สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ชุดทดสอบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าแรงดันต่ำ
INSULATION TEST SET FOR LOW VOLTAGE MACHINES

นายนันทชัย ตานพิพัฒน์
นายพลฤทธิ์ หมื่นปัญญา
นายสามารถ ประจวบสุข
นายนิยมไพร สุวรรณธรรมมา

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 61384
วัน,เดือน,ปี 17 ก.ค. 2549

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดทดสอบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าแรงดันต่ำ
INSULATION TEST SET FOR LOW VOLTAGE MACHINES

โดย

นายนันทชัย ตานพิพัฒน์

นายพลฤทธิ์ หมื่นปัญญา

นายสามารถ ประจวบสุข

นายนิยมไพร สุวรรณธรรมมา

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. พิชิต ล่ายอง

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2547

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ชุดทดสอบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าแรงดันต่ำ
INSULATION TEST SET FOR LOW VOLTAGE MACHINES

ผู้จัดทำ

1. นาย นันทชัย ตานพิพัฒน์ รหัสประจำตัว 44010250
2. นาย พลฤทธิ์ หมื่นปัญญา รหัสประจำตัว 44010321
3. นาย สามารถ ประจวบสุข รหัสประจำตัว 44010526
4. นาย นิยมไพร สุวรรณธรรมมา รหัสประจำตัว 44010909

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.พิชิต ลำยอง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดทดสอบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าแรงดันต่ำ

นายนันทชัย ตานพิพัฒน์ 44010250
นายพลฤทธิ์ หมื่นปัญญา 44010321
นายสามารถ ประจวบสุข 44010526
นายนิยมไพร สุวรรณธรรมมา 44010909
รศ.พิชิต ลำยอง อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2547

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันนี้มีปัญหาเกิดขึ้นในโรงงานอุตสาหกรรมมากมาย ซึ่งสาเหตุที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ล้วนมาจากเครื่องจักรกลไฟฟ้า จากปัญหานี้อาจส่งผลให้กระบวนการต่างๆในโรงงานหยุดชะงักลง ทำให้เกิดผลเสียหายตามมาอย่างมาก สาเหตุของปัญหาของเครื่องจักรกลไฟฟ้าส่วนใหญ่นั้นอาจมีหลายสาเหตุด้วยกัน อาทิเช่น การสั่นสะเทือนของเครื่องจักร ผลของคลื่นรบกวนต่างๆ หรือ การเสื่อมสภาพของฉนวน โดยการเสื่อมสภาพของฉนวนนั้นมีหลายสาเหตุ ซึ่งอาจมาจากความร้อนจากการใช้งาน ความชื้นจากบรรยากาศ การสั่นสะเทือนระหว่างการใช้งานและการใช้งานทางไฟฟ้า

จากปัญหาที่เกิดขึ้นดังกล่าวจึงมีการทดสอบฉนวนขึ้นมาเพื่อพัฒนาคุณภาพของฉนวนให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งก่อนการทดสอบนั้นจะต้องมีชุดทดสอบที่ได้มาตรฐานและมีประสิทธิภาพที่ดีเสียก่อน จึงจะนำมาซึ่งผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือ โครงงานนี้จึงนำเสนอการออกแบบชุดทดสอบที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพื่อให้การทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับค่าในสภาวะการใช้งานจริงเพื่อเป็นข้อมูลในการพัฒนาระบบฉนวนต่อไป และโครงการนี้ยังนำเสนอแนวโน้มของค่าอิมพีแดนซ์เมื่อมีการเร่งอายุให้ฉนวนเสื่อมสภาพลง เพื่อที่จะสามารถหาจุดสิ้นสุดของฉนวนได้ก่อนที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าจะหยุดชะงัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Insulation Test Set for Low Voltage Machines

Nuntachai Tanpipat
Ponlit Mueanpanya
Samart Prachuabsuk
Niyompri Suwannathumma
Assist. Prof. Pichit Lamyong Advisor

ABSTRACT

Recently, there are many problems in enterprise industries. Most of the problem is caused by electrical Machines. Which can make all processes in factory fail. There are so many problem that caused by electrical machines such as vibration , interferences or insulation fail. Insulation fail comes from many things , which one heat , atmosphere and vibration

From this important problem , insulation test is invented to improve an insulation quality. In testing phase standard insulation testing equipment must be proved to ensure that the result is reliable. This paper presents a design of an insulation testing equipment .Which produce a testing result that closes to a result from a real-used insulation. In addition this project present an impedance trend when aging is applied to an insulation. Which used to predict an over all time the insulation can be used before the electrical machine fail.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และร่วมมือจากหลาย ๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จลงได้ก็คือ รศ. พิชิต ลำยอง อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำ ช่วยเหลือเสมอมา และ คุณ เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์ รุ่นพี่ที่ปรึกษาปริญญาโท ที่ช่วยแนะนำและช่วยเหลือด้านข้อมูลต่างๆซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้าน อันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ท้ายสุดขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้วิชาความรู้ และให้คำปรึกษาโดยตลอดจนกระทั่งประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดี

นายนันทชัย ตานพิพัฒน์
นายพลฤทธิ์ หมื่นปัญญา
นายนิยมไพร สุวรรณธรรมมา
นายสามารถ ประจวบสุข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ขอบเขตของโครงงาน	2
1.3 จุดมุ่งหมายของโครงงาน	2
1.4 วิธีการดำเนินงาน	4
บทที่ 2 วัสดุฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้า	4
2.1 สารเอนาเมล	4
2.2 กระดาษฉนวนและฟิล์มฉนวน	11
2.3 ท่อร้อยสาย (Sleeving)	16
2.4 วาร์นิชเรซิน (Varnish resin)	16
บทที่ 3 กระวนการเร่งอายุของระบบฉนวน	18
3.1 บทนำ	18
3.2 การเร่งอายุระบบฉนวน	18
3.2.1 การเร่งอายุทางไฟฟ้า	19
3.2.2 การเร่งอายุทางความร้อน	21
3.2.3 การเร่งอายุทางกล	25
3.2.4 การเร่งอายุเนื่องจากผลทางสภาพแวดล้อม	27
3.2.5 การเร่งอายุจากหลายปัจจัย	28
บทที่ 4 การออกแบบการทดสอบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าแหนี่ยวนำที่มีการพันแบบ WIRE- WOUND WINDINGS โดยใช้แบบจำลองร่องสล็อต	31
4.1 บทนำ	31
4.2 ขอบเขตของการทดสอบ	31
4.3 จุดประสงค์การทดสอบ	31
4.4 วัตถุทดสอบ	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้าที่
4.4.1 โครงสร้างของวัตถุทดสอบ	32
4.4.4.1 วัสดุที่นำมาใช้	32
4.4.4.2 ขนาดของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	32
4.4.4.3 โครงสร้าง	32
4.4.2 รายละเอียดของโครงสร้างของแบบจำลองร่องสล็อต	32
4.3 ส่วนประกอบของแบบจำลองร่องสลิ็อต	34
4.4.4 การประกอบแบบจำลองร่องสลิ็อต	35
4.4.5 จำนวนชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ	36
4.4.6 การตรวจสอบคุณภาพก่อนการทดสอบ	36
4.4.7 การทดสอบเพื่อการวินิจฉัยเบื้องต้น	37
4.5 รอบย่อยการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อน	37
4.6 รอบย่อยการทดสอบเพื่อการวินิจฉัย	37
4.6.1 การทดสอบทางกล	37
4.6.2 การทดสอบทางความชื้น	37
4.6.2.1 ตู้อบความชื้น	37
4.6.2.2 ตู้อบความชื้นสำหรับวัตถุทดสอบที่เย็นตัวลง (ที่อุณหภูมิห้อง)	38
4.6.3 การทดสอบทางแรงดันไฟฟ้า	39
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง	41
5.1 การทดสอบรอบย่อยการเร่งอายุของระบบฉนวน	41
5.1.1 ขอบเขตของการทดสอบ	41
5.1.2 จุดประสงค์การทดสอบ	41
5.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	41
5.1.4 วิธีการดำเนินการทดสอบ	41
5.1.5 ผลของอุณหภูมิภายในตู้อบความร้อนขณะทำการทดสอบ	45
5.1.6 ผลของอุณหภูมิภายในตู้อบความชื้นขณะทำการทดสอบ	48
5.1.7 ผลการทดสอบรอบการเร่งอายุของแบบจำลองร่องสลิ็อต	52
5.1.8 สรุปผลการทดลอง	54
5.2 การทดสอบเพื่อการวิเคราะห์หาค่าทางไฟฟ้า	54
5.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	54
5.2.2 จุดประสงค์ของการทดสอบ	54
5.2.3 ขั้นตอนการทดลอง	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

		หน้าที่
	5.2.4 ผลการทดสอบ	55
	5.2.5 สรุปผลการทดลอง	59
บทที่	6 สรุปผลและวิจารณ์การทดลอง	60
	ภาคผนวก	
	บรรณานุกรม	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้าที่

รูปที่ 3-1 การเร่งอายุของระบบฉนวนไฟฟ้า 18
รูปที่ 3-2 ปัจจัยการเร่งอายุทางไฟฟ้าภายในและภายนอกของระบบฉนวน 20
รูปที่ 3-3 ตัวอย่างการเร่งอายุทางไฟฟ้าระบบฉนวน 21
รูปที่ 3-4 ปัจจัยการเร่งอายุทางความร้อนภายในและภายนอกของระบบฉนวน 22
รูปที่ 3-5 ตัวอย่างการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวน 23
รูปที่ 3-6 ปัจจัยการเร่งอายุทางกลภายในและภายนอกของระบบฉนวน 24
รูปที่ 3-7 ตัวอย่างการเร่งอายุทางกลระบบฉนวน 25
รูปที่ 3-8 ปัจจัยการเร่งอายุเนื่องจากผลทางสภาพแวดล้อมภายในและภายนอกของระบบฉนวน 26
รูปที่ 3-9 ตัวอย่างการเร่งอายุเนื่องจากผลทางสภาพแวดล้อมระบบฉนวน 27
รูปที่ 3-10 ตัวอย่างการเร่งอายุระบบฉนวนจากหลาย ๆ ปัจจัยเป็นลำดับเวลา 28
รูปที่ 3-11 ความสัมพันธ์ของการเร่งอายุกับลำดับเวลาจากรูปที่ 3-10 29
รูปที่ 3-12 ตัวอย่างการเร่งอายุระบบฉนวนจากหลาย ๆ ปัจจัยเป็นลำดับเวลาตัวอย่างที่ 29
รูปที่ 3-13 ความสัมพันธ์ของการเร่งอายุกับลำดับเวลาจากรูปที่ 3-12 30
รูปที่ 4-1 ส่วนประกอบทั้งหมดของแบบจำลองร่องสล็อตก่อนทำการประกอบ 33
รูปที่ 4-2 แบบจำลองร่องสล็อตที่ประกอบสมบูรณ์แล้ว 33
รูปที่ 4-3 ส่วนประกอบที่เป็นโลหะของเฟรมแบบจำลองร่องสล็อต 34
รูปที่ 4-4 บล็อกไดอะแกรมของตู้อบความชื้นสำหรับวัตถุทดสอบที่เย็นตัวลง 38
รูปที่ 4-5 ตัวอย่างตู้อบความชื้นสำหรับวัตถุทดสอบที่เย็นตัวลง 39
รูปที่ 5-1 ขั้นตอนของกระบวนการทดสอบการเร่งอายุของฉนวน 42
รูปที่ 5-2 ส่วนปะกอบของแบบจำลองร่องสล็อต 43
รูปที่ 5-3 แบบจำลองร่องสล็อตที่ใช้ในการทดสอบ 43
รูปที่ 5-4 ตู้อบความร้อน 44
รูปที่ 5-5 ขดลวดที่กำลังทำการเร่งอายุทางความร้อน 44
รูปที่ 5-6 แบบจำลองร่องสล็อตที่ได้รับการเร่งอายุทางความร้อน 45
รูปที่ 5-7 การปรับสภาพทางกลต่อแบบจำลองร่องสล็อตโดยโต๊ะสั่น 47
รูปที่ 5-8 ตู้อบความชื้น 48
รูปที่ 5-9 วงจรที่ใช้ในการทดสอบทางด้านแรงดันไฟฟ้า 50
รูปที่ 5-10 การทดสอบทางไฟฟ้าเพื่อการวินิจฉัย 50
รูปที่ 5-11 ฉนวนเกิดการเสียหาย 51
รูปที่ 5-12 ลักษณะของฉนวนที่มองเห็นได้ชัดเจนเมื่อเกิดการเสียหาย 51
รูปที่ 5-13 ผลการทดสอบระหว่างขดลวดบนและขดลวดล่าง 52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้าที่

รูปที่ 5-14 ผลการทดสอบระหว่างขดลวดกับกราวด์ 52

รูปที่ 5-15 ผลการทดสอบระหว่างรอบในขดลวดเดียวกันของขดลวดบน 53

รูปที่ 5-16 ผลการทดสอบระหว่างรอบในขดลวดเดียวกันของขดลวดล่าง 53

รูปที่ 5-17 วงจรที่ใช้ในการทดสอบหาค่าทางไฟฟ้า 54

รูปที่ 5-18 ผลการทดสอบระหว่างขดลวดกับกราวด์ (resistance) 55

รูปที่ 5-19 ผลการทดสอบระหว่างขดลวดกับกราวด์ (reactance) 56

รูปที่ 5-20 ผลการทดสอบระหว่างรอบในขดลวดเดียวกันของขดลวดล่าง(resistance) 56

รูปที่ 5-21 ผลการทดสอบระหว่างรอบในขดลวดเดียวกันของขดลวดล่าง(reactance) 57

รูปที่ 5-22 ผลการทดสอบระหว่างรอบในขดลวดเดียวกันของขดลวดบน (resistance) 57

รูปที่ 5-23 ผลการทดสอบระหว่างรอบในขดลวดเดียวกันของขดลวดบน (reactance) 58

รูปที่ 5-24 ผลการทดสอบระหว่างขดลวดบนและขดลวดล่าง(resistance) 58

รูปที่ 5-25 ผลการทดสอบระหว่างขดลวดบนและขดลวดล่าง(reactance) 59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้าที่

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของสารเอนาเมลชนิดต่างๆ 4
ตารางที่ 2.1(ต่อ) คุณสมบัติของสารเอนาเมลชนิดต่างๆ 5
ตารางที่ 2.1(ต่อ) คุณสมบัติของสารเอนาเมลชนิดต่างๆ 6
ตารางที่ 2.1(ต่อ) คุณสมบัติของสารเอนาเมลชนิดต่างๆ 7
ตารางที่ 2.1(ต่อ) คุณสมบัติของสารเอนาเมลชนิดต่างๆ. 8
ตารางที่ 2-2 ระดับชั้นทางความร้อนฉนวนสำหรับสารโพลียูรีเทน 9
ตารางที่ 2-3 ระดับชั้นทางความร้อนฉนวนสำหรับสารไนลอน 9
ตารางที่ 2-3 (ต่อ) ระดับชั้นทางความร้อนฉนวนสำหรับสารไนลอน 10
ตารางที่ 2-4 ระดับชั้นทางความร้อนฉนวนสำหรับสารโพลียูรีเทน 10
ตารางที่ 2-5 คุณลักษณะของฟลูออโรโพลิเมอร์ฟิล์ม 13
ตารางที่ 4 -1 อุณหภูมิ ณ ส่วนต่าง ๆ ของตู้อบความชื้น 39
ตารางที่ 4-2 ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ 40
ตารางที่ 5-1 ผลของอุณหภูมิภายในตู้อบความร้อนที่ทำการทดสอบในรอบ 96 ชั่วโมง 45
ตารางที่ 5-1(ต่อ) ผลของอุณหภูมิภายในตู้อบความร้อนที่ทำการทดสอบในรอบ 96 ชั่วโมง 46
ตารางที่ 5-2 ผลของอุณหภูมิภายในตู้อบความร้อนที่ทำการทดสอบในรอบ 24 ชั่วโมง 46
ตารางที่ 5-2(ต่อ) ผลของอุณหภูมิภายในตู้อบความร้อนที่ทำการทดสอบในรอบ 24 ชั่วโมง 47
ตารางที่ 5-3 ผลของอุณหภูมิภายในตู้อบความชื้นในช่วงระยะเวลาการสังเกตการณ์ 48ชั่วโมง 48
ตารางที่ 5-3(ต่อ) ผลของอุณหภูมิภายในตู้อบความชื้นในช่วงระยะเวลาการสังเกตการณ์ 48ชั่วโมง 49
ตารางที่ 5-4 ผลของอุณหภูมิภายในตู้อบความชื้นในช่วงระยะเวลาการทดสอบ 48 ชั่วโมง 49
ตารางที่ 5-5 ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ 55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ฉนวนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าสมัยใหม่มีความน่าเชื่อถือสูงมาก ถ้าใช้งานที่อุณหภูมิแวดล้อมไม่เกินค่าที่ออกแบบไว้ ไม่เกิดการใช้งานที่เกินพิกัดทางด้านไฟฟ้า ไม่เกิดการใช้งานในที่ผิดทางกลหรือทางเคมี เช่นมีไอของเคมีในพื้นที่ที่ติดตั้งใช้งาน ฉนวนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าอาจมีอายุยาวนานถึง 100,000 ชั่วโมงทำงานนั่นคือ ใช้งานได้นานถึง 20 ปี หากใช้งานปีละ 5,000 ชั่วโมง

แต่ในปัจจุบันเราพบว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้งานอยู่ มีปัญหาเกิดขึ้นอย่างมากมายซึ่งจะทำให้สายการผลิตนั้นหยุดชะงักลงและจะส่งผลต่อการทำงานทั้งระบบ สาเหตุของปัญหาของเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้นมีด้วยกันหลายสาเหตุ อาทิ การสั่นสะเทือน ผลของคลื่นรบกวน หรือ การเสื่อมสภาพของฉนวน เป็นต้น

ปัญหาการเสื่อมสภาพของฉนวนมีสาเหตุได้หลายประการด้วยกัน เช่น ผลจากความเค้นทางความร้อน ผลจากความเค้นทางแรงดันไฟฟ้า ผลจากความเค้นทางกล หรือแม้กระทั่งผลจากสภาวะแวดล้อม ซึ่งในเครื่องจักรกลไฟฟ้าขนาดเล็ก จะมีสาเหตุหลักมาจากผลจากความเค้นทางความร้อน และผลจากสภาวะแวดล้อมเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งหากมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการใช้งานเพียงเล็กน้อยอาจทำให้อายุของฉนวนลดลงเป็นอย่างมาก

การเสื่อมสภาพของฉนวนจากความร้อน คือสาเหตุหลักของการเสียสภาพการเป็นฉนวนก่อนเวลาอันควรของฉนวนเครื่องจักรกลไฟฟ้า เราอาจกล่าวได้ว่าการให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่ออกแบบไว้ 10 องศาเซลเซียสจะทำให้อายุของฉนวนลดลงครึ่งหนึ่ง นั่นคือถ้าอุณหภูมิสูงเกินค่าที่ออกแบบไว้ 10 องศาเซลเซียส อายุของฉนวนจะเป็น 50 เปอร์เซนต์ของอายุที่ควรจะเป็นและถ้าอุณหภูมิสูงเกินกว่าค่าที่ออกแบบไว้ 20 องศาเซลเซียส อายุของฉนวนจะเป็น 25 เปอร์เซนต์ของอายุที่ควรจะเป็นความชื้นจากบรรยากาศเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ฉนวนเสียสภาพ

ในขณะนี้ประเทศไทยไม่ได้มีการทดสอบระดับชั้นทางความร้อนของฉนวนอยู่เลย โดยโรงงานอุตสาหกรรมที่ผลิตเครื่องจักรกลไฟฟ้าหรือโรงงานที่นำเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหล่านั้นไปใช้ส่วนใหญ่เชื่อถือตามป้ายชื่อ (Nameplate) เพียงอย่างเดียว ซึ่งหากระบบฉนวนนั้นไม่ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดและโรงงานอุตสาหกรรมนั้นนำระบบฉนวนไปใช้ที่อุณหภูมิปกติตามป้ายชื่อแล้วจะทำให้ระบบฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพก่อนที่ควรจะเป็นอย่างมาก

อีกปัญหาหนึ่งของเครื่องจักรกลไฟฟ้าทำงานอยู่ในสภาวะทั่วไป จะไม่ทราบว่าฉนวนของเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้นเสื่อมสภาพหรือหมดอายุเมื่อใด หากโรงงานอุตสาหกรรมเหล่านั้นสามารถทำนายอายุระบบฉนวนเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้แล้วจะทำให้สามารถคาดการณ์การเสื่อมสภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้นได้และทำให้สามารถมีการเตรียมนำเครื่องจักรกลไฟฟ้าสำรองมาทดแทนอันจะทำให้ไม่ส่งผลเสียต่อภาวการณ์ทำงานของระบบนั้น ๆ

โดยในโครงงานนี้จะเน้นไปในการสร้างวิธีการทดสอบต่างๆ ตามที่มาตรฐานได้กำหนดเพื่อที่จะได้ทราบได้ว่าขบวนการและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบสามารถก่อให้เกิดผลตามที่มาตรฐานกำหนดไว้ได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ขอบเขตของโครงงาน

ทำการศึกษาการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวนโดยการใช้แบบจำลองร่องสล็อตตามมาตรฐาน IEC 34-18-21 เป็นการทดสอบสำหรับระบบฉนวนที่มีการพันแบบไวร์วาวด์ (wire-wound winding) ซึ่งจะทำการออกแบบพัฒนาชุดทดสอบสำหรับระบบฉนวนและทำการทดสอบระบบฉนวนจำนวน 1 ระบบฉนวนเพื่อดูแนวโน้มของค่าอิมพีแดนซ์ของฉนวน

โดยที่รูปแบบกระบวนการทดสอบนี้ใช้ในการหาค่าของระบบฉนวนที่มีระบบการทำความเย็นโดยอากาศภายใต้สิ่งแวดล้อมซึ่งนำไปสู่การเสื่อมโทรมของฉนวนแต่ไม่รวมถึงการใช้งานที่อยู่ในกรณีพิเศษ เช่นการใช้งานภายใต้ของเหลวบางชนิด ก๊าซบางอย่างหรือการใช้งานร่วมกับเคมีภัณฑ์บางประเภท

1.3 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของโครงงาน

จากปัญหาที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โครงงานนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะทำการพัฒนาชุดทดสอบทดสอบฉนวนให้มีประสิทธิภาพตามมาตรฐานการทดสอบเพื่อการทดสอบฉนวนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพด้วยเช่นกัน

เพื่อตรวจสอบสภาพฉนวนของขดลวดเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่เกิดระหว่างรอบต่อรอบของขดลวดระหว่างเฟสกับเฟส สภาพฉนวนเทียบกับกราวด์ และวิเคราะห์ค่าอิมพิแดนซ์ของฉนวนเพื่อดูแนวโน้มอายุของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้

1.4 วิธีการดำเนินงาน

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ดำเนินการศึกษาวิจัยโดยมีโดยจะเริ่มด้วยทฤษฎีพื้นฐานต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาตลอดจนการวิเคราะห์ผลการทดสอบ เป็นลำดับดังต่อไปนี้

ในบทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงวัสดุฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้า มีส่วนประกอบของระบบฉนวนที่สำคัญอยู่หลายส่วนด้วยกัน ซึ่งส่วนประกอบแต่ละส่วนนั้นจะมีการใช้วัสดุที่แตกต่างกันอยู่หลายชนิด ซึ่งจะทำให้มีค่าความทนทานต่อระดับชั้นความร้อนในทุกระดับชั้นความร้อน ซึ่งสามารถแยกส่วนประกอบ

ในบทที่ 3 เป็นการกล่าวถึงการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวนตามมาตรฐาน IEC 34-18-1 ซึ่งจะกล่าวถึงขั้นตอนการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อน ตั้งแต่การเตรียมการทดสอบ ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ การทดสอบเพื่อการวินิจฉัย และการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ในบทที่ 4 เป็นการกล่าวถึงการออกแบบการทดสอบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการพันแบบ WIRE-WOUND WINDINGS โดยใช้แบบจำลองร่องสล็อต เพื่อการทดสอบการเร่งอายุของระบบฉนวนตามมาตรฐาน IEC 34-18-21 ซึ่งจะกล่าวถึงขั้นตอนการทดสอบทั้งหมด คือ การเตรียมระบบฉนวนที่ใช้ทำการทดสอบ การออกแบบแบบจำลองร่องสล็อต ขั้นตอนการเร่งอายุทางความร้อน การทดสอบการปรับสภาพก่อนการวินิจฉัย โดยการทดสอบทางกล การทดสอบทางความชื้น และ ทำการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยโดยการทดสอบทางแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในบทที่ 5 เป็นการนำเสนอการทดลองและผลการทดลอง โดยการทดลองจะทำการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวน โดยทำการทดสอบรอบการเร่งอายุทางความร้อนสองระดับความร้อนคือ 96 ชั่วโมงและ 24 ชั่วโมงเพื่อทำการวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงของฉนวน

และบทที่ 6 เป็นการกล่าวถึงการสรุป พร้อมทั้งข้อเสนอแนะและวิจารณ์ผลการทดลองเพื่อการวิจัยต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
วัสดุฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้า

เครื่องจักรกลไฟฟ้าขนาดเล็ก มีส่วนประกอบของระบบฉนวนที่สำคัญอยู่หลายส่วนด้วยกัน ซึ่งส่วนประกอบแต่ละส่วนนั้นจะมีการใช้วัสดุที่แตกต่างกันอยู่หลายชนิด ซึ่งจะทำให้มีค่าความทนทานต่อระดับชั้นความร้อนในทุกระดับชั้นความร้อน ซึ่งสามารถแยกส่วนประกอบของระบบฉนวนเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่สำคัญ คือ

- สารเอนาเมล
- กระดาษฉนวน
- ปลอกสายหรือท่อร้อยสาย
- วาร์นิช

ซึ่งมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

2.1 สารเอนาเมล

สารเอนาเมลเป็นสารที่ใช้เคลือบขดลวดทองแดงซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารจำพวกโพลีเมอร์ มีความสำคัญอย่างสูงสำหรับระบบฉนวนของเครื่องจักรกลไฟฟ้า เนื่องจากว่าหากสารเอนาเมลมีความอ่อนแอ หรือเกิดการเสื่อมสภาพก็อาจจะทำให้เครื่องจักรกลไฟฟ้านั้นเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด อันจะทำให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าใช้งานได้อย่างไม่เต็มประสิทธิภาพ ฉะนั้นในการเลือกใช้สารเอนาเมลที่เคลือบลวดทองแดงควรเลือกใช้งานที่เหมาะสมกับสารนั้น ๆ ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของสารเอนาเมลชนิดต่าง ๆ

วัสดุสาร	ระดับชั้น (° C)	ข้อดี	ข้อจำกัด
เอนาเมลพื้นฐาน [Plain Enamel (oreoresinous)]	105	- ราคาถูก - เป็นฟิล์มที่มีความต่อเนื่องดี - ต้านทานการตัดผ่านดี - ต้านทานโหลดเกินดี - ง่ายต่อผลทางกลและรอยฉีกทางเคมี - Tight dimensional tolerance	- ต้านทานการสึกกร่อนต่ำ - ไม่เหมาะกับการพันลวดหนัก - มีขอบเขตของความสอดคล้องกับวาร์นิชอื่น ๆ

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของสารเอนาเมลชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุสาร	ระดับชั้น (° C)	ข้อดี	ข้อจำกัด
โพลีไวนิลฟอร์มัลเรซินแบบประยุกต์ (Modified polyvinyl formal resin)	105	- สามารถหมุนได้อย่างดี - มีพิกัดความเหนียวสูง - สามารถเข้ากับวาร์นิชส่วนใหญ่ แวกซ์ และ imprenating compound - เหมาะสำหรับใช้กับหม้อแปลงน้ำมัน - คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่ดี	- ต้องทำให้เกิดรอยก่อนการเชื่อมประสาน - จะเกิดความผิดปกติเมื่อถูกใช้กับสารละลายวาร์นิชโดยที่ยังไม่ได้คลายความเค้นก่อน
โพลียูรีเทน (polyurethane)	105.130.155	- สามารถเชื่อมประสานได้ที่ 360-425 ° C (ฟิล์มกลายเป็นไอ) - self fluxing - มีคุณลักษณะ Q ที่ดีเยี่ยมที่ความถี่และความชื้นสูง - เป็นฟิล์มที่มีความเหนียวและยืดหยุ่น - สามารถทำงานที่ 105 ° C ได้อย่างต่อเนื่องสูงที่สุดในระดับชั้น A ถ้าเป็นระบบใหม่สามารถใช้ได้ที่ ระดับชั้น B,F	- ไม่เหมาะกับการใช้เมื่อเกิดภาวะโหลดเกินรุนแรง - มีความต้านทานการสึกกร่อนได้น้อยกว่า Formvar or nylon jacketed wire - มีความไวต่อการทำให้นิ่มจนเป็นสารละลาย -เสถียรภาพทางการแผ่รังสีต่ำ
อีพอกซี	130	- ใช้กับหม้อแปลงที่มีลักษณะเปียก - มีความเหนียวและยืดหยุ่นดี - ต้านทานทางเคมีและทางความชื้นดี - ต้านทานการเกิดโคโรนาดี	- ต้องทำให้เป็นรอยก่อนการเชื่อมประสาน

ตารางที่ 2.1(ต่อ) คุณสมบัติของสารเอนาเมลชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุสาร	ระดับชั้น (° C)	ข้อดี	ข้อจำกัด
โพลีเอสเตอร์ที่สามารถเชื่อมได้ (Solderable polyester)	155	- สามารถเชื่อมได้ที่ 482 ° C - ทนทานอุณหภูมิ 175 ° C ได้นาน - ต้านทาน heat chock ดี - คุณลักษณะโอเวอร์โหลดดีสำหรับสายที่เชื่อมได้ - เสถียรภาพทางการแผ่รังสีดี	- ไม่ใช้สำหรับหม้อแปลงน้ำมัน - ไม่ใช้สำหรับระบบที่มีการใช้แคตาไลซ์ชนิดเอไมน์
ไนลอนโพลีเอสเอตร์ที่สามารถเชื่อมได้ (Solderable nylon polyester)	155	- สามารถเชื่อมได้ที่ 482 ° C - สามารถหมุนได้ดีกว่า unjacketed grade - ต้านทาน heat shock และ solvent shock ดี	- ไม่ใช้สำหรับหม้อแปลงน้ำมัน - ไม่ใช้สำหรับระบบที่มีการใช้แคตาไลซ์ชนิดเอไมน์ - ไม่ต้านทานความชื้นที่ unjacketed grade
โพลีเอสเตอร์ที่มีไนลอนโอเวอร์โค้ท (polyester with nylon overcoated)	155 .180	- สามารถหมุนได้ดีเยี่ยม - ต้านทาน heat shock และ solvent shock ดี - สามารถยืดหยุ่น กันรอยขูดขีดและฟิล์มมีลักษณะเหนียวดีเยี่ยม - คุณลักษณะโอเวอร์โหลดดีสำหรับสายที่เชื่อมได้	- ต้องทำให้เป็นรอยก่อนการเชื่อมประสาน - ไม่ใช้กับอุปกรณ์ที่มีการปิดคลุม - เสถียรภาพทางการแผ่รังสีต่ำ
ไอโซเนลโพลีเอสเตอร์ที่มีโพลีไอไมด์โอเวอร์โค้ท (Isonel * polyester with polyimide overcoat)	200	- คุณสมบัติทางกายภาพและไฟฟ้าส่วนใหญ่เหมือนฟอร์มวา(Formvar) - ต้านทานการตัดผ่านดีเยี่ยม - ต้านทานกับฟรีออน(Freon)ดีเยี่ยม - ต้านทานการทำลายลายดี	- ต้องทำให้เป็นรอยก่อนการเชื่อมประสาน - ไม่ใช้สำหรับหม้อแปลงน้ำมัน - ไม่ใช้ในระบบที่ประกอบด้วยคลอรีนคอมปาวด์(chroline compound)

