายุระบบฉนวนเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของการทดสอบครั้งที่ 2 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.44 ซึ่งเป็นการทำนายการใช้งานที่อุณหภูมิ 125 °C ถึง อุณหภูมิ 225 °C

6.6 วิจารณ์การทดสอบและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัย

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมดนั้นไม่ว่าจะเป็น ตู้อบความร้อน โต๊ะสั่น ตู้อบความชื้น มีค่าใกล้เคียงกับมาตรฐาน และจากผลการทดสอบที่ได้ทั้งรอบการทดสอบในครั้งแรกและการทดสอบในรอบการทดสอบที่ 2 นั้นจะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน และการทำนายอายุของระบบฉนวนเมื่อเทียบกับมาตรฐานมีค่าเป็นจริงจากการขึ้นชั้นระดับชั้นทางความร้อนฉนวนข้างต้น ซึ่งจากข้อสังเกตทั้ง 2 ข้อสามารถสรุปได้ว่าในกระบวนการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวนเครื่องจักรกลไฟฟ้าโดยการใช้แบบจำลองร่องสลีตในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความน่าเชื่อถือสามารถนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมได้จริง เพื่อที่จะนำระบบฉนวนไปใช้ในบ้านอุณหภูมิการใช้งานที่ถูกต้อง และทำนายอายุระบบฉนวนเพื่อมีการสำรองเครื่องจักรกลไฟฟ้าในระบบได้

สิ่งสำคัญในวิทยานิพนธ์นี้ การวิเคราะห์ผลการทดสอบ โดยเฉพาะการหาจุดสิ้นสุดอายุฉนวนนั้นต้องอาศัยประสบการณ์ในการทดสอบไม่เช่นนั้นผลการทดสอบจะมีค่าความคลาดเคลื่อนได้ และอาจมีการวิเคราะห์จุดสิ้นสุดอายุฉนวนได้จากค่าความต้านทานฉนวนได้อีกทางหนึ่งหากมีการใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์

ในระบบอุตสาหกรรมนั้นในหลาย ๆ กรณี การใช้งานอาจมีค่าอุณหภูมิการใช้งานที่ไม่คงที่ ทำให้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไม่สามารถหาค่าอายุจากการใช้งานนั้นได้ ฉะนั้นควรมีการศึกษาเพิ่มเติม และในการหาจุดสิ้นสุดอายุฉนวนนั้นได้นำเสนอการวินิจฉัยตามมาตรฐานซึ่งจะต้องรอให้ระบบฉนวนเสื่อมสภาพก่อน แต่หากสามารถวินิจฉัยโดยวิธีการอื่นได้แล้วก็อาจเป็นผลดีเพราะจะไม่ต้องรอให้มีการเสื่อมสภาพก่อนและสามารถใช้งานได้จริงได้ในอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Emanuel L.Brancato. 1992. “Estimation of Lifetime Expectancies of Motors”. **IEEE Electrical Insulation Magazine**. Page 5-13. May/June. Vol 8. No.3.
- [2] Gian Carlo Montanari. 1990. : “A New Thermal Life Model Derived by the Aging Compensation Effect. **IEEE Transaction on Electrical Insulation**. Page 309-317 . Vol.25 . No.2
- [3] IEC standard 34-18-21. 1992. **Functional evaluation of insulation system Section 21 :Test procedure for wire wound windings –Thermal evaluation and classification**. First Edition . Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission
- [4] IEC standard 34-18-1. 1992. **Functional evaluation of insulation system for rotating electrical machines**. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission
- [5] IEC standard 60505. 1999. **Evaluation and qualification of electrical insulation system**. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission
- [6] IEC standard 60085. 1984. **Determining the thermal classification of electrical insulation**. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission
- [7] IEC standard 34-1. 1983. **Rotating electrical machines**. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission
- [8] IEEE standard 101. 1987. **IEEE Guide for the Statistical Analysis of Thermal Life Test Data**. Newyork, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineering, Inc
- [9] W.Tillar Shugg. 1995. **Handbook of Electrical Insulation and Electronic Insulating Materials**. 2nd edition. Newyork, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineering, Inc
- [10] เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์ และ พิชิต ถ้ายอง. 2546. “การเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวนของเครื่องจักรกลไฟฟ้า”. หน้า 132-137. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 26. กรุงเทพฯ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก1 ผลการทดสอบครั้งที่ 1

ตารางที่ ก1 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีตที่ 1 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	54.0	27	24	24	25	14	16	360	28	16	16
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	33	18	16	23	23	23	27	400	196	25	24
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	110	55	60	62	64	61	66	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	141	54	60	55	58	61	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$

ตารางที่ ก2 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีต 2 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	50	30	24	24	25	36	40	239.5	2.4	104	1×10^6
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	34	18	18	59	34	22	33	45	2.2×10^3	215	25
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	102	52	55	58	61	55	59	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	144	53	59	61	115	88	66	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$

ตารางที่ ก3 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีต 3 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	55	31	22	27	22	15	21	1×10^6	1×10^6	1×10^6	1×10^6
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	36	23	7	21	21	19	21	3.4×10^3	1×10^6	1×10^6	1×10^6
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	111	52	56	58	55	280	280	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	150	56	63	64	65	280	290	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$

ตารางที่ ก4 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีต 4 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	53	34	23	22	22	17	23	1×10^6	1×10^6	1×10^6	1×10^6
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	34	23	17	20	22	26	29	86	1×10^6	1×10^6	1×10^6
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	95	45	49	51	53	51	54	215	70	72	$\times 10^3$
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	124	48	53	54	55	52	65	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก5 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีต 5 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	57	34	27	27	28	17	22	107	45	25	18
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	34	23	17	20	22	26	29	86	47	29	28
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	110	53	59	61	62	60	61	260 $\times 10^3$	470	65	64
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	122	49	54	55	56	280 $\times 10^3$	280 $\times 10^3$	280 $\times 10^3$	284 $\times 10^3$	260 $\times 10^3$	265 $\times 10^3$

ตารางที่ ก6 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีต 6 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	55	29	42	29	27	18	80	8×10^3	1×10^6	1×10^6	1×10^6
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	35	21	25	27	20	23	30	41	2.2×10^3	3.6×10^3	24
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	89	38	55	290 $\times 10^3$	290 $\times 10^3$	280 $\times 10^3$	280 $\times 10^3$	287 $\times 10^3$	288 $\times 10^3$	280 $\times 10^3$	283 $\times 10^3$
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	109	50	70	280 $\times 10^3$	290 $\times 10^3$	280 $\times 10^3$	280 $\times 10^3$	282 $\times 10^3$	282 $\times 10^3$	277 $\times 10^3$	273 $\times 10^3$

ตารางที่ ก7 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีต 7 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	50	26	23	22	24	17	27	150	25	1.2×10^3	16
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	26	19	15	23	25	24	22	1.1×10^3	9.7×10^3	1.6×10^3	21×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	82	46	50	52	53	534	52	101	70	7×10^3	57
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	76	35	37	42	41	37	38	54	41	45	41

ตารางที่ ก8 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีต 8 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	53	24	20	18	19	15	15	20×10^3	1.3×10^3	196	20
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	35	18	16	24	20	16	17	5.7×10^3	30×10^3	1×10^6	1×10^6
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	65	33	35	40	40	280 $\times 10^3$	63	290 $\times 10^3$	2.4 $\times 10^3$	1.6 $\times 10^3$	41
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	75	29	33	27	39	280 $\times 10^3$	280 $\times 10^3$	280 $\times 10^3$	275 $\times 10^3$	260 $\times 10^3$	270 $\times 10^3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก9 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีต 9 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	63	27	22	20	21	16	120	1×10^6	1×10^6	1×10^6	1×10^6
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	36	19	17	22	20	23	1×10^6	1×10^6	1×10^6	1×10^6	1×10^6
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	74	34	36	37	40	37	61	4.5×10^3	34×10^3	30×10^3	200×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	78	35	37	40	42	60	780	7.5×10^3	440	770	110

ตารางที่ ก10 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีต 10 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	52	25	20	20	19	15	14	1×10^6	1×10^6	1×10^6	1×10^6
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	31	17	15	24	20	18	19	1×10^6	1×10^6	1×10^6	1×10^6
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	88	43	46	55	50	49	51	13×10^3	280	255	275
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	76	34	60	54	41	45	90	260×10^3	273×10^3	263×10^3	270×10^3

ตารางที่ ก11 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีต 1 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	20	16	17	16	15	18	33	230	720	5.3×10^3	103×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	32	22	27	21	21	28	63	1.5×10^3	2.1×10^3	7.6×10^3	115×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	90	62	66	68	64	73	80	1.3×10^3	1.4×10^3	17×10^3	263×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	74	55	57	60	55	60	60	3.8×10^3	4.45×10^3	10×10^3	282×10^3

ตารางที่ ก12 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีต 2 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	18	13	15	16	17	16	116	1×10^3	2.3×10^3	1.6×10^3	210×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	31	21	24	24	36	28	427	2.1×10^3	3.3×10^3	4×10^3	70×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	72	55	59	60	62	67	2×10^3	4.7×10^3	5.7×10^3	5.1×10^3	285×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	75	56	60	62	56	70	2.6×10^3	3.2×10^3	4.3×10^3	23×10^3	278×10^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก13 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีต 3 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	23	33	30	135	87	382	22	1.4×10^3	1.7×10^3	1.2×10^3	129×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	33	52	55	560	300	380	29	2×10^3	2.8×10^3	3.3×10^3	81×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	75	87	70	131	2.2×10^3	60×10^3	23×10^3	15×10^3	32×10^3	280	265×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	78	64	65	80	160	420	62	1.2×10^3	3×10^3	2.2×10^3	284×10^3

ตารางที่ ก14 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีต 4 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	20	19	19	17	28	25	13	700	1.2×10^3	2.6×10^3	50×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	34	40	25	30	1×10^6	100	19	4×10^3	6.3×10^3	14×10^3	328×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	72	50	55	53	65	61	53	3.2×10^3	4.4×10^3	1.6×10^3	280×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	75	55	60	58	59	65	55	400	912	3.2×10^3	280

ตารางที่ ก15 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีต 5 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	23	17	17	16	15	13	16	13×10^3	16×10^3	40×10^3	300×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	34	21	21	31	18	18	3×10^3	11×10^3	20×10^3	65×10^3	150×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	66	46	51	49	49	51	56	1.5×10^3	2.5×10^3	3×10^3	276×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	80	53	58	55	55	54	58	1.1×10^3	1.7×10^3	280	278×10^3

ตารางที่ ก16 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีต 6 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	22	19	20	16	16	51	23	176	250	400	65×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	30	25	25	18	20	100	40	400	753	800	87×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	51	41	46	46	43	81	52×10^3	1.3×10^3	2.3×10^3	270	270×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	57	45	50	50	49	58	53	106	1.1×10^3	8.6×10^3	1.5×10^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก17 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีต 7 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	25	20	21	17	16	15	20	82	184	700	114×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	39	27	31	25	25	23	40	5.3×10^3	83×10^3	260×10^3	100×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	60	43	51	44	46	46	64	270	546	2×10^3	1.9×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	57	44	50	45	44	45	52	53	67	565	2.7×10^3

ตารางที่ ก18 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีต 8 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	25	23	43	33	160	245	135	1.5×10^3	3.1×10^3	11×10^3	15×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	36	40	86	97	17	4×10^3	3.7×10^3	5×10^3	6.3×10^3	3.8×10^3	16×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	70	56	66	61	66	83	81	410	1.7×10^3	2.5×10^3	37×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	63	46	62	54	73	70	67	1.3×10^3	1.5×10^3	2.6×10^3	99×10^3

ตารางที่ ก19 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีต 9 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	23	17	19	13	13	20	13	37	325	1.4×10^3	481
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	37	22	28	18	16	19	17	55	9.3×10^3	14×10^3	26×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	55	36	39	37	36	57	48	60	144	2.1×10^3	131
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	69	51	56	52	51	55	57	63	512	2.3×10^3	10×10^3

ตารางที่ ก20 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีต 10 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	19	16	16	13	13	25	40	5×10^3	67×10^3	107×10^3	10×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	28	18	22	17	17	250	6×10^3	13×10^3	30×10^3	50×10^3	1×10^6
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	29	20	22	20.91	21	26	34	62	78	146	441
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	64	50	54	53	53	54	67	68	82	3×10^3	3.3×10^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก21 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีต 1 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	20	22	30	18	25	23	29	71	1.1×10^3	1.6×10^3	2×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	25	32	35	30	43	40	148	2.3×10^3	4×10^3	6×10^3	8×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	90	64	58	62	1.2×10^3	1.6×10^3	1.8×10^3	2.7×10^3	215 $\times 10^3$	226 $\times 10^3$	258 $\times 10^3$
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	75	54	70	143	660	2.3×10^3	68	1100	193 $\times 10^3$	253 $\times 10^3$	235 $\times 10^3$

ตารางที่ ก22 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีต 2 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	24	20	33	20	23	70	80	3×10^3	3.7×10^3	4.6×10^3	5.5×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	36	26	29	32	33	77	84	792	800	1×10^3	1.2×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	90	104	86	60	228	415	730	4.2×10^3	147 $\times 10^3$	257 $\times 10^3$	235 $\times 10^3$
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	89	69	70	88	1.5×10^3	4×10^3	262	7.8×10^3	103 $\times 10^3$	250 $\times 10^3$	237 $\times 10^3$

ตารางที่ ก23 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีต 3 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	18	18	20	18	31	36	78	4.5×10^3	3.2×10^3	2.3×10^3	2×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	29	26	24	30	50	40	132	1.2×10^3	7.3×10^3	8×10^3	5.7×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	86	87	54	66	318	3.3×10^3	3.6×10^3	8.2×10^3	6.3×10^3	7×10^3	239 $\times 10^3$
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	61	41	70	90	47	4200	278	185×10^3	100 $\times 10^3$	225 $\times 10^3$	241 $\times 10^3$