ตารางที่ 2.1(ต่อ) คุณสมบัติของสารเอนาเมลชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุสาร	ระดับชั้น (° C)	ข้อดี	ข้อจำกัด
โพลีเอสเตอร์/ โพลีเอไมด์-ไอไมด์ (polyester/ polyamide-imide)	200,220	- โพลีเอสเตอร์ส่วนใหญ่จะใช้เอไมด์-ไอไมด์โค้ทบนสุด - หมุนได้ดี - ต้านทาน heat shock และ solvent shock ดีกว่าโพลีเอสเตอร์พื้นฐาน - ต้านทานการตัดผ่านและรอยขูดขีดดีกว่าโพลีเอสเตอร์ทั่วไป - ต้านทานฟรีออนและการทำละลายสูง -เหมาะสำหรับใช้ใน มอเตอร์ที่ปิดสนิท	- ต้องทำให้เป็นรอยก่อนการเชื่อมประสาน - ไม่ใช้กับอุปกรณ์ที่มีการปิดคลุมที่มีความชื้นและคลอรีนคอมปาวด์อยู่
โพลีเอสเตอร์เอไมด์-ไอไมด์ (polyesteramide-imide)	200	- โค้ทด้วยฟิล์มเดี่ยว - คุณลักษณะโอเวอร์โหลดดีเยี่ยม - เข้ากับอีพ็อกซีหล่อและสารหุ้มคอมปาวด์ - เข้ากับวาร์นิชและ impregnated compound ส่วนใหญ่ - ทนทานความร้อนที่ 180-210 ได้นาน - ใช้สำหรับหม้อแปลงน้ำมัน - ทนทานต่อระบบการพันขดลวดที่มีความเร็ว	- ต้องทำให้เป็นรอยก่อนการเชื่อมประสาน

ตารางที่ 2.1(ต่อ) คุณสมบัติของสารเอนาเมลชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุสาร	ระดับชั้น (° C)	ข้อดี	ข้อจำกัด
ไอโซมิด โพลีเอสเตอร์ โพลีไอไมด์ (isomid* polyester polyimide)	180,200	- โค้ทติ้งด้วยฟิล์มเดียว - คุณสมบัติ การตัดผ่าน การยืดหยุ่นและความเหนียวดีเยี่ยม - คุณสมบัติทางความชื้นและแห้งของไดอิเล็คตริกดีเยี่ยม - ต้านทานได้สูงต่อฟรีออนและตัวทำละลาย - พัฒนาการต้านทาน Heat shock ได้ดีขึ้น - เข้ากันได้กับวาร์นิชและ impregnate compound ส่วนใหญ่	- ต้องทำให้เป็นรอยก่อนการเชื่อมประสาน
ไพล์-เอ็มแอลโพลีไอไมด์ (Pyre-ML** polyimide)	220(240 pe MW 1000)	-โค้ทติ้งด้วยฟิล์มเดียว - ยังคงคุณสมบัติทางไดอิเล็คตริกสูงเมื่อทำงานที่ 220 ° C - ต้านทาน Heat shock และเสถียรภาพทางความร้อนของทุกฉนวนได้สูงสุด - ต้านทานการแผ่รังสีได้สูงสุด - มีความคงทนทางไดอิเล็กตริกและคุณลักษณะการสูญเสียต่ำสูง - เข้ากันได้กับวาร์นิชและ impregnate compound ส่วนใหญ่ - อาจใช้สำหรับมอเตอร์ระบบปิดและหม้อแปลงน้ำมัน	- ยากต่อการทำให้เป็นรอยก่อนการเชื่อมประสาน - เป็นตัวไฮโดรไลซ์หรือระบบที่มีการปิดประกอบด้วยความชื้น - จะถูกตัวทำลายลายถ้าความเค้นไม่ถูกผ่อนคลาย - ราคาของฟิล์มโค้ทติ้งสูงสุด

ตารางที่ 2.1(ต่อ) คุณสมบัติของสารเอนาเมลชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสารเอนาเมลแต่ละชนิดข้างต้นสามารถนำไปใช้งานในลักษณะที่ต่าง ๆ กัน คือ

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

- **โพลีไวนิล ฟอร์มัล (Polyvinyl Formal)** สำหรับระดับชั้นทางความร้อน A ใช้งานอย่างกว้างขวางในขดลวดสเตเตอร์ที่มีการพันแบบไวร์วาวด์ ขดลวดอาร์มาเจอร์ในมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และในหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดแห้งและชนิดน้ำมัน

- **โพลียูรีเทน (Polyurethane)** สำหรับระดับชั้นทางความร้อน A B F สามารถมีไนลอน หรือไม่มีไนลอนหุ้มอยู่ก็ได้ ซึ่งจะนิยมใช้ในบริเวณที่ต้องมีการเชื่อมประสาน และมี คุณลักษณะ 'Q' ดีเยี่ยมซึ่งจะทำให้เป็นตัวเลือกแรกที่ใช้ในงานที่ประยุกต์กับงานอิเล็คทรอนิกส์ ซึ่งสามารถแบ่งชนิดและระดับชั้นได้ดังตารางที่ 2-2

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 25-46 AWG	 B F

● NEMA Standard

ตารางที่ 2-2 ระดับชั้นทางความร้อนฉนวนสำหรับสารโพลียูรีเทน

- **ไนลอน (Nylon)** สำหรับระดับชั้นทางความร้อน A B F เหมาะสำหรับการนำไปใช้สำหรับฉนวนที่มีความต้องการคุณลักษณะทางกายภาพและทางกลที่ดี เช่น ในอุปกรณ์ที่มีการหมุน หรือขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งสามารถแบ่งชนิดและระดับชั้นได้ดังตารางที่ 2-3

สารพื้นฐาน	ระดับชั้นทางความร้อน
โพลีไวนิลฟอร์มัล	A
อะคริลิคเชื่อมประสานได้	A

ตารางที่ 2-3 ระดับชั้นทางความร้อนฉนวนสำหรับสารไนลอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารพื้นฐาน	ระดับชั้นทางความร้อน
โพลียูรีเทน	B
โพลีเอสเตอร์	F

ตารางที่ 2-3 (ต่อ) ระดับชั้นทางความร้อนฉนวนสำหรับสารไนลอน

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

- **โพลีเอสเตอร์ (Polyester)** สำหรับระดับชั้นทางความร้อน F H 200 เป็นสารที่นิยมใช้ร่วมกับสารชนิดอื่น ๆ ยกเว้น โพลีไอไมด์ เหมาะที่จะใช้งานที่อุณหภูมิสูง สามารถแบ่งชนิดและระดับชั้นได้ดังตารางที่ 2-4

โครงสร้างขดลวด	ระดับชั้นทางความร้อน
โพลีเอสเตอร์ไอไมด์สามารถเชื่อมประสานได้	F MW1000 26 H MW1000 77
โพลีเอสเตอร์ไอไมด์สามารถเชื่อมประสานได้มีไนลอนโอเวอร์โค้ท	F MW1000 27 H MW1000 78
โพลีเอสเตอร์ ไพลิเอสเตอร์ไอไมด์	H MW1000 30 200 MW1000 74
โพลีเอสเตอร์มีไนลอนโอเวอร์โค้ท	F MW1000 24 H MW1000 76
โพลีเอสเตอร์มีเอไมด์ไอไมด์โอเวอร์โค้ท	200 MW1000 35.73
โพลีเอสเตอร์มีเอไมด์ไอไมด์โอเวอร์โค้ท (bondable over coat)	180/200

ตารางที่ 2-4 ระดับชั้นทางความร้อนฉนวนสำหรับสารโพลียูรีเทน

- **โพลีเอไมด์ไอไมด์ (Polyamide imide)** สำหรับระดับชั้นทางความร้อน 200 220 เหมาะที่จะใช้งานสำหรับมอเตอร์ที่มีการปิดสนิท และสำหรับต้านทานสารฟรีออนหรือสารละลานโซเวนท์ส่วนใหญ่ ใช้สำหรับต้องการคุณลักษณะอุณหภูมิและทางกลที่ดี

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

- **โพลีไอไมด์ (Polyimide)** สำหรับระดับชั้นทางความร้อน 220 ซึ่งเป็นสารที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดในหมู่ของสารเอนาเมล ซึ่งมีคุณสมบัติ ทางเคมี การต้านทานการแผ่รังสี การทนทานการตัด สูงสุด ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้งานใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานที่ที่มีสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม แต่ราคาจะแพง ซึ่งจะนิยมใช้ในอุปกรณ์ที่มีลักษณะปิดซึ่งไม่มีชุดดักจับความชื้น การใช้งานในอุปกรณ์ที่มีการหมุนที่ต้องการอุณหภูมิสูง การใช้งานที่เกี่ยวกับการบิน

2.2 กระดาษฉนวนและฟิล์มฉนวน

กระดาษฉนวนและฟิล์มฉนวนในเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้นมีหน้าที่เพื่อป้องกันการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับขดลวดทั้งที่อยู่ในร่องสล็อตเดียวกันและที่ไม่ได้อยู่ในร่องสล็อตเดียวกัน และป้องกันการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับเฟรมของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเอง ฉะนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องรู้ถึงคุณภาพของกระดาษฉนวนเพื่อไปใช้ให้ถูกต้อง ซึ่งสามารถแบ่งชนิดต่าง ๆ ของกระดาษฉนวนได้ดังนี้

- กระดาษและฟิล์มเซลลูโลส (Cellulose paper and film)

กระดาษเซลลูโลสมีโครงสร้างพื้นฐานที่มาจากวัสดุหลายชนิด เช่น ฝ้าย เยื่อไม้ ป่าน ปอ ปอกระเจา ชานอ้อย หญ้าแห้ง กก และไม้ไผ่

คุณสมบัติ

กระดาษเซลลูโลสทั่วไปจะมีค่าความคงทนทางไดอิเล็คตริกมากกว่าอากาศเพียงเล็กน้อย ค่าความสูญเสียทางไดอิเล็คตริกจะเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากหากมีการเพิ่มความถี่ ค่าความคงทนทางกลต่ำซึ่งบางที่อาจจะต่ำที่สุด และมีความสัมพันธ์กับความชื้นสูง อย่างไรก็ตามหากกระดาษเซลลูโลสได้มีการรวมกับวัสดุฉนวนอื่น ๆ ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง เช่น หากมีการรวมกับวาร์นิชก็จะใช้กับอุปกรณ์แรงดันไฟฟ้าต่ำได้ หรือหากมีการรวมกับฉนวนเหลวก็สามารถใช้งานในแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นได้ ซึ่งกระดาษเซลลูโลสโดยทั่วไปนั้นจะมีค่าระดับชั้นทางความร้อน A แต่สามารถงานรวมกับวัสดุฉนวนอื่น ๆ เช่น เรซิน ไมกา และวัสดุฉนวนที่ได้กล่าวมาข้างต้น เป็นต้น

การใช้งาน

การใช้งานทั่วไปเพื่อสำหรับปกปิดสายและเคเบิล และเป็นฉนวนร่องสล็อตของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนและหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อป้องกันอันตรายที่มีต่อขดลวด

- กระดาษเส้นใยยาง (Vulcanised Fibre or Fish paper)

กระดาษเส้นใยยางนั้นมีพื้นฐานทางวัสดุมาจากการอิ่มตัวของเยื่อไม้ ซึ่งมีความทนทานต่อการ ช็อคสูง และมีความแข็งแรงสูง

คุณสมบัติ

- มีความยืดหยุ่นและมีความแข็งแรงสูง
- มีการต้านทานและลดระดับการอาร์คที่ดี
- น้ำหนักเบา
- ข้อเสียของกระดาษเส้นใยยางคือสามารถดูดซับความชื้นได้ดี เช่น หากมีกระดาษเส้นใยยางขนาดความหนา 1/16 นิ้ว ก็จะเพิ่มน้ำหนักถึง 30-50 % เมื่ออยู่ในน้ำ 2 ชั่วโมง
- ระดับชั้นทางความร้อน A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งาน

การใช้งานทั่วไปของกระดาษเส้นใยยางนั้นคือต้องการการใช้งานที่มีความแข็งแรงทางกลสูง และเป็นส่วนที่ไม่มีปัญหาทางความชื้น เช่น แอร์เซอร์กิตเบรคเกอร์ เครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนทั่วไป อุปกรณ์สวิทช์ และไลท์นิ่งอะแรสเตอร์ (Lightning arrester) สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าไฟฟ้าขนาดใหญ่

- กระดาษอะรามิด (Aramid paper)

กระดาษอะรามิดเป็นกระดาษที่มีพื้นฐานมาจากกระดาษโพลีไอไมด์ ซึ่งรู้จักกันในชื่อของ Nomex ซึ่งมีระดับชั้นทางความร้อน F ถึง 220

คุณสมบัติ

กระดาษอะรามิดสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ถึง 220 °C แต่ในทางการค้าหากมีการรวมกับโพลีเอสเตอร์ก็จะทำให้มีการสูญเสียคุณสมบัติข้อนี้ไปจนอาจจะเหลือการใช้งานได้ที่อุณหภูมิเพียง 180 °C มีความทนทาน และมีความแข็งแรงทางกลดีเยี่ยม และมีความต้านทานต่อกรด ด่าง คีโตน แอลกอฮอล์ น้ำมัน น้ำเย็น ได้ดี และสามารถเข้ากันได้ดีกับเอนาเมล และวาร์นิช แต่จะมีความไวต่อความชื้น

การใช้งาน

การใช้งานทั่วไปคือในเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนซึ่งจะใช้ในสล็อต เฟส ขดลวด และจุดสิ้นสุดของฉนวน และในหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับแต่ละรอบ แต่ละแท็บ และแต่ละเลเยอร์

- กระดาษไมกา (Mica paper)

กระดาษไมกาเป็นกระดาษที่ทำมาจากวัสดุไมกาโดยเฉพาะแต่จะมีค่าระดับชั้นทางความร้อนแตกต่างกันขึ้นอยู่วัสดุที่นำไปใช้ร่วม เช่น

ระดับชั้นทางความร้อน B จะรวมกับเรซินหรือวาร์นิชอินทรีย์

ระดับชั้นทางความร้อน F จะรวมกับอีพอกซีหรือโพลีเอสเตอร์

ระดับชั้นทางความร้อน H จะรวมกับเรซินหรือวาร์นิชซิลิโคน

คุณสมบัติ

มีความต้านทานการอาร์คและการเกิดโคโรนาได้ดี สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ แต่มีปัญหาคืออาจต้องใช้งานร่วมกับวัสดุฉนวนอื่น ๆ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติอื่น ๆ

การใช้งาน

ใช้สำหรับปกปิดส่วนของขดลวดหรือเคเบิลในส่วนที่ต้องการความอ่อนตัวและมีการใช้งานที่อุณหภูมิสูง

- ฟลูอโรโพลิเมอร์ฟิล์ม (Fluoropolymer film)

ฟลูออโรโพลิเมอร์เป็นตระกูลที่มีราคาสูง ซึ่งมีย่านการใช้งานที่อุณหภูมิต่าง ๆ กว้างมีคุณสมบัติทางไดอิเลคตริกและการต้านทานทางเคมีที่ดีเยี่ยม ซึ่งจะใช้ก็ต่อเมื่อไม่อยู่ในขอบเขตความสามารถของฟิล์มชนิดอื่น ซึ่งมีคุณสมบัติต่าง ๆ ดังตารางที่ 2-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟลูออโรโพลิเมอร์	ข้อดี	ข้อเสีย
โพลีเตตระฟรูออโรเอธิลีน (Polytetra fluoro ethylene .PTFE)	- ย่านการใช้งานกว้างที่สุดของพลาสติก คือ -267-260 °C - ไม่มีผลกับทางเคมีทั้งหมด - ค่าคงที่ไดอิเลคตริกไม่มีความสัมพันธ์ที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาความถี่หรืออุณหภูมิ - ทนทานต่อการอาร์ค"ดายไม่เกิดการเป็นถ่าน - ค่าดัชนีของออกซิเจนมากกว่า 95%	- ไม่สามารถหลอมละลายได้ - มีความต้านทานต่อโคโรนาและการแผ่รังสีต่ำ
เอธิลีนคลอโรไตรฟลูออโรเอธิลีนโคโพลิเมอร์(Ethylene chlorotrifluoro ethylene copolymer .ECTFE)	- มีความแข็งแรงต่อการสึกกร่อนได้ดีที่สุดในกลุ่มสารฟลูออโร - คุณสมบัติทางไดอิเลคตริกที่ดี - ค่าดัชนีของออกซิเจน 60% - น้ำหนักต่ำสุดในกลุ่มสารฟลูออโร - ต้านทานการ- สามารถทำละลายได้กับสารเอสเตอร์อินทรีย์แลคีโตน - ต้านทานการสึกกร่อนได้ดี - ต้านทานการแผ่รังสียูวีและนิวเคลียร์ได้ - ราคาต่ำที่สุดในกลุ่มสารฟลูออโร - ค่าดัชนีของออกซิเจน 44 %ซึมน้ำได้ดี	- ราคาประมาณ FEP - ถูกทำลายโดยเอมีนได้
โพลีคลอโรไตรฟลูออโรเอธิลีน (Polychlorotrifluoroethylene,PCTFE)	- ต้านทานออกซิเจน โอโซน กรดก๊าซออกซิเดชั่น ดีเยี่ยม - ป้องกันก๊าซและของเหลวดีเยี่ยม - ต้านทานการสึกกร่อนและมีคุณสมบัติทางไดอิเลคตริกดี	- ต้องใช้งานที่อุณหภูมิที่แม่นยำเพื่อป้องกันการเสื่อมถอย - ถูกทำลายโดยตัวทำละลายฮาโลจิเนท - ราคาสูงสุด

ตารางที่ 2-5 คุณลักษณะของฟลูออโรโพลิเมอร์ฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งาน

สารฟลูออโรโพลิเมอร์นี้นิยมใช้ เพื่อการคลุมฉนวนที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูงสำหรับขดลวดและเคเบิล เป็นฉนวนของฉนวนขดลวดมอเตอร์ เฟสและกราวด์มอเตอร์ ฉนวนของคาปาซิเตอร์ เป็นต้น

- โพลีไอไมด์ฟิล์ม (Polyimide film)

โพลีไอไมด์อยู่ในกลุ่มของไอไมด์โพลิเมอร์ เป็นสารที่มีคุณสมบัติทางความร้อนดีที่สุดในกลุ่มของสารอินทรีย์ ซึ่งมีคุณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

คุณสมบัติ

หลอมเหลวยากเนื่องจากมีย่านการใช้งานสูง คือ -269 ถึง 350 ° C และสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 240 ° C คุณสมบัติทางกายภาพสูง คุณสมบัติทางไดอิเลคตริกดี ถึงแม้ว่าค่าความคงทนทางไดอิเลคตริกจะลดต่ำลงเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ มีความต้านทานรังสีและแสงยูวีได้ดีเยี่ยม อย่างไรก็ตามโพลีไอไมด์มีข้อเสียที่เปราะบางต่อด่างแต่จะแข็งแรงต่อกรดอนินทรีย์ มีอัตราการดูดซับความชื้นได้ดีที่สุดในกลุ่มของไดอิเลคตริกฟิล์ม

การใช้งาน

เนื่องจากมีราคาสูงฉะนั้นจะนำไปใช้สำหรับอุปกรณ์ที่มีราคาแพง เช่น มอเตอร์ที่ต้องการกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นต้องการฉนวนที่หนาขึ้นโดยที่ไม่มีการเพิ่มขนาดของเฟรม หรือการใช้งานกับอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับอากาศยาน ใช้ในสายหรือเคเบิลที่ต้องการสมรรถนะสูงที่ต้องการประหยัดน้ำหนักและพื้นที่ หรือใช้เป็นฉนวนในคาปาซิเตอร์เป็นต้น

- โพลีคาร์บอเนทฟิล์ม (Polycarbonate film)

คุณสมบัติ

โพลีคาร์บอเนทมีคุณสมบัติการอ่อนตัวที่ดี ต้านทานความร้อน มีเสถียรภาพในรูปร่าง ค่าคงที่ทางไดอิเลคตริกไม่ขึ้นกับ อุณหภูมิหรือความถี่เมื่อใช้งานในย่าน -60 ถึง 120 ° C สามารถถูกทำลายโดยน้ำมัน ไขมัน หรือกรดเจือจางได้ แต่จะมีผลกับด่าง คีโตน เอมีน เอสเตอร์ และสาร ไฮโดรคาร์บอน

การใช้งาน

นิยมนำไปใช้ในคาปาซิเตอร์ ฉนวนขดลวด ฉนวนร่องสล็อต ฉนวนของตัวนำ เป็นต้น

- โพลีเอสเตอร์ฟิล์ม (Polyester film)

โพลีเอสเตอร์เป็นฟิล์มที่มีความคงทนแข็งแรง เหมาะสำหรับการใช้งานในระบบอุตสาหกรรมและการบรรจุ มีคุณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

คุณสมบัติ

มีคุณสมบัติทางไดอิเลคติกและคุณสมบัติทางเคมีในระดับทั่วไป เหมาะสำหรับย่านการใช้งานที่อุณหภูมิ -20 ถึง 150 ° C มีความแข็งแรงทางกลดีเยี่ยม อย่างไรก็ตามจะมีการต้านทานรังสียูวีได้ต่ำ ภายใต้สภาวะความชื้นและอุณหภูมิสูงฟิล์มมีความแนวโน้มที่จะเกิดปรากฏการณ์ไฮโดรไลซ์ (hydrolyze) โดยส่วนใหญ่แล้วจะนิยมใช้ในระดับชั้นทางความร้อน B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งาน

การใช้งานทั่วไปของโพลีเอสเตอร์นิยมใช้ในบอร์ดวงจร การใช้งานสำหรับปกปิดสายและเคเบิล เป็นสล็อตเว็ด (slot wedge) และฉนวนระหว่างเฟสในมอเตอร์ เป็นตัวป้องกันในแต่ละเลเยอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้า ฉนวนในคาปาซิเตอร์ เป็นต้น

- กรดโพลีพาราบานิค (Polyparabanic Acid)

คุณสมบัติ

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

การใช้งาน

กรดโพลีพาราบานิคนี้นิยมใช้ในการทำสายและเคเบิล ฉนวนของมอเตอร์ แผงวงจรที่มีการอ่อนตัว และเคเบิลชนิดแบนที่มีการอ่อนตัว

- โพลีโพรพิลีน (Polypropylene)

โพลีโพรพิลีนเป็นฟิล์มที่มีราคาถูกซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางไดอิเลคตริกที่เพียงพอต่องานทางไฟฟ้าและอิเลคทรอนิคส์ทั่วไป

คุณสมบัติ

โพลีโพรพิลีนฟิล์มที่มีการจัดเรียงแล้วนั้นจะมีความคงทนทางไดอิเลคตริกดี มีค่าคงที่ไดอิเลคตริกและดิสสิเพชั่นแฟคเตอร์ (dissipation factor) ที่ต่ำและคงที่เมื่อใช้งานในย่านความถี่ที่กว้าง มีความต้านทานในการป้องกันภาระเกินในกรณีแรงดันไฟฟ้าลัดวงจรได้ดี มีความต้านทานความชื้นน้ำมัน ไขมันสัตว์ ที่ดีเยี่ยม

การใช้งาน

การใช้งานหลักของโพลีโพรพิลีนคือเป็นฉนวนในคาปาซิเตอร์ การใช้งานในเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนและหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไป

- ซัลโฟนโพลิเมอร์ (Sulfone Polymers)

ซัลโฟนโพลิเมอร์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดด้วยกัน คือ โพลีซัลโฟน และ โพลีอีเธอร์ซัลโฟน

โพลีซัลโฟน (Polysulfone) มีคุณสมบัติที่ดีเยี่ยมในการต้านทานการแผ่รังสี มีการต้านทานที่ดี ในกรดแร่ ด่าง สารละลายเกลือ แอลกอฮอล์ น้ำมัน และไขมันสัตว์ แต่จะมีผลกับ คลอริเนทไฮโดรคาร์บอน เอสเตอร์ คีโตน และอะโรเมติกไฮโดรคาร์บอน (aromatic hydrocarbon) คุณสมบัติทางความร้อน ทางกล และ การติดไฟมีค่าต่ำ นิยมใช้กันในแผงวงจรที่มีความอ่อนตัวและชนิดแข็ง หรือการใช้งานในคาปาซิเตอร์ เป็นต้น

ซัลโฟนโพลิเมอร์ มีคุณสมบัติทางไดอิเลคตริกและทางกลที่ดีเมื่อใช้งานได้ถึงอุณหภูมิ 180 ° C แต่ค่าทางไดอิเลคตริกบางค่าจะมีค่าต่ำกว่าโพลีซัลโฟน แต่ค่าทางความร้อน ทางกล และการติดไฟที่สูงกว่า ความต้านทานทางเคมีใกล้เคียงกับโพลีซัลโฟน ซึ่งนิยมใช้งานในแผงวงจรที่มีราคาสูง เคเบิลชนิดแบน และไอซีเป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ท่อร้อยสาย (Sleeving)

ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าท่อร้อยสายมีความจำเป็นในส่วนที่ขดลวดไม่ได้รับการป้องกันการลัดวงจรจากกระดาษฉนวน เช่น บริเวณปลายขดลวดที่ต่อออกมาที่จุดต่อสาย ซึ่งระดับชั้นทางความร้อนของท่อร้อยสายจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ในการโค้ท ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

- **โอรีโอเรซินวาร์นิช (Oleoresinous varnish) และ โพลีไวนิลครอไรด์ (Polyvinychrolide)** ราคาถูก มีความอ่อนตัวและต้านทานต่อน้ำมันร้อนได้ดี แต่มีขอบเขตของอุณหภูมิใช้งานต่ำ คือ ระดับชั้นทางความร้อน A

- **โพลียูรีเทน (Polyurethane)** มีความเหนียวสูง และไม่มีผลกับน้ำมันร้อน สามารถใช้งานได้ ที่ระดับชั้นทางความร้อน B

- **อะคริริค (Acrylic)** มีความต้านทานต่อกรด สารละลายอินทรีย์ น้ำได้ดี มีความเหนียวและสามารถเข้ากันได้กับเอนาเมล สามารถใช้งานได้ถึงระดับชั้นทางความร้อน F

- **ยางซิลิโคน (Silicone rubber)** มีความอ่อนตัวดี และคุณลักษณะในการเร่งอายุที่ดีเยี่ยม สามารถใช้งานได้ถึงระดับชั้นทางความร้อน 200

- **ซิลิโคนเรซิน (Siliconeresin) และโพลีเตตระฟลูออโรเอธิลีนเรซิน (Polytetrafluoroethylene resin)** ราคาแพงเหมาะสำหรับใช้งานที่อุณหภูมิสูง

2.4 วาร์นิชเรซิน (Varnish resin)

วาร์นิชเรซินที่ใช้ในเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้นเพื่อให้ระบบฉนวนที่ใช้มีการยึดเกาะกันอย่างดีขึ้นเพื่อให้มีความแข็งแรงทางกลที่ดีขึ้นซึ่งสามารถแบ่งชนิดของวาร์นิชเรซินได้ดังนี้

- **โพลีเอสเตอร์ (Polyester)**

โพลีเอสเตอร์ในการผลิตวาร์นิชมี 2 ชนิดด้วยกัน คือ อัลไคด์โพลีเอสเตอร์ (Alkyd Polyester)และโพลีเอสเตอร์ที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Polyester) ซึ่งอัลไคด์โพลีเอสเตอร์มีคุณสมบัติ ทางไดอิเล็คตริกดีเยี่ยม มีความแข็งแรงทางกลและมีความต้านทานทางเคมีที่ดีและมีคุณสมบัติทางความร้อน และอัลไคด์โพลีเอสเตอร์นิยมใช้ทั่วไปในการโค้ทสำหรับอุปกรณ์ทางไฟฟ้าเช่นเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุน หม้อแปลงไฟฟ้า และอุปกรณ์อิเล็คทรอนิคส์ ซึ่งมีย่านการใช้งานที่อุณหภูมิถึง 180 °C -215 °C

โพลีเอสเตอร์ที่ไม่อิ่มตัวเหมาะสำหรับการทำให้อิ่มตัวในสูญญากาศ (Vacuum pressure impregnation .VPI) มีความเป็นไดอิเล็คตริก ความแข็งแรงทางกลและการต้านทานทางเคมีที่เพียงพอสำหรับงานทั่วไป และมีการต้านทานต่อความชื้นและไม่ดูดซับน้ำ และสามารถลดผลของการเกิดโคโรนาเนื่องจากจะเกิดช่องอากาศน้อยในระหว่างการรอให้แห้ง ซึ่งย่านการใช้งานทางความร้อนสูงถึง 180 °C -205 °C

- **อีพอกซี (Epoxy)**

อีพอกซีนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในระดับทางความร้อน B และ F ซึ่งมีความแข็งแรงทางพันธะสูงทนทานต่อความชื้นและเคมีสูง คุณสมบัติทางไดอิเล็ตริกที่ดี แต่อย่างไรก็ตามจะลดต่ำลงเมื่อใช้งานเกินย่านของอุณหภูมิแนะนำ ซึ่งนิยมใช้กันในเครื่องจักรหมุนขนาดใหญ่และมอเตอร์ที่มีการปิดสนิทซึ่งจะรวมกับตัวทำละลายจนย่านการใช้งานได้ถึง 210 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

- พารีลีน (Parylene)