ตารางที่ ก24 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีต 4 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	20	18	30	15	66	74	4.4×10^3	6.4×10^3	46×10^3	135 $\times 10^3$	190 $\times 10^3$
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	24	30	25	21	22	40	127	8.2×10^3	1×10^6	1×10^6	800 $\times 10^3$
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	83	30	48	80	50	122	51×10^3	77×10^3	85×10^3	247 $\times 10^3$	244 $\times 10^3$
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	68	58	63	150	665	87	216	3.5×10^3	50×10^3	246 $\times 10^3$	242 $\times 10^3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก25 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีต 5 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	36	38	28	23	30	110	2.3×10^3	6.9×10^3	9.3×10^3	15×10^3	17×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	30	38	24	28	23	33	55	1×10^6	1×10^6	1×10^6	1×10^6
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	68	48	34	48	90	74	60	394	105	95	220×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	86	55	51	57	60	120	849	3.7×10^3	3.1×10^3	14×10^3	26×10^3

ตารางที่ ก26 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีต 6 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	23	26	30	50	51	31	56	750	700	720	1×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	39	35	32	55	51	70	87	700	880	2×10^3	5.8×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	67	69	34	55	70	233	618	6.5×10^3	11×10^3	47×10^3	240×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	47	62	100	120	190	320	3.8×10^3	4.5×10^3	4.3×10^3	5.5×10^3	7.6×10^3

ตารางที่ ก27 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีต 7 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	23	18	20	15	91	32	41	500	2×10^3	1.6×10^3	3.1×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	28	25	53	20	40	63	74	950	1.4×10^3	2.6×10^3	2.7×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	72	71	56	55	66	700	960	1.3×10^3	2.1×10^3	8×10^3	30×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	77	56	58	62	200	6.4×10^3	8×10^3	14×10^3	17×10^3	22×10^3	24×10^3

ตารางที่ ก28 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีต 8 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	20	17	26	21	31	17	590	870	1.5×10^3	3.7×10^3	5.8×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	32	24	38	113	122	18	87	1.6×10^3	1.5×10^3	17×10^3	22×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	73	68	100	70	80	70	67	10×10^3	17×10^3	48×10^3	66×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	80	52	58	65	71	91	290	1.2×10^3	5×10^3	7×10^3	176×10^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก29 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีต 9 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	18	16	21	23	22	65	352	2.2×10^3	2.1×10^3	7.4×10^3	6.3×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	30	20	20	26	32	33	36	2.4×10^3	2.6×10^3	3×10^3	800×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	65	66	47	83	63	876	125	4.5×10^3	17×10^3	23×10^3	33×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	55	44	52	60	60	1.6×10^3	4.8×10^3	4.4×10^3	5.2×10^3	7×10^3	2.4×10^3

ตารางที่ ก30 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองร่องสลีต 10 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	20	19	54	65	60	50	693	1×10^3	1.3×10^3	1.5×10^3	1.6×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	30	28	20	38	44	67	2×10^3	4.7×10^3	2.1×10^3	7.4×10^3	8×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	85	82	92	120	142	150	240	325	454	6×10^3	226×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	73	48	58	95	87	4.9×10^3	2×10^3	2.2×10^3	2.5×10^3	3×10^3	3.1×10^3

ก2 การทดสอบครั้งที่ 2

ตารางที่ ก31 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 1 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	15.8	12.9	13.1	14.0	15.1	15.5	16.6	28.3	17.2	30.4	33.3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	31.0	17.7	18.2	19.3	19.1	20.7	22.0	420	23.0	45.5	54.9
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	70.8	66.9	65.4	50.7	50.9	53.7	53.4	350	63.5	140	2.5×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	97.5	51.6	52.4	55.9	57.6	59.8	60.2	300	64.7	15×10^3	82×10^3

ตารางที่ ก32 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 2 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	21.2	13.2	13.5	14.1	15.0	15.6	15.8	22.0	21.1	25.5	27.2
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	30.0	18.4	19.5	20.0	21.1	21.4	23.1	41.5	41.0	53.0	48.5
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	58.6	39.5	35.2	35.7	44.7	43.0	43.6	270	58.9	84×10^3	84×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	100.2	57.5	57.9	60.0	62.2	64.5	64.6	86×10^3	86×10^3	85×10^3	85×10^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก33 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 3 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	17.4	11.7	11.8	12.0	12.7	14.2	14.0	18.1	17.2	3.5×10^3	5.5×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	32.2	17.1	17.2	18.5	18.3	20.1	21.0	44.4	24.4	4.3×10^3	12×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	58.5	57.3	58.3	61.5	62.2	64.7	64.8	1×10^3	70.7	22×10^3	82×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	88.4	55.2	58.3	69.7	59.0	61.4	61.2	74.8	65.7	75.3	83.0

ตารางที่ ก34 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 4 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	19.2	13.1	13.5	13.6	14.8	15.4	17.0	15.6	800	300	300×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	40.1	19.3	19.1	20.9	21.4	22.5	24.2	29.2	300×10^3	300×10^3	300×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	73.6	47.3	44.2	51.3	56.6	54.1	54.5	72.6	290	120	150
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	101.5	59.0	60.2	63.9	66.1	68.1	68.8	74.0	20×10^3	84×10^3	84×10^3

ตารางที่ ก35 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 5 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	20.9	14.6	14.4	15.8	15.4	16.8	17.2	15.4	18.4	19.5	20.3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	37.5	18.6	18.8	20.7	21.2	22.6	24.8	21.3	29.8	32.3	40.4
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	81.6	56.5	58.8	62.5	64.0	66.0	66.0	260	73.9	420	12×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	78.9	42.6	47.2	47.2	48.9	50.6	50.5	52.5	54.3	380	3.2×10^3

ตารางที่ ก36 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 6 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	19.6	12.9	13.3	14.6	14.2	15.1	16.2	313	16.8	3.5×10^3	7.8×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	36.1	18.5	19.3	20.3	20.3	21.3	22.0	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	76.5	53.6	57.8	59.0	59.6	61.5	61.6	119	67.5	120	150
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	93.3	53.7	56.5	57.9	59.9	62.5	62.4	165	86.5	1×10^3	23×10^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก37 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 7 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	19.4	13.3	14.5	15.3	14.0	15.1	16.6	21.6	17.7	300 $\times 10^3$	300 $\times 10^3$
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	32.7	18.1	19.9	20.6	20.8	21.6	22.5	320	350	300 $\times 10^3$	300 $\times 10^3$
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	68.0	59.0	51.5	52.9	54.7	56.5	57.0	102	61.2	4.8×10^3	82×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	72.0	43.5	45.6	47.2	49.5	50.8	51.5	90.0	56.2	330	82×10^3

ตารางที่ ก38 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 8 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	21.2	12.3	13.5	15.2	13.7	14.7	15.0	35.9	17.8	37.8	42.0
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	39.7	17.6	18.2	19.8	19.7	20.5	21.2	260	31.6	272	3×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	79.9	48.0	50.0	54.7	52.4	54.0	55.2	128	117	12×10^3	83×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	89.1	51.6	55.6	56.2	58.2	59.7	60.2	68.7	67.0	520	1.4×10^3

ตารางที่ ก39 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 9 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	22.5	12.9	13.5	14.1	14.1	15.5	16.5	420	15.5	23.4	500
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	37.0	16.8	17.0	21.2	19.9	21.1	22.4	2.6×10^3	33.1	12×10^3	45×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	94.3	55.5	57.5	60.8	62.0	64.7	65.8	1.5×10^3	71.6	25×10^3	82×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	83.3	51.8	52.5	55.4	57.2	58.7	59.4	2.4×10^3	64.7	83×10^3	83×10^3

ตารางที่ ก40 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 10 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	23.7	12.2	14.5	14.4	14.0	14.9	16.1	450	23.8	24.9	27.3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	31.8	17.5	18.2	19.3	20.5	21.6	22.4	300 $\times 10^3$	300 $\times 10^3$	300 $\times 10^3$	300 $\times 10^3$
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	56.9	39.3	40.0	42.8	45.7	45.4	46.2	3.0×10^3	51.0	82×10^3	83×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	90.2	55.8	57.5	85×10^3	85×10^3	85×10^3	85×10^3	85×10^3	85×10^3	85×10^3	85×10^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก41 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 11 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	21.0	13.4	14.5	15.0	14.8	15.7	16.3	15.1	30.2	33.8	40.2
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	28.5	18.4	20.3	32.9	20.2	22.1	22.6	22.1	1.2×10^3	18×10^3	45×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	50.7	32.9	38.8	39.7	37.5	39.0	39.4	390	81×10^3	81×10^3	81×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	87.4	52.5	56.5	65.5	60.1	62.5	62.5	64.8	250	280	330

ตารางที่ ก42 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 12 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	18.6	13.2	16.5	17.5	18.9	19.9	19.9	424	19.75	34×10^3	300×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	28.6	20.1	25.3	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3	30	300×10^3	300×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	63.5	45.5	45.6	44.5	43.8	47.3	45.5	4.8×10^3	53.5	2.8×10^3	4.5×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	113.7	59.6	55.3	67.2	68.0	71.3	70.7	1.9×10^3	77.3	23×10^3	48×10^3

ตารางที่ ก43 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 13 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	19.3	14.1	14.2	14.6	16.0	17.0	23.6	420	750	4.5×10^3	300×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	28.6	19.5	19.6	20.0	20.5	21.8	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	82.7	55.0	56.5	58.5	58.8	61.4	61.5	5.8×10^3	88.0	120	400
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	98.5	54.9	58.7	60.2	62.7	65.0	64.4	85×10^3	85×10^3	85×10^3	85×10^3

ตารางที่ ก44 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 14 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	18.3	11.8	13.0	13.3	14.4	15.7	14.8	14.6	14.1	300×10^3	300×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	26.8	18.0	19.3	18.7	19.3	20.6	20.8	23.8	25.9	300×10^3	300×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	89.4	60.0	61.5	61.2	61.9	64.6	64.5	120	71.6	135	280
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	103.2	53.9	55.2	60.0	61.7	63.8	63.9	67.8	69.2	12×10^3	83×10^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก45 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 15 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	20.3	13.9	14.5	15.5	16.1	18.7	18.6	20.4	140	120	42×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	32.4	20.2	20.5	20.6	20.9	22.3	22.2	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	76.8	51.4	52.5	56.0	57.2	59.7	61.0	88	72.9	124	220
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	94.4	51.0	53.7	55.4	57.5	59.7	60.2	62.0	77.0	320	430

ตารางที่ ก46 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 16 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	18.5	15.2	14.5	14.8	15.0	17.3	16.9	890	180	300×10^3	300×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	24.2	18.6	18.9	18.7	20.0	21.4	21.5	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	75.6	89.4	55.5	54.1	56.2	57.6	59.2	80×10^3	82×10^3	82×10^3	82×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	64.8	37.6	37.5	40.5	41.8	43.7	43.9	1.8×10^3	240	25×10^3	80×10^3

ตารางที่ ก47 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 17 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	22.5	13.5	14.5	16.4	16.0	17.4	16.5	18.9	27.5	27.7	34.3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	26.7	19.5	19.8	20.5	22.3	22.9	23.5	213	160	3.4×10^3	43×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	76.2	58.9	58.5	58.5	58.9	61.7	62.2	85.7	143	440	1×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	74.5	44.3	45.7	50.6	51.0	53.6	54.0	58.2	1.3×10^3	82×10^3	82×10^3

ตารางที่ ก48 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 18 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	22.7	12.8	14.8	15.3	15.3	16.3	16.5	22.8	16.5	300×10^3	300×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	27.8	20.1	22.3	21.0	21.6	23.4	24.3	87.4	27.4	35×10^3	300×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	69.2	55.8	57.5	49.7	51.0	53.0	53.7	2.3×10^3	60.4	2.3×10^3	84×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	75.5	43.6	47.8	47.7	49.0	51.2	51.7	53.8	62.5	73.8	77.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก49 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 19 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	21.3	13.2	14.4	15.1	14.5	16.9	16.8	32.4	14.9	28.8	33.9
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	27.6	20.0	21.2	19.7	20.9	21.9	22.6	800	33.5	44.8	45.5
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	92.7	63.4	64.4	61.5	63.5	66.5	67.0	820	72.1	82×10^3	81×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	91.2	50.9	52.3	55.0	57.4	59.8	59.9	122	62.7	82×10^3	81×10^3

ตารางที่ ก50 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 20 รอบย่อยการทดสอบ 1 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	21.3	13.7	16.5	15.8	15.3	17.8	15.4	23.6	2.6×10^3	35×10^3	300×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	26.4	19.2	19.7	20.4	22.1	21.8	21.8	300	300	300	300
								$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	84.3	34.3	32.5	85×10^3	85×10^3	85×10^3	85×10^3	85×10^3	85×10^3	85×10^3	85×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	106.5	58.4	59.7	64.1	66.3	69.0	69.3	72.5	86×10^3	85×10^3	85×10^3

ตารางที่ ก51 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 1 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	22.5	15.2	15.4	17.5	18.8	19.7	23.5	23.4	45.8	45.5	65.3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	24.8	17.5	18.9	18.7	21.5	22.4	28.8	300	300	300	300
								$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	65.3	40.7	45.5	48.8	49.8	55.2	64.5	60.3	75.8	85×10^3	85×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	67.9	43.5	45.2	48.6	48.8	50.3	65.2	85.3	98.2	100.5	85×10^3

ตารางที่ ก52 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 2 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	20.5	10.3	15.8	15.3	17.7	18.9	20.7	85.3	25.8	300	300
										$\times 10^3$	$\times 10^3$
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	29.8	15.3	16.2	21.3	22.4	25.9	300	300	300	300	300
							$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	75.3	43.3	44.4	48.8	61.1	75.3	82×10^3	85×10^3	85×10^3	85×10^3	85×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	98.3	40.5	48.6	52.2	75.8	77.1	103.5	8.2×10^3	84×10^3	84×10^3	84×10^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก53 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 3 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	21.3	10.8	13.4	15.8	19.8	19.7	25.3	52.8	78.4	280	1.1×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	27.5	19.2	20.3	22.5	21.6	28.8	29.0	45.7	32.5	2.3×10^3	12×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	63.2	30.6	33.4	34.4	37.0	48.2	49.0	102.3	83×10^3	80×10^3	80×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	62.0	30.2	35.5	38.1	40.0	42.3	53.1	81.0	83×10^3	82×10^3	82×10^3

ตารางที่ ก54 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 4 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	19.8	15.7	15.3	16.5	17.2	23.4	25.4	48.0	55.7	350	720
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	30.2	20.0	22.4	22.4	23.4	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	88.0	42.8	43.1	52.5	53.7	55.9	120	400	8.3×10^3	32×10^3	83×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	84.3	50.4	55.5	53.8	57.9	60.1	82.5	135	83×10^3	84×10^3	85×10^3

ตารางที่ ก55 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 5 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	17.8	11.1	12.3	15.4	16.9	20.4	22.5	26.8	48.3	14×10^3	110×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	27.6	21.6	25.4	26.6	27.9	26.5	130	420	220	300×10^3	300×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	92.0	44.3	44.4	47.8	52.6	55.5	48.9	68.8	66.7	59.7	83×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	67.6	45.6	52.4	53.3	58.4	58.2	60.3	61.2	62.2	78.4	440

ตารางที่ ก56 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 6 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	23.5	16.2	18.8	19.0	23.3	22.6	22.8	29.4	36.1	48.5	2.3×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	30.1	25.5	27.8	33.3	34.0	38.9	45.9	280	300×10^3	300×10^3	300×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	75.4	48.8	49.0	49.3	55.7	2.5×10^3	81×10^3	84×10^3	84×10^3	84×10^3	84×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	65.1	45.5	64.0	68.9	77.1	225	102	77.2	82×10^3	82×10^3	82×10^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก57 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 7 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	18.3	12.2	13.4	18.9	20.0	22.5	24.6	25.1	38.1	44.3	48.2
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	21.5	14.1	16.5	17.9	23.6	28.7	35.6	84.8	84.5	300 $\times 10^3$	300 $\times 10^3$
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	78.8	50.1	45.9	47.5	48.9	180	200	105	83 $\times 10^3$	85 $\times 10^3$	85 $\times 10^3$
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	94.3	42.3	44.4	48.8	47.5	55.5	110	235	250	83 $\times 10^3$	85 $\times 10^3$

ตารางที่ ก58 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 8 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	15.5	10.8	11.5	14.8	18.7	22.6	22.8	27.5	30.4	54.5	77.9
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	20.3	17.6	19.5	18.8	17.4	300 $\times 10^3$	300 $\times 10^3$	300 $\times 10^3$	300 $\times 10^3$	300 $\times 10^3$	300 $\times 10^3$
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	74.5	32.4	35.7	48.7	52.0	55.0	57.8	56.7	83 $\times 10^3$	82 $\times 10^3$	82 $\times 10^3$
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	88.9	65.4	66.6	64.3	67.3	44.8	78.8	240	5.2 $\times 10^3$	85 $\times 10^3$	85 $\times 10^3$

ตารางที่ ก59 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 9 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	23.4	12.4	12.8	19.3	25.5	25.4	26.0	28.9	38.4	45.5	50.3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	35.7	18.3	19.6	18.5	24.5	28.8	26.5	300 $\times 10^3$	300 $\times 10^3$	300 $\times 10^3$	300 $\times 10^3$
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	100.2	44.3	44.8	53.7	59.4	54.5	57.6	60.0	64.3	15 $\times 10^3$	81 $\times 10^3$
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	89.8	38.8	44.4	43.2	48.3	52.0	74.4	77.0	92.4	82 $\times 10^3$	82 $\times 10^3$

ตารางที่ ก60 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 10 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	22.2	11.1	15.8	29.4	30.4	34.8	35.5	43.3	78.2	100.5	130
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	29.5	25.3	25.4	28.4	35.4	33.4	32.5	34.8	49.1	82.4	300 $\times 10^3$
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	67.7	39.8	44.5	44.1	47.3	59.8	62.0	67.3	67.2	180	85 $\times 10^3$
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	72.5	33.4	36.4	38.5	45.7	52.1	60.0	64.1	66.0	62.4	82 $\times 10^3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก61 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 11 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	19.7	10.2	11.5	11.8	18.3	19.4	21.0	26.7	78×10^3	300×10^3	300×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	29.8	24.5	26.0	35.1	120×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	98.4	50.0	52.4	56.8	68.1	67.2	69.3	72.1	80×10^3	83×10^3	83×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	91.5	41.3	48.8	50.2	53.3	56.8	82×10^3	85×10^3	85×10^3	85×10^3	85×10^3

ตารางที่ ก62 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 12 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	20.0	17.8	21.3	25.4	27.8	35.3	40.6	48.8	56.0	78.1	77.5
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	34.8	22.3	22.5	27.8	29.0	33.4	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	95.2	33.5	37.5	38.4	41.5	43.5	44.7	85×10^3	85×10^3	85×10^3	82×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	78.8	42.0	46.3	47.2	53.6	55.4	57.8	62.4	83×10^3	84×10^3	84×10^3

ตารางที่ ก63 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 13 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	20.3	11.3	12.2	15.8	17.9	24.3	28.4	35.0	37.9	40.4	150
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	28.7	23.5	25.8	32.4	36.8	48.4	190	100	88.4	300×10^3	300×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	82.4	34.5	37.8	45.3	42.2	50.3	51.4	57.9	240	12×10^3	84×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	77.8	42.2	45.3	48.8	50.0	52.3	55.7	62.5	400	3.6×10^3	85×10^3

ตารางที่ ก64 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 14 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	18.3	12.2	13.5	18.5	23.0	26.4	27.5	56.4	78.2	77.4	77.5
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	32.5	25.4	24.3	35.3	40.0	53.4	5.2×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	83.5	43.4	52.1	58.0	62.2	125	84×10^3	22×10^3	83×10^3	83×10^3	83×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	98.4	40.2	48.8	60.2	61.3	62.4	84.3	1.4×10^3	85×10^3	85×10^3	85×10^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก65 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 15 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	23.7	13.3	25.4	27.5	30.0	33.4	45.8	1.3×10^3	150	300 $\times 10^3$	300 $\times 10^3$
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	29.8	20.1	35.5	40.4	300 $\times 10^3$	300 $\times 10^3$	300 $\times 10^3$	300 $\times 10^3$	300 $\times 10^3$	300 $\times 10^3$	300 $\times 10^3$
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	68.1	30.5	42.4	50.3	51.2	50.8	2.8×10^3	2.5×10^3	30×10^3	82×10^3	82×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	78.6	43.2	44.4	53.2	55.4	68.8	300	7.5×10^3	10×10^3	85×10^3	85×10^3

ตารางที่ ก66 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 16 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	20.2	12.8	14.0	19.4	35.5	35.1	42.3	46.3	200	230	140
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	36.6	18.8	20.4	25.3	24.4	27.2	29.3	32.5	34.8	37.8	135
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	96.2	48.1	50.4	51.3	55.7	80×10^3	82×10^3	85×10^3	85×10^3	85×10^3	85×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	81.6	45.2	49.9	56.5	56.4	58.7	350	85×10^3	85×10^3	85×10^3	85×10^3

ตารางที่ ก67 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 17 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	17.6	11.5	11.8	17.5	20.7	22.3	22.5	24.5	27.8	34.8	35.7
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	23.5	13.5	14.5	15.6	18.3	25.8	44.5	55.3	130	23×10^3	300 $\times 10^3$
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	59.3	48.8	50.3	50.2	55.5	250	81×10^3	82×10^3	82×10^3	82×10^3	82×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	77.1	44.2	45.3	48.7	50.8	130	120	450	81×10^3	83×10^3	83×10^3

ตารางที่ ก68 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 18 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	19.6	15.5	15.5	18.4	19.3	23.3	22.1	35.5	42.2	43.4	53.9
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	32.3	17.0	19.2	23.5	45.6	44.2	48.2	53.3	57.8	350	1.2×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	81.3	30.5	33.3	42.8	49.3	44.8	47.3	50.3	320	120	83×10^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก69 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 19 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	23.4	13.5	13.4	15.7	16.4	17.5	20.8	22.6	23.4	43.5	88.7
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	33.6	19.8	22.4	22.6	26.5	24.8	30.5	34.5	450	110	2.4×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	95.4	48.7	44.5	50.2	52.1	55.4	55.2	68.3	73.1	2.8×10^3	83×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	63.8	32.1	35.5	45.3	44.2	58.7	60.4	400	60.5	13×10^3	85×10^3

ตารางที่ ก70 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 20 รอบย่อยการทดสอบ 2 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	20.8	11.5	13.5	14.4	16.5	19.5	35.3	28.5	300	300	300×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	33.8	19.4	19.5	23.4	22.2	150	24.5	35.8	300×10^3	300×10^3	300×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	67.2	40.8	42.5	44.5	44.4	50.2	48.3	48.9	1.3×10^3	500	85×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	88.4	35.3	36.5	38.1	42.3	44.1	100	260	480	2.3×10^3	4.5×10^3

ตารางที่ ก71 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 1 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	10.5	10.9	14.1	10.5	11.9	16.1	19.4	20.7	33.5	34.4	52.2
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	21.0	17.4	19.9	19.4	19.2	23.8	47.8	85.3	300×10^3	300×10^3	300×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	43.7	39.7	46.8	42.7	43.7	4.8	70.3	195.5	69.6	126.3	185.5
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	51.2	48.0	49.3	49.8	51.2	44.3	46.7	58.6	54.8	55.7	60.0

ตารางที่ ก72 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 2 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	13.10	11.37	11.32	12.78	13.00	15.65	37.32	20.50	21.90	15.66	17.7
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	23.59	19.30	19.30	63.74	19.53	25.25	98.54	50.50	33.25	22.20	33.8
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	43.44	34.73	35.7	36.03	37.13	50.57	60.73	42.30	40.10	41.72	85×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	47.93	39.11	40.55	41.75	42.40	54.35	80.73	47.38	45.17	48.05	5.3×10^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก73 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 3 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	11.69	11.30	11.53	11.20	12.45	14.93	27.35	15.30	27.95	13.9	29.7
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	22.06	18.24	18.90	18.95	19.65	24.58	40.23	26.30	42.36	25.00	13×10^1
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	57.91	51.62	52.90	53.15	55.05	60.40	61.43	60.65	66.75	63.12	65.4
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	35.60	32.80	33.66	33.98	35.25	37.93	40.00	39.25	85×10^1	85×10^1	85×10^1

ตารางที่ ก74 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 4 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	11.20	10.87	10.52	11.00	12.44	42.40	642.4	140.50	300	300	300
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	24.76	18.15	19.48	19.39	20.40	37.00	300	300	300	300	300
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	56.54	49.21	51.05	31.04	52.93	58.95	63.25×10^3	61.43	60.99	175	200
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	59.40	49.65	51.45	51.72	53.23	315.0	1.4×10^3	60.43	81×10^3	85×10^3	85×10^3

ตารางที่ ก75 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 5 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	11.43	12.06	11.79	12.11	13.58	24.75	185.41	33.45	43.45	14.25	55.1
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	21.54	17.55	18.51	18.20	18.83	200	618.4	459.5	325	20.58	455
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	55.64	52.41	54.94	55.71	56.90	63.95	100.5	66.58	64	64.30	82×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	47.72	50.60	47.87	48.89	49.58	72.90	650.55	70.50	128	55.15	55.2

ตารางที่ ก76 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 6 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	12.86	12.14	10.83	11.54	13.10	19.37	33.89	20.32	44.63	47.8	52.0
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	26.01	18.86	18.46	18.28	19.18	71.76	100	33.85	300	300	300
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	72.54	53.98	56.93	55.03	56.46	62.98	11.20	93.58	1.5×10^3	8.5×10^3	37×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	50.75	46.92	47.64	47.23	49.27	70.60	110.30	74.0	980	5×10^3	83×10^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก77 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 7 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	18.52	12.87	13.30	13.14	13.91	18.01	90.11	130.35	432	16.35	20.30
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	36.90	21.50	20.03	19.90	20.90	26.20	878.5	630.85	1.3×10^3	25.34	420
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	95.45	55.20	58.4	60.04	61.57	65.12	90.17	72.50	25×10^3	85×10^3	85×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	84.69	52.93	54.3	53.87	55.48	59.95	380.5	80.95	6.7×10^3	65.13	72.5

ตารางที่ ก78 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 8 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	14.1	11.7	11.5	11.9	13.5	16.3	32.2	36.5	52.4	14.8	17.8
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	27.2	18.5	19.0	19.3	19.5	24.2	73.5	890.5	68.6	23.3	25.5
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	84.5	56.4	72.8	58.1	60.0	64.6	71.3	70.7	70.8	29×10^3	80×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	87.9	54.8	54.3	57.0	58.0	62.0	780	55×10^3	27×10^3	33×10^3	82×10^3

ตารางที่ ก79 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 9 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	13.98	12.15	11.57	11.73	13.51	17.65	6.70	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	29.20	23.90	23.24	22.92	23.39	26.50	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	60.23	47.74	59.04	48.74	50.20	54.33	30.14	85×10^3	85×10^3	85×10^3	85×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	68.70	55.11	49.64	56.34	58.49	61.84	70.10	85×10^3	85×10^3	85×10^3	85×10^3

ตารางที่ ก80 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 10 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	11.60	10.74	16.29	12.59	13.36	19.80	19.37	36.67	26.84	27.8	27.4
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	23.03	18.30	100.33	19.54	19.00	35.10	70.45	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	55.72	52.20	56.84	59.49	59.13	69.86	93.54	76.80	74.67	45.5	49.9
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	54.04	49.49	78.58	80.91	52.63	55.61	60.53	59.25	58.29	53.7	52.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก81 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 11 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	11.36	15.13	16.83	15.18	13.50	20.36	17.30	19.69	23.52	16.15	27.7
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	20.88	20.15	23.58	21.83	20.44	41.50	34.65	58.96	35.26	26.15	45×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	59.77	52.51	62.92	59.61	59.10	73.62	78.85	75.50	80.17	67.12	8.8×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	55.03	50.64	52.27	51.93	53.63	58.02	61.54	60.65	58.34	58.96	85×10^3