เป็นสารที่ใช้ทำมีฟิล์มขนาดบางในอุปกรณ์อิเล็คทรอนิคส์ ซึ่งสามารถกำหนดความหนาบริเวณขอบจุด และพื้นที่ภายในของอุปกรณ์ได้ ซึ่งมีความแม่นยำถึง 0.004-1.25 mils คุณสมบัติทางไดอิเล็คตริกดีเยี่ยมหากทำงานไม่เกินอุณหภูมิ 150 °C ในอากาศหรือมากกว่า 220 °C ในบรรยากาศที่มีออกซิเจนอิสระ มีคุณสมบัติทางกลที่ดีเมื่อใช้งานที่ย่าน -200 ถึง 275 °C และมีความต้านทานสูงในการป้องกันกับตัวทำละลายและการกัดกร่อนทางเคมี นิยมใช้ในวงจรที่ต้องการการป้องกันจากสภาพแวดล้อมที่ไม่ดี เช่น ความชื้น สเปรย์เกลือ สารปนเปื้อนในอากาศ เป็นต้น ตัวอย่างอุปกรณ์ที่ใช้เช่น เทรอ์โมคัปเปิล ตัวต้านทาน โฟโตเซล และเซนเซ็อร์ต่าง ๆ

- ฟีโนลิค (Phenolics)

ฟีโนลิคเป็นวาร์นิชเรซินที่ใช้อย่างกว้างขวางในย่านการใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่าเรซินชนิดอื่น และใช้งานในระดับชั้นทางความร้อน H ซึ่งมีราคาถูกกว่า ซิลิโคนวาร์นิช และนิยมนำไปใช้ในสถานที่ที่มีความชื้นหรือที่ที่เกิดราได้ง่าย อีกทั้งยังสามารถต้านทานผลของเคมีได้ดีอีกด้วย

- โพลียูรีเทน (Polyurethane)

โพลียูรีเทนเป็นวาร์นิชเรซินที่มีย่านการใช้งานที่ระดับชั้นทางความร้อน F และมีความสามารถทนต่อการสึกกร่อนได้ดีเยี่ยม นิยมใช้ในการโค้ทสารเอนาเมลและอุปกรณ์ไฟฟ้าทั่วไป

- ซิลิโคน (Sillicone)

ซิลิโคนวาร์นิชเป็นสารที่ทำมาจากเรซิน ซึ่งมีเสถียรภาพทางความร้อนดีเยี่ยมและมีความต้านทานน้ำ แต่จะมีราคาสูงซึ่งจะนำไปใช้เมื่อวาร์นิชอื่นไม่มีความเหมาะสมในการใช้งาน ซึ่งมีคุณสมบัติที่ดีต่าง ๆ เช่น มีคุณสมบัติทางไดอิเลคตริคที่ดีเยี่ยมในย่านการใช้งานที่อุณหภูมิกว้าง และสามารถใช้งานได้สูงถึง 250 °C มีความต้านทานในการเกิดโคโรนาได้ดีกว่าสารชนิดอื่น กันน้ำและกันความชื้นได้ดีเยี่ยม แต่จะมีคุณสมบัติทางกลและความเหนียวที่น้อยกว่า อีพอกซี และโพลีเอสเตอร์ ส่วนการละลายน้ำ การต้านทานทางเคมีและการเข้ากันได้กับวัสดุสารชนิอื่น ๆ นั้นจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักของโมเลกุลและลักษณะของพันธะ ซึ่งนิยมใช้กับอุปกรณ์ที่ต้องการการใช้งานที่อุณหภูมิสูง สภาพแวดล้อมที่ไม่ดี เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
61384

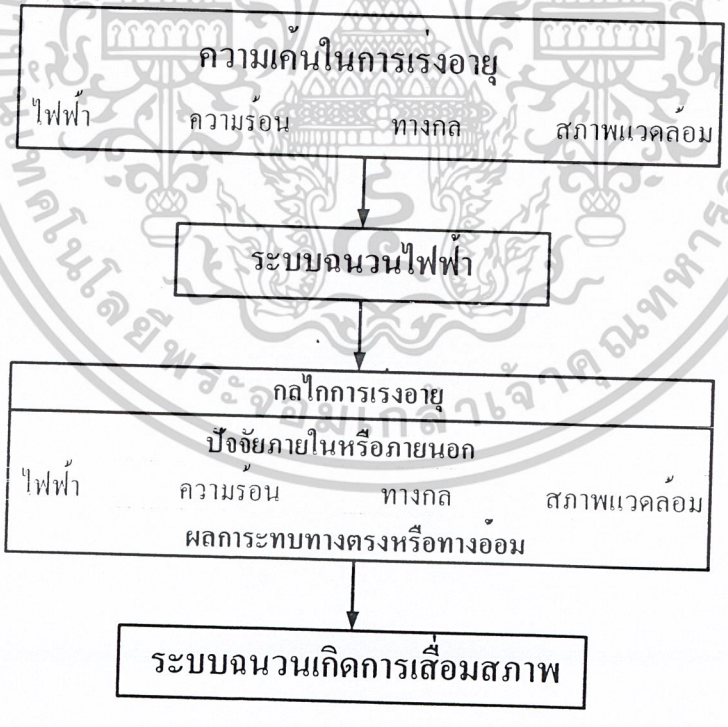
บทที่ 3
กระบวนการเร่งอายุของระบบฉนวน

3.1 บทนำ

การเสื่อมสภาพของระบบฉนวนสามารถเกิดขึ้นจากหลายปัจจัย เช่น ความเค้นทางความร้อน ความเค้นทางกล ความเค้นทางไฟฟ้า หรือผลจากสภาพแวดล้อม เป็นต้น แต่ละปัจจัยเป็นการเร่งอายุของระบบฉนวนแทบทั้งสิ้น ซึ่งจะทำให้อายุของระบบฉนวนนั้นลดน้อยลง โดยในบทนี้จะนำเสนอผลที่เกิดจากปัจจัยต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมา

3.2 การเร่งอายุระบบฉนวน

การเร่งอายุหมายถึงการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรของคุณสมบัติความเป็นฉนวนของระบบฉนวนไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการถูกกระทำ โดยปัจจัยที่ส่งผลอาจเป็นปัจจัยเดียวหรือหลายปัจจัยรวมกันก็ได้ ความเค้นที่ทำให้เกิดการเร่งอายุนั้นอาจเกิดจากการเร่งอายุภายในหรือการเร่งอายุภายนอกของระบบฉนวนนั้น ซึ่งระบบฉนวนไฟฟ้าส่วนใหญ่การเร่งอายุภายนอกจะมีอิทธิพลเหนือกว่า เป็นเพราะว่าโดยปกติแล้วระบบฉนวนไฟฟ้านั้นอาจเกิดความไม่สมบูรณ์หรือการปนเปื้อนของสิ่งสกปรกได้ การเร่งอายุของระบบฉนวนทางไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3-1



รูปที่ 3-1 การเร่งอายุของระบบฉนวนไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดและระดับของสิ่งปนเปื้อนและส่วนของความไม่สมบูรณ์ในระบบฉนวนไฟฟ้าในหลายชนิดของอุปกรณ์ทางไฟฟ้า จะส่งผลทำให้สมรรถนะการใช้งานของอุปกรณ์นั้นลดลง ซึ่งการลดระดับของสิ่งปนเปื้อนและตรวจสภาพของระบบฉนวนไฟฟ้านั้นจะทำให้สมรรถนะการใช้งานของอุปกรณ์นั้นดีขึ้น

ปัจจัยความเค้นที่เกิดจาก ไฟฟ้า ความร้อน ทางกล หรือทางสภาพแวดล้อมนั้นจะส่งผลให้เกิดการเร่งอายุระบบฉนวนไฟฟ้าอันจะทำให้ระบบฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพในที่สุด ระหว่างการเร่งอายุในปัจจัยความเค้นหนึ่งนั้นอาจไม่ส่งผลกับระบบฉนวนไฟฟ้าในช่วงแรก แต่ในท้ายที่สุดแล้วก็จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอัตราการเสื่อมสภาพของระบบฉนวนนั้นเร็วขึ้น ซึ่งการเร่งอายุระบบฉนวนทางไฟฟ้า มีดังนี้

3.2.1 การเร่งอายุทางไฟฟ้า

การเร่งอายุทางไฟฟ้าเกิดได้จากทั้งแรงดันกระแสสลับ กระแสตรง หรือแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งจะทำให้เกิดผลต่าง ๆ ดังนี้

- ผลกระทบจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วน เมื่อความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าเฉพาะจุดมีค่ามากกว่าความคงทนต่อการเกิดการเบรกดาวน์ ในระบบฉนวนไฟฟ้า
- ผลจากการเกิดร่องรอย(electrical tracking)
- ผลจากการเกิดปรากฏการณ์ทรีอิง (electrical treeing)
- ผลจากปรากฏการณ์อิเล็คโตรไลซิส (electrolysis)
- ผลจากระบบฉนวน 2 ชั้น
- ผลจากการเพิ่มอุณหภูมิอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของความสูญเสีย
- ผลจากการประจุ (charge injection)

รูปที่ 3-2 แสดงปัจจัยทั้งภายในและภายนอกของการเร่งอายุทางไฟฟ้า ความเค้นทางไฟฟ้าได้ถูกนำมาพิจารณาเป็นปัจจัยหลักในการเร่งอายุ ซึ่งสามารถยกตัวอย่างความเสื่อมสภาพของระบบฉนวนซึ่งเกิดจากปัจจัยการเร่งอายุทางไฟฟ้าได้ดังรูป 3-3 กล่าวคือ เมื่อระบบฉนวนเกิดการอัดประจุ จะทำให้เกิดช่องโหว่ หรือโพรงอากาศขึ้นอันจะทำให้เกิดการดิสชาร์จ์บางส่วนให้เกิดความเสื่อมสภาพ หรืออาจจะส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ทรีอิงและทำให้ระบบฉนวนเกิดการเสียหาย

ในแต่ละระบบฉนวนทางไฟฟ้านั้นกระบวนการเสื่อมสภาพมีความซับซ้อนมาก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงได้มีการพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการทำนายว่าปัจจัยในการเร่งอายุทางไฟฟ้ามีผลกระทบอย่างไรต่ออายุของระบบฉนวนทางไฟฟ้า ซึ่งความสัมพันธ์อย่างหนึ่งซึ่งเป็นสมการแปรผันตรงข้ามระหว่างอายุและแรงดันไฟฟ้าเป็นไปตามสมการ 3.1

$$L \propto V^{-n} \qquad (3.1)$$

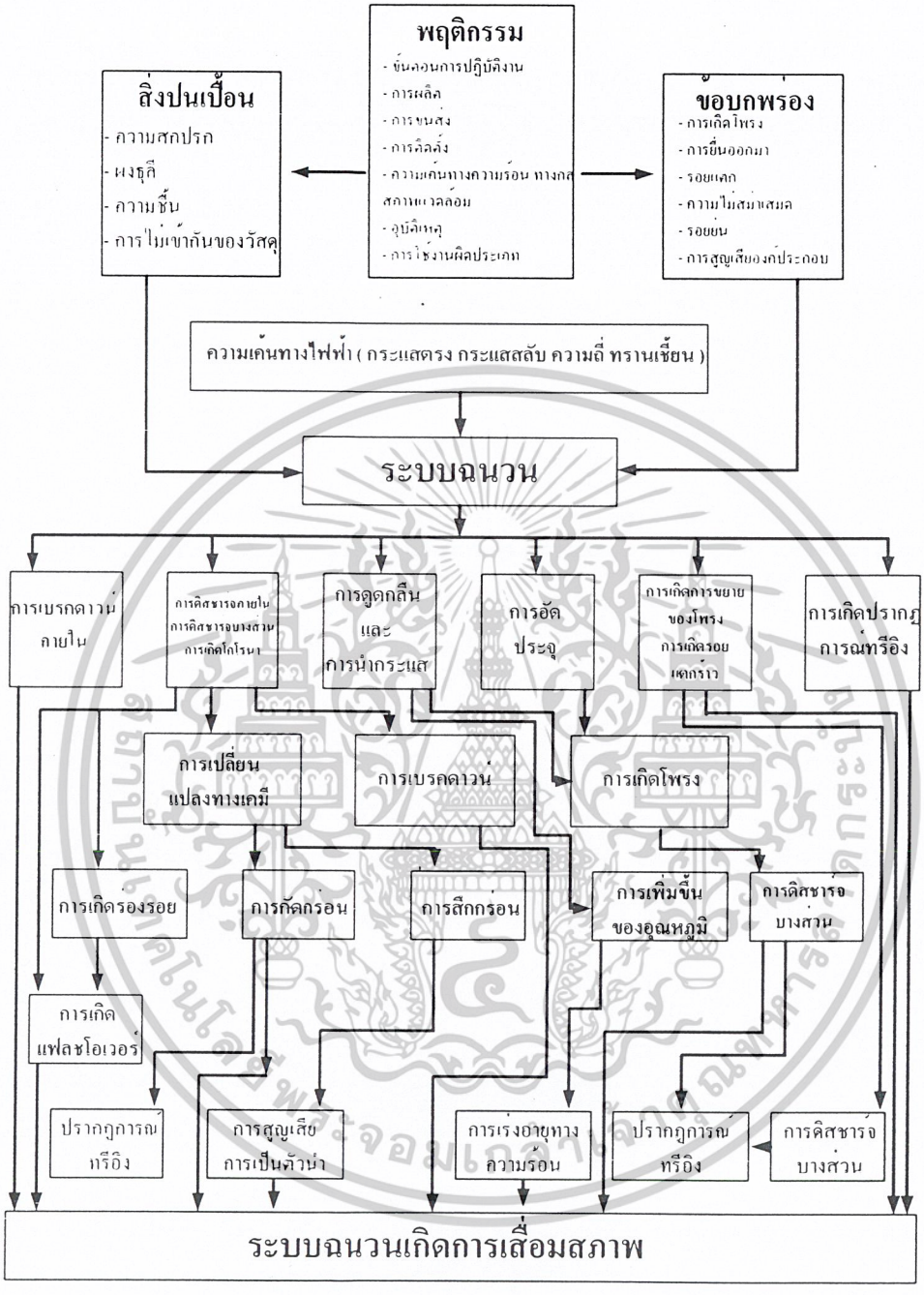
เมื่อ L คือ อายุ

V คือ แรงดันไฟฟ้า

n คือ เลขชี้กำลังของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและอายุ

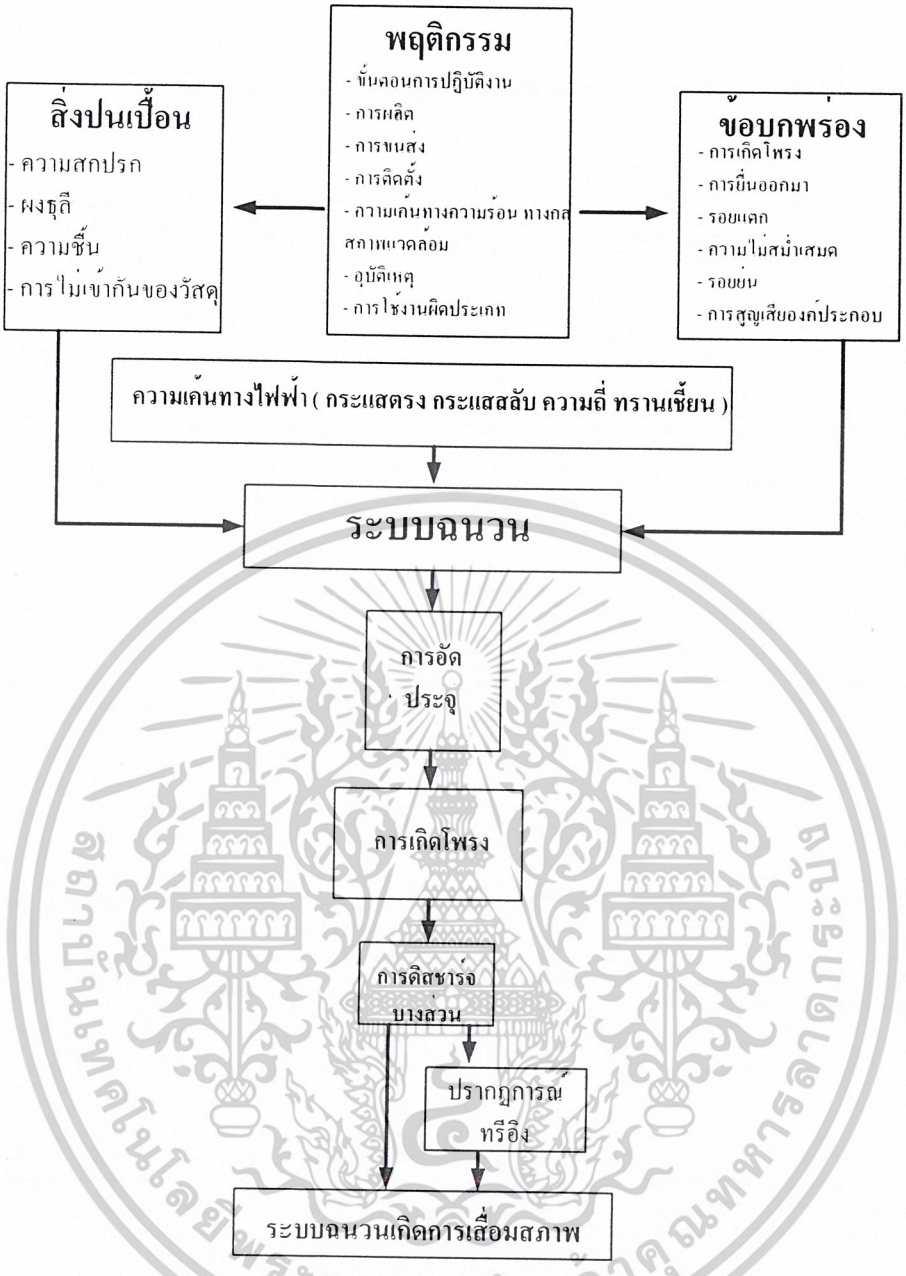
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเร่งอายุทางไฟฟ้าจะมีผลมากขึ้นหากมีการให้ความเค้นทางไฟฟ้าที่ความถี่สูงมากกว่าการใช้งานปกติ



รูปที่3-2 ปัจจัยการเร่งอายุทางไฟฟ้าภายในและภายนอกของระบบฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-3 ตัวอย่างการเร่งอายุทางไฟฟ้าระบบฉนวน

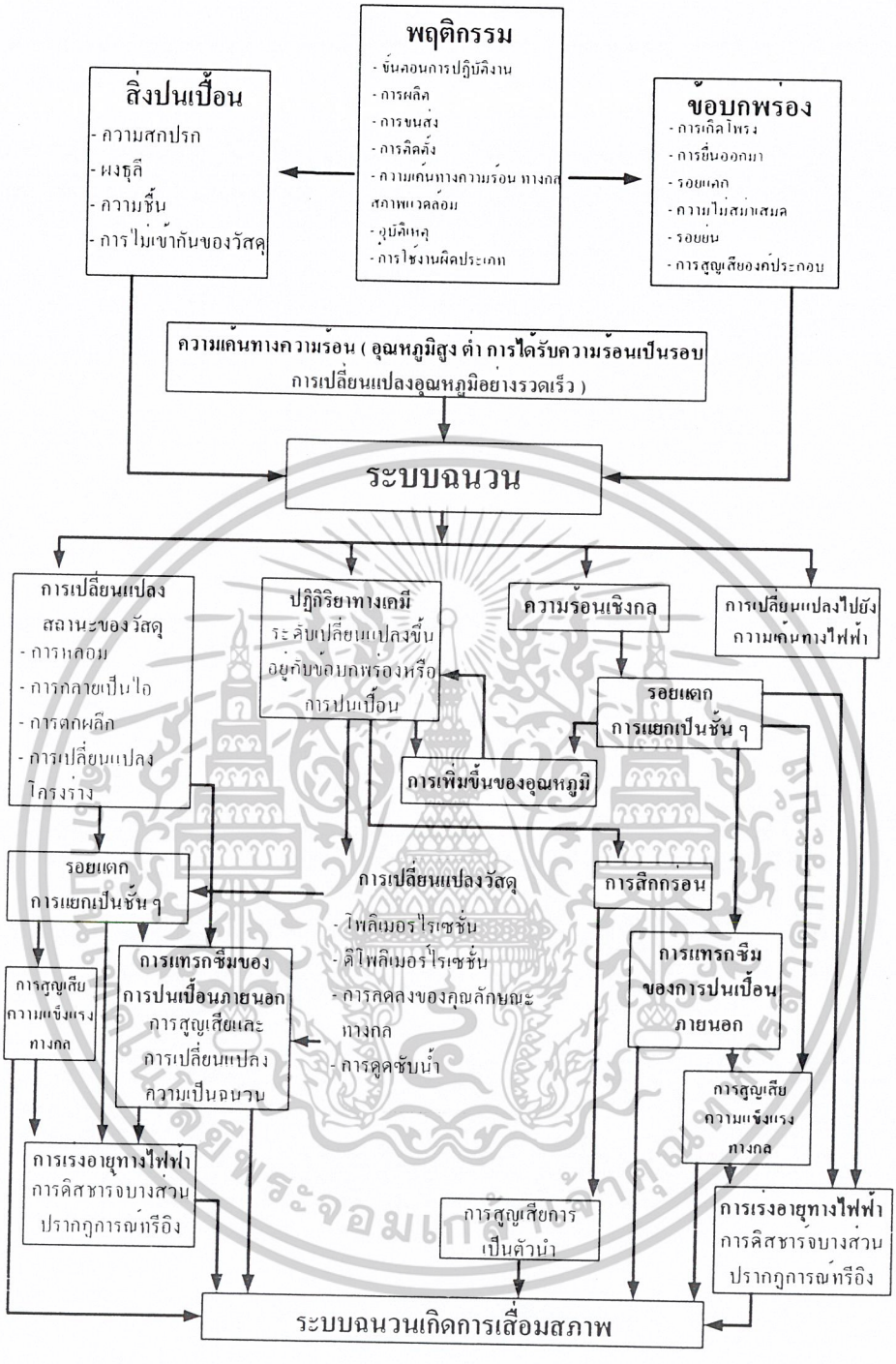
3.2.2 การเร่งอายุทางความร้อน

การเร่งอายุทางความร้อนทำให้เกิดผลดังนี้

- กระบวนการในการเปลี่ยนแปลงค่าทางเคมี และฟิสิกส์ ตัวอย่างผลของการเสื่อมสภาพทางเคมี เช่น โพลิเมอไรเซชั่น ดิโพลิเมอไรเซชั่น เป็นต้น

- ผลกระทบเนื่องมาจากอุณหภูมิทางกลที่เป็นสาเหตุมาจากแรงที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

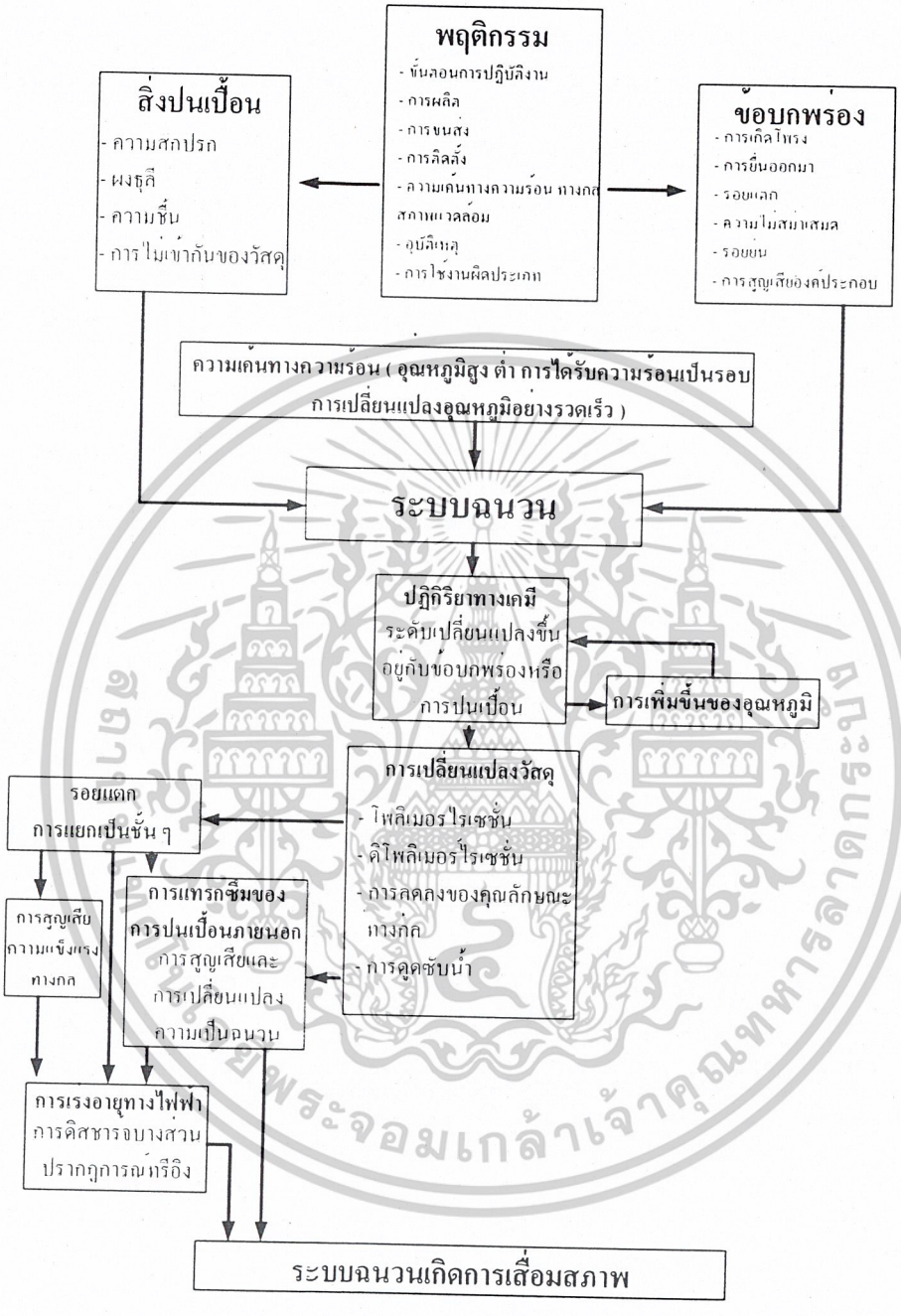


รูปที่ 3-4 ปัจจัยการเร่งอายุทางความร้อนภายในและภายนอกของระบบฉนวน

ปัจจัยทั้งภายในและภายนอกที่มีผลต่อการเร่งอายุทางความร้อนแสดงได้ดังรูปที่ 3-4 และตัวอย่างการเสื่อมสภาพของระบบฉนวนซึ่งเกิดจากการเร่งอายุทางความร้อนแสดงได้ดังรูปที่ 3-5กล่าวคือ เมื่อระบบฉนวนได้รับการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มของอุณหภูมิจนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ซึ่งทำให้เกิดรอยแตกและมีการแทรกซึมจากสิ่งเจือปนภายนอก อันทำให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วน หรือการเกิดปรากฏการณ์ทรีอิง อันทำให้ระบบฉนวนเกิดการเสียหาย



รูปที่ 3-5 ตัวอย่างการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวน

ระดับการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และฟิสิกส์ที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นสาเหตุหลักของการเร่งอายุทางความร้อน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางเคมีตามสมการอาร์รีเนียส (Arrhenius equation) เป็นดังสมการที่ 3.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าอายุของระบบฉนวนนั้นจะแปรผกผันกับอุณหภูมิสัมพัทธ์ที่ทำการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวนนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L = A\exp(-\frac{E}{kT}) \qquad (3.2)$$

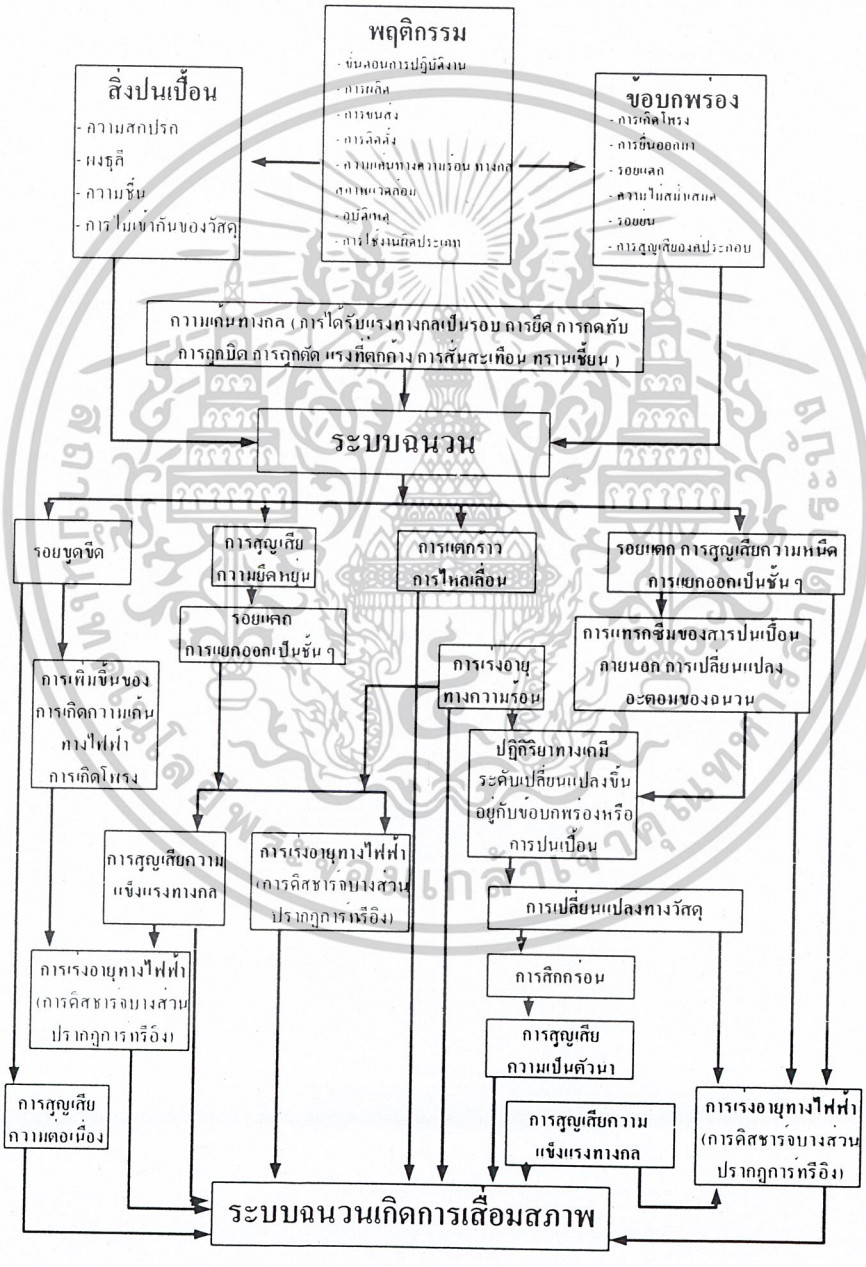
เมื่อ L คือ อายุ

A คือ ค่าคงที่

E คือ พลังงานกระตุ้น

k คือ ค่าคงที่โบลซ์แมน (Boltzmann constant)