ตารางที่ ก82 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 12 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	10.46	9.56	15.34	16.05	16.77	23.35	25.40	33.22	25.67	27.7	28.1
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	22.10	18.60	19.5	43.4	52.0	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	42.34	39.30	48.17	44.82	73×10^3	80×10^3	82×10^3	83×10^3	83×10^3	83×10^3	83×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	53.61	50.23	52.11	51.42	53.57	54.8	60.66	83×10^3	83×10^3	83×10^3	83×10^3

ตารางที่ ก83 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 13 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	12.9	10.4	12.2	11.8	12.3	22.1	21×10^3	19×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	22.7	18.1	19.8	18.3	18.3	44.6	110×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	56.7	47.1	54.3	49.7	51.0	58.9	28×10^3	50×10^3	85×10^3	85×10^3	85×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	61.9	50.4	53.7	52.5	54.5	22×10^3	30×10^3	57×10^3	27×10^3	85×10^3	85×10^3

ตารางที่ ก84 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 14 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	12.44	11.05	93.57	12.81	13.26	21.02	48.44	13.64	34.46	17.37	25.3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	24.74	19.52	31.37	20.70	21.13	35.25	160.6	238.46	68.32	30.98	1×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	59.42	49.84	69.43	58.02	55.86	65.69	140.12	50×10^3	91.13	63.87	80×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	52.32	45.68	55.81	48.55	49.05	60.98	61.41	62.72	64.93	55.18	85×10^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก85 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 15 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	11.6	10.4	18.3	11.5	12.4	26.6	200.7	6.7×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	25.0	19.5	141.4	19.5	20.5	72.00	2.4×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	59.7	45.4	64.7	50.6	50.7	69.7	1.1×10^3	54×10^3	83×10^3	83×10^3	85×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	45.8	43.0	51.2	82×10^3	44.8	1.2×10^3	31×10^3	54×10^3	85×10^3	82×10^3	82×10^3

ตารางที่ ก86 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 16 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	11.20	10.17	130.55	11.39	12.26	29.90	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	25.61	20.53	953.2	22.83	21.21	80.7	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	52.10	49.29	120.95	56.22	54.99	67.59	29×10^3	83×10^3	83×10^3	83×10^3	83×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	70.39	58.57	2.4×10^3	61.71	62.39	7.6×10^3	13×10^3	85×10^3	85×10^3	85×10^3	85×10^3

ตารางที่ ก87 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 17 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	16.65	11.76	42.02	14.81	14.13	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	30.37	17.99	120.4	22.82	19.52	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	97.56	55.18	89.03	64.08	63.46	83.75	$27. \times 10^3$	82×10^3	82×10^3	82×10^3	82×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	80.77	53.41	61.40	58.12	57.17	2.8×10^3	6.9×10^3	83×10^3	83×10^3	83×10^3	83×10^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก88 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 18 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	12.4	10.7	45.1	11.8	13.0	22.2	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	26.8	22.5	60.3	23.40	23.5	36.5	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	55.8	47.4	54.4	51.6	53.6	78.8	82×10^3	85×10^3	85×10^3	85×10^3	85×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	52.9	43.6	46.2	44.7	46	1×10^3	30×10^3	85×10^3	85×10^3	85×10^3	85×10^3

ตารางที่ ก89 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 19 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	11.92	11.47	17.57	12.98	14.67	23.04	404.5	118.25	56.87	55.4	57.9
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	18.5	17.3	23.27	17.89	19.16	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	56.53	51.96	86.80	66.63	63.86	77×10^3	83×10^3	83×10^3	83×10^3	83×10^3	83×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	50.94	48.13	49.11	49.53	51.27	54.96	71.05	75.04	75.7	77.8	72.3

ตารางที่ ก90 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าการทดสอบครั้งที่ 2 ของแบบจำลองร่องสลีต 20 รอบย่อยการทดสอบ 4 วัน

รอบย่อย กระแสไฟฟ้า(μA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระหว่างขดลวดกับขดลวด	10.7	9.9	10.4	10.9	12.8	16.1	20.4	23.1	29.3	27.4	31.5
ระหว่างขดลวดกับกราวด์	20.8	17.8	16.9	17.7	18.3	23.7	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3	300×10^3
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดบน	43.1	38.0	42.2	42.9	77×10^3	54.3	108.5	54.5	55.6	62.4	280.0
ระหว่างรอบต่อรอบของ ขดลวดล่าง	47.2	44.1	45.1	45.4	47.4	50.2	52.5	51.3	50.7	115.0	360.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้า

เครื่องจักรกลไฟฟ้าขนาดเล็ก มีส่วนประกอบของระบบฉนวนที่สำคัญอยู่หลายส่วนด้วยกัน ซึ่งส่วนประกอบแต่ละส่วนนั้นจะมีการใช้วัสดุที่แตกต่างกันอยู่หลายชนิด ซึ่งจะทำให้มีค่าความทนทานต่อระดับชั้นความร้อนในทุกระดับชั้นความร้อน ซึ่งสามารถแยกส่วนประกอบของระบบฉนวนเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่สำคัญ คือ

- สารเอนาเมล
- กระดาษฉนวน
- ปลอกสายหรือท่อร้อยสาย
- วาร์นิช

ซึ่งมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

ข1 สารเอนาเมล

สารเอนาเมลเป็นสารที่ใช้เคลือบขดลวดทองแดงซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารจำพวกโพลีเมอร์ มีความสำคัญอย่างสูงสำหรับระบบฉนวนของเครื่องจักรกลไฟฟ้า เนื่องจากว่าหากสารเอนาเมลมีความอ่อนแอ หรือเกิดการเสื่อมสภาพก็อาจจะทำให้เครื่องจักรกลไฟฟ้านั้นเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด อันจะทำให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าใช้งาน ได้อย่างไม่เต็มประสิทธิภาพ ฉะนั้นในการเลือกใช้สารเอนาเมลที่เคลือบขดลวดทองแดงควรเลือกใช้งานที่เหมาะสมกับสารนั้น ๆ ตารางที่ ข1 แสดงคุณสมบัติของสารเอนาเมลชนิดต่าง ๆ

ตารางที่ ข1 คุณสมบัติของสารเอนาเมลชนิดต่างๆ

วัสดุสาร	ระดับชั้น (° C)	ข้อดี	ข้อจำกัด
เอนาเมลพื้นฐาน [Plain Enamel (oreoresinous)]	105	- ราคาถูก - เป็นฟิล์มที่มีความต่อเนื่องดี - ด้านทานการตัดผ่านดี - ด้านทานโหลดเกินดี - ง่ายต่อผลทางกลและรอยฉีกทางเคมี - Tight dimensional tolerance	- ด้านทานการสึกกร่อนต่ำ - ไม่เหมาะกับการพันลวดหนัก - มีขอบเขตของความสอดคล้องกับวาร์นิชอื่น ๆ
โพลีไวนิลฟอรัลเรซินแบบประยุกต์ (Modified polyvinyl formal resin)	105	- สามารถหมุนได้อย่างดี - มีพิสัยความเหนียวสูง - สามารถเข้ากับวาร์นิชส่วนใหญ่, แวกซ์, และ imprenating compound - เหมาะสำหรับใช้กับหม้อแปลงน้ำมัน - มีคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่ดี	- ต้องทำให้เกิดรอยก่อนการเชื่อมประสาน - จะเกิดความผิดปกติเมื่อถูกใช้กับสารละลายวาร์นิชโดยที่ยังไม่ได้คลายความเค้นก่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข1 (ต่อ) คุณสมบัติของสารเอนาเมลชนิดต่างๆ

วัสดุสาร	ระดับชั้น (°C)	ข้อดี	ข้อจำกัด
โพลียูรีเทน (polyurethane)	105,130,155	- สามารถเชื่อมประสานได้ที่ 360-425 °C (ฟิล์มกลายเป็นไอ) - self fluxing - มีคุณลักษณะ Q ที่ดีเยี่ยมที่ความถี่และความชื้นสูง - เป็นฟิล์มที่มีความเหนียวและยืดหยุ่น - สามารถทำงานที่ 105 °C ได้อย่างต่อเนื่องสูงที่สุดใน ระดับชั้น A ถ้าเป็นระบบใหม่สามารถใช้ได้ที่ ระดับชั้น B,F	- ไม่เหมาะกับการใช้เมื่อเกิดภาวะโหลดเกินรุนแรง - มีความต้านทานการสึกกร่อนได้น้อยกว่า Formvar or nylon jacketed wire - มีความไวต่อการทำให้เน็มจนเป็นสารละลาย - เสถียรภาพทางการแผ่รังสีต่ำ
อีพอกซี	130	- ใช้กับหม้อแปลงที่มีลักษณะเปียก - มีความเหนียวและยืดหยุ่นดี - ต้านทานทางเคมีและทางความชื้นดี - ต้านทานการเกิดโคโรนาดี	- ต้องทำให้เป็นรอยก่อนการเชื่อมประสาน
โพลีเอสเตอร์ ที่สามารถเชื่อมได้ (Solderable polyester)	155	- สามารถเชื่อมได้ที่ 482 °C - ทนทานอุณหภูมิ 175 °C ได้นาน - ต้านทาน heat shock ดี - คุณลักษณะ โอเวอร์โหลตดีสำหรับสายที่เชื่อมได้ - เสถียรภาพทางการแผ่รังสีดี	- ไม่ใช่สำหรับหม้อแปลงน้ำมัน - ไม่ใช่สำหรับระบบที่มีการใช้แคตาไลซ์ชนิดเอโมไน์
ไนลอน โพลีเอสเตอร์ ที่สามารถเชื่อมได้ (Solderable nylon polyester)	155	- สามารถเชื่อมได้ที่ 482 °C - สามารถหมุนได้ดีกว่า unjacketed grade - ต้านทาน heat shock และ solvent shock ดี	- ไม่ใช่สำหรับหม้อแปลงน้ำมัน - ไม่ใช่สำหรับระบบที่มีการใช้แคตาไลซ์ชนิดเอโมไน์ - ไม่ต้านทานความชื้นที่ unjacketed grade
โพลีเอสเตอร์ที่มี ไนลอน โอเวอร์โค้ท (polyester with nylon overcoated)	155 ,180	- สามารถหมุนได้ดีเยี่ยม - ต้านทาน heat shock และ solvent shock ดี - สามารถยืดหยุ่น กันรอยขีดข่วนและฟิล์มมีลักษณะเหนียว ดีเยี่ยม - คุณลักษณะ โอเวอร์โหลตดีสำหรับสายที่เชื่อมได้	- ต้องทำให้เป็นรอยก่อนการเชื่อมประสาน - ไม่ใช่กับอุปกรณ์ที่มีการปิดคลุม - เสถียรภาพทางการแผ่รังสีต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข1 (ต่อ) คุณสมบัติของสารเอนาเมลชนิดต่างๆ

วัสดุสาร	ระดับชั้น (°C)	ข้อดี	ข้อจำกัด
ไอโซเนลโพลีเอสเตอร์ที่มีโพลีไอไมด์โอเวอร์โค้ท (Isonel * polyester with polyimide overcoat)	200	<ul style="list-style-type: none"> - คุณสมบัติทางกายภาพและไฟฟ้าส่วนใหญ่เหมือนฟอร์มวา(Formvar) - ด้านทานการตัดผ่านดีเยี่ยม - ด้านทานกับฟร็อน(Freon)ดีเยี่ยม - ด้านทานการทำลายสายดี - เข้ากับวารินิซและ impregnated compound ส่วนใหญ่ 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องทำให้เป็นรอยก่อนการเชื่อมประสาน - ไม่ใช่สำหรับหม้อแปลงน้ำมัน - ไม่ใช่ในระบบที่ประกอบด้วยคลอรีนคอมปาวด์(chlorine compound) - ไม่ใช่สำหรับระบบที่มีการใช้แคทาไลซ์ชนิดเอไมน์
โพลีเอสเตอร์/โพลีเอไมด์-ไอไมด์ (polyester/polyamide-imide)	200,220	<ul style="list-style-type: none"> - โพลีเอสเตอร์ส่วนใหญ่จะใช้เอไมด์-ไอไมด์โค้ทบนสุด - หมุนได้ดี - ด้านทาน heat shock และ solvent shock ดีกว่าโพลีเอสเตอร์พื้นฐาน - ด้านทานการตัดผ่านและรอยขีดข่วนดีกว่าโพลีเอสเตอร์ทั่วไป - ด้านทานฟร็อนและการทำลายสูง - เหมาะสำหรับใช้ในมอเตอร์ที่ปิดสนิท 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องทำให้เป็นรอยก่อนการเชื่อมประสาน - ไม่ใช้กับอุปกรณ์ที่มีการปิดคลุมที่มีความชื้นและคลอรีนคอมปาวด์อยู่
โพลีเอสเตอร์เอไมด์-ไอไมด์ (polyesteramide-imide)	200	<ul style="list-style-type: none"> - โค้ทด้วยฟิล์มเดี่ยว - คุณสมบัติของโอเวอร์โพลดีเยี่ยม - เข้ากับอีพ็อกซีหล่อและสารหุ้มคอมปาวด์ - เข้ากับวารินิซและ impregnated compound ส่วนใหญ่ - ทนทานความร้อนที่ 180-210 °C ได้นาน - ใช้สำหรับหม้อแปลงน้ำมัน - ทนทานต่อระบบการพันขลวดที่มีความเร็ว 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องทำให้เป็นรอยก่อนการเชื่อมประสาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข1 (ต่อ) คุณสมบัติของสารเอนาเมลชนิดต่างๆ