T คือ อุณหภูมิสัมพัทธ์



รูปที่ 3-6 ปัจจัยการเร่งอายุทางกลภายในและภายนอกของระบบฉนวน

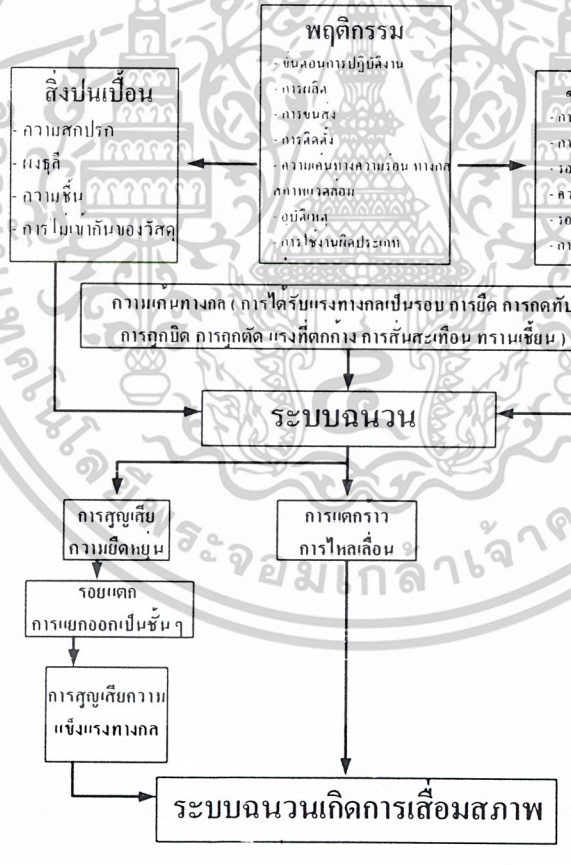
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การเร่งอายุทางกล

การเร่งอายุทางกลจะทำให้เกิดผลต่าง ๆ ดังนี้

- การเสียสภาพของส่วนที่เป็นฉนวนที่มีสาเหตุมาจากรอบของความเค้นทางกลระดับต่ำ ๆ จำนวนมาก
- ผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิทางกลที่เป็นสาเหตุมาจากแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน
- การปริแตกของฉนวนเนื่องจากความเค้นทางกลที่ระดับสูง
- การเกิดรอยสึกเนื่องจากการเคลื่อนไหวที่สัมพัทธ์กันระหว่างส่วนประกอบต่าง ๆ ของอุปกรณ์
- การค่อย ๆ เสื่อมลงของฉนวนภายใต้ความเค้นทางกลซึ่งมีผลของความเค้นทางไฟฟ้าและทางความร้อน

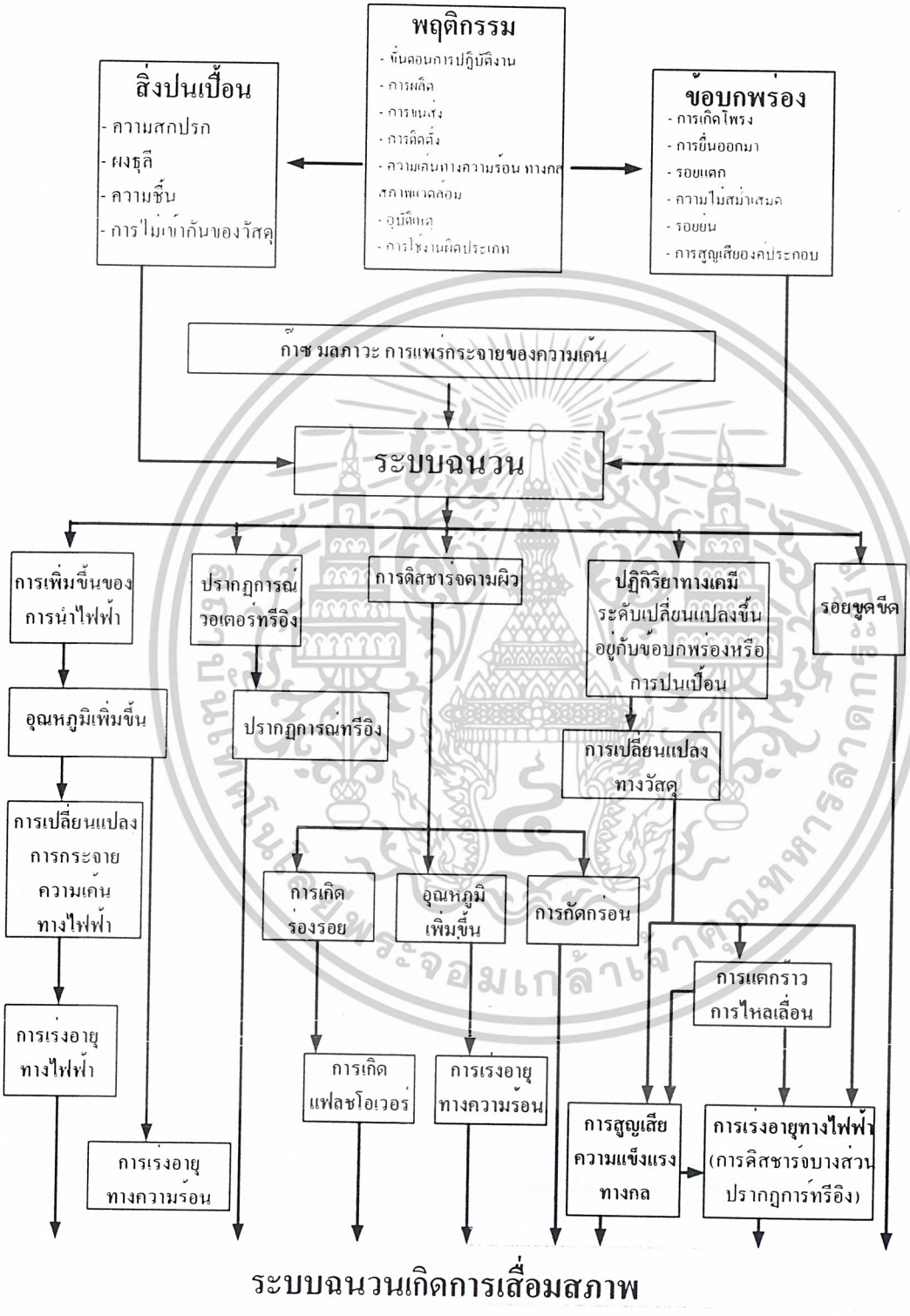
ปัจจัยทั้งภายในและภายนอกที่มีผลต่อการเร่งอายุทางกลแสดงได้ดังรูปที่ 3-6 และตัวอย่างการเสื่อมสภาพของระบบฉนวนซึ่งเกิดจากการเร่งอายุทางกลแสดงได้ดังรูปที่ 3-7 กล่าวคือ เมื่อระบบฉนวนได้รับความเค้นทางกล อาจทำให้เกิดรอยแตก รอยร้าวจนทำให้ระบบฉนวนเกิดความเสียหาย หรืออาจเกิดการเสื่อมสภาพความยืดหยุ่นของฉนวนก่อนจนเกิดรอยแตกร้าวจนทำให้ระบบฉนวนเกิดการเสียหาย



รูปที่ 3-7 ตัวอย่างการเร่งอายุทางกลระบบฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาที่ผ่านมาความเค้นทางกลจะแปรผกผันกับอายุของระบบฉนวน และหากทำการพล็อตความสัมพันธ์ดังกล่าวลงบนลอกการิทึมกราฟ แล้วนั้นจะได้ความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้น และหากมีผลของความถี่ทางกลเพิ่มขึ้นก็จะส่งผลกับอายุของระบบฉนวนนั้น ๆ

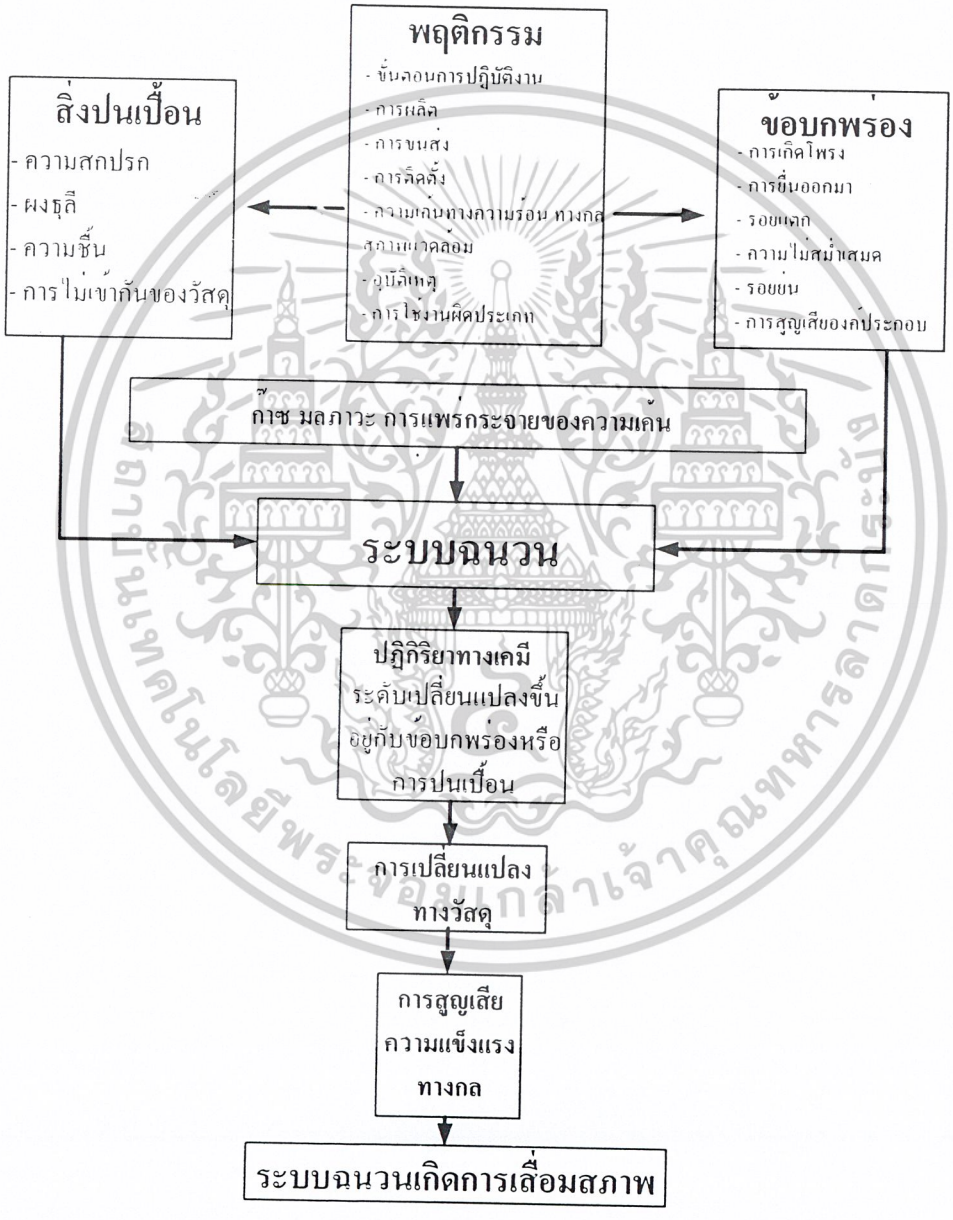


รูปที่ 3-8 ปัจจัยการเร่งอายุเนื่องจากผลทางสภาพแวดล้อมภายในและภายนอกของระบบฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 การเร่งอายุเนื่องจากผลทางสภาพแวดล้อม

การเร่งอายุเนื่องจากผลของสิ่งแวดล้อมนั้นจะประกอบด้วยการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาทางเคมี ภายใน ผลจากสิ่งแวดล้อมหรือการปนเปื้อนของฝุ่นละอองอันทำให้เกิดผลของพฤติกรรมทางไฟฟ้า เป็นต้น ปัจจัยทั้งภายในและภายนอกที่มีผลต่อการเร่งอายุเนื่องจากผลทางสภาพแวดล้อมแสดงได้ดังรูปที่ 3-8 และตัวอย่างการเสื่อมสภาพของระบบฉนวนซึ่งเกิดจากการเร่งอายุเนื่องจากผลทางสภาพแวดล้อมแสดงได้ดังรูปที่ 3-9 กล่าวคือ เมื่อระบบฉนวนได้รับผลจากสภาพแวดล้อมอาจเกิดปฏิกิริยาทางเคมีอันเนื่องมากจากการปนเปื้อน จนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของวัสดุอันทำให้เกิดการสูญเสียทางกลจนทำให้เกิดการเสียหายของระบบฉนวน



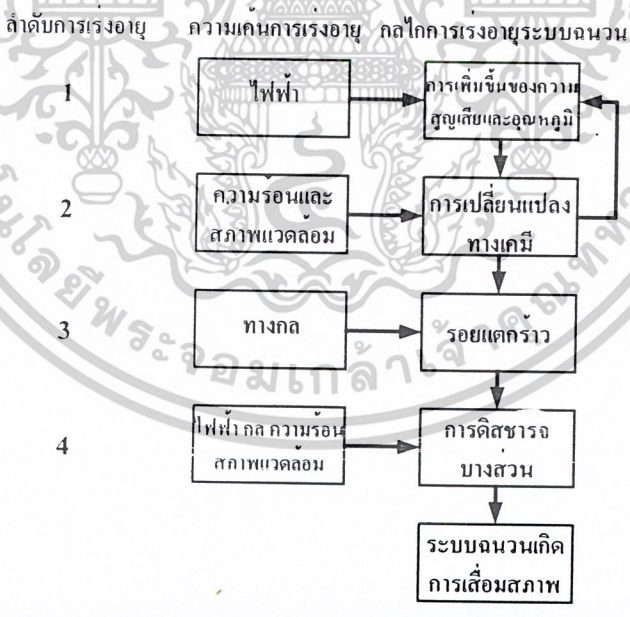
รูปที่ 3-9 ตัวอย่างการเร่งอายุเนื่องจากผลทางสภาพแวดล้อมระบบฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 การเร่งอายุจากหลายปัจจัย

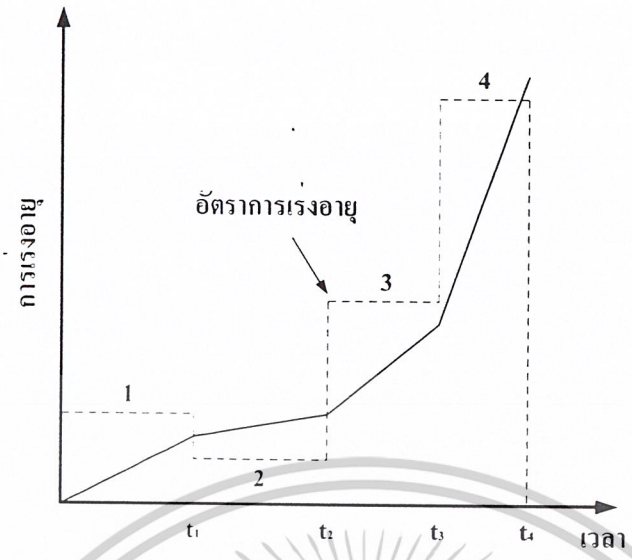
การเร่งอายุระบบฉนวนนั้นอาจเกิดจากปัจจัยการเร่งอายุปัจจัยเดียวซึ่งเป็นส่วนสำคัญต่อการเสื่อมสภาพของฉนวน หรืออาจเกิดจากหลายปัจจัยที่มีส่วนสำคัญต่อสภาพของระบบฉนวน ซึ่งปัจจัยการเร่งอายุนี้อาจมีผลกระทบรวมกันได้ ซึ่งกล่าวได้ว่าเป็นการกระทำรวมกันของความเค้นอาจจะเป็นการกระทำที่เสริมกันหรือหักล้างกันก็ได้ การเร่งอายุระบบฉนวนในทางปฏิบัตินั้นมีความซับซ้อนและการเสื่อมสภาพของระบบฉนวนนั้นมักมีสาเหตุมาจากการรวมกันของหลายปัจจัย แม้ว่าระบบฉนวนนั้นอาจเกิดการเสียหายเนื่องจากปัจจัยสำคัญเพียงปัจจัยเดียวก็ตาม

ยกตัวอย่างเช่น หากระบบฉนวนได้รับผลกระทบจากปัจจัยความเค้นทางไฟฟ้า ทางกล ทางความร้อน และสภาพแวดล้อมดังรูปที่ 3-10 ในขั้นแรกนั้นระบบฉนวนได้รับความเค้นทางไฟฟ้าซึ่งจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียไดอิเล็คตริก (dielectric loss) มากขึ้นซึ่งเป็นผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ณ จุดใดจุดหนึ่ง หรือหลาย ๆ จุด ในระบบฉนวนนั้น ในช่วงที่มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมินี้ระบบฉนวนได้รับความเค้นทางความร้อนและผลจากสภาพแวดล้อม ซึ่งจะทำให้ระบบฉนวนเกิดการเร่งการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในขั้นตอนที่ 2 โดยการเปลี่ยนแปลงทางเคมีนี้สามารถทำให้อัตราการเร่งอายุฉนวนเพิ่มมากขึ้นหรือลดลงก็ได้ และเมื่อคุณสมบัติทางกลของระบบฉนวนได้รับผลกระทบจนถึงระดับวิกฤตอันเนื่องมาจากได้รับความเค้นทางกลจนทำให้ระบบฉนวนเกิดรอยแตกหรือรอยแยกขึ้นในขั้นตอนที่ 3 ต่อมาเมื่อรอยแตกหรือรอยแยกนั้นมีขนาดใหญ่มากพอซึ่งจะทำให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วนจนทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของระบบฉนวน รูปที่ 3.11 แสดงว่าอัตราการเร่งอายุนั้นจะไม่ขึ้นกับเวลาแต่จะขึ้นอยู่กับการให้ความเค้นซึ่งเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญในช่วงนั้น ๆ



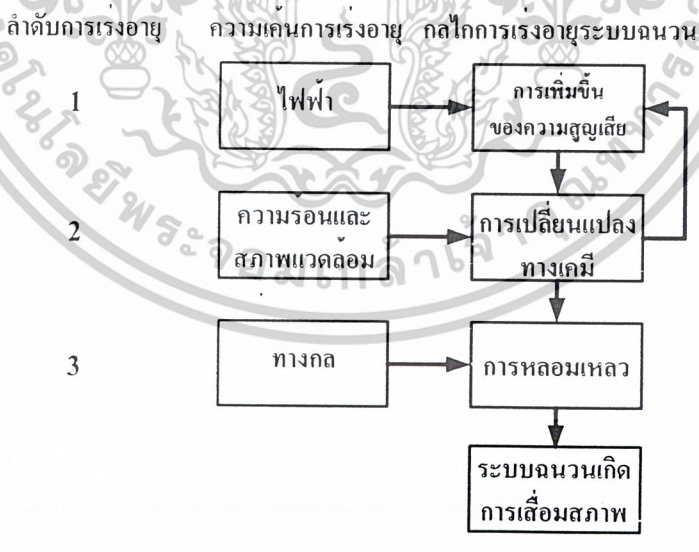
รูปที่ 3-10 ตัวอย่างการเร่งอายุระบบฉนวนจากหลาย ๆ ปัจจัยเป็นลำดับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



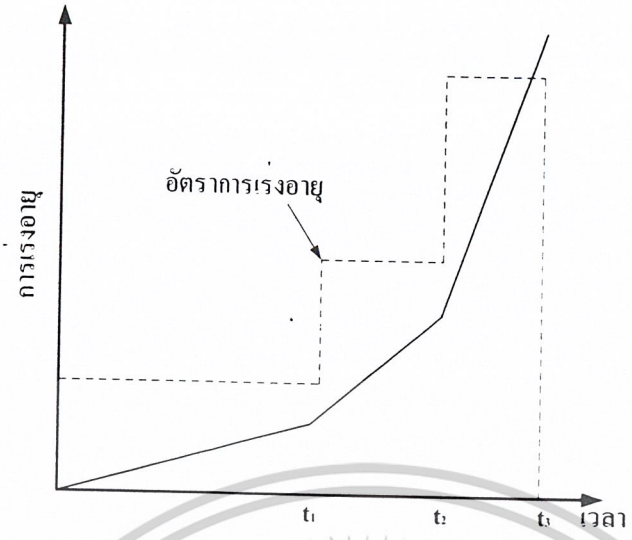
รูปที่ 3-11 ความสัมพันธ์ของการเร่งอายุกับลำดับเวลาจากรูปที่ 3-10

อีกลักษณะหนึ่งดังรูปที่ 3-12 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีในขั้นตอนที่ 2 นั้นกลับไปทำให้เกิดการสูญเสียของไดอิเล็คตริกเพิ่มมากขึ้นในขั้นตอนที่ 1 ด้วยซึ่งจะส่งผลให้มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วจนนำไปสู่การหลอมเหลวของระบบฉนวนในขั้นตอนที่ 3 ซึ่งการสูญเสียความแข็งแรงทางกลนี้เพียงพอต่อการทำให้ระบบฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพได้ อัตราการเร่งอายุกับลำดับเวลาของตัวอย่างนี้แสดงได้ดังรูปที่ 3-13



รูปที่ 3-12 ตัวอย่างการเร่งอายุระบบฉนวนจากหลาย ๆ ปัจจัยเป็นลำดับเวลาตัวอย่างที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-13 ความสัมพันธ์ของการเร่งอายุกับลำดับเวลาจากรูปที่ 3-12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การออกแบบการทดสอบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการ พันแบบ WIRE-WOUND WINDINGS โดยใช้แบบจำลองร่องสล็อต

4.1 บทนำ

ความทนทานของวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับตัวประกอบหลายอย่าง เช่น อุณหภูมิ ความเค้นทางไฟฟ้า และทางกล การสั่นสะเทือน การเผยผึ่งต่อบรรยากาศและสารเคมี ที่ทำให้เกิดความเสียหายความชื้น และสิ่งสกปรกโดยทั่วไป วัสดุฉนวนไฟฟ้าจะ ไม่สามารถทนทานต่ออุณหภูมิที่กำหนดให้โดยไม่จำกัดเวลาได้แต่วัสดุฉนวนไฟฟ้าก็จะมีอายุการใช้งานที่พอเพียง ถ้าอุณหภูมิ ของบางคาบในช่วงเวลานั้นลดลงต่ำกว่าค่าที่กำหนดเป็นครั้งคราว ซึ่งโดยทั่วไปแล้ววัสดุฉนวนไฟฟ้าจะมีอายุการใช้งานที่นานพอถ้าให้ทำงานที่ภาวะการใช้งานตามปกติตามมาตรฐานของขีดจำกัดทางอุณหภูมิ

4.2 ขอบเขตของการทดสอบ

การทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวนโดยการใช้แบบจำลองร่องสล็อตตามมาตรฐาน IEC 34-18-21 เป็นวัตถุทดสอบนั้นจะทำการทดสอบโดยอ้างถึงมาตรฐาน IEC 34-18-1 ซึ่งในการทดสอบจะประกอบด้วยหลายรอบการทดสอบ ซึ่งแต่ละรอบการทดสอบจะประกอบด้วย

- รอบย่อยการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อน
- รอบย่อยการทดสอบเพื่อการวินิจฉัย ซึ่งจะประกอบด้วย การทดสอบทางกล การทดสอบทางความชื้น และการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้า

4.3 จุดประสงค์การทดสอบ

จุดประสงค์การทดสอบเพื่อวิเคราะห์หาจุดบกพร่องของระบบฉนวน แล้วตรวจสอบสภาพฉนวนของขดลวดเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่เกิดระหว่างรอบต่อรอบของขดลวด ระหว่างเฟสกับเฟส สภาพฉนวนเทียบกับกราวด์ และวิเคราะห์ระบบฉนวนเพื่อดูแนวโน้มอายุของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้

4.4 วัตถุทดสอบ

4.4.1 โครงสร้างของวัตถุทดสอบ

วัตถุทดสอบที่ใช้ในการทดสอบนี้ จะใช้โครงสร้างแบบจำลองร่องสล็อตที่ได้ทำการออกแบบ และรูปแบบระบบฉนวนที่ถูกทดสอบ ซึ่งแบบจำลองร่องสล็อตที่ทำขึ้นรูปมานั้นควรมีความใกล้เคียงกับระบบฉนวนจริงที่มีการประกอบเสร็จแล้ว ซึ่งเป็นการจำลองระบบฉนวนที่มีการพันแบบไวร์วาวด์ ซึ่งมีรายละเอียดของแบบจำลองร่องสล็อตดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1.1 วัสดุที่นำมาใช้

- ส่วนประกอบที่เป็นโลหะ (นอกเหนือจากส่วนที่นำไฟฟ้า) โลหะสแตนเลส
- อินซูเลเตอร์หรือเทอมินอล เซรามิคหรือวัสดุอื่นๆที่ทนต่ออุณหภูมิสูงๆได้
- ขดลวดและวัสดุที่เป็นฉนวน เมื่อนำมาใช้หรือพิจารณาเลือกมาใช้ให้ใช้ตามการใช้งานในเครื่องจักรกล

4.4.1.2 ขนาดของวัสดุตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

ขนาดของวัสดุตัวอย่างทีใช้ในการทดสอบควรประมาณขนาดที่ใช้ตามการใช้งานในเครื่องจักรกล ระยะครีพเอจ (creepage distance) ความหนาของวัสดุที่ใช้เป็นฉนวน และที่ว่างอากาศควรเหมือนหรือใกล้เคียงกับการใช้งานในเครื่องจักรกล

4.4.1.3 โครงสร้าง

ขดลวดสองขดถูกใส่เข้าไปในคู่ร่องสล็อตที่เหมือนกันซึ่งเป็นส่วนประกอบที่จำเป็นของแบบจำลองร่องสล็อต ร่องสล็อตถูกสร้างจากแผ่นสแตนเลสในรูปแบบโดยประมาณและถูกยึดอยู่บนฐานของแบบจำลองร่องสล็อต อินซูเลเตอร์หรือเทอมินอลทั้ง 4

ชิ้นจะถูกยึดอยู่บนฐานของแบบจำลองร่องสล็อตดังรูปที่ 4.3 แสดงแบบจำลองร่องสล็อตที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์

ขดลวดทั้งสองขดนั้นได้จากการพันด้วยลวดตัวนำสองเส้นขนานกัน จำนวนรอบควรจะประมาณให้พอดีกับร่องสล็อตโดยให้เหมือนกับการใช้งานในเครื่องจักรกล และขดลวดทั้งสองขดถูกต่อเข้ากับอินซูเลเตอร์หรือต่อมินอลเพื่อให้ง่ายในการทดสอบแรงดันระหว่างขดลวดกับกราวด์ ระหว่างขดลวดกับขดลวด และระหว่างรอบต่อรอบขดลวด

แบบจำลองร่องสล็อตไม่สามารถจำลองผลกระทบจากกระบวนการผลิตจริง เช่น เทคนิคในการพันขดลวด เนื่องจากผลกระทบจากกระบวนการผลิตนั้นมีค่าน้อยมาก แบบจำลองร่องสล็อตอาจจะประกอบด้วยมือเพราะง่ายและสะดวก

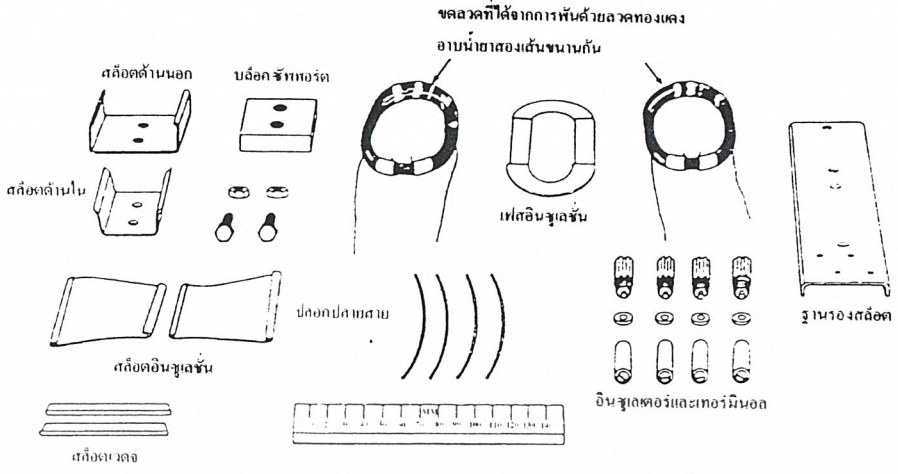
4.4.2 รายละเอียดของโครงสร้างแบบจำลองร่องสล็อต

ในห้องทดสอบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบของแบบจำลองร่องสล็อตที่กำหนดไว้ อาจจะสร้างขึ้นเพื่อปรับปรุงหรือเพื่อให้สะดวกมากยิ่งขึ้นที่จะสร้างเป็นวัตถุทดสอบ อย่างไรก็ตามถ้าประสบการณ์ที่ผ่านมาในการหาค่าฉนวนไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ หากการออกแบบแบบจำลองร่องสล็อตไม่มีความใกล้เคียงกับความเป็นจริง ฉะนั้นโครงสร้างของแบบจำลองร่องสล็อตที่ได้แสดงรายละเอียดนี้ควรปฏิบัติตามอย่างพิถีพิถัน ประสบการณ์ได้แสดงให้เห็นว่าเพียงการพิถีพิถันในการออกแบบและการเตรียมแบบจำลองร่องสล็อตจะมีผลต่อวัสดุตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งสามารถนำไปทดสอบในห้องทดสอบที่ต่างกันด้วยผลกระทบที่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้

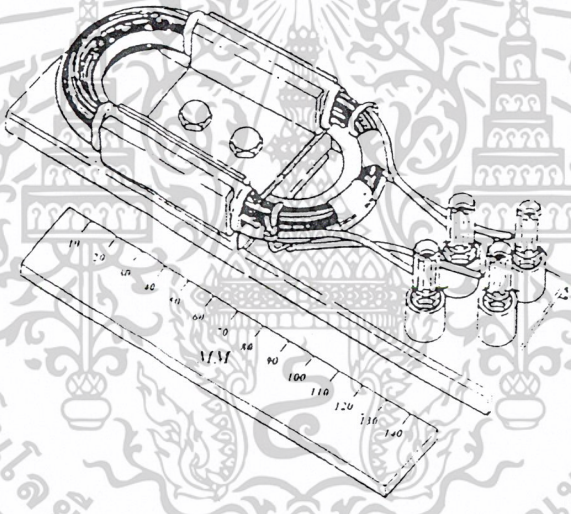
การออกแบบแบบจำลองร่องสล็อตซึ่งมีการนำมาใช้กันเมื่อหลายปีมาแล้วในห้องทดสอบที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลกระทบที่ทำให้เปลี่ยนแปลงได้ง่าย

รูปแสดงรายละเอียดแบบจำลองร่องสล็อตมีดังนี้ รูปที่ 4-1 แสดงส่วนประกอบทั้งหมดของแบบจำลองร่องสล็อตก่อนทำการประกอบรวมทั้งวัสดุที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าขดลวดและส่วนประกอบที่เป็นโลหะ รูปที่ 4-3 ส่วนประกอบที่เป็นโลหะของเฟรม และฐานของแบบจำลองร่องสล็อตก่อนทำการประกอบ รูปที่ 4-2 แบบจำลองร่องสล็อตที่ประกอบสมบูรณ์แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

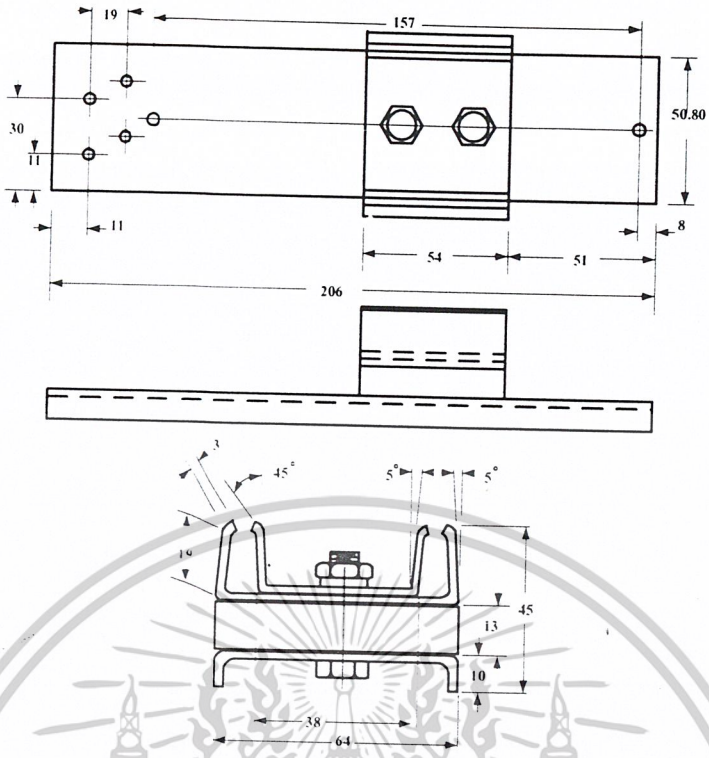


รูปที่ 4-1 ส่วนประกอบทั้งหมดของแบบจำลองร่องสล็อตก่อนทำการประกอบ



รูปที่ 4-2 แบบจำลองร่องสล็อตที่ประกอบสมบูรณ์แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-3 ส่วนประกอบที่เป็นโลหะของเฟรมแบบจำลองร่องสล็อต

แบบจำลองร่องสล็อตที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์แล้วก็จะประกอบด้วยฐานโลหะรองรับที่มีความแข็งสำหรับยึดเทอมินอลที่ทำจากโพชีเลนหรือวัสดุอื่น ๆ ที่เหมาะสม และยึดร่องสล็อตทั้งสองที่ประกอบขึ้นมาจากแผ่นโลหะภายในและภายนอก ฐานรองรับมีไว้สำหรับแขวนแบบจำลองร่องสล็อตขณะที่ทำการทดสอบการสั่นสะเทือน ร่องสล็อตที่นำมาใช้ได้สะดวกจะทำมาจากแผ่นโลหะสแตนเลส ร่องสล็อตที่ประกอบขึ้นภายในจะบรรจุขดลวดสองขด โดยมีฉนวนคั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรม (slot insulation) ฉนวนคั่นระหว่างขดลวดทั้งสอง (phase insulation)และยึดให้ติดอยู่กับที่ด้วยลิ่ม (slot wedges) ส่วนประกอบเหล่านี้เป็นส่วนที่เหมือนกันกับที่ใช้ในมอเตอร์ ขดลวดแต่ละขดนั้นได้จากการพันลวดตัวนำสองเส้นขนานกัน ดังนั้นการทดสอบแรงดันระหว่างลวดตัวนำกับลวดตัวนำสามารถทำการทดสอบได้ การพันขดลวดของเครื่องจักรกลนั้นสามารถพันลงในแบบที่ต้องการได้เมื่อมีความเหมาะสมแล้ว โครงสร้างและกระบวนการในการสร้างอาจจะถูกปรับปรุงจำลองให้ตรงกับความตั้งใจในการนำไปใช้

4.4.3 ส่วนประกอบของแบบจำลองร่องสล็อต

- ลวดตัวนำขนาด 1.12 มิลลิเมตร หุ้มด้วยแผ่นฟิล์มหนา

- ฉนวนคั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรม (slot insulation) แผ่นฉนวนหนา 0.25 มิลลิเมตรตัดออกมาเพื่อทำเป็นม้วน โดยมีความกว้างทั้ง 4 ด้าน 70 มิลลิเมตรและพับขอบ 2 ด้านเข้ามาด้านละ 3 .2 มิลลิเมตร สุดท้ายด้านทั้งสองจะเหลือความยาวด้านละ 64 มิลลิเมตร และมีส่วนที่ยื่นออกมาจากขอบสล็อต 4.8 มิลลิเมตร

- ฉนวนคั่นระหว่างขดลวดทั้งสอง (phase insulation) แผ่นฉนวนบาง 0.25 มิลลิเมตรประกอบด้วยส่วนที่เป็นสีเหลี่ยมผืนผ้ามีความยาว 75 มิลลิเมตร กว้าง 64 มิลลิเมตร และมีช่องว่างตรงกลางซึ่งมีความกว้าง 38 มิลลิเมตร เมื่อวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากจุดกึ่งกลางทำให้เหลือขอบกว้าง 13 มิลลิเมตร สำหรับส่วนที่เป็นส่วนโค้งที่ต่อกับด้านกว้างของสี่เหลี่ยมผืนผ้าทั้งสองด้านตัดส่วนโค้ง โดยใช้ด้านกว้างทั้งสองด้านของสี่เหลี่ยมผืนผ้า 64 มิลลิเมตรเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของขอบนอก และตัดส่วนโค้งที่เป็นขอบในซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 มิลลิเมตร คือวัดจากจุดกึ่งกลางของสี่เหลี่ยมผืนผ้า

- ลิ่ม (slot wedge) ลิ่มสำหรับยึดขดลวดให้อยู่กับที่ ตัดออกมาจากชิ้นที่มีลักษณะเป็นรูปตัว U โดยควรตัดให้มีความกว้าง 9.5 มิลลิเมตร และยาว 76 มิลลิเมตร ส่วนปลายด้านหนึ่งของลิ่มควรทำให้กลมเล็กน้อยเพื่อให้มั่นใจได้ว่าสามารถใส่เข้าไปในสล็อตได้ง่าย

- ปลอกปลายสาย (sleeving) ปลอกปลายสายที่เป็นฉนวนมีขนาดและความยาวพอดีที่จะหุ้มปลายสายของขดลวดที่ยื่นออกมาจากจุดกึ่งกลางของสล็อตเพื่อแบ่งขดลวดทั้งสองขดต่อเข้ากับเทอมินอล

- เชือก (tie cord) มีความยาวพอดีที่จะใช้มัดขดลวดกับปลายสายของขดลวดเข้าด้วยกัน

- เทปพันขดลวด เทปที่มีระดับทางไฟฟ้ากว้าง 13 มิลลิเมตร

- วาร์นิชหรือเรซินที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าอธิบายอยู่ใน IEC 455 หรือ IEC 464

วัสดุทั้งหมดที่กล่าวไปข้างต้นเป็นส่วนประกอบของระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ

4.4.4 การประกอบแบบจำลองร่องสล็อต

- **การพันขดลวด** ขดลวดแต่ละขดควรมีการพันที่แน่น โดยมีรูปร่างคล้ายรูปไข่ ด้านที่ขนานกันมีความยาว 64 มิลลิเมตร และห่างกัน 44 มิลลิเมตร ส่วนโค้งของรูปไข่เป็นครึ่งวงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 44 มิลลิเมตร ขดลวดแต่ละขดประกอบด้วยการพันลวดตัวนำ 2 เส้นด้วยมือจำนวน 20 รอบ (40 เส้น) เมื่อใส่ขดลวดทั้งสองลงในร่องสล็อต นั่นก็หมายความว่าในแต่ละร่องสล็อตจะมีลวดตัวนำ 80 เส้น และได้ส่วนปลายสายของขดลวดแต่ละขดออกมา 4 เส้น และปลายสายด้านใดด้านหนึ่งของลวดตัวนำเส้นเดียวกันจะถูกตัดออกโดยเหลือความยาวเส้นละ 5 มิลลิเมตรออกมาจากขดลวดใกล้กับตรงกลางด้านหนึ่งของครึ่งวงกลม ส่วนที่เหลือ 5 มิลลิเมตรนี้จะถูกพันให้อยู่กับที่ด้วยเทปพันขดลวดซึ่งเป็นปลายสายที่ไม่ได้นำไปต่อกับเทอมินอล โดยพันห่างกันอย่างน้อยที่สุด 5 มิลลิเมตร และส่วนของปลายสาย 2 เส้นที่เหลือออกมาจากขดลวดจะมีการใส่ปลอกปลายสายปลายสายและปลอกปลายสายจะถูกมัดเข้าด้วยกันด้วยเชือก โดยแสดงในรูปที่ 4.2

- **การทำความสะอาดและประกอบชิ้นส่วนที่เป็นโลหะ** ก่อนที่จะทำการประกอบชิ้นส่วนที่เป็นโลหะของแบบจำลองร่องสล็อตแต่ละชิ้นจะถูกจุ่มลงในตัวทำละลายที่ประกอบด้วยโทลูอีนและแอลกอฮอลสังเคราะห์ในอัตราส่วนที่เท่ากันเป็นเวลาอย่างน้อยที่สุด 30 นาที เมื่อนำแต่ละชิ้นส่วนออกจากตัวทำละลาย และล้างออกด้วยตัวทำละลายบริสุทธิ์แล้วเช็ดให้แห้งด้วยผ้าสำลี ส่วนประกอบที่เป็นโลหะของแบบจำลองร่องสล็อตควรประกอบด้วยความระมัดระวังเพื่อให้มั่นใจว่าตรงส่วนที่เป็นร่องสล็อตมีระยะห่างเท่ากันและด้านทั้งสองขนานกัน เพื่อความง่ายในการประกอบให้ตัดชิ้นไม้ที่มีขนาดเท่ากับความกว้างของร่องสล็อต และเพื่อให้สล็อตอยู่ตรงกลางควรใส่ชิ้นไม้ในร่องสล็อตก่อนที่จะทำการอัดน็อตให้แน่น

- **การใส่ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรม** ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรมจะถูกตัดออกมาแล้วม้วนให้พอดีกับร่องสล็อต และให้มีส่วนของฉนวนยื่นออกมาจากขอบร่องสล็อตด้านละ 5 มิลลิเมตร ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรมจะถูกใส่เข้าไปในร่องสล็อตอย่างระมัดระวังเพื่อให้ส่วนของฉนวนที่ยื่นออกมาจากขอบร่องสล็อตแต่ละด้านเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **การใส่ขดลวด** ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรมจะถูกม้วนออกมาเหนือส่วนที่มีลักษณะคล้ายฟันปลาตรงด้านบนของร่องสล็อตเพื่อให้มั่นใจว่าขดลวดจะไม่ถลอกเมื่อใส่ลงไปในร่องสล็อต ใส่ขดลวดขดล่างลงในร่องสล็อตให้ปลายสายที่ไม่ต่อกับเทอมินอลอยู่ด้านล่างส่วนที่ใช้ต่อกับเทอมินอลอยู่ด้านบน หลังจากใส่ขดลวดขดล่างแล้วใส่ฉนวนที่คันระหว่างขดลวดทั้งสอง และระมัดระวังในการใส่เพื่อให้มั่นใจว่าฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองปิดทับขดลวดขดล่างทั้งหมด ถ้าฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองมีขนาดใหญ่มาก ขอบของฉนวนจะถูกพับขึ้นไปทางด้านบนของร่องสล็อต ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองจะต้องมีขนาดและวางในตำแหน่งที่แน่ใจว่าปิดทับขดลวดด้านล่างทั้งหมด ปลายของขดลวดขดล่างจะต้องวางในแนวราบเพื่อหลีกเลี่ยงการทำให้ขอบของฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองเสียหาย การใส่ขดลวดขดบนก็ทำในลักษณะเดียวกันกับการใส่ขดลวดขดล่างแต่ปลายที่ไม่ได้ต่อกับเทอมินอลอยู่ด้านบนและส่วนที่ใช้ต่อกับเทอมินอลด้านล่าง จัดขอบของขดลวดขดบนให้อยู่ในตำแหน่งเดียวกับขดลวดขดล่างเพื่อให้แน่ ใจว่าลวดตัวนำของขดลวดขดบนไม่เลื่อนออกมานอกฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสอง

- **การต่อปลายสายกับเทอมินอล** ปลายสายจะต้องวัดขนาดให้พอดีที่จะต่อเข้ากับเทอมินอลปอกส่วนปลายของปลายสายออก 13 มิลลิเมตร แล้วทำการบัดกรีก่อนที่จะต่อเข้ากับเทอมินอล ปลายสายของขดลวดขดล่างต่อ เข้ากับเทอมินอลที่อยู่ด้านใน ส่วนปลายสายของขลลวดขดบนต่อเข้ากับเทอมินอลที่อยู่ด้านนอก ถ้าขดลวดที่ใส่เข้าไปในฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรมเกิดเลื่อนให้ใส่ลิ่มเข้าไปโดยให้อยู่บนฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรม

- **การทดสอบทางไฟฟ้า** วัดความต้านทานของขดลวดถ้าต้องการ และแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการวัดความต้านทานได้แนะนำไว้ หากพบว่าขดลวดผ่านการทดสอบ ก็ทำการชุบวาร์นิชหรือเรซินที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนทางไฟฟ้า

- **การชุบวาร์นิชหรือเรซิน** น้ำยาวาร์นิชหรือเรซินควรมีการนำมาใช้ในลักษณะเดียวกันกับที่ใช้ในเครื่องจักรกลทั่วไป

- **การติดตั้งแบบจำลองร่องสล็อต** แบบจำลองร่องสล็อตควรบรรจุอยู่ในภาชนะ ซึ่งภาชนะนั้นจะต้องมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรองรับน้ำหนัก แบบจำลองร่องสล็อตจำนวน 10 ชิ้นหรือ 20 ชิ้นในกรณีที่ทดสอบพร้อมกัน โดยที่ภาชนะนั้นต้องมีระยะห่างระหว่างแบบจำลองร่องสล็อตที่เพียงพอต่อการไหลเวียนของอากาศ และขนาดของภาชนะนั้นควรที่จะสามารถนำเข้าตู้อบ ตู้อบความชื้นและโต๊ะสั่นได้

4.4.5 จำนวนชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ

จำนวนแบบจำลองร่องสล็อตอย่างน้อย 10 ชิ้นควรถูกทำการทดสอบที่แต่ละอุณหภูมิทดสอบ สำหรับแต่ละระบบฉนวนที่ทำการทดสอบ

4.4.6 การตรวจสอบคุณภาพก่อนการทดสอบ

ก่อนที่จะทำเริ่มการทดสอบรอบย่อยของการเร่งอายุทางความร้อน ควรมีการทดสอบเพื่อทำการตรวจคุณภาพของชิ้นงานที่นำมาทดสอบ โดยสามารถตรวจสอบได้ดังนี้

- การตรวจสอบด้วยสายตา
- การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 34-18-1
- การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ขนาด 400 V ระหว่างตัวนำกับตัวนำซึ่งควรมีค่าของกระแสไม่เกิน 50 mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.7 การทดสอบเพื่อการวินิจฉัยเบื้องต้น

ภายหลังการทดสอบเพื่อทำการตรวจคุณภาพของชิ้นงานที่นำมาทดสอบ การทดสอบเพื่อการวินิจฉัยควรมีการทดสอบเพื่อสังเกตว่ามีความผิดปกติกับระบบฉนวนที่นำมาทดสอบหรือไม่

4.5 รอบย่อยการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อน

รอบย่อยการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวน อาจมีการใช้ตู้อบความร้อนในการให้ความร้อนแก่วัตถุทดสอบ ซึ่งอุณหภูมิและระยะเวลาในแต่ละรอบย่อยการทดสอบแสดงได้ดังตาราง ที่ 3.2 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับระดับชั้นทางความร้อนระบบฉนวนตามตารางที่ 3.1 ซึ่งแบบจำลองร่องสล็อตควรมีการใส่เข้าไปโดยตรงภายในตู้อบทันที และมีการนำแบบจำลองร่องสล็อตออกจากตู้อบมาสู่อุณหภูมิห้องทันทีภายหลังทำการเร่งอายุทางความร้อนในแต่ละรอบย่อยการเร่งอายุ และในการลดผลของความแตกต่างของอุณหภูมิในแต่ละแบบจำลองร่องสล็อตภายในตู้อบความร้อน ฉะนั้นในการทดสอบแต่ละรอบย่อยการทดสอบนั้นควรมีการสลับเปลี่ยนที่ระหว่างแบบจำลองร่องสล็อตในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ

4.6 รอบย่อยการทดสอบเพื่อการวินิจฉัย

4.6.1 การทดสอบทางกล

ในแต่ละรอบย่อยการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อน ภายหลังการทำให้เย็นภายใต้อุณหภูมิห้องแล้ว แต่ละแบบจำลองร่องสล็อตควรมีการทดสอบด้วยการให้ความเค้นทางกลบนโต๊ะสั่นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งแบบจำลองร่องสล็อตนั้นควรมีการติดตั้งเพื่อให้เกิดแรงทางกลทำให้มีการเคลื่อนที่ในมุมที่ทำให้เกิดการสั่นบริเวณจุดสิ้นสุดของการพันของขดลวด ซึ่งในการทดสอบให้มีการสั่นนั้นจะไม่มีการทดสอบทางด้านแรงดันเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ซึ่งค่ายอดของการสั่นนั้นจะให้มีความเร่งที่ 1.5 g (0.2 มม. จากยอดสู่ยอดที่ความถี่ 60 Hz หรือ 0.3 มม.ที่ความถี่ 50 Hz) ถ้าความเค้นที่ทำการทดสอบไม่ได้ตามที่กำหนดนั้นให้มีการรายงานในผลการทดสอบ

4.6.2 การทดสอบทางความชื้น

การทดสอบทางแรงดันไฟฟ้าควรมีการทำการทดสอบอย่างน้อย 48 ชั่วโมง ซึ่งควรมีการทำให้ชิ้นงานมีความเปียกชื้น และไม่มีการทดสอบทางแรงดันไฟฟ้าในระหว่างการทดสอบทางความชื้นนี้ ซึ่งรายละเอียดของตู้อบความชื้นที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้

4.6.2.1 ตู้อบความชื้น

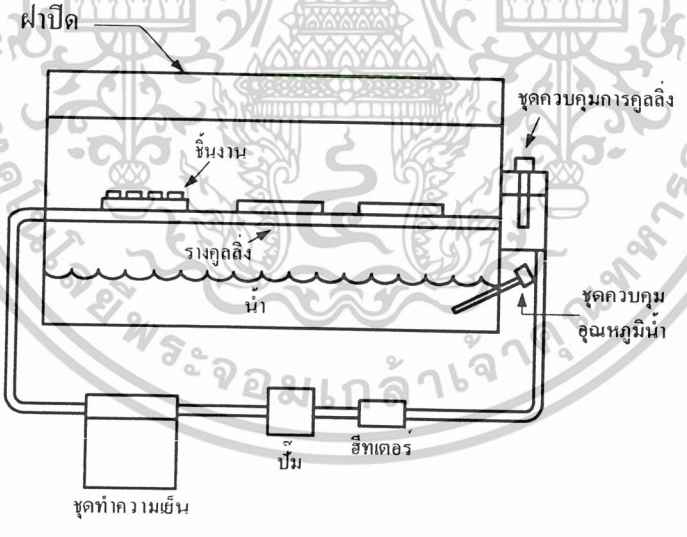
สภาพบรรยากาศภายในตู้อบความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 เปอร์เซ็นต์จะมีไอน้ำมาเกาะบริเวณผนังของตู้อบความชื้น ถาดที่รองรับน้ำจะมีเครื่องทำความร้อนจุ่มอยู่เพื่อให้ความร้อนแก่น้ำให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 5 ถึง 10 องศาเซลเซียสจากอุณหภูมิห้อง ฝาครอบของตู้อบความชื้นควรไม่มีการฉนวนและควรไม่มีความลาดเอียงเพื่อป้องกับการหยดของหยดน้ำลงบนวัตถุทดสอบ ภาชนะของตู้อบความชื้นควรสร้างด้วยวัสดุที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อน ควรหลีกเลี่ยงจุดต่อที่ไม่ใช่โลหะ ฝาเปิดควรสร้างให้มีขอบยื่นออกมาเพื่อที่จะให้ความชื้นที่อยู่รอบ ๆ ฝาเปิดถายเทเข้าสู่ภายในตู้อบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.2.2 ตู้อบความชื้นสำหรับวัตถุทดสอบที่เย็นตัวลง (ที่อุณหภูมิห้อง)

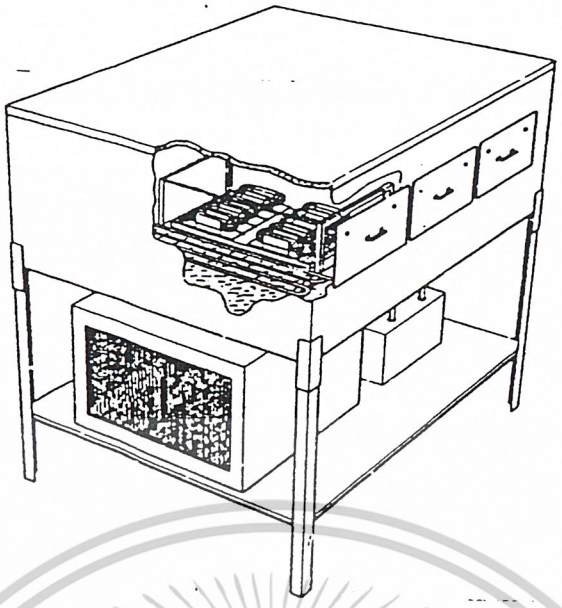
ฐานของวัตถุทดสอบควรติดตั้งโดยให้ตัววัตถุทดสอบเย็นกว่าอากาศที่อยู่รอบ ๆ เพื่อให้แน่ใจว่าระบบฉนวนมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดที่ทำให้เกิดไอน้ำของอากาศ รูปที่ 4.4 แสดงบล็อคไดอะแกรมการสร้างตู้อบความชื้น ภาชนะที่ใส่วัตถุทดสอบอยู่ในลิ้นชักของตู้อบความชื้นซึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ 4.5โดยถูกทำให้เย็นโดยตัวทำความเย็น (น้ำ) ตัวทำความเย็นเป็นตัวควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งซึ่งได้กำหนดไว้โดยให้มีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของวัตถุทดสอบกับอุณหภูมิของอากาศทีอยู่ภายในตู้อบ ทำให้มีไอน้ำเกาะที่วัตถุทดสอบ ความแตกต่างนี้ไมขึ้นอยู่กับอุณหภูมิห้องที่เปลี่ยนแปลง เมื่อถาดรองรับน้ำและตัวทำความเย็นเป็นตัวควบคุมอุณหภูมิและมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของวัตถุทดสอบกับอุณหภูมิของอากาศที่อยู่ภายในตู้อบนี้ถูกจำกัดด้วยปริมาตรของตู้อบความชื้น

การควบคุมอุณหภูมิต้องระวังเหตุการณ์การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิห้องจนถึงระดับเดียวกันกับอุณหภูมิน้ำ ซึ่งความร้อนที่สูญเสียให้แก่ภาชนะที่ให้ความเย็นแก่วัตถุทดสอบสามารถทดแทนได้โดยการให้ความร้อนแก่น้ำ ซึ่งก็จะทำให้เกิดความสมดุลของอุณหภูมิทั่วทั้งตู้อบความชื้นตามที่กำหนด ถ้าอุณหภูมิห้องลดระดลงจนต่ำกว่าภาชนะที่ให้ความเย็นแก่วัตถุทดสอบสามารถควบคุมอุณหภูมิได้โดยการให้ความร้อนแก่น้ำโดยเครื่องทำความร้อน เพื่อให้มีความชัดเจนยิ่งขึ้นในการมีไอน้ำเกิดขึ้น ซึ่งก็คือการทำงานร่วมกันของการให้ความร้อนและความเย็นแก่ระบบเพื่อให้เกิดความสมดุล ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งต่อการควบคุมอุณหภูมิของตู้อบความชื้นภายในตู้อบ ซึ่งค่าของอุณหภูมิ ณ ส่วนต่าง ๆ ของตู้อบความชื้นแสดงได้ดังตารางที่ 4-1



รูปที่ 4-4 บล็อกไดอะแกรมของตู้อบความชื้นสำหรับวัตถุทดสอบที่เย็นตัวลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-5 ตัวอย่างตู้อบความชื้นสำหรับวัตถุทดสอบที่เย็นตัวลง

ตำแหน่งของตู้อบความชื้น	อุณหภูมิ (° C)
อุณหภูมิน้ำ	30
อุณหภูมิชิ้นงานทดสอบ	24
จุดกึ่งกลางภายใต้ฝาปิดตู้อบความชื้น	28-29

ตารางที่ 4 -1 อุณหภูมิ ณ ส่วนต่าง ๆ ของตู้อบความชื้น

4.6.3 การทดสอบทางแรงดันไฟฟ้า

ในการตรวจสภาพชิ้นงานที่ทำการทดสอบ และตัดสินใจการมาถึงของจุดสิ้นสุดอายุของระบบฉนวนที่ทำการทดสอบ จะทำโดยการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่กำลังภายหลังได้รับการทดสอบทางความชื้นแล้ว ซึ่งระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบขึ้นอยู่กับชนิดของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบนั้นใช้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้าพิกัดใช้งานเท่าใด ซึ่งสามารถแสดงค่าระดับแรงดันไฟฟ้าแนะนำที่ใช้ในการทดสอบได้ดังตารางที่ 4-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิกัดแรงดันไฟฟ้าใช้งาน (V r.m.s)	แรงดันไฟฟ้าตามความถี่กำลังแนะนำสำหรับใช้ทดสอบ (V r.m.s)		
	การทดสอบระหว่างขดลวดกับเฟรม	การทดสอบระหว่างขดลวดกับขดลวด	การทดสอบระหว่างรอบต่อรอบของขดลวด
110-400	400	400	110 ± 10
401-660	660	660	110 ± 10
661-1000	ภายใต้การตัดสินใจ	ภายใต้การตัดสินใจ	ภายใต้การตัดสินใจ

ตารางที่ 4-2 ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบทางแรงดันไฟฟ้านั้นการทดสอบระหว่างเฟรม และการทดสอบระหว่างขดลวดกับขดลวดนั้นจะใช้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขอบเขตการใช้งานจริงของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบ ส่วนการทดสอบด้วยระดับแรงดันไฟฟ้าอื่นนั้นขึ้นอยู่กับประสบการณ์ในการทดสอบ และควรมีรายงานในผลการทดสอบ

การป้อนแรงดันไฟฟ้านั้นควรป้อนเป็นเวลานาน 10 นาทีสำหรับแต่ละชิ้นงานซึ่งควรเริ่มต้นการทดสอบในระหว่างรอบต่อรอบของขดลวดหลังจากนั้นทำการทดสอบระหว่าง ขดลวดกับขดลวด และสุดท้ายทำการทดสอบระหว่างขดลวดกับเฟรม ซึ่งควรมีอุปกรณ์ป้องกันเซิร์จในวงจรการทดสอบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
การทดสอบและผลการทดสอบ

5.1 การทดสอบรอบย่อยการเร่งอายุของระบบฉนวน

5.1.1 ขอบเขตของการทดสอบ

กระบวนการทดสอบนี้เป็นการทดสอบระบบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ใช้การพันแบบไวร์วาวด์ โดยใช้แบบจำลองร่องสล็อตตามมาตรฐาน IEC 34-18-21

5.1.2 จุดประสงค์การทดสอบ

จุดประสงค์การทดสอบนี้ก็เพื่อเป็นการสร้างการทดสอบให้มีความเหมาะสมตามมาตรฐานกำหนด เพื่อนำไปวิเคราะห์แนวโน้มของค่าเฉลี่ยอายุของฉนวนในเครื่องจักรกลไฟฟ้า

5.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. แบบจำลองร่องสล็อต
2. ตู้อบความร้อน
3. โต๊ะสั่น
4. ตู้อบความชื้น
5. ชุดทดสอบทางด้านแรงดันไฟฟ้า

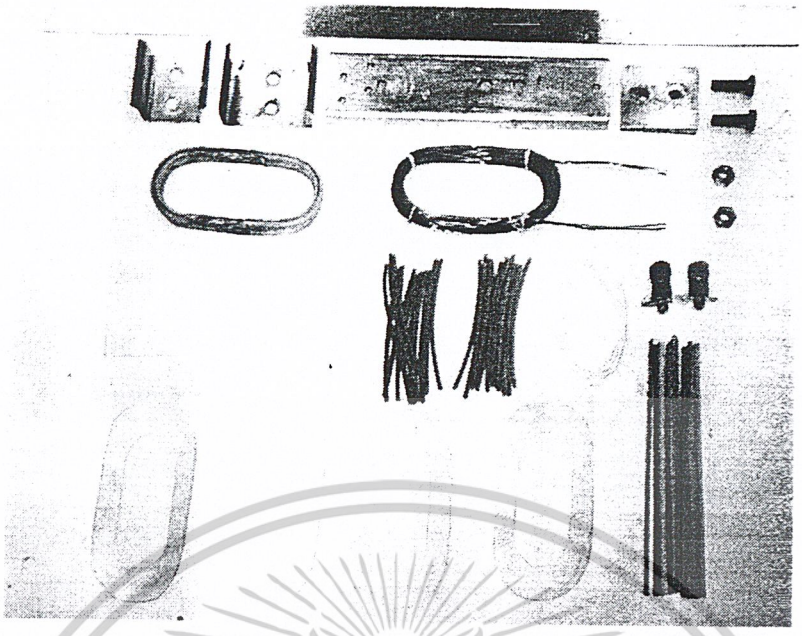
5.1.4 วิธีการดำเนินการทดสอบ

เนื่องจากการทดสอบนี้เป็นการทดสอบรอบย่อยการเร่งอายุของฉนวน ดังนั้นจึงได้ทำการทดสอบระบบฉนวน 2 ระบบเพื่อดูแนวทางของค่าที่ต้องการวิเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบเดียวกัน หลังการเตรียมวัตถุทดสอบและทำการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยเบื้องต้นแล้วก็จะทำการเข้าสู่รอบย่อยของการเร่งอายุโดยความร้อนตามขนาดของอุณหภูมิและเวลาที่ได้เลือกไว้ หลังจากนั้นก็จะเข้าสู่ขั้นตอนรอบย่อยของการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยซึ่งก็จะประกอบไปด้วย การปรับสภาพก่อนการวินิจฉัยเพื่อเพิ่มประสิทธิผลของการทดสอบเพื่อการวินิจฉัย ประกอบด้วยการปรับสภาพก่อนการวินิจฉัยโดยการให้ความเค้นทางกลและหลังจากนั้นก็เป็นการปรับสภาพก่อนการวินิจฉัยโดยการให้ความชื้นและการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยตามบรรทัดฐาน การเกิดการเสียหายซึ่งในที่นี้ก็คือ การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้านั่นเองซึ่งในตอนนี้ก็จะมีการเก็บข้อมูลของกระแสรั่ว หลังจากนั้นก็จะทำการทดสอบวนรอบอย่างนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งฉนวนเกิดการเสียหายขึ้นจนครบทุกชิ้นนั่นเอง