วัสดุสาร	ระดับชั้น (°C)	ข้อดี	ข้อจำกัด
ไอโซมิด โพลีเอสเตอร์ โพลีไอไมด์ (isomid* polyester polyimide)	180,200	<ul style="list-style-type: none"> - ใ้ติดตั้งด้วยฟิล์มเดียว - คุณสมบัติ การตัดผ่าน การยึดหยุ่น และความเหนียวดีเยี่ยม - คุณสมบัติทางความชื้นและแห้งของ ไดอิเล็กตริกดีเยี่ยม - ด้านทานได้สูงต่อฟร็อนและตัวทำละลาย - พัฒนาการด้านทาน Heat shock ได้ดี ขึ้น - เข้ากันได้กับวารันิชและ impregnate compound ส่วนใหญ่ 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องทำให้เป็นรอยก่อนการเชื่อมประสาน
ไพล์-เอ็มแอลโพลีไอ ไมด์ (Pyre-ML** polyimide)	220(240 pe MW 1000)	<ul style="list-style-type: none"> - ใ้ติดตั้งด้วยฟิล์มเดียว - ยังคงคุณสมบัติทางไดอิเล็กตริกสูงเมื่อทำงานที่ 220 °C - ด้านทาน Heat shock และ เสถียรภาพทางความร้อนของทุกฉนวนได้สูงสุด - ด้านทานการแผ่รังสีได้สูงสุด - มีความคงทนทางไดอิเล็กตริกและคุณสมบัติการสูญเสียต่ำสูง - เข้ากันได้กับวารันิชและ impregnate compound ส่วนใหญ่ - อาจใช้สำหรับมอเตอร์ระบบปิดและหม้อแปลงน้ำมัน - ด้านทานการทำละลายและปฏิกิริยาเคมีได้ดี - พิกัดโอเวอร์โวลตสูงสุด 	<ul style="list-style-type: none"> - ยากต่อการทำให้เป็นรอยก่อนการเชื่อมประสาน - เป็นตัวไฮโดรไลซ์หรือระบบที่มีการปิดประกอบด้วยความชื้น - จะถูกตัวทำลายถ้าความเค้นไม่ถูกผ่อนคลาย - ราคาของฟิล์ม ใ้ติดตั้งสูงสุด

ซึ่งสารเอนาเมลแต่ละชนิดข้างต้นสามารถนำไปใช้งานในลักษณะที่ต่าง ๆ กัน คือ

- เพลน เอนาเมล (Plain Enamel) สำหรับระดับชั้นทางความร้อน A ใช้ในงานทั่วไปของ หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก โทรศัพท ขดลวดโซลินอยด์ และ เครื่องจุดไฟอัตโนมัติ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โพลีไวนิล ฟอร์มัล (Polyvinyl Formal) สำหรับระดับชั้นทางความร้อน A ใช้งานอย่างกว้างขวางใน ขดลวดสเตเตอร์ที่มีการพันแบบไวร์วาวด์ ขดลวดอาร์มาเจอร์ในมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และในหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดแห้งและชนิดน้ำมัน

- โพลียูรีเทน (Polyurethane) สำหรับระดับชั้นทางความร้อน A B F สามารถมีในลอนหรือไม่มีในลอนหุ้มอยู่ก็ได้ ซึ่งจะนิยมใช้ในบริเวณที่ต้องมีการเชื่อมประสาน และมี คุณลักษณะ 'Q' ดีเยี่ยมซึ่งจะทำให้เป็นตัวเลือกแรกที่ใช้ในงานที่ประยุกต์กับงานอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถแบ่งชนิดและระดับชั้น ได้ดังตารางที่ ข2

ตารางที่ ข2 ระดับชั้นทางความร้อนฉนวนสำหรับสารโพลียูรีเทน

โครงสร้างขดลวด	ระดับชั้นทางความร้อน
กลม	A (MW1000 2 *)
กลม	F (MW1000 79)
กลม (สามารถเชื่อมประสานได้)	B
สามารถผูกติดได้ (bondable butyral overcoat)	A
สามารถผูกติดได้ (bondable polyurethane nylon butyral)	B
ไนลอนโอเวอร์โค้ท	
14-24 AWG	B
25-46 AWG	F

* NEMA Standard

- ไนลอน (Nylon) สำหรับระดับชั้นทางความร้อน A B F เหมาะสำหรับการนำไปใช้สำหรับฉนวนที่มีความต้องการคุณลักษณะทางกายภาพและทางกลที่ดี เช่น ในอุปกรณ์ที่มีการหมุนหรือขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งสามารถแบ่งชนิดและระดับชั้น ได้ดังตารางที่ ข3

ตารางที่ ข3 ระดับชั้นทางความร้อนฉนวนสำหรับสารไนลอน

สารพื้นฐาน	ระดับชั้นทางความร้อน
โพลีไวนิลฟอร์มัล	A
อะคริลิกเชื่อมประสานได้	A
โพลียูรีเทน	B
โพลีเอสเตอร์	F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อีพอกซี (Epoxy) สำหรับระดับชั้นทางความร้อน B เป็นสารที่นิยมใช้สำหรับ หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดเปียก เพราะสามารถต้านทาน ของเหลวอัสคาเรล (Askarel) ได้ดี

- โพลีเอสเตอร์ (Polyester) สำหรับระดับชั้นทางความร้อน F H 200 เป็นสารที่นิยมใช้ร่วมกับสารชนิดอื่น ๆ ยกเว้น โพลีไอไมด์ เหมาะที่จะใช้งานที่อุณหภูมิสูง สามารถแบ่งชนิดและระดับชั้นได้ดังตารางที่ ข4

ตารางที่ ข4 ระดับชั้นทางความร้อนฉนวนสำหรับสารโพลีเอสเตอร์

โครงสร้างขดลวด	ระดับชั้นทางความร้อน
โพลีเอสเตอร์ไอไมด์สามารถเชื่อมประสานได้	F MW1000 26 H MW1000 77
โพลีเอสเตอร์ไอไมด์สามารถเชื่อมประสานได้มีไนลอนโอเวอร์โค้ท	F MW1000 27 H MW1000 78
โพลีเอสเตอร์ โพลีเอสเตอร์ไอไมด์	H MW1000 30 200 MW1000 74
โพลีเอสเตอร์มีไนลอนโอเวอร์โค้ท	F MW1000 24 H MW1000 76
โพลีเอสเตอร์มีเอไมด์ไอไมด์โอเวอร์โค้ท	200 MW1000 35,73
โพลีเอสเตอร์มีเอไมด์ไอไมด์โอเวอร์โค้ท (bondable over coat)	180/200

- โพลีเอไมด์ไอไมด์ (Polyamide imide) สำหรับระดับชั้นทางความร้อน 200 220 เหมาะที่จะใช้งานสำหรับมอเตอร์ที่มีการปิดสนิท และสำหรับด้านทานสารฟร็อนหรือสารละลายไอโซเวนท์ส่วนใหญ่ ใช้สำหรับต้องการคุณลักษณะอุณหภูมิและทางกลที่ดี

- โพลีเอสเตอร์ไอไมด์ (Polyester imide) สำหรับระดับชั้นทางความร้อน H 200 เหมาะสำหรับใช้งานทางไฟฟ้าและทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการใช้งานที่อุณหภูมิสูงถึงแม้จะไม่เท่าโพลีไอไมด์ (220 °C) แต่ราคาจะถูกกว่า

- โพลีไอไมด์ (Polyimide) สำหรับระดับชั้นทางความร้อน 220 ซึ่งเป็นสารที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดในหมู่ของสารเอนาเมต ซึ่งมีคุณสมบัติ ทางเคมี การต้านทานการแผ่รังสี การทนทานการตัดสูงสุด ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้งานในสถานที่ที่มีสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม แต่ราคาจะแพง ซึ่งจะนิยมใช้ในอุปกรณ์ที่มีลักษณะปิดซึ่งไม่มีชุดดักจับความชื้น การใช้งานในอุปกรณ์ที่มีการหมุนที่ต้องการอุณหภูมิสูง การใช้งานที่เกี่ยวข้องกับการบิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข2 กระดาษฉนวนและฟิล์มฉนวน

กระดาษฉนวนและฟิล์มฉนวนในเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้นมีหน้าที่เพื่อป้องกันการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับขดลวดทั้งที่อยู่ในร่องสลีตเดียวกันและที่ไม่ได้อยู่ในร่องสลีตเดียวกัน และป้องกันการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับเฟรมของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเอง ฉะนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องรู้ถึงคุณภาพของกระดาษฉนวนเพื่อไปใช้ให้ถูกต้อง ซึ่งสามารถแบ่งชนิดต่าง ๆ ของกระดาษฉนวนได้ดังนี้

- กระดาษและฟิล์มเซลลูโลส (Cellulose paper and film)

กระดาษเซลลูโลสมีโครงสร้างพื้นฐานที่มาจากวัสดุหลายชนิด เช่น ฝ้าย เยื่อไม้ ป่าน ปอ ปอกระเจา ชานอ้อย หญ้าแห้ง กก และไม้ไผ่

คุณสมบัติ

กระดาษเซลลูโลสทั่วไปจะมีค่าความคงทนทางไดอิเล็กตริกมากกว่าอากาศเพียงเล็กน้อย ค่าความสูญเสียทางไดอิเล็กตริกจะเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากหากมีการเพิ่มความถี่ ค่าความคงทนทางกลต่ำซึ่งบางที่อาจจะต่ำที่สุด และมีความสัมพันธ์กับความชื้นสูง อย่างไรก็ตามหากกระดาษเซลลูโลสได้มีการรวมกับวัสดุฉนวนอื่น ๆ ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง เช่น หากมีการรวมกับวาร์นิชก็จะใช้กับอุปกรณ์แรงดันไฟฟ้าต่ำได้ หรือหากมีการรวมกับฉนวนเหลวก็สามารถใช้งานในแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นได้ ซึ่งกระดาษเซลลูโลสโดยทั่วไปนั้นจะมีค่าระดับชั้นทางความร้อน A แต่สามารถงานรวมกับวัสดุฉนวนอื่น ๆ เช่น เรซิน ไมกา และวัสดุฉนวนที่ได้กล่าวมาข้างต้น เป็นต้น

การใช้งาน

การใช้งานทั่วไปเพื่อสำหรับปกปิดสายและเคเบิล และเป็นฉนวนร่องสลีตของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนและหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อป้องกันอันตรายที่มีต่อขดลวด

- กระดาษเส้นใยยาง (Vulcanised Fibre or Fish paper)

กระดาษเส้นใยยางนั้นมีพื้นฐานทางวัสดุมาจากการอิมตัวของเยื่อไม้ ซึ่งมีความทนทานต่อการช็อคสูง และมีความแข็งแรงสูง

คุณสมบัติ

- มีความยืดหยุ่นและมีความแข็งแรงสูง
- มีการต้านทานและลดระดับการอาร์คที่ดี
- น้ำหนักเบา

- ข้อเสียของกระดาษเส้นใยยางคือสามารถดูดซับความชื้นได้ดี เช่น หากมีกระดาษเส้นใยขนาดความหนา 1/16 นิ้ว ก็จะเพิ่มน้ำหนักถึง 30-50 % เมื่ออยู่ในน้ำ 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ระดับชั้นทางความร้อน A

การใช้งาน

การใช้งานทั่วไปของกระดาษเส้นใยขางนั้นคือต้องการการใช้งานที่มีความแข็งแรงทางกลสูง และเป็นส่วนที่ไม่มีปัญหาทางความชื้น เช่น แอร์เซอร์กิตเบรคเกอร์ เครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนทั่วไป อุปกรณ์สวิทช์ และไลท์นิ่งอะเรสเตอร์ (Lightning arrester) สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าไฟฟ้าขนาดใหญ่

- กระดาษอะรามิด (Aramid paper)

กระดาษอะรามิดเป็นกระดาษที่มีพื้นฐานมาจากกระดาษโพลีไอมิด ซึ่งรู้จักกันในชื่อของ Nomex ซึ่งมีระดับชั้นทางความร้อน F ถึง 220

คุณสมบัติ

กระดาษอะรามิดสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ถึง 220 °C แต่ในทางการค้าหากมีการรวมกับ โพลีเอสเตอร์ก็จะทำให้มีการสูญเสียคุณสมบัติข้อนี้ไปจนอาจจะเหลือการใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำเพียง 180 °C มีความทนทาน และมีความแข็งแรงทางกลดีเยี่ยม และมีความต้านทานต่อกรด ต่าง คีโตน แอลกอฮอล์ น้ำมัน น้ำเย็น ได้ดี และสามารถเข้ากันได้ดีกับเอนาเมล และวาร์นิช แต่จะมีความไวต่อความชื้น

การใช้งาน

การใช้งานทั่วไปคือในเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนซึ่งจะใช้ในสลีต เฟส ขดลวด และจุดสิ้นสุดของฉนวน และในหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับแต่ละรอบ แต่ละแท็บ และแต่ละเลเยอร์

- กระดาษไมกา (Mica paper)

กระดาษไมกาเป็นกระดาษที่ทำมาจากวัสดุไมกาโดยเฉพาะแต่จะมีค่าระดับชั้นทางความร้อนแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำไปใช้ร่วม เช่น

ระดับชั้นทางความร้อน B จะรวมกับเรซินหรือวาร์นิชอินทรีย์

ระดับชั้นทางความร้อน F จะรวมกับอีพอกซีหรือโพลีเอสเตอร์

ระดับชั้นทางความร้อน H จะรวมกับเรซินหรือวาร์นิชซิลิโคน

คุณสมบัติ

มีความต้านทานการอาร์คและการเกิดโคโรนาได้ดี สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ แต่มีปัญหาคืออาจต้องใช้งานร่วมกับวัสดุฉนวนอื่น ๆ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติอื่น ๆ

การใช้งาน

ใช้สำหรับปกปิดส่วนของขดลวดหรือเคเบิลในส่วนที่ต้องการความอ่อนตัวและมีการใช้งานที่อุณหภูมิสูง

- ฟลูออโรโพลิเมอร์ฟิล์ม (Fluoropolymer film)

ฟลูออโรโพลิเมอร์เป็นตระกูลที่มีราคาสูง ซึ่งมีย่านการใช้งานที่อุณหภูมิต่าง ๆ กว้างมีคุณสมบัติทางไดอิเล็กตริกและการต้านทานทางเคมีที่ดีเยี่ยม ซึ่งจะใช้ก็ต่อเมื่อไม่อยู่ในขอบเขตความสามารถของฟิล์มชนิดอื่น ซึ่งมีคุณสมบัติต่าง ๆ ดังตารางที่ ข 5