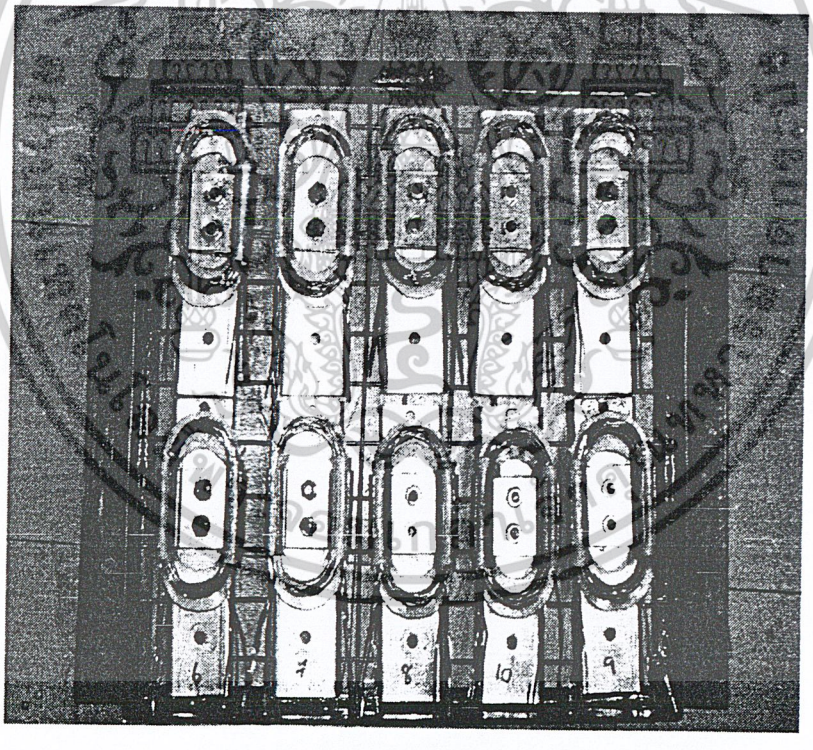
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5-1 ขั้นตอนของกระบวนการทดสอบการเร่งอายุของฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

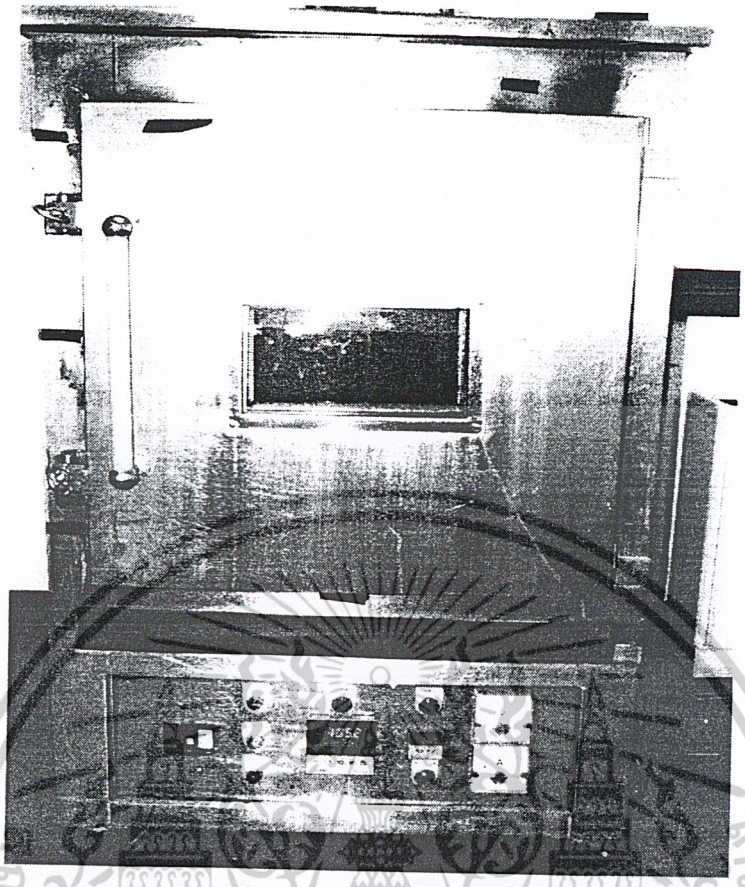


รูปที่ 5-2 ส่วนประกอบของแบบจำลองร่องสลอต

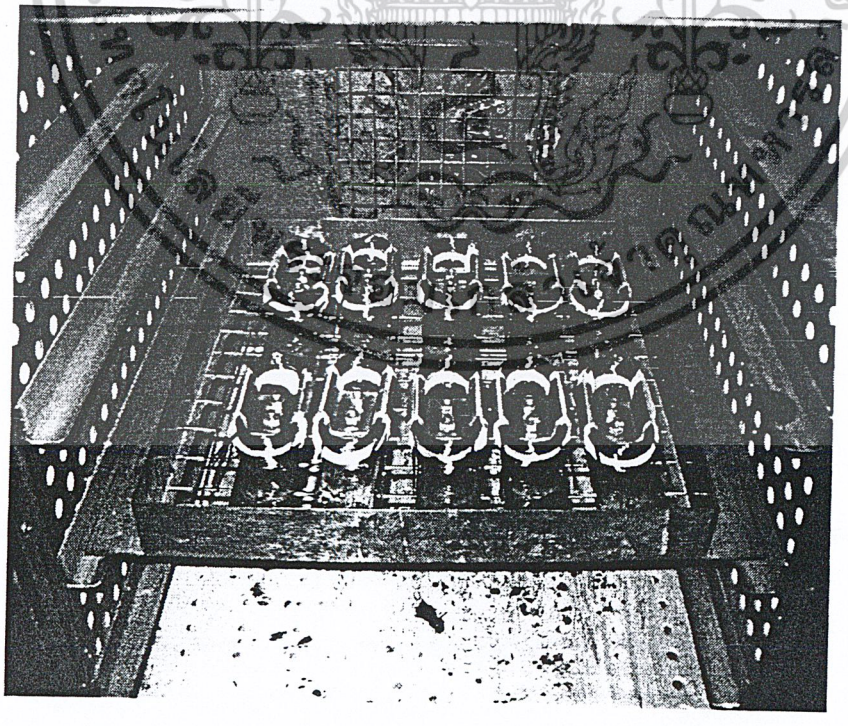


รูปที่ 5-3 แบบจำลองร่องสลอตที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

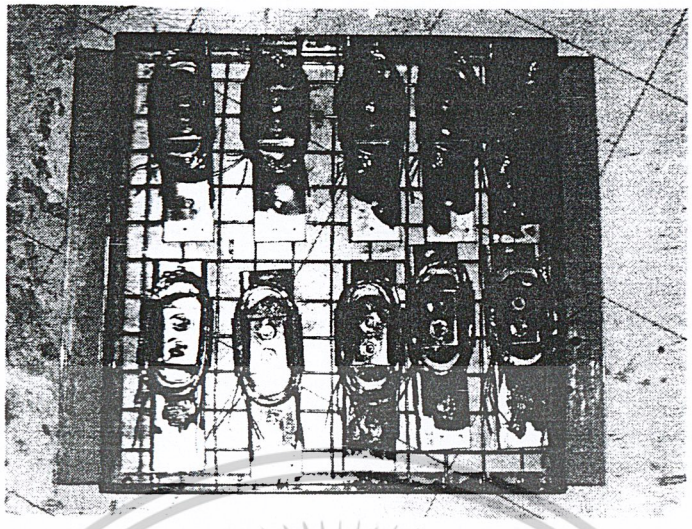


รูปที่ 5-4 ตู้อบความร้อน



รูปที่ 5-5 ขดลวดที่กำลังทำการเร่งอายุทางความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-6 แบบจำลองร่องสล็อตที่ได้รับการเร่งอายุทางความร้อน

5.1.5 ผลของอุณหภูมิภายในตู้อบความร้อนขณะทำการทดสอบ

ระยะเวลาทดสอบ (รอบ 4 วัน)	อุณหภูมิที่ต้องการทดสอบ (˚c)	อุณหภูมิที่อ่านค่าได้ (˚c)	ค่าความผิดเพี้ยน (˚c)
เริ่มทำงาน	205	208.4	+3.4
ทำงานไปแล้ว 8 ชั่วโมง	205	205.4	+0.4
ทำงานไปแล้ว 16 ชั่วโมง	205	205.8	+0.8
ทำงานไปแล้ว 24 ชั่วโมง	205	205.2	+0.2
ทำงานไปแล้ว 32 ชั่วโมง	205	205.4	+0.4
ทำงานไปแล้ว 40 ชั่วโมง	205	205.4	+0.4
ทำงานไปแล้ว 48 ชั่วโมง	205	205.4	+0.4

ตารางที่ 5-1 ผลของอุณหภูมิภายในตู้อบความร้อนที่ทำการทดสอบในรอบ 96 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำงานไปแล้ว 56 ชั่วโมง	205	205.4	+0.4
ทำงานไปแล้ว 64 ชั่วโมง	205	205.8	+0.8
ทำงานไปแล้ว 72 ชั่วโมง	205	205.6	+0.6
ทำงานไปแล้ว 80 ชั่วโมง	205	205.1	+0.1
ทำงานไปแล้ว 88 ชั่วโมง	205	205.2	+0.2
ทำงานไปแล้ว 96 ชั่วโมง	205	205.3	+0.3

ตารางที่ 5-1(ต่อ) ผลของอุณหภูมิภายในตู้อบความร้อนที่ทำการทดสอบในรอบ 96 ชั่วโมง

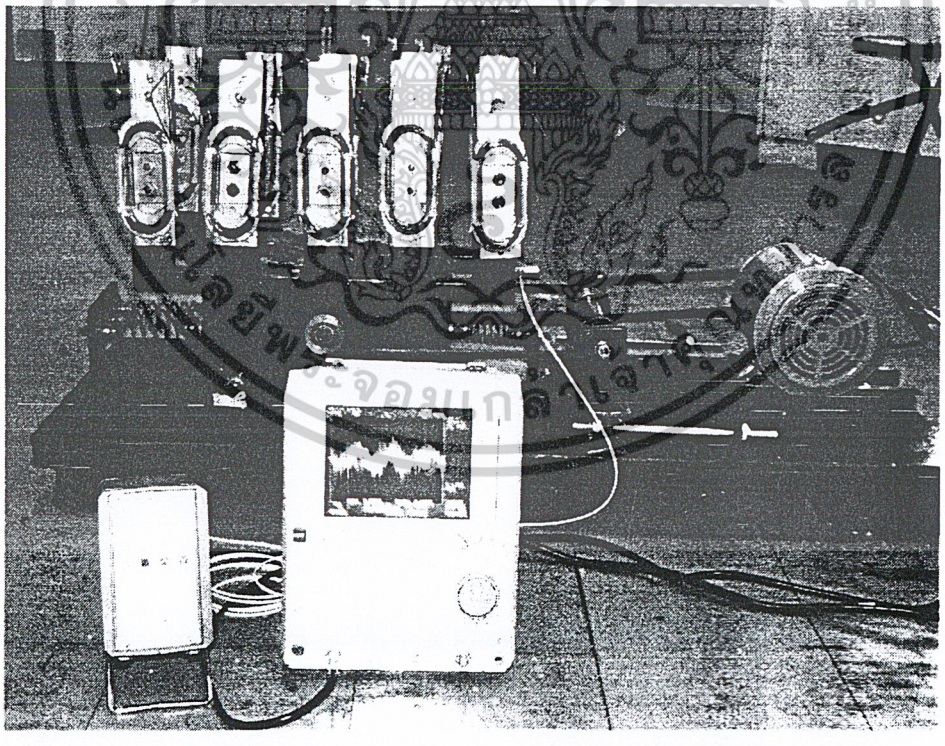
ระยะเวลาทดสอบ (รอบ 1 วัน)	อุณหภูมิที่ต้องการทดสอบ (°c)	อุณหภูมิที่อ่านค่าได้ (°c)	ค่าความผิดเพี้ยน (°c)
เริ่มทำงาน	235	235.2	+0.2
ทำงานไปแล้ว 4 ชั่วโมง	235	235.1	+0.1
ทำงานไปแล้ว 6 ชั่วโมง	235	235.2	+0.2
ทำงานไปแล้ว 8 ชั่วโมง	235	235.3	+0.3
ทำงานไปแล้ว 10 ชั่วโมง	235	235.4	+0.4
ทำงานไปแล้ว 12 ชั่วโมง	235	235.4	+0.4

ตารางที่ 5-2 ผลของอุณหภูมิภายในตู้อบความร้อนที่ทำการทดสอบในรอบ 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

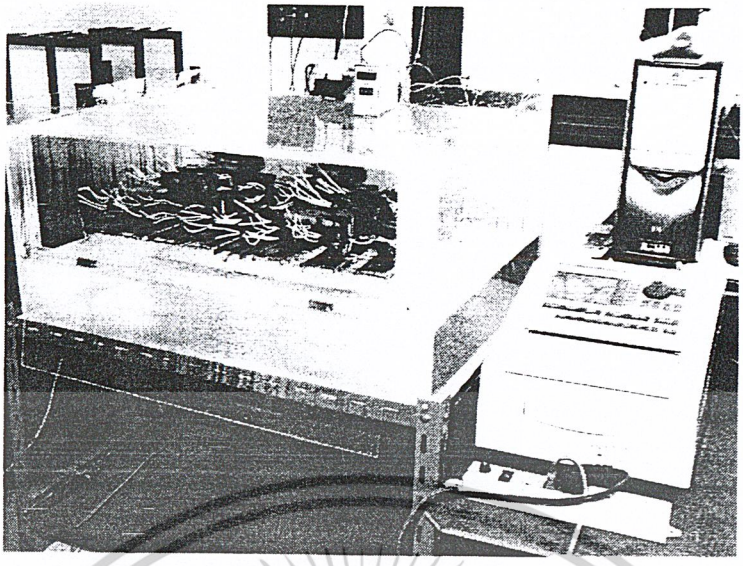
ทำงานไปแล้ว 14 ชั่วโมง	235	235.4	+0.4
ทำงานไปแล้ว 16 ชั่วโมง	235	235.2	+0.2
ทำงานไปแล้ว 18 ชั่วโมง	235	235.3	+0.3
ทำงานไปแล้ว 20 ชั่วโมง	235	235.1	+0.1
ทำงานไปแล้ว 22 ชั่วโมง	235	235.1	+0.1
ทำงานไปแล้ว 24 ชั่วโมง	235	235.4	+0.4

ตารางที่ 5-2(ต่อ) ผลของอุณหภูมิภายในตู้อบความร้อนที่ทำการทดสอบในรอบ 24 ชั่วโมง



รูปที่ 5-7 การปรับสภาพทางกลต่อแบบจำลองร่องสล็อตโดยโต๊ะสั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-8 ตู้อบความชื้น

5.1.6 ผลของอุณหภูมิภายในตู้อบความชื้นขณะทำการทดสอบ

ระยะเวลาการทดสอบ (2 วัน)	อุณหภูมิน้ำ (˚c)	อุณหภูมิชิ้นงานทดสอบ (˚c)	อุณหภูมิใต้ฝาปิดตู้อบความชื้น (˚c)
ตู้อบเริ่มทำงาน	-	-	-
ทำงานไปแล้ว 6 ชั่วโมง	30.8	24.5	29.6
ทำงานไปแล้ว 12 ชั่วโมง	30.2	24.3	28.4
ทำงานไปแล้ว 18 ชั่วโมง	29.9	24.6	29.2
ทำงานไปแล้ว 24 ชั่วโมง	30.8	24.5	30.2
ทำงานไปแล้ว 30 ชั่งโมง	30.4	23.9	29.8
ทำงานไปแล้ว 36 ชั่วโมง	30.8	24.2	29.1

ตารางที่ 5-3 ผลของอุณหภูมิภายในตู้อบความชื้นในช่วงระยะเวลาการสังเกตการณ์ 48ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

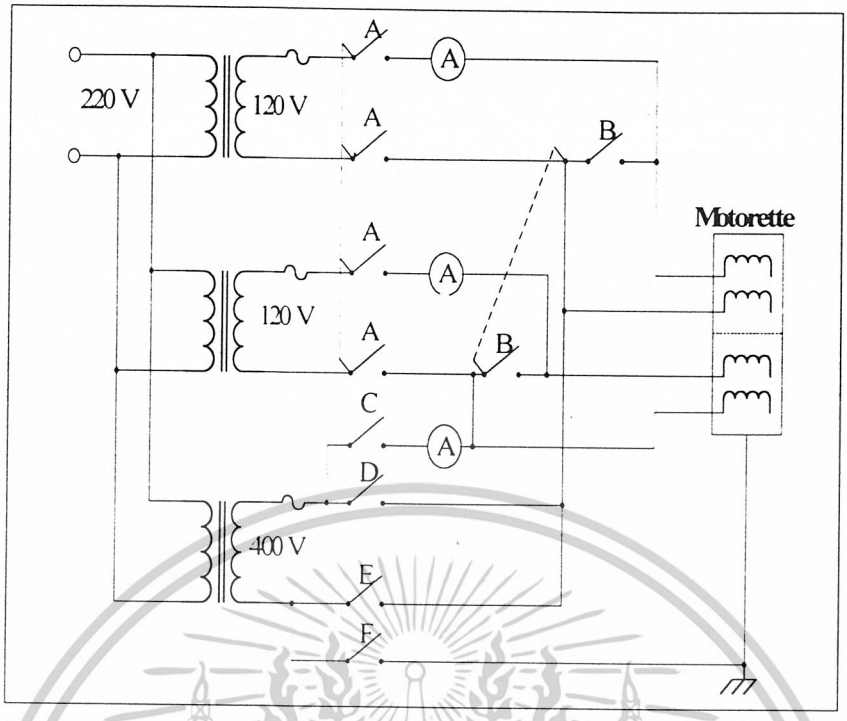
ทำงานไปแล้ว 42 ชั่วโมง	30.1	28.4	23.8
ทำงานไปแล้ว 48 ชั่วโมง	30.6	30.4	23.9

ตารางที่ 5-3(ต่อ) ผลของอุณหภูมิภายในตู้อบความชื้นในช่วงระยะเวลาการสังเกตการณ์ 48ชั่วโมง

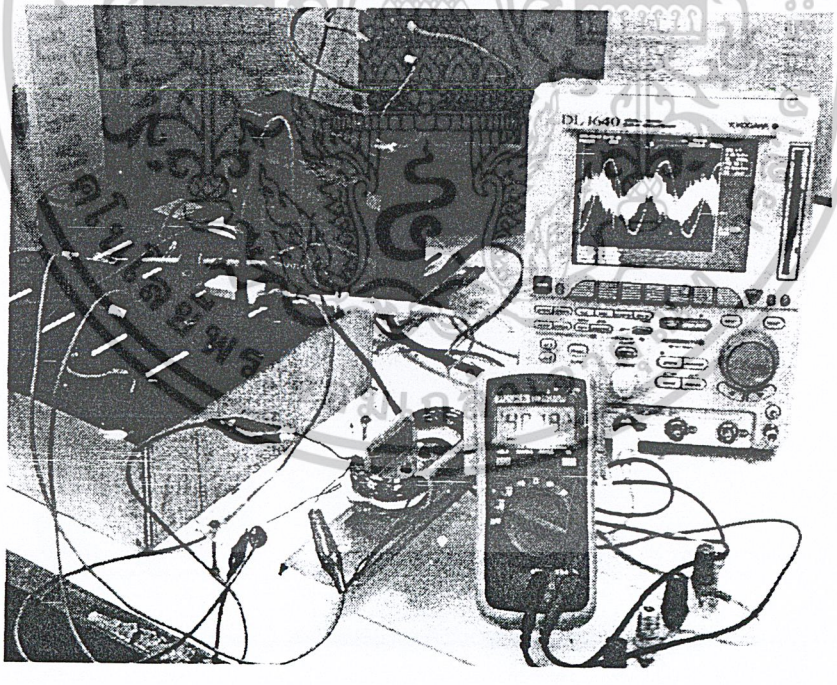
ระยะเวลาการทดสอบ (2 วัน)	อุณหภูมิน้ำ (˚c)	อุณหภูมิชิ้นงานทดสอบ (˚c)	อุณหภูมิใต้ฝาปิดตู้อบความชื้น (˚c)
ตู้อบเริ่มทำงาน	-	-	-
ทำงานไปแล้ว6 ชั่วโมง	30.5	24.6	29.7
ทำงานไปแล้ว 12 ชั่วโมง	30.6	23.9	29.0
ทำงานไปแล้ว 18 ชั่วโมง	30.5	22.8	28.6
ทำงานไปแล้ว 24 ชั่วโมง	30.7	24.7	31.0
ทำงานไปแล้ว 30 ชั่งโมง	29.8	24.2	27.9
ทำงานไปแล้ว 36 ชั่วโมง	31.2	23.8	28.4
ทำงานไปแล้ว 42 ชั่วโมง	32.0	23.6	29.3
ทำงานไปแล้ว 48 ชั่วโมง	29.9	23.6	30.2

ตารางที่ 5-4 ผลของอุณหภูมิภายในตู้อบความชื้นในช่วงระยะเวลาการทดสอบ 48 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

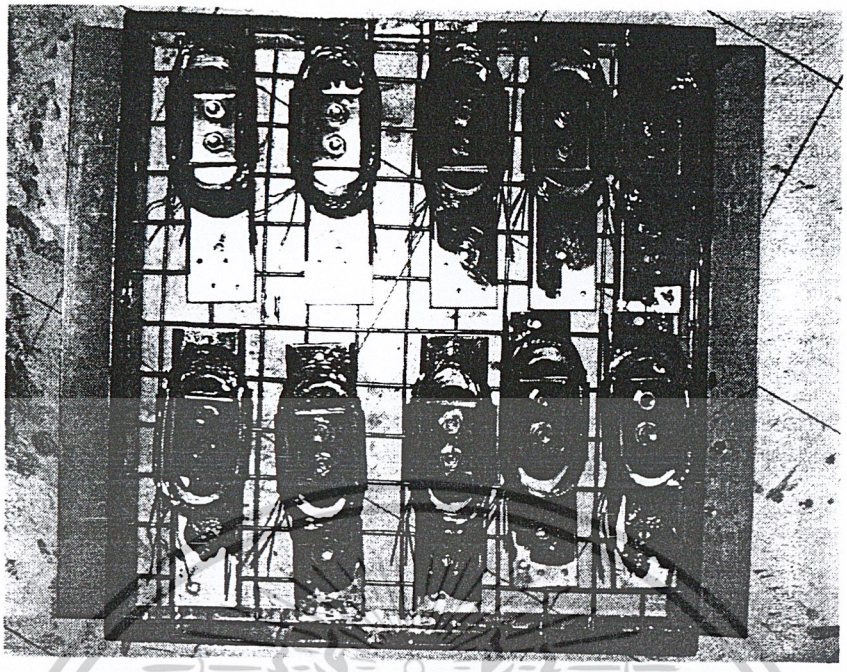


รูปที่ 5-9 วงจรที่ใช้ในการทดสอบทางด้านแรงดันไฟฟ้า

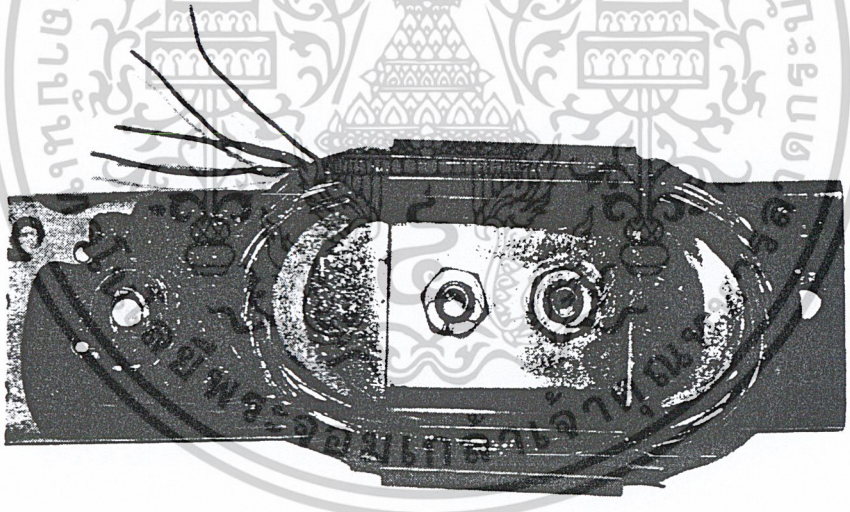


รูปที่ 5-10 การทดสอบทางไฟฟ้าเพื่อการวินิจฉัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



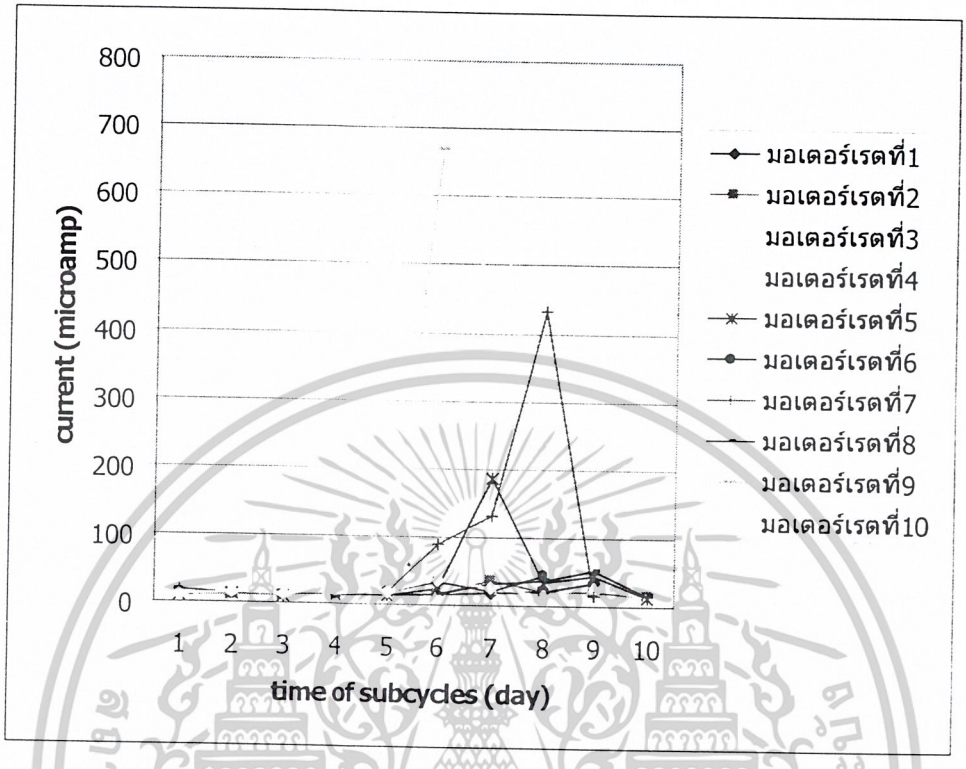
รูปที่ 5-11 ฉนวนเกิดการเสียหาย



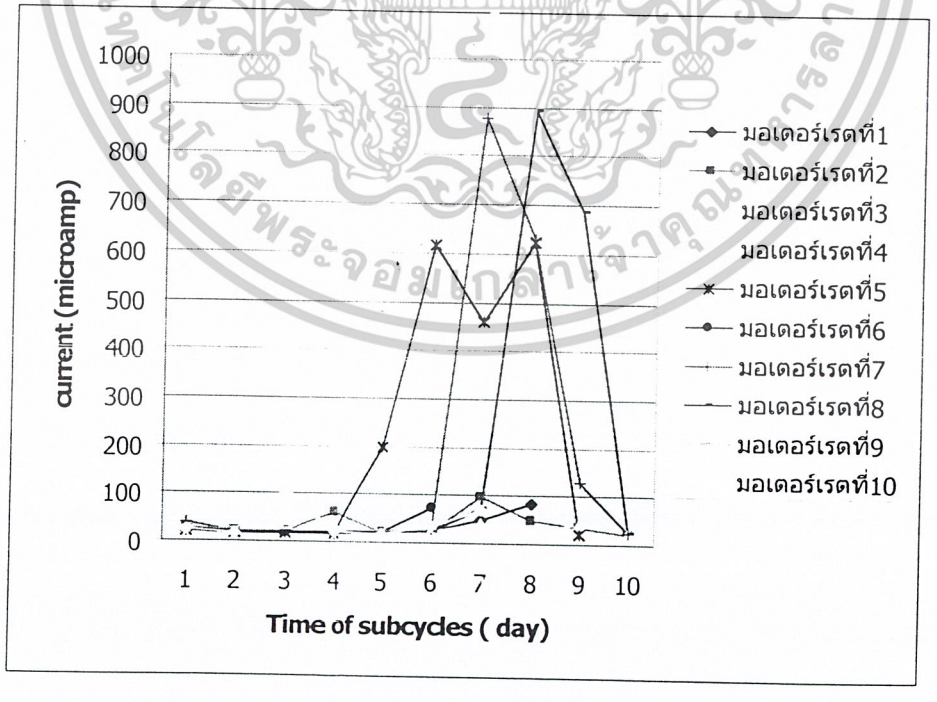
รูปที่ 5-12 ลักษณะของฉนวนที่มองเห็นได้ชัดเจนเมื่อเกิดการเสียหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.7 ผลการทดสอบรอบการเร่งอายุของแบบจำลองร่องสลิ็อต

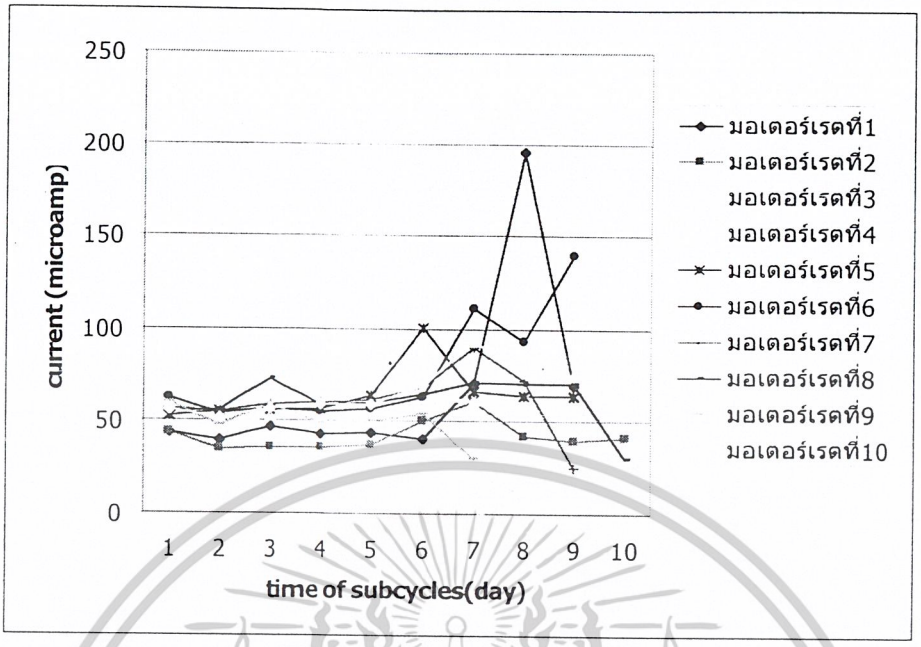


รูปที่ 5-13 ผลการทดสอบระหว่างขดลวดบนและขดลวดล่าง

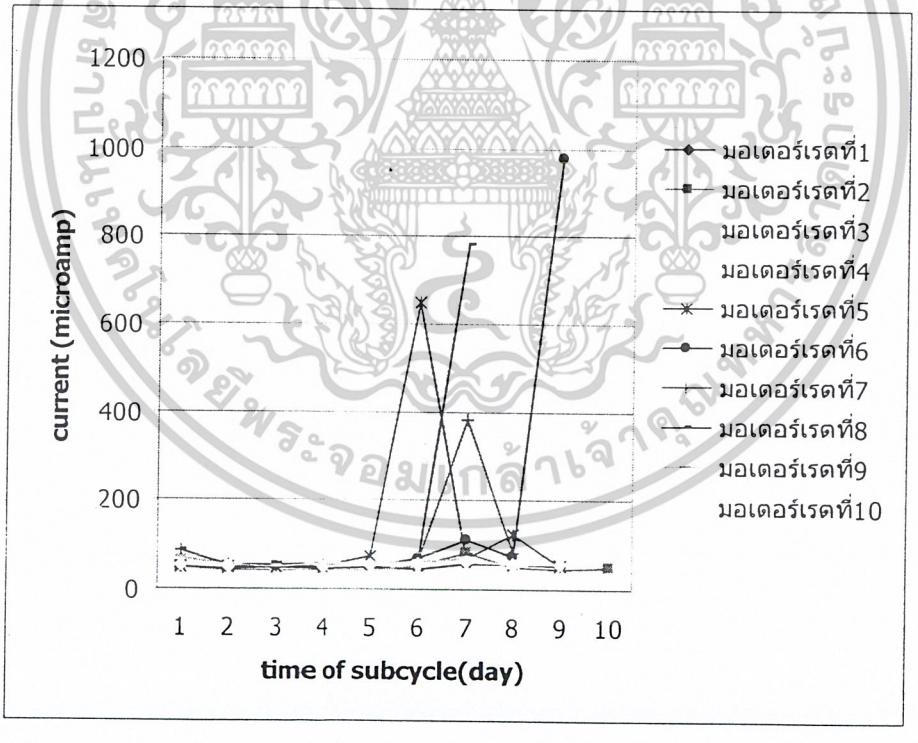


รูปที่ 5-14 ผลการทดสอบระหว่างขดลวดกับกราวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-15 ผลการทดสอบระหว่างรอบในขดลวดเดียวกันของขดลวดบน



รูปที่ 5-16 ผลการทดสอบระหว่างรอบในขดลวดเดียวกันของขดลวดล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.8 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า เมื่อผ่านกระบวนการเร่งอายุของฉนวน กระแสจะมีค่าสูงขึนอย่างต่อเนื่องจนมีค่าสูงสุด ค่านี้จะเป็นตัวบอกว่าฉนวนเสื่อมสภาพไม่สามารถใช้งานได้ ดังนั้นจะกล่าวได้ว่ากระแสที่ไหลผ่านจะแปรตามการเสื่อมสภาพของฉนวน

5.2 การทดสอบเพื่อการวิเคราะห์หาค่าทางไฟฟ้า

5.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

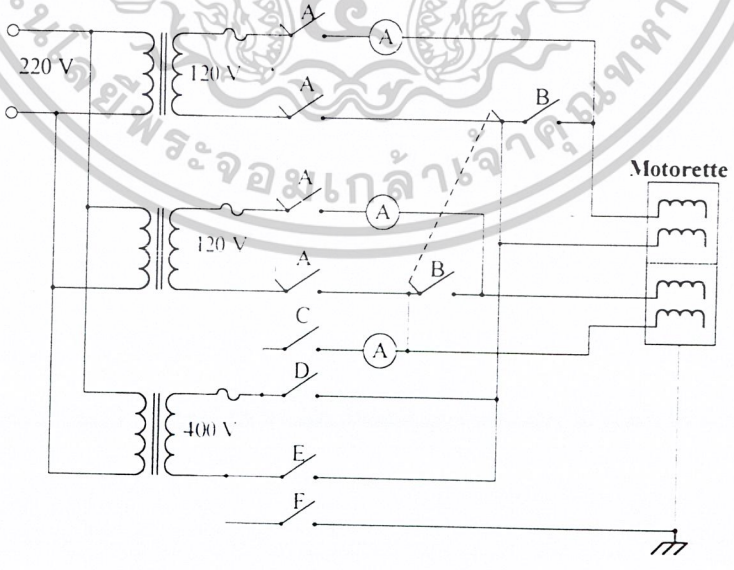
1. แบบจำลองร่องสล็อตที่ได้จากแต่ละรอบการเร่งอายุ
2. ชุดทดสอบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1 ชุด
3. สตอเรจสโคป (Storage Scope) 1 เครื่อง
4. หม้อแปลงปรับแรงดัน 1 เฟส 10 A. 0-260 V 1 ตัว
5. แอมป์มิเตอร์แบบดิจิตอล 1 เครื่อง

5.2.2 จุดประสงค์ของการทดสอบ

1. เพื่อทดสอบหาค่าทางไฟฟ้าของฉนวน
2. เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มของค่าเฉลี่ยอายุของฉนวนเครื่องจักรกล

5.2.3 ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการทดสอบรอบย่อยการเร่งอายุของระบบฉนวน 1 ระบบแล้วทำการวัดค่าทางไฟฟ้าโดยต่อวงจรดังรูปที่ 5-16
2. ทำการทดสอบป้อนแรงดันไฟฟ้าตามตารางที่ 5-6 ทดสอบระหว่างขดลวดบนกับขดลวดล่าง ระหว่างขดลวดกับกราวด์ และทดสอบภายในขดเดียวกันระหว่างเส้นลวด



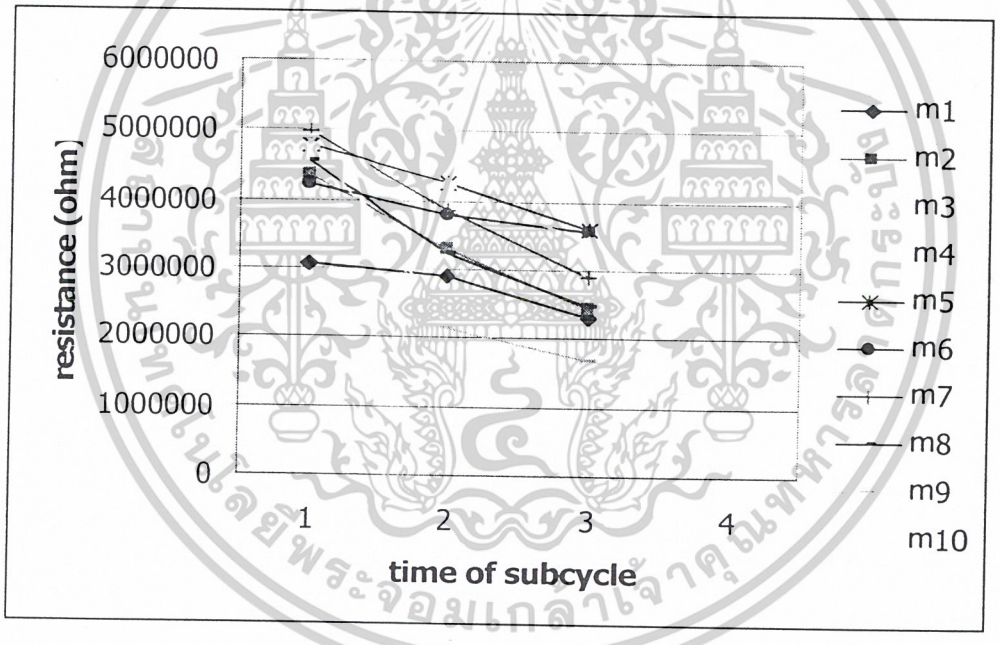
รูปที่ 5-17 วงจรที่ใช้ในการทดสอบหาค่าทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิกัดแรงดันไฟฟ้าใช้งาน (V r.m.s)	แรงดันไฟฟ้าตามความถี่กำลังแนะนำสำหรับใช้ทดสอบ (V r.m.s)		
	การทดสอบระหว่างขดลวดกับเฟรม	การทดสอบระหว่างขดลวดกับขดลวด	การทดสอบระหว่างรอบต่อรอบของขดลวด
110-400	400	400	110 ± 10
401-660	660	660	110 ± 10
661-1000	ภายใต้การตัดสินใจ	ภายใต้การตัดสินใจ	ภายใต้การตัดสินใจ

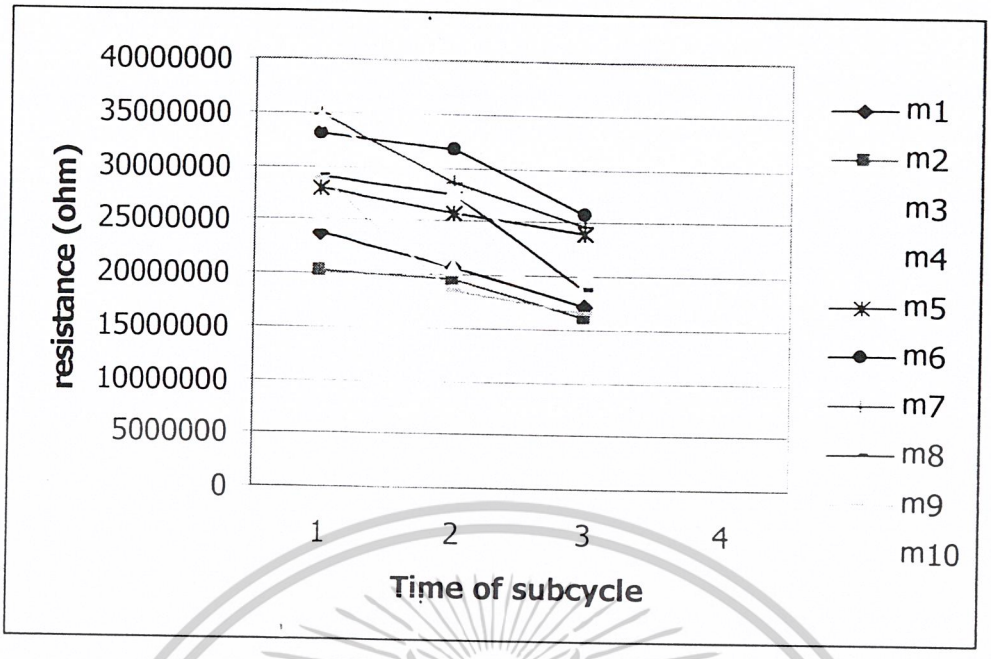
ตารางที่ 5-5 ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ

5.2.4 ผลการทดสอบ

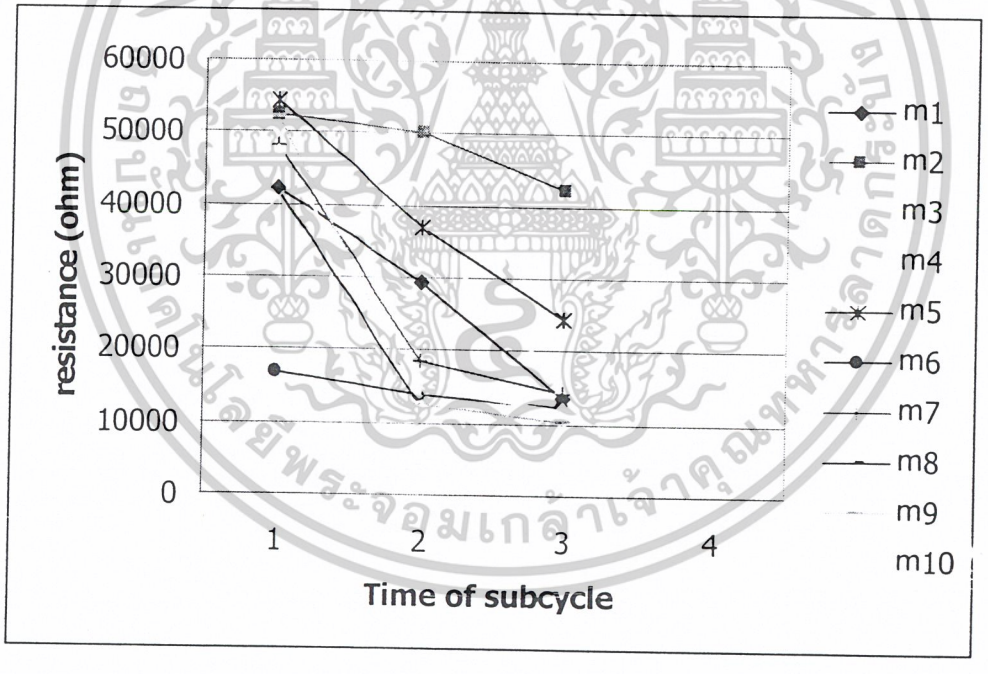


รูปที่ 5-18 ผลการทดสอบระหว่างขดลวดกับกราวด์ (resistance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

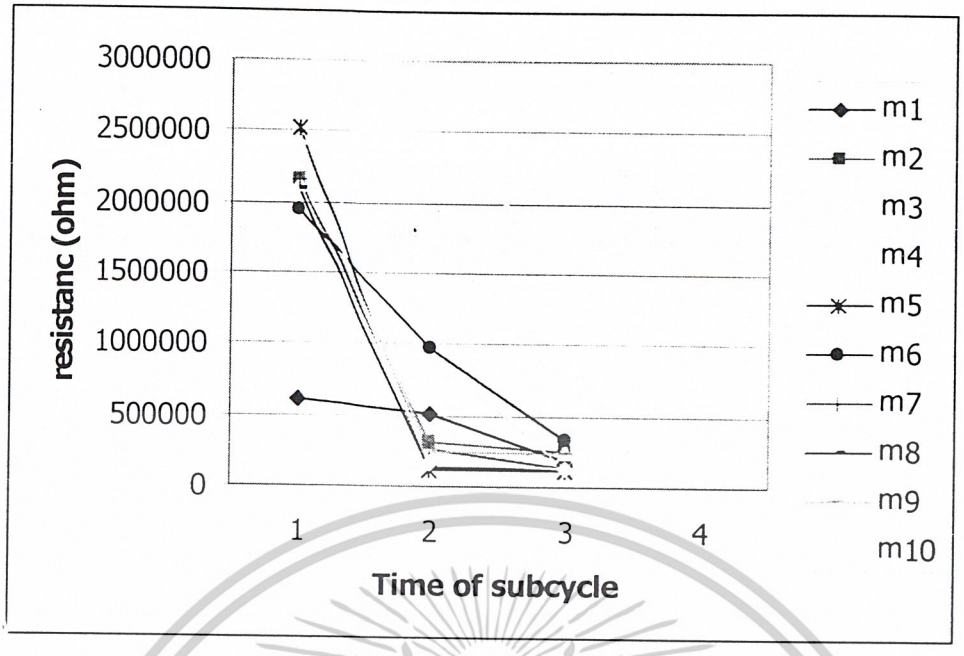


รูปที่ 5-19 ผลการทดสอบระหว่างขดลวดกับกราวด์ (reactance)

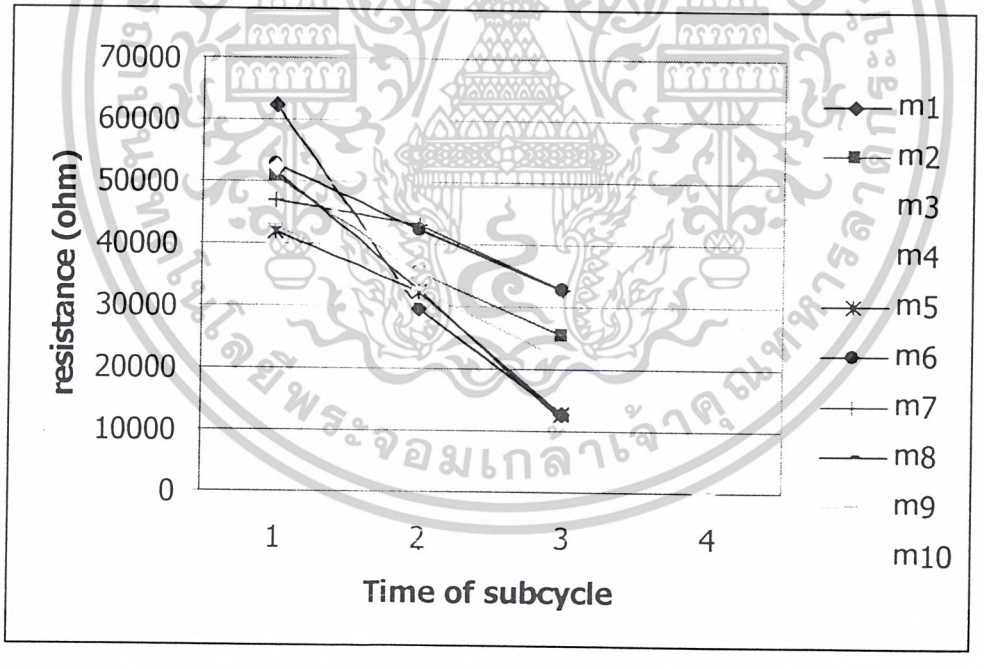


รูปที่ 5-20 ผลการทดสอบระหว่างรอบในขดลวดเดียวกันของขดลวดล่าง(resistance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

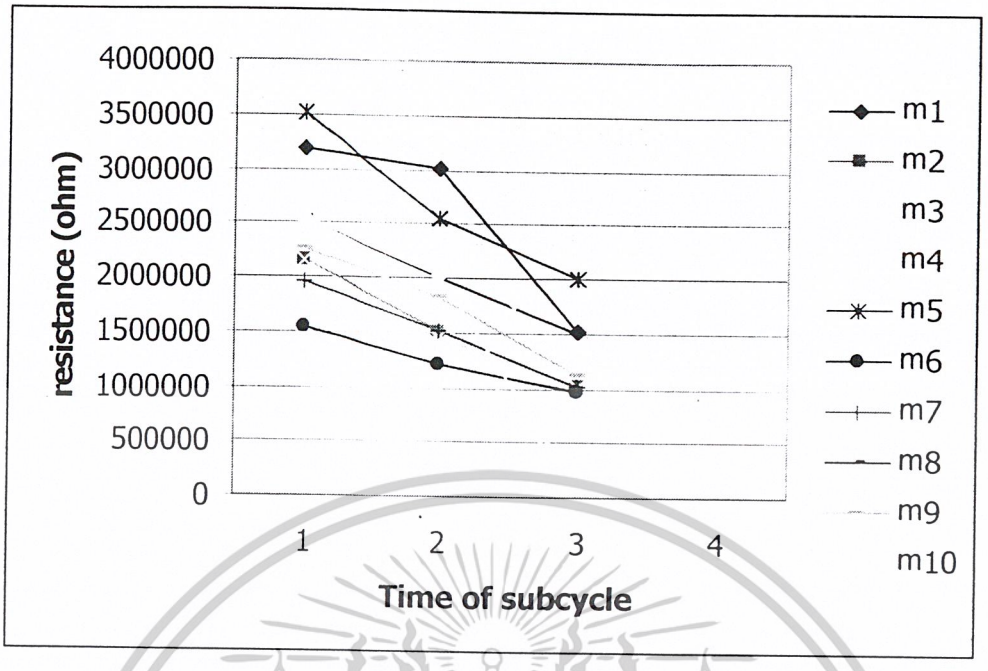


รูปที่ 5-21 ผลการทดสอบระหว่างรอบในขดลวดเดียวกันของขดลวดล่าง(reactance)

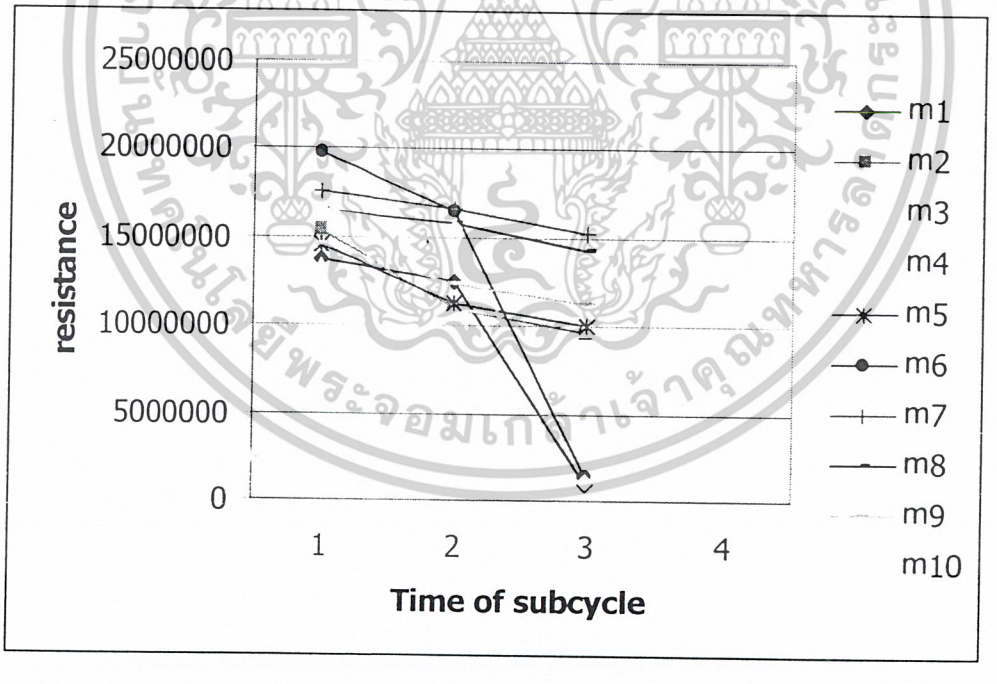


รูปที่ 5-22 ผลการทดสอบระหว่างรอบในขดลวดเดียวกันของขดลวดบน (resistance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

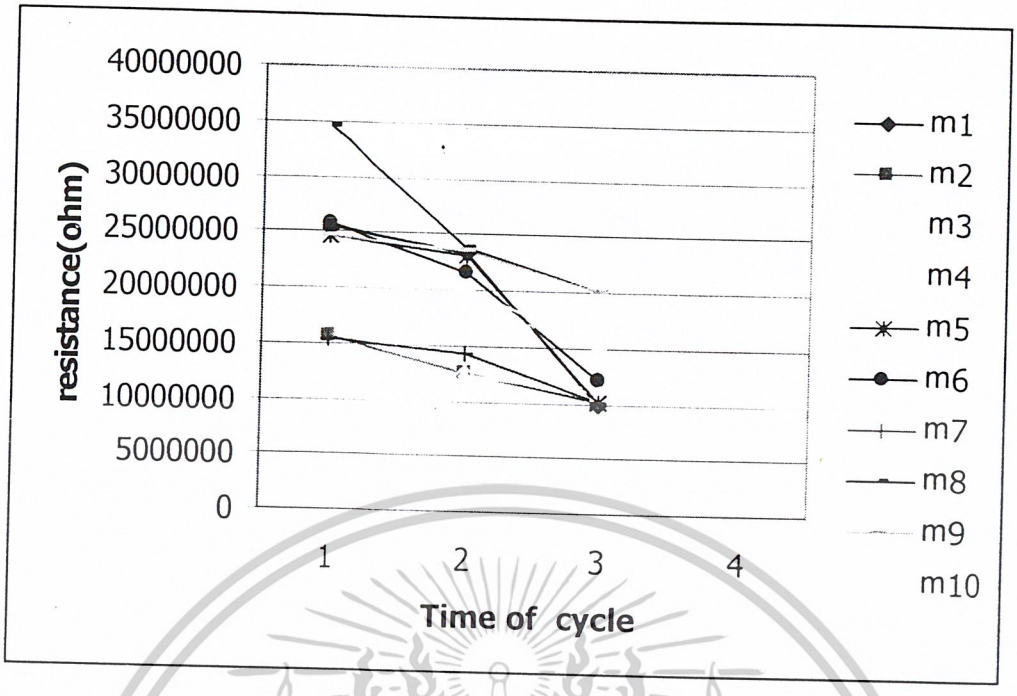


รูปที่ 5-23 ผลการทดสอบระหว่างรอบในขดลวดเดียวกันของขดลวดบน(reactance)



รูปที่ 5-24 ผลการทดสอบระหว่างขดลวดบนและขดลวดล่าง(resistance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-25 ผลการทดสอบระหว่างขดลวดบนและขดลวดล่าง(reactance)

5.2.5 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองข้างต้นจะเห็นได้ว่า เมื่อผ่านการเร่งอายุทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพ ค่าของ Impedance ซึ่งประกอบไปด้วย ส่วนของ Resistance และ Reactance จะมีแนวโน้มลดลงตามการเสื่อมสภาพของฉนวน หรือกล่าวได้ว่า ค่า Impedance ของฉนวนแปรผกผันกับกระแสที่ไหลผ่านฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปและวิจารณ์การทดลอง

จากการทดสอบที่ผ่านมาทำให้เห็นว่า แบบจำลองของวัตถุทดสอบสามารถแสดงการเกิดการเสียหายเนื่องมาจากกระบวนการเร่งโดยความร้อนและการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยได้โดยที่อุปกรณ์การทดสอบเพื่อการวินิจฉัยนั้นไม่ได้แสดงให้เห็นว่าก่อให้เกิดการเสียหายแก่ระบบและแก่แบบการทดลองของวัตถุทดสอบ ก่อนที่จะเข้าสู่ระบบทดสอบแต่อย่างใด และการลัดวงจรของวัตถุทดสอบที่เกิดขึ้นก็แสดงให้เห็นว่าบรรทัดฐานของการเกิดการเสียหายโดยการตรวจสอบด้วยความดันไฟฟ้านั้นสามารถเกิดขึ้นได้จริง

ในการออกแบบการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยควรเป็นการออกแบบเพื่อการตรวจสอบสภาพวัตถุฉนวนของระบบฉนวนตามหน้าที่ของวัสดุนั้นโดยเฉพาะ เช่นในแบบร่องสล๊อตจะเป็นการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยด้วยแรงดันไฟฟ้า ซึ่งก็จะแบ่งการทดสอบเป็น 3 อย่างคือ การทดสอบระหว่างเส้นลวดในขดเดียวกันเพื่อที่จะตรวจสอบสภาพวัสดุฉนวนที่ทำหน้าที่ป้องกันการลัดวงจรระหว่างเส้นลวดหรือก็คือน้ำยาอาบขอลวดนั่นเอง ส่วนระหว่างขดลวดกับขดลวดและระหว่างขดลวดกับกราวด์ก็เป็นไปเพื่อตรวจสอบฉนวนคั่นระหว่างเฟส (Phase Insulation) ฉนวนคั่นช่องสล๊อต (Slot Insulation) ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันการเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวด ระหว่างเฟส และขดลวดกับช่องสล๊อตตามลำดับ

แม้วัสดุฉนวนบางชนิดซึ่งทางผู้ผลิตได้ระบุถึงระดับความร้อนของวัสดุฉนวนนั้นไว้ที่ค่าหนึ่ง แต่หลังจากที่เรานำมาทดสอบ โดยการเร่งอายุโดยความร้อนตามขนาดอุณหภูมิที่มาตรฐานได้กำหนดต่อ ระดับความร้อนของวัสดุของฉนวนนั้น ปรากฏว่าวัสดุฉนวนหลาย ๆ ชนิดที่ไม่สามารถนำเข้ามาใช้ในกระบวนการการทดสอบได้เนื่องจากระดับความร้อนที่แท้จริงของวัสดุทดสอบนั้นอาจมีค่าต่ำกว่าที่ทางผู้ผลิตระบุไว้มาก ซึ่งจะเห็นได้จากการที่ระบบฉนวนนั้นเกิดการปริแตกออกเป็นแผ่น หรือร่วนออกเป็นชิ้น ๆ หลังจากการเข้าสู่รอบย่อยรอบแรกเท่านั้น และเป็นที่น่าสังเกตอย่างหนึ่งว่าค่ากระแสรั่วที่อยู่ในขั้นตอนการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยด้วยแรงดันไฟฟ้าของวัตถุก่อนการนำเข้าสู่รอบย่อยของการเร่งอายุโดยความร้อนเสียอีก ซึ่งนี่ก็แสดงให้เห็นว่า ความร้อนก็สามารถเป็นส่วนหนึ่งของการเพิ่มภาพความเป็นฉนวนของวัสดุฉนวนให้มีค่าความเป็นฉนวนมากขึ้นก็ได้ ซึ่งอาจกล่าวได้เป็นอย่างหนึ่งว่า แม้ลักษณะความเป็นฉนวนของวัสดุฉนวนทางไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ลักษณะทางกายภาพของวัสดุฉนวนทางไฟฟ้าก็ยังจะมีค่าเสื่อมลงและลดค่าลงซึ่งอาจจะมีลักษณะเช่นนี้อีกในรอบการให้ความร้อนต่อไปหรืออาจเป็นไปในทางที่ลักษณะความเป็นฉนวนของวัสดุทางไฟฟ้าจะมีค่าคงที่หรือใกล้เคียงกับค่าเดิมแต่ลักษณะทางกายภาพของฉนวนทางไฟฟ้ามีค่าเสื่อมและลดลงต่อไป แต่แนวโน้มของค่าความเป็นฉนวนมีแนวโน้มที่จะมีค่าลดลงตามสภาพทางกายภาพของฉนวน