ตารางที่ ข5 คุณสมบัติของฟลูออโรโพลิเมอร์ฟิล์ม

ฟลูออโรโพลิเมอร์	ข้อดี	ข้อเสีย
โพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetra fluoro ethylene ,PTFE)	<ul style="list-style-type: none"> - ย่านการใช้งานกว้างที่สุดของพลาสติกคือ -267-260 °C - ไม่มีผลกับทางเคมีทั้งหมด - ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกไม่มีความสัมพันธ์ที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา ความถี่หรืออุณหภูมิ - ทนทานต่อการอาร์ค"คายไม่เกิดการเป็นถ่าน - ค่าดัชนีของออกซิเจนมากกว่า 95% 	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่สามารถหลอมละลายได้ - มีความต้านทานต่อโคโรนาและการแผ่รังสีต่ำ
เพอร์ฟลูออโรอัลคอกซี (Perfluoroalkoxy,PFA)	<ul style="list-style-type: none"> - คุณสมบัติไดอิเล็กตริก คุณสมบัติทางกล ทางความร้อน และทางเคมีเท่ากับ PTFE - มีคุณสมบัติทางกลที่ดีกว่า FEP เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิมากกว่า 150 °C 	<ul style="list-style-type: none"> - การต้านทานการสึกกร่อนต่ำ - ราคาแพงกว่า PTFE
ฟลูออรีเนทเฮทิลีนโพรพิลีนโคโพลิเมอร์(Fluorinated ethylene propylene copolymer ,FEP)	<ul style="list-style-type: none"> - คุณสมบัติไดอิเล็กตริก คุณสมบัติทางกล และทางเคมี เท่ากับ PTFE และ PFA - ย่านการใช้งานอุณหภูมิ -73 ถึง 205 °C - ค่าดัชนีของออกซิเจนมากกว่า 95% 	<ul style="list-style-type: none"> - ย่านการใช้งานอุณหภูมิต่ำกว่า PTFE และ PFA - มีความเหนียวน้อยกว่า PTFE - ราคาอยู่ระหว่าง PFA และ PTFE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข5 (ต่อ) คุณสมบัติของฟลูออโรโพลีเมอร์ฟิล์ม

ฟลูออโรโพลีเมอร์	ข้อดี	ข้อเสีย
เอธิลีนเตตระฟลูออโรเอธิลีน (Ethylene tetra fluoro ethylene,ETFE)	- คุณสมบัติทางกลดีว่าสารฟลูออโรชนิดอื่น ยกเว้น PCTFE	- คุณสมบัติทางไดอิเล็กตริกน้อยกว่า PTFE PFA FEP - อุณหภูมิการใช้งานสูงสุดต่ำกว่า PTFE PFA FEP ECTFE - ค่าดัชนีของออกซิเจน 28-32 % - ราคาใกล้เคียงกับ PFA
โพลีไวนิลไอดีฟลูออไรด์ (Polyvinylidene fluoride,PVDF)	- สามารถทำละลายได้กับสารเอสเทอร์อินทรีย์แลคโตน - ด้านทานการสึกกร่อนได้ดี - ด้านทานการแผ่รังสียูวีและนิวเคลียร์ได้ - ราคาต่ำที่สุดในกลุ่มสารฟลูออโร - ค่าดัชนีของออกซิเจน 44 %	- ค่าคงที่ทางไดอิเล็กตริกสูงสุดในกลุ่มสารฟลูออโร - มีความต้านทานทางเคมีต่ำสุด - อุณหภูมิใช้งานแคบสุดคือ -62 ถึง 150 °C
เอธิลีนคลอโรไตรฟลูออโรเอธิลีนโคโพลีเมอร์(Ethylene chlorotrifluoro ethylene copolymer ,ECTFE)	- มีความแข็งแรงต่อการสึกกร่อนได้ดีที่สุดในกลุ่มสารฟลูออโร - คุณสมบัติทางไดอิเล็กตริกที่ดี - ค่าดัชนีของออกซิเจน 60% - น้ำหนักต่ำสุดในกลุ่มสารฟลูออโร - ด้านทานการซึมน้ำได้ดี	- ราคาประมาณ FEP - ถูกทำลายโดยเอมีนได้
โพลีคลอโรไตรฟลูออโรเอธิลีน (Polychlorotrifluoroethylene,PC TFE)	- ด้านทานออกซิเจน โอโซน กรด ก๊าซออกซิเดชั่น ดีเยี่ยม - ป้องกันก๊าซและของเหลวดีเยี่ยม - ด้านทานการสึกกร่อนและมีคุณสมบัติทางไดอิเล็กตริกดี	- ต้องใช้งานที่อุณหภูมิที่แม่นยำเพื่อป้องกันการเสื่อมถอย - ถูกทำลายโดยตัวทำละลายฮาโลเจน - ราคาสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งาน

สารฟลูออโรโพลีเมอร์นี้นิยมใช้ เพื่อการคลุมฉนวนที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูงสำหรับขดลวด และเคเบิล เป็นฉนวนของฉนวนขดลวดมอเตอร์ เฟสและกราวด์มอเตอร์ ฉนวนของคาปาซิเตอร์ เป็นต้น

- โพลีไอมิด์ฟิล์ม (Polyimide film)

โพลีไอมิด์อยู่ในกลุ่มของไอมิด์โพลีเมอร์ เป็นสารที่มีคุณสมบัติทางความร้อนดีที่สุดในกลุ่มของสารอินทรีย์ ซึ่งมีคุณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

คุณสมบัติ

หลอมเหลวยากเนื่องจากมีย่านการใช้งานสูง คือ -269 ถึง 350 ° C และสามารถใช้งานได้ อย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 240 ° C คุณสมบัติทางกายภาพสูง คุณสมบัติทางไดอิเล็กตริกดี ถึงแม้ว่าค่า ความคงทนทางไดอิเล็กตริกจะลดต่ำลงเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ มีความต้านทานรั่วสีและแสงยูวีได้ดีเยี่ยม อย่างไรก็ตามโพลีไอมิด์มีข้อเสียที่เปราะบางต่อค้างแต่จะแข็งแรงต่อกรดอินทรีย์ มีอัตราการดูดซับความชื้นได้ดีที่สุดในกลุ่มของไดอิเล็กตริกฟิล์ม

การใช้งาน

เนื่องจากมีราคาสูงจะนั้นจะนำไปใช้สำหรับอุปกรณ์ที่มีราคาแพง เช่น มอเตอร์ที่ต้องการ กำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้น ต้องการฉนวนที่หนาขึ้นโดยที่ไม่มีการเพิ่มขนาดของเฟรม หรือการใช้งานกับ อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับอากาศยาน ใช้ในสายหรือเคเบิลที่ต้องการสมรรถนะสูงที่ต้องการประหยัด น้ำหนักและพื้นที่ หรือใช้เป็นฉนวนในคาปาซิเตอร์ เป็นต้น

- โพลีคาร์บอเนตฟิล์ม (Polycarbonate film)

คุณสมบัติ

โพลีคาร์บอเนตมีคุณสมบัติการอ่อนตัวที่ดี ด้านทานความร้อน มีเสถียรภาพในรูปร่าง ค่าคงที่ทางไดอิเล็กตริกไม่ขึ้นกับ อุณหภูมิหรือความถี่เมื่อใช้งานในย่าน -60 ถึง 120 ° C สามารถการ ถูกทำลายโดยน้ำมัน ไขมัน หรือกรดเจือจางได้ แต่จะมีผลกับด่าง คีโตน เอมีน เอสเตอร์ และสาร ไฮโดรคาร์บอน

การใช้งาน

นิยมนำไปใช้ในคาปาซิเตอร์ ฉนวนขดลวด ฉนวนร่องสล็อต ฉนวนของตัวนำ เป็นต้น

- โพลีเอสเตอร์ฟิล์ม (Polyester film)

โพลีเอสเตอร์เป็นฟิล์มที่มีความคงทนแข็งแรง เหมาะสำหรับการใช้งานในระบบอุตสาหกรรมและการบรรจุ มีคุณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

คุณสมบัติ

มีคุณสมบัติทางไดอิเล็กตริกและคุณสมบัติทางเคมีในระดับทั่วไป เหมาะสำหรับย่านการใช้งานที่อุณหภูมิ -20 ถึง 150 °C มีความแข็งแรงทางกลดีเยี่ยม อย่างไรก็ตามจะมีการต้านทานรังสียูวีได้ต่ำ ภายใต้สภาวะความชื้นและอุณหภูมิสูงฟิล์มมีความแนวโน้มที่จะเกิดปรากฏการณ์ไฮโดรไลซ์ (hydrolyze) โดยส่วนใหญ่แล้วจะนิยมใช้ในระดับนชั้นทางความร้อน B

การใช้งาน

การใช้งานทั่วไปของโพลีเอสเตอร์นิยมใช้ในบอร์ดวงจร การใช้งานสำหรับปกปิดสายและเคเบิล เป็นสล็อตเวดจ์ (slot wedge) และฉนวนระหว่างเฟสในมอเตอร์ เป็นตัวป้องกันในแต่ละเลเยอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้า ฉนวนในคาปาซิเตอร์ เป็นต้น

- กรดโพลีพาราบานิก (Polyparabanic Acid)

คุณสมบัติ

กรดโพลีพาราบานิกนี้มีคุณสมบัติทางไดอิเล็กตริกที่ดี และเหมาะสมสำหรับการใช้งานในย่าน -200 ถึง 170 °C สามารถต้านทานคลอรีนไฮโดรคาร์บอน (chlorinated hydrocarbon) แอลกอฮอล์ อีเธอร์ และกรดอื่น ๆ แต่จะมีผลอย่างมากกับเบส

การใช้งาน

กรดโพลีพาราบานิกนี้นิยมใช้ในการทำสายและเคเบิล ฉนวนของมอเตอร์ แผงวงจรที่มีการอ่อนตัว และเคเบิลชนิดแบนที่มีการอ่อนตัว

- โพลีโพรพิลีน (polypropylene)

โพลีโพรพิลีนเป็นฟิล์มที่มีราคาถูกซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางไดอิเล็กตริกที่เพียงพอต่องานทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป

คุณสมบัติ

โพลีโพรพิลีนฟิล์มที่มีการจัดเรียงแล้วนั้นจะมีความคงทนทางไดอิเล็กตริกดี มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและดิสซิเพชันแฟกเตอร์ (dissipation factor) ที่ต่ำและคงที่เมื่อใช้งานในย่านความถี่ที่กว้าง มีความต้านทานในการป้องกันภาระเกินในกรณีแรงดันไฟฟ้าลัดวงจรได้ดี มีความต้านทานความชื้นน้ำมัน ไขมันสัตว์ ที่ดีเยี่ยม

การใช้งาน

การใช้งานหลักของโพลีโพรพิลีนคือเป็นฉนวนในคาปาซิเตอร์ การใช้งานในเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนและหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไป

ซัลฟอนโพลีเมอร์ (Sulfone Polymers)

ซัลฟอนโพลีเมอร์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดด้วยกัน คือ โพลีซัลฟอน และ โพลีอีเธอร์ซัลฟอน

โพลีซัลฟอน (Polysulfone) มีคุณสมบัติที่ดีเยี่ยมในการต้านทานการแผ่รังสี มีการต้านทานที่ดี ในกรดแร่ ต่าง สารละลายเกลือ แอลกอฮอล์ น้ำมัน และไขมันสัตว์ แต่จะมีผลกับ คลอรีเนทไฮโดรคาร์บอน เอสเตอร์ ดีโตน และอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (aromatic hydrocarbon) คุณสมบัติทางความร้อน ทางกล และการติดไฟมีค่าต่ำ นิยมใช้กันในแผงวงจรที่มีความอ่อนตัวและชนิดแข็งหรือการใช้งานในคาปาซิเตอร์ เป็นต้น

โพลีอีเธอร์ซัลฟอน มีคุณสมบัติทางไดอิเล็กตริกและทางกลที่ดีเมื่อใช้งานได้ถึงอุณหภูมิ 180 ° C แต่ค่าทางไดอิเล็กตริกบางค่าจะมีค่าต่ำกว่าโพลีซัลฟอน แต่ค่าทางความร้อน ทางกล และการติดไฟที่สูงกว่า ความต้านทานทางเคมีใกล้เคียงกับโพลีซัลฟอน ซึ่งนิยมใช้งานในแผงวงจรที่มีราคาสูง เคเบิลชนิดแบน และไอซี เป็นต้น

ก3 ท่อร้อยสาย (Sleeving)

ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าท่อร้อยสายมีความจำเป็นในส่วนที่ขดลวดไม่ได้รับการป้องกันการลัดวงจรจากกระดาดฉนวน เช่น บริเวณปลายขดลวดที่ต่อออกมาที่จุดต่อสาย ซึ่งระดับชั้นทางความร้อนของท่อร้อยสายจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ในการโค้ท ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

- โอลีโอรินวารนิช (Oleoresinous varnish) และ โพลีไวนิลครอไรด์ (Polyvinylchloride) ราคาถูก มีความอ่อนตัวและต้านทานต่อน้ำมันร้อนได้ดี แต่มีขอบเขตของอุณหภูมิใช้งานต่ำ คือระดับชั้นทางความร้อน A

- โพลียูรีเทน (Polyurethane) มีความเหนียวสูง และไม่มีผลกับน้ำมันร้อน สามารถใช้งานได้ ที่ระดับชั้นทางความร้อน B

- อะคริลิก (Acrylic) มีความต้านทานต่อกรด สารละลายอินทรีย์ น้ำได้ดี มีความเหนียว และสามารถเข้ากันได้กับเอนาเมล สามารถใช้งานได้ถึงระดับชั้นทางความร้อน F

- ยางซิลิโคน (Silicone rubber) มีความอ่อนตัวดี และคุณลักษณะในการเร่งอายุที่ดีเยี่ยม สามารถใช้งานได้ถึงระดับชั้นทางความร้อน 200

- ซิลิโคนเรซิน (Siliconeresin) และโพลีเตตระฟลูออโรเอธิลีนเรซิน (Polytetrafluoroethylene resin) ราคาแพงเหมาะสำหรับใช้งานที่อุณหภูมิสูง

ก4 วาร์นิชเรซิน (Varnish resin)

วาร์นิชเรซินที่ใช้ในเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้นเพื่อให้ระบบฉนวนที่ใช้มีการยึดเกาะกันอย่างดีขึ้นเพื่อให้มีความแข็งแรงทางกลที่ดีขึ้นซึ่งสามารถแบ่งชนิดของวาร์นิชเรซินได้ดังนี้

- โพลีเอสเตอร์ (Polyester)

โพลีเอสเตอร์ในการผลิตวาร์นิชมี 2 ชนิดด้วยกัน คือ อัลคไคด์โพลีเอสเตอร์ (Alkyd Polyester) และโพลีเอสเตอร์ที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Polyester) ซึ่งอัลคไคด์โพลีเอสเตอร์มีคุณสมบัติทางไดอิเล็กตริกดีเยี่ยม มีความแข็งแรงทางกลและมีความต้านทานทางเคมีที่ดีและมีคุณสมบัติทางความร้อนดังตารางที่ ก และอัลคไคด์โพลีเอสเตอร์นิยมใช้ทั่วไปในการโค้ทสำหรับอุปกรณ์ทางไฟฟ้าเช่นเครื่องจักรกลไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีการใช้งานที่อุณหภูมิถึง 180 °C -215 °C

โพลีเอสเตอร์ที่ไม่อิ่มตัวเหมาะสำหรับการทำให้อิ่มตัวในสูญญากาศ (Vacuum pressure impregnation ,VPI) มีความเป็นไดอิเล็กตริก ความแข็งแรงทางกลและการต้านทานทางเคมีที่เพียงพอสำหรับงานทั่วไป และมีการต้านทานต่อความชื้นและไม่ดูดซับน้ำ และสามารถลดผลของการเกิดโคโรนาเนื่องจากจะเกิดช่องอากาศน้อยในระหว่างการรอให้แห้ง ซึ่งมีการใช้งานทางความร้อนสูงถึง 180 °C -205 °C

- อีพอกซี (Epoxy)

อีพอกซีนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในระดับทางความร้อน B และ F ซึ่งมีความแข็งแรงทางพันธะสูงทนทานต่อความชื้นและเคมีสูง คุณสมบัติทางไดอิเล็กตริกที่ดี แต่อย่างไรก็ตามจะลดต่ำลงเมื่อใช้งานเกินย่านของอุณหภูมิแนะนำ ซึ่งนิยมใช้กันในเครื่องจักรหมุนขนาดใหญ่และมอเตอร์ที่มีการปิดสนิทซึ่งจะรวมกับตัวทำละลายจนย่านการใช้งานได้ถึง 210 °C

- พาริซีน (Parylene)

เป็นสารที่ใช้ทำมีฟิล์มขนาดบางในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถกำหนดความหนาบริเวณขอบจุด และพื้นที่ภายในของอุปกรณ์ได้ ซึ่งมีความแม่นยำถึง 0.004-1.25 mils คุณสมบัติทางไดอิเล็กตริกดีเยี่ยมหากทำงานไม่เกินอุณหภูมิ 150 °C ในอากาศหรือมากกว่า 220 °C ในบรรยากาศที่มีออกซิเจนอิสระ มีคุณสมบัติทางกลที่ดีเมื่อใช้งานที่ย่าน -200 ถึง 275 °C และมีความต้านทานสูงในการป้องกันกับตัวทำละลายและการกัดกร่อนทางเคมี นิยมใช้ในวงจรที่ต้องการการป้องกันจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาพแวดล้อมที่ไม่ดี เช่น ความชื้น สเปรย์เกลือ สารปนเปื้อนในอากาศ เป็นต้น ตัวอย่างอุปกรณ์ที่ใช้เช่น เทอร์โมคัปเปิล ตัวต้านทาน โฟโตเซลล์ และเซนเซอร์ต่าง ๆ

- ฟีนอลิก (Phenolics)

ฟีนอลิกเป็นวารันิซเรซินที่ใช้อย่างกว้างขวางในย่านการใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่าเรซินชนิดอื่น และใช้งานในระดับชั้นทางความร้อน H ซึ่งมีราคาสูงกว่า ซิลิโคนวารันิซ และนิยมนำไปใช้ในสถานที่ที่มีความชื้นหรือที่ที่เกิดราได้ง่าย อีกทั้งยังสามารถต้านทานผลของเคมีได้ดีอีกด้วย

- โพลียูรีเทน (Polyurethane)

โพลียูรีเทนเป็นวารันิซเรซินที่มีย่านการใช้งานที่ระดับชั้นทางความร้อน F และมีความสามารถทนต่อการสึกกร่อนได้ดีเยี่ยม นิยมใช้ในการโค้ทสารเอนาเมลและอุปกรณ์ไฟฟ้าทั่วไป

- ซิลิโคน (Sillicone)

ซิลิโคนวารันิซเป็นสารที่ทำมาจากเรซิน ซึ่งมีเสถียรภาพทางความร้อนดีเยี่ยมและมีความต้านทานน้ำ แต่จะมีราคาสูงซึ่งจะนำไปใช้เมื่อวารันิซอื่นไม่มีความเหมาะสมในการใช้งาน ซึ่งมีคุณสมบัติที่ต่าง ๆ เช่น มีคุณสมบัติทางไดอิเล็กตริกที่ดีเยี่ยมในย่านการใช้งานที่อุณหภูมิกว้าง และสามารถใช้งานได้สูงถึง 250 °C มีความต้านทานในการเกิดโคโรนาได้ดีกว่าสารชนิดอื่น กันน้ำและกันความชื้นได้ดีเยี่ยม แต่จะมีคุณสมบัติทางกลและความเหนียวที่น้อยกว่า อีพอกซีและโพลีเอสเตอร์ ส่วนการละลายน้ำ การต้านทานทางเคมีและการเข้ากันได้ดีกับวัสดุสารชนิดอื่น ๆ นั้นจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักของโมเลกุลและลักษณะของพันธะ ซึ่งนิยมใช้กับอุปกรณ์ที่ต้องการการใช้งานที่อุณหภูมิสูง สภาพแวดล้อมที่ไม่ดี เป็นต้น



ภาคผนวก ก
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวนของเครื่องจักรกลไฟฟ้า

Thermal ageing insulation system of machine

เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์ พิชิต ล้ายอง

ศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โทร/โทรสาร 0-2326-4175 E-mail:piam_13@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าสำหรับการพันแบบไวร์ววด โดยใช้แบบจำลองร่องสลีตตามมาตรฐาน IEC 34-18-21[1]ในการทดสอบ ซึ่งทำการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนของฉนวน 1 รอบการทดสอบ ประกอบด้วย 10 รอบย่อยการทดสอบ ในแต่ละรอบย่อยจะทำการวินิจฉัยโดยการให้ความเค้น กระทำโดยการให้แรงทางกล การทดสอบทางความชื้นเพื่อทำการปรับสภาพก่อนการวินิจฉัยและใช้การทดสอบทางแรงดันเป็นการพิสูจน์จุดสิ้นสุดอายุของฉนวน หลังจากนั้นนำกระบวนการทดสอบข้างต้นมาประยุกต์ใช้กับการทดสอบฉนวนระหว่างเฟสเพียงอย่างเดียว สุดท้ายจะนำเสนอผลการทดสอบค่ากระแสที่วัดได้จากการทดสอบทางแรงดันเพื่อให้เห็นจุดสิ้นสุดของอายุฉนวน

Abstract

This paper presents the thermal ageing insulation system testing of machine for wire wound winding using the motorette by IEC std 34-18-21. One cycle test process of thermal ageing consists of 10 subcycles. Each subcycles has diagnostic test by mechanical stress which is applied mechanical force and moisture stress test. Endlife of insulation is proved by voltage test. The thermal ageing insulation system can be used to apply with only phase insulation. Finally, the result of insulation test current is illustrated and discussed the endlife of insulation.

Keyword: thermal ageing , machine insulation , motorette

1. บทนำ

ในปัจจุบันการเสื่อมสภาพของฉนวนเครื่องจักรกลไฟฟ้าคือสาเหตุสำคัญประการหนึ่งของความเสียหายในเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ใช้งานอยู่ในอุตสาหกรรม โดยปกติแล้วในเครื่องจักรกลไฟฟ้าขนาดเล็กจะได้รับผลกระทบจากความเค้นทางความร้อนและสภาพแวดล้อมมากกว่าความเค้นทางไฟฟ้าและทางกล[2] ซึ่งหากเครื่องจักรกลไฟฟ้าทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่าปกติเพียง 8-10 องศาเซลเซียสจะทำให้อายุของฉนวนลดลงเป็น 50 เปอร์เซ็นต์ของอายุฉนวนที่ควรจะเป็น[3]

ฉะนั้นในการนำฉนวนมาใช้จึงควรมีการทดสอบระดับชั้นของฉนวน เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายในการนำเครื่องจักรกลไฟฟ้าไปใช้งานระดับชั้นทางความร้อนของฉนวนไฟฟ้าซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลกตามมาตรฐาน IEC 85[4] แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ระดับชั้นทางความร้อนของฉนวน

Thermal Insulation class	Temperature
Y	90°C
A	105°C
E	120°C
B	130°C
F	155°C
H	180°C
200	200°C
220	220°C
250	250°C

บทความนี้จะนำเสนอการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนของฉนวนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าสำหรับการพันแบบไวร์ววด (wire wound winding) โดยใช้แบบจำลองร่องสลีต (motorette) ที่สร้างขึ้น โดยจะทำการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 34-18-21 ของฉนวนระดับชั้น เอฟ (insulation class F) จำนวน 1 รอบการทดสอบ ประกอบด้วย 10 รอบย่อยการทดสอบในแต่ละรอบย่อยการทดสอบจะมีการวินิจฉัยโดยการให้ความเค้น ประกอบด้วยการให้แรงทางกล การทดสอบทางความชื้น เพื่อปรับสภาพก่อนการวินิจฉัยและพิสูจน์จุดสิ้นสุดอายุ (end of life) ของฉนวน โดยการทดสอบทางแรงดันไฟฟ้า

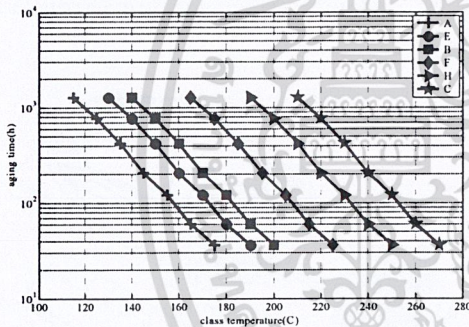
ในการทดสอบทั้งระบบฉนวนจะเกิดความยุ่งยากในการประกอบระบบฉนวนขึ้นมากกล่าวคือ การพันขดลวด การชุบวานิช เป็นต้น อีกทั้งยังไม่สามารถพิสูจน์ฉนวนเพียงอย่างเดียวได้ ฉะนั้นบทความฉบับนี้จึงทำการทดสอบโดยการนำแท่งทองแดง ซึ่งไม่มีฉนวนเอนาเมล (enamel) หุ้มอยู่มาจัดให้เป็นรูปนำมาทดสอบแทนขดลวดที่มีฉนวนเอนาเมลหุ้มอยู่ โดยทำการทดสอบฉนวนระหว่างเฟสจำนวน 2 ชนิด ตามกระบวนการเร่งอายุและนำเสนอผลการทดสอบที่ได้มาเปรียบเทียบเพื่อแสดงความเป็นไปได้ในการทดสอบฉนวนระหว่างเฟสเพียงอย่างเดียว

2. การเร่งอายุทางความร้อน[5]

การเร่งอายุทางความร้อนประกอบด้วยกระบวนการในการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ฟิสิกส์ และ ผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิทางกลที่เป็นสาเหตุมาจากแรงที่เกิดจากการแผ่หรือการรวมตัวของความร้อน ระดับที่เพิ่มขึ้นของกระบวนการทางเคมีและฟิสิกส์ที่ดำเนินต่อไปสู่สภาวะสมดุลย์เทอร์โมไดนามิกเป็นสาเหตุใหญ่ของการเร่งอายุทางความร้อนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีตามสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) เป็นไปตามสมการ

$$L = A \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (1)$$

เมื่อ L แทน อายุ, A แทน ค่าคงที่, E แทน พลังงานกระตุ้น, k แทน ค่าคงที่โบลทซ์แมน (Boltzman constant), T แทน ค่าอุณหภูมิสัมพัทธ์ จากสมการอาร์เรเนียส จะเห็นได้ว่าค่าอายุของฉนวนจะแปรผกผันกับค่าอุณหภูมิสัมพัทธ์ตามสมการลือกการที่สามซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ในการเร่งอายุดังตารางที่ 2 และนำมาพล็อตได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอายุและอุณหภูมิดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับอุณหภูมิสัมพัทธ์

3. กระบวนการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนของฉนวน

3.1 รอบย่อยการเร่งอายุโดยการให้ความร้อน

ขนาดอุณหภูมิและช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการเร่งอายุของระบบฉนวนแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 อุณหภูมิแนะนำและรอบย่อยของการเร่งอายุ

105 °C (°C)	120 °C (°C)	130 °C (°C)	155 °C (°C)	180 °C (°C)	200 °C (°C)	รอบย่อย (วัน)
170-180	185-195	195-205	220-230	245-255	265-275	1-2
160-170	175-185	185-195	210-220	235-245	255-265	2-3
150-160	165-175	175-185	200-210	225-235	245-255	4-6
140-150	155-165	165-175	190-200	215-225	235-245	7-10
130-140	145-155	155-165	180-190	205-215	225-235	14-21
120-130	135-145	145-155	170-180	195-205	215-225	28-35
110-120	125-135	135-145	160-170	185-195	205-215	45-60

จำนวนชิ้นงานที่ใช้ทดสอบควรมีน้อย 10 ชิ้น ซึ่งควรนำเข้าสู่รอบย่อยการทดสอบอย่างต่อเนื่อง อุณหภูมิที่ใช้ทำการทดสอบควรทดสอบในตู้อบปิดซึ่งมีการไหลเวียนของอากาศและอุณหภูมิภายในตู้อบคงที่ เมื่อทำการทดสอบในแต่ละรอบย่อยควรนำชิ้นงานออกจากตู้อบมาที่อุณหภูมิห้องโดยทันทีเพื่อรักษารูปแบบการเกิดความผิดปกติทางความร้อน (thermal shock) จากการตุลิ่งเมื่อมีการให้ความร้อน

3.2 รอบย่อยของการวินิจฉัย

ภายหลังจากการรอบย่อยของการเร่งอายุชิ้นงานทดสอบในแต่ละชั้นควรเข้าสู่ขั้นตอนในการวินิจฉัยซึ่งประกอบด้วยการให้ความชื้นโดยการทดสอบการให้แรงทางกล การทดสอบทางความชื้นและการทดสอบทางแรงดันไฟฟ้า ตามลำดับ

- 1) การทดสอบการให้แรงทางกล ในการทดสอบควรรอให้ชิ้นงานที่ทำการทดสอบอุณหภูมิเย็นลงอยู่ที่อุณหภูมิห้อง และทำการทดสอบบน โต๊ะสั่นเป็นเวลา 1 ชั่วโมงโดยมีการสั่น ณ ตำแหน่งจุดสูงสุดถึงจุดสูงสุดขนาด 0.3 มิลลิเมตร ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ หรือ 0.2 มิลลิเมตรที่ความถี่ 60 เฮิรตซ์[1]
- 2) การทดสอบทางความชื้น ควรมีการทดสอบอย่างน้อย 48 ชั่วโมงโดยที่ชิ้นงานมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 15-35 °C และที่อุณหภูมิภายในตู้อบความชื้นอยู่ที่ 30 °C[1]
- 3) การทดสอบทางแรงดัน การตรวจสอบจุดสิ้นสุดของอายุโดยการป้อนแรงดันขนาดต่าง ๆ ตามพิสัยการใช้งานของมอเตอร์[1]ดังตารางที่ 3

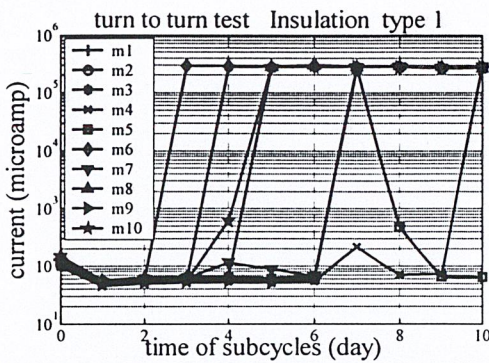
ตารางที่ 3 แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ

พิสัยแรงดันที่ใช้	แรงดันไฟฟ้า (V _{max}) ที่แนะนำในการทดสอบ		
	ระหว่างโหลดกับเฟรม	ระหว่างโหลดกับโหลด	ระหว่างรอบต่อรอบของโหลด
110-400	400	400	110±10
401-600	660	660	110±10
661-1000	ภายใต้การตัดสินใจ	ภายใต้การตัดสินใจ	ภายใต้การตัดสินใจ

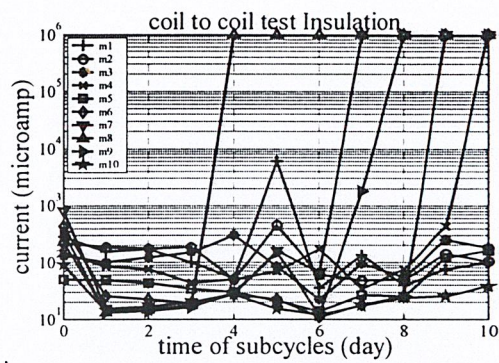
4. ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ

4.1 แบบจำลองร่องสลีต (motorette)

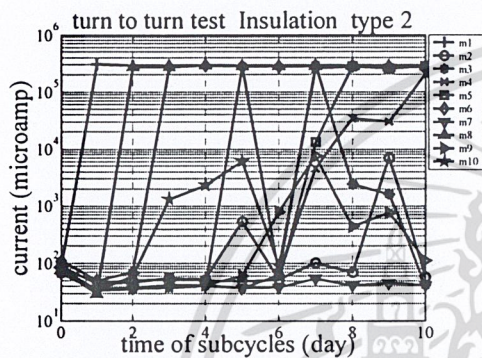
การทดสอบฉนวนทั้งระบบใช้โครงสร้างแบบจำลองร่องสลีต ในการทดสอบใช้แผ่นสแตนเลสหนา 1.5 มม.ซึ่งมีส่วนประกอบต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2 และแบบจำลองร่องสลีตที่ประกอบเรียบ



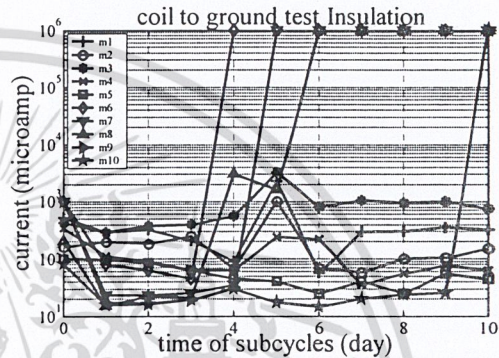
รูปที่ 9 ผลการทดสอบระหว่างรอบต่อรอบของขดลวด ชนิดที่ 1



รูปที่ 11 ผลการทดสอบระหว่างขดลวดกับขดลวดของฉนวนระหว่างเฟส



รูปที่ 10 ผลการทดสอบระหว่างรอบต่อรอบของขดลวด ชนิดที่ 2



รูปที่ 12 ผลการทดสอบระหว่างขดลวดกับกราวด์ของฉนวนระหว่างเฟส

การทดสอบระหว่างรอบต่อรอบของขดลวด เป็นการทดสอบฉนวนเอนาเมลซึ่งหุ้มขดลวดและในส่วนของวาร์นิชเท่านั้น

จากการทดสอบข้างต้น สามารถหาจุดสิ้นสุดของอายุฉนวนได้ทั้งระบบฉนวนโดยดูจากค่ากระแสที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่ไม่สามารถหาจุดสิ้นสุดอายุของฉนวนระหว่างเฟสเพียงอย่างเดียวได้เนื่องจากการทดสอบระหว่างขดลวดกับขดลวดและการทดสอบระหว่างขดลวดกับกราวด์นั้นยังมีฉนวนเอนาเมลและวาร์นิชเคลือบอยู่อีกชั้นหนึ่งฉะนั้นจึงทำการประยุกต์โดยนำกระบวนการข้างต้นมาใช้ทดสอบฉนวนระหว่างเฟสเพียงอย่างเดียว

5.2.2 ผลการทดสอบฉนวนระหว่างเฟส

ในการทดสอบด้วยฉนวนระหว่างเฟสนั้นจะทำการวัดค่ากระแสเมื่อทำการทดสอบระหว่างขดลวดกับขดลวด และระหว่างขดลวดกับกราวด์เท่านั้น ซึ่งในการทดสอบจะใช้ฉนวนระหว่างเฟส 2 ชนิดในการทดสอบ ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองร่องสลีตดังตารางที่ 5 ตารางที่ 5 ชนิดฉนวนระหว่างเฟสกับแบบจำลองร่องสลีตที่ใช้ในการทดสอบ

แบบจำลองร่องสลีต	ฉนวนระหว่างเฟส
m1-m5	ชนิดที่ 1
m6-m10	ชนิดที่ 2

การทดสอบฉนวนระหว่างเฟสเพียงอย่างเดียวข้างต้นทั้งการทดสอบระหว่างขดลวดกับขดลวดและระหว่างขดลวดกับกราวด์นั้นสามารถหาจุดสิ้นสุดของอายุฉนวนได้ ซึ่งผลการทดสอบเป็นไปในทางเดียวกับการทดสอบฉนวนทั้งระบบ คือ มีจำนวนของฉนวนที่ถึงจุดสิ้นสุดในจำนวนที่ใกล้เคียงกัน

6.สรุป

การทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำตามมาตรฐาน IEC 34-18-21 โดยการ ใช้แบบจำลองร่องสลีตนั้นสามารถทำตามกระบวนการทดสอบข้างต้นกล่าวคือ จะต้องมีกรเร่งอายุทางความร้อนก่อน หลังจากนั้นทำการปรับสภาพก่อนการวินิจฉัย โดยการให้ความเค้น ประกอบด้วยการทดสอบโดยให้แรงทางกล การทดสอบทางความชื้นและพิสูจน์จุดสิ้นสุดของอายุฉนวน โดยการทดสอบทางแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะทำการทั้งหมด 10 รอบย่อยการทดสอบ ซึ่งในการทดสอบทางแรงดันไฟฟ้าและจะดูจุดสิ้นสุดของอายุฉนวนได้จากค่ากระแสที่เกิดขึ้นซึ่งมีขนาดสูงกว่าค่าปกติมาก ในการทดสอบโดยการ ใช้แบบจำลองร่องสลีตนั้นจากผลการทดสอบจะสามารถหาจุดสิ้นสุดของอายุของฉนวนได้ทั้งการทดสอบระหว่างขดลวดกับขดลวด ระหว่างขดลวดกับกราวด์ และระหว่างรอบต่อรอบของขดลวด

การทดสอบระหว่างรอบต่อรอบของขดลวดนั้นจะเป็นการพิสูจน์ฉนวนเอนาเมลและวาร์นิชที่ใช้อยู่เท่านั้นซึ่งจะเห็นได้ว่าแบบจำลอง

ร่องสลีตส่วนใหญ่จะถึงจุดสิ้นสุดของอายุฉนวน ส่วนการทดสอบระหว่างขดลวดกับขดลวดและการทดสอบระหว่างขดลวดกับกราวด์นั้นจะเป็นการทดสอบฉนวนทั้งระบบเนื่องจากในการทดสอบทางแรงดันนั้นจะทำการทดสอบโดยการป้อนแรงดันไปที่ขดลวดทำให้ต้องมีการผ่านทั้ง ฉนวนเอนาเมลและวาร์นิชที่เคลือบอยู่

ส่วนในการทดสอบฉนวนระหว่างเฟสเพียงอย่างเดียวนั้นยังสามารถหาจุดสิ้นสุดของอายุฉนวนได้เช่นกันซึ่งในการทดสอบระหว่างขดลวดกับขดลวดและการทดสอบระหว่างขดลวดกับกราวด์ จะได้ผลการทดสอบที่ไปในทางเดียวกันคือจุดสิ้นสุดของอายุฉนวนจากการทดสอบที่ได้จะเกิดขึ้นที่ฉนวนชนิดเดียวกันกับกรณีของการทดสอบฉนวนทั้งระบบโดยใช้แบบจำลองร่องสลีต

จากผลการทดสอบที่แปรปรวนนั้นอาจเกิดจากการที่ฉนวนที่ได้มานั้นมีค่าความคงทนต่อระดับความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอ

จากการทดสอบทั้งสองแบบข้างต้น สามารถนำกระบวนการทดสอบการเร่งอายุของฉนวนไปใช้กับระบบฉนวนที่ต้องกรจะทดสอบเพื่อหาจุดสิ้นสุดของอายุฉนวน และสามารถนำแบบจำลองร่องสลีตมาประยุกต์ใช้กับฉนวนระหว่างเฟสเพียงอย่างเดียวทำให้สะดวกในการทดสอบไม่ต้องใช้ฉนวนทั้งระบบในการทดสอบได้ เมื่อรู้จุดสิ้นสุดอายุฉนวนแล้วเราก็จะสามารถหาระดับชั้นความร้อนของฉนวนได้ หากอายุของฉนวนตามสมการอริเนียส และมีการทดสอบทำซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดสอบในการวิจัยขั้นต่อไป

7.เอกสารอ้างอิง

- [1] IEC standard 34-18-21 ,Functional evaluation of insulation system Section 21 :Test procedure for wire wound windings –Thermal evaluation and classification,1992, First Edition
- [2] IEC standard 34-18-1 ,Functional evaluation of insulation system for rotating electrical machines Part 1:General guidelines,1992 First Edition
- [3] G.C.Montanari,G.Mazzanti,L.Simoni,“Progress in Electrothermal Life Modeling of Electrical Insulation during the Last Decades,”*IEEE Trans.on Dielectrics and Electrical Insulation*,Vol.9 No.5,October2002
- [4] IEC standard 85 ,Determining the thermal classification of electrical insulation,1984
- [5] IEC standard 60505,Evaluation and qualification of electrical insulation systems,1999



เปี่ยมภูมิ สดุดพฤษภ์ สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันกำลังศึกษาต่อระดับปริญญาโทสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสถาบันเดียวกัน และเป็นเจ้าหน้าที่ศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยทำงานวิจัยด้านการแปรรูปพลังงาน ฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้า



พิชิต ฉ่ายอง สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตและวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและหัวหน้าศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยทำงานวิจัยทางการแปรรูปพลังงาน, เครื่องจักรกลไฟฟ้า, เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ-นามสกุล นายเปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์
- วัน เดือน ปี เกิด 2 กันยายน 2524 ที่สงขลา
- ประวัติการศึกษา 2545 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ประสบการณ์ทำงาน
- 2545-ปัจจุบัน เจ้าหน้าที่วิจัย
ประจำศูนย์บริการและพัฒนามหาวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ผลงานวิจัยขณะกำลังศึกษาที่ได้รับการตีพิมพ์
1. “ การเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวนของเครื่องจักรกล ไฟฟ้า” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรม ไฟฟ้าครั้งที่ 26 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ , หน้า 132-137, 2546
 2. “การศึกษาเทคนิคการทดสอบเพื่อหาค่าประสิทธิภาพของหม้อหุงข้าวไฟฟ้า” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27 มหาวิทยาลัยขอนแก่น , หน้า 237-240 ,2547