ความเป็นฉนวนนั้นเราสามารถมองเป็นค่า อิมพิแดนซ์ ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนของ Resistance และ Reactance จากผลการทดลองที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า resistance และ reactance ซึ่งมีแนวโน้มลดลง ตามสภาพการเร่งอายุของฉนวนหมายความว่า เมื่อฉนวนมีการเร่งอายุ ทำให้เสื่อมสภาพ จะทำให้อิมพิแดนซ์ของฉนวนมีค่าต่ำลง จากการที่ฉนวนเสื่อมสภาพขึ้นจะทำให้ มีกระแสไหลผ่านฉนวนในแนวโน้มที่สูงขึ้น หรือจะกล่าวได้ว่าในความเป็นฉนวนนั้นจะมีค่ากระแสที่ไหลผ่านแปรผกผันกับค่าอิมพิแดนซ์ของฉนวน เมื่อมีการเร่งอายุของฉนวนนั้นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบชุดทดสอบ จากที่ผ่านมาชุดทดสอบเก่าเกิดปัญหาขึ้นมากไม่ว่าจะเป็นเรื่อง Vibation ที่ยังไม่สั่นได้ตามมาตรฐาน ตู้อบไอน้ำมีการรั่วไหลของไอน้ำ มีหยดน้ำหยดลงบนชิ้นงาน และอุณหภูมิไม่ได้ตามมาตรฐาน

ชุดทดสอบที่ใช้ในปัจจุบันนั้น Vibration ของเราสามารถสั่นได้ใกล้เคียงกับมาตรฐานมาก และตู้อบไอน้ำสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตามมาตรฐานมีค่าความผิดพลาดน้อยมาก และยังขจัดปัญหาเรื่องการที่หยดน้ำหยดลงบนชิ้นงานได้ด้วย และยังสร้างแบบจำลองร่องสล๊อต เพิ่มขึ้นกว่าเดิม 60 ตัว เพื่อใช้ในการทดสอบ ที่ใช้จำนวนชิ้นงานมาก ๆ ได้อีก

แนวทางการพัฒนาคือ ควรมีการทดสอบหาค่าอิมพิแดนซ์เมื่อมีการเร่งอายุให้มีความละเอียดมากกว่านี้ เพื่อไปประยุกต์ในการพัฒนาในการคำนวณอายุของฉนวน และยังต้องมีการพัฒนาชุดทดสอบทางกลให้ดีและมีความเป็นมาตรฐานมากกว่านี้ และการทดสอบยังไม่สามารถควบคุมเวลาในการทดสอบได้ ตรงตามเวลาพอดี ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

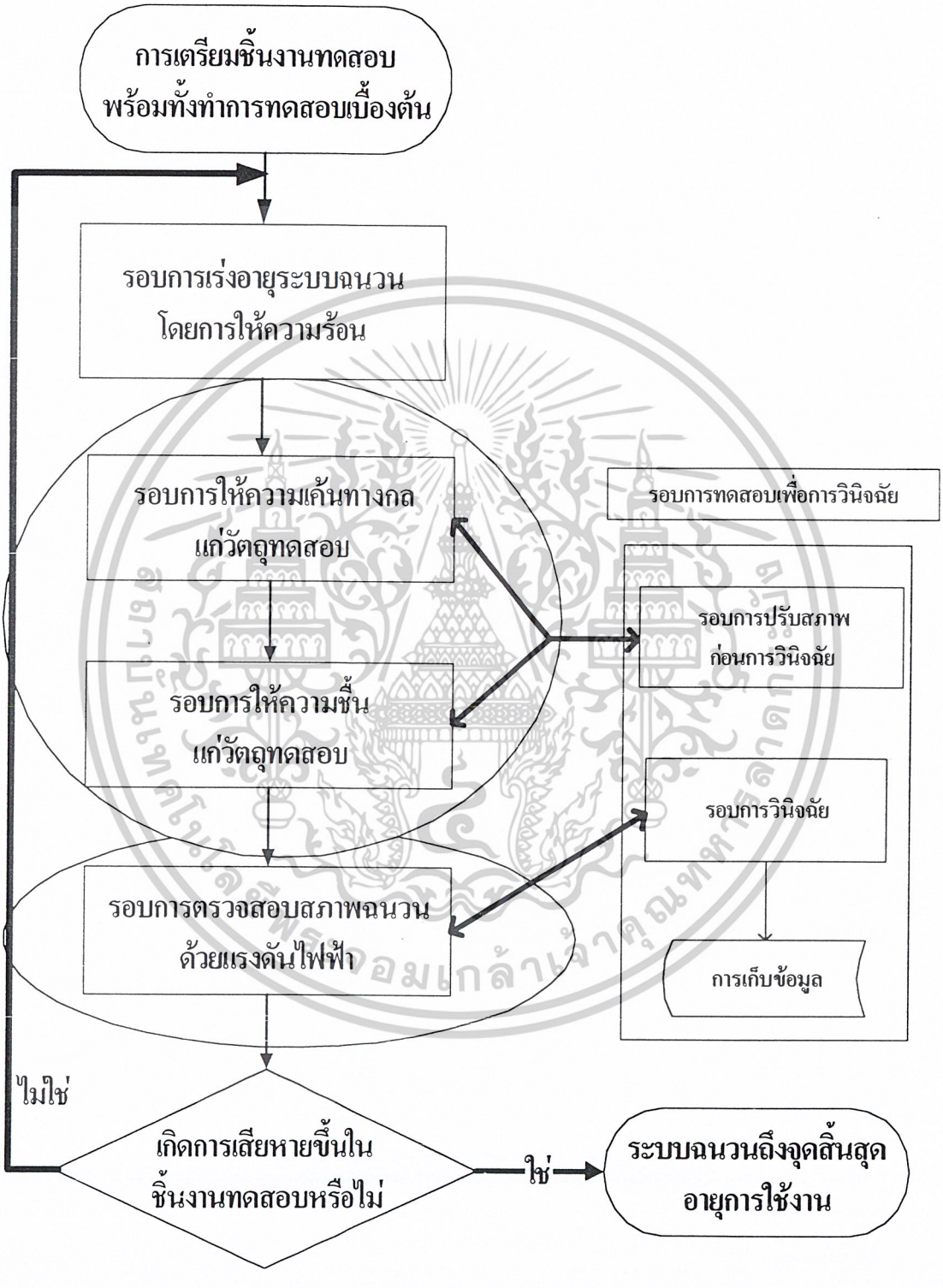
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

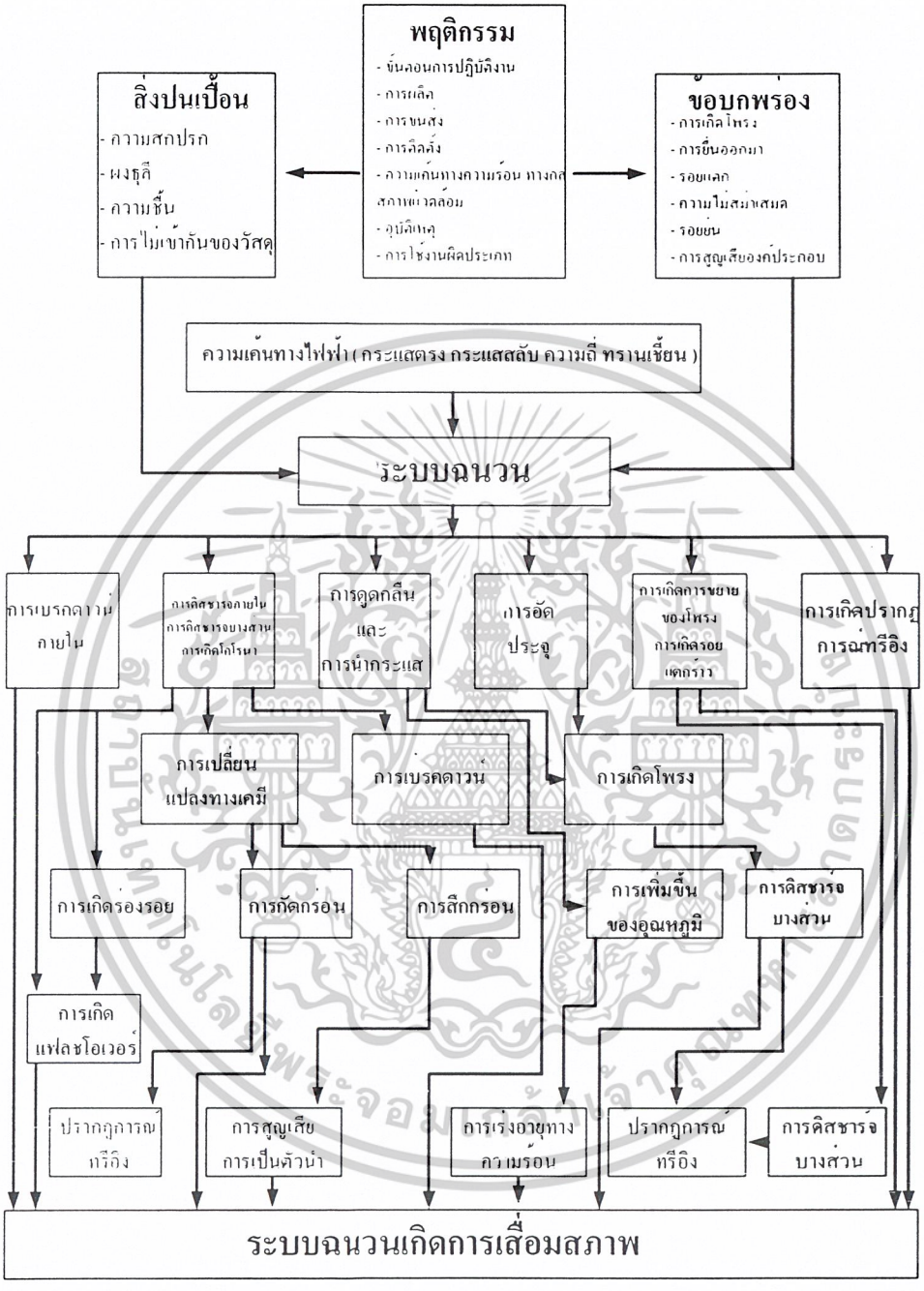
ภาคผนวก ก

ลำดับการทำงาน



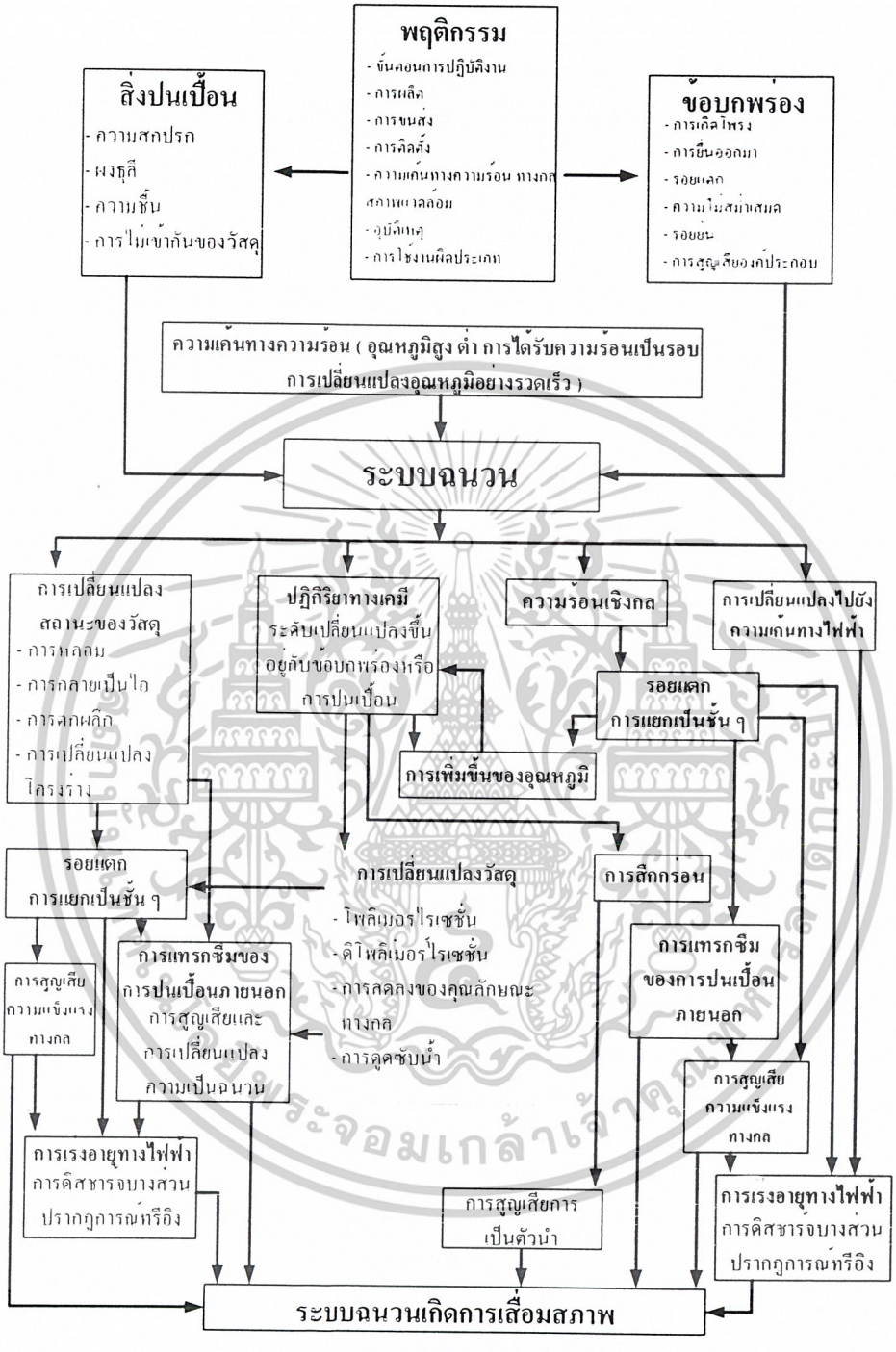
รูปที่ ก-1 ขั้นตอนของกระบวนการทดสอบการเร่งอายุของฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



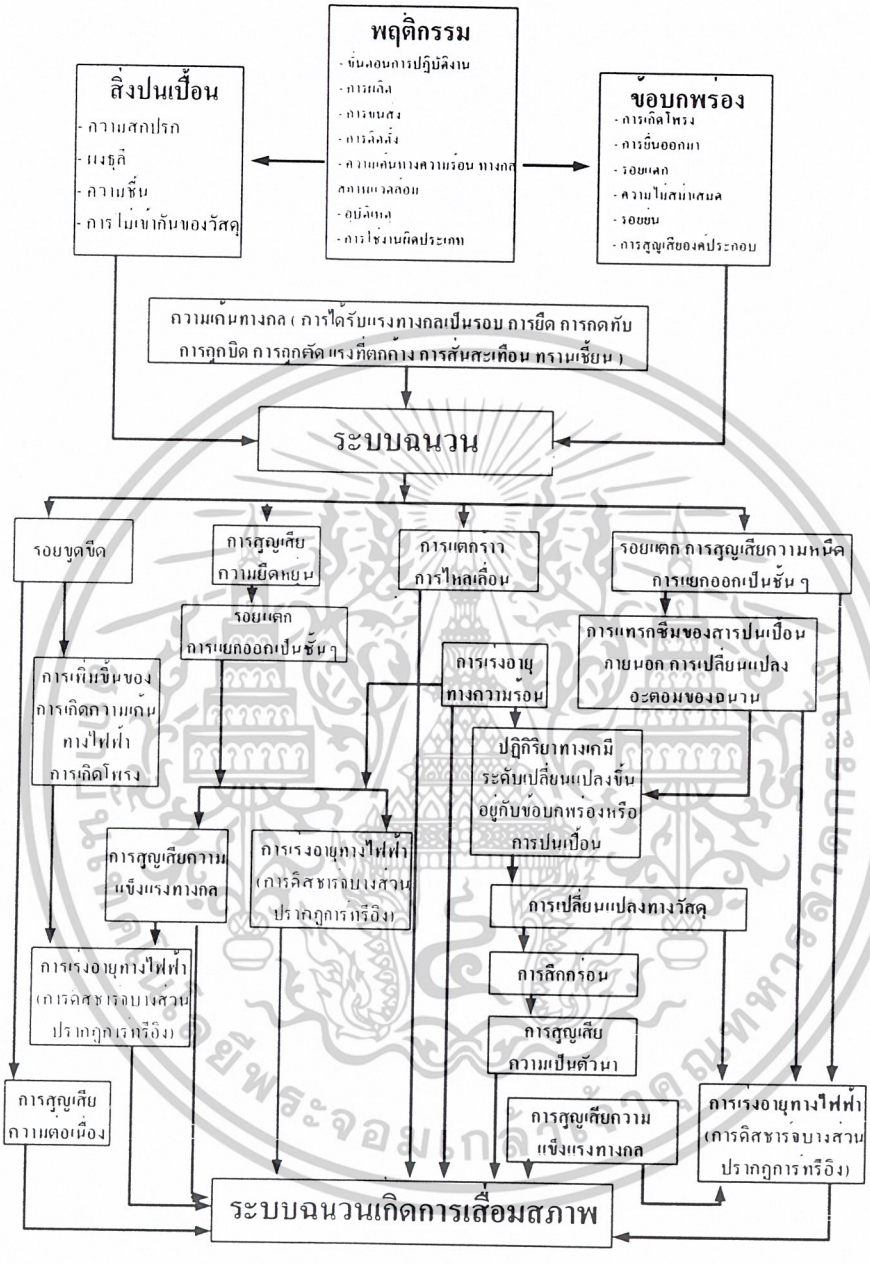
รูปที่ ก-2 ปัจจัยการเร่งอายุทางไฟฟ้าภายในและภายนอกของระบบฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



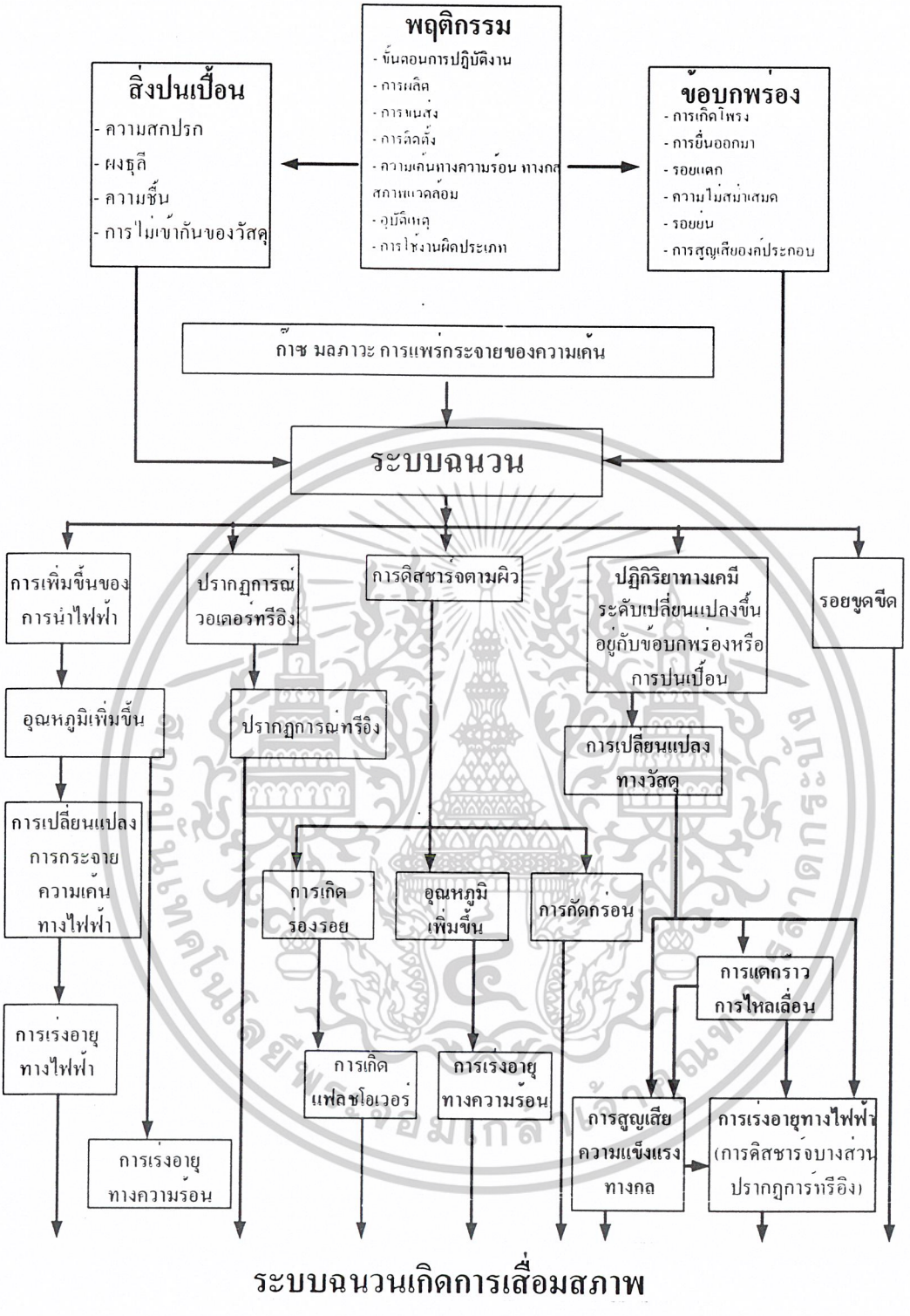
รูปที่ ก-4 ปัจจัยการเร่งอายุทางความร้อนภายในและภายนอกของระบบฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-6 ปัจจัยการเร่งอายุทางกลภายในและภายนอกของระบบฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ระบบฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพ

รูปที่ ก-1 ปัจจัยการเร่งอายุเนื่องจากผลทางสภาพแวดล้อมภายในและภายนอกของระบบฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอเรโอเรซิเนียส	105
โพลิไวนิล อะซิเทล	105
โพลิไวนิลฟอร์มัล	105
โพลิเอไมด์	105
โพลิยูเรทิน	130
โพลิเอสเตอร์	155
อีพอกซี	155
โพลิไฮดาทิน	155
โพลิเอสเตอร์ริไมด์	180
โพลิเอสเตอร์ริไมด์/เอไมด์ (เคลือบ 2 ชั้น)	180
ซิลิโคน	180+
โพลิเอไมด์	200
โพลิเตตระฟลูออโรเอทิรีน	200

ตารางที่ ก-2 อุณหภูมิและช่วงเวลาที่ใช้ในการเร่งอายุของระบบฉนวน

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

ตารางที่ ก-3 ระดับชั้นทางความร้อนของฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

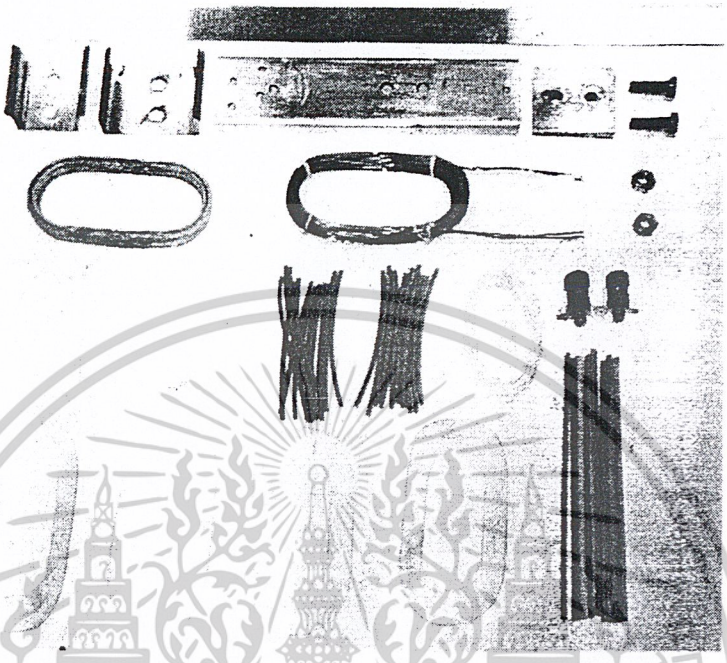
105 °C (°C)	120 °C (°C)	130 °C (°C)	155 °C (°C)	180 °C (°C)	200 °C (°C)	รอบย่อย (วัน)
170-180	185-195	195-205	220-230	245-255	265-275	1-2
160-170	175-185	185-195	210-220	235-245	255-265	2-3
150-160	165-175	175-185	200-210	225-235	245-255	4-6
140-150	155-165	165-175	190-200	215-225	235-245	7-10
130-140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

ตารางที่ ก- 4 อุณหภูมิแนะนำและรอบย่อยของการเร่งอายุ

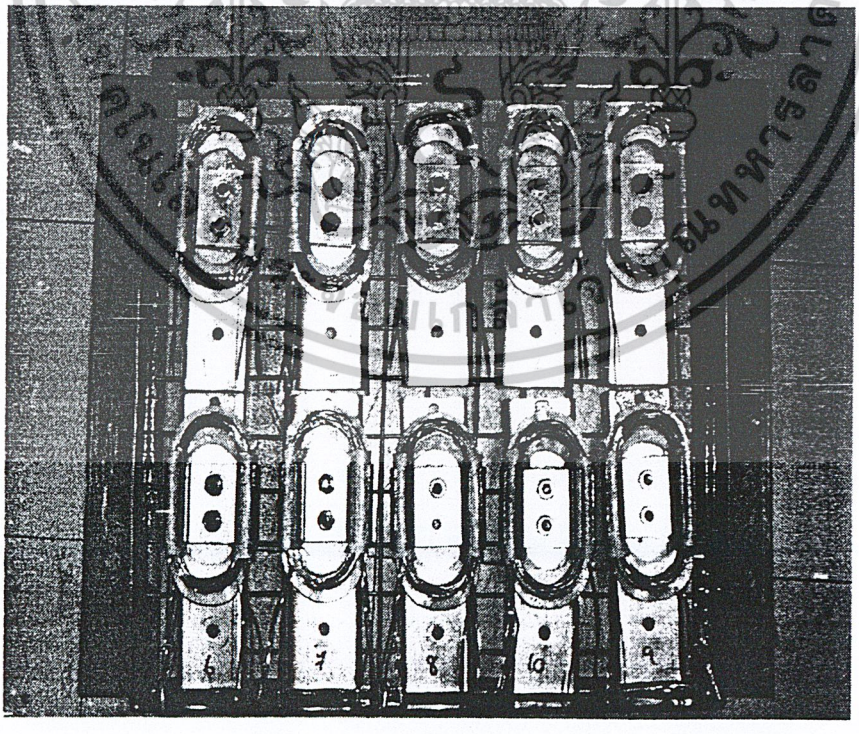
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

รูปแสดงลำดับการทำงาน

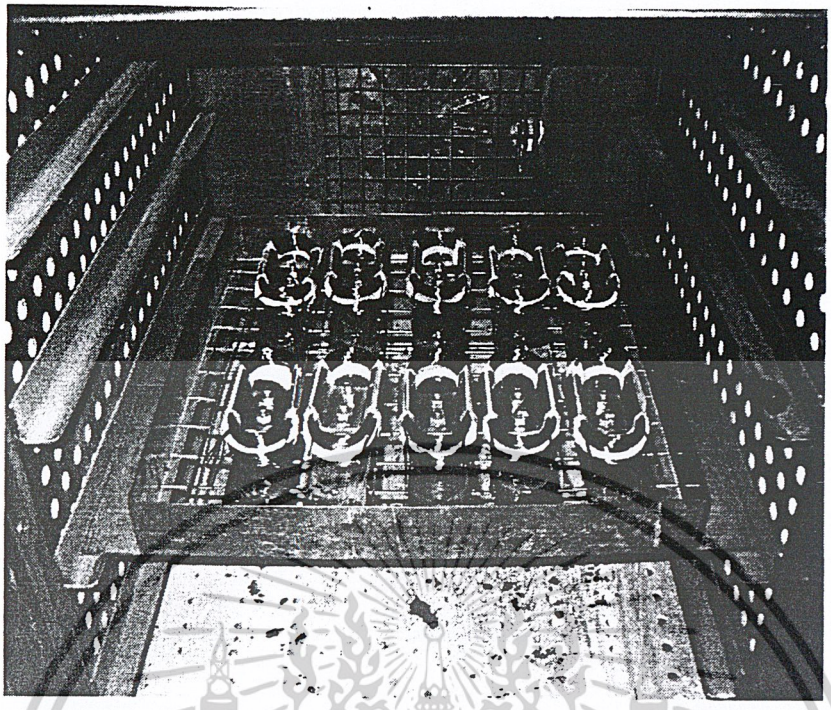


รูปที่ ข-1 ส่วนประกอบของแบบจำลองร่องสลัด



รูปที่ ข-2 แบบจำลองร่องสลัดที่ใช้ในการทดลอง

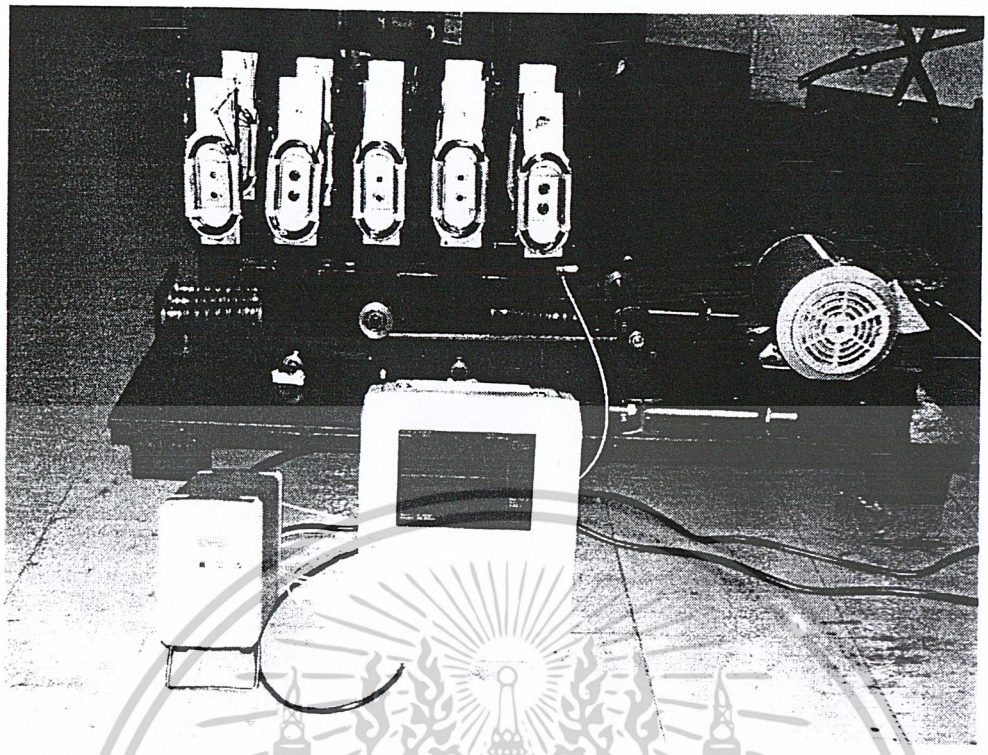
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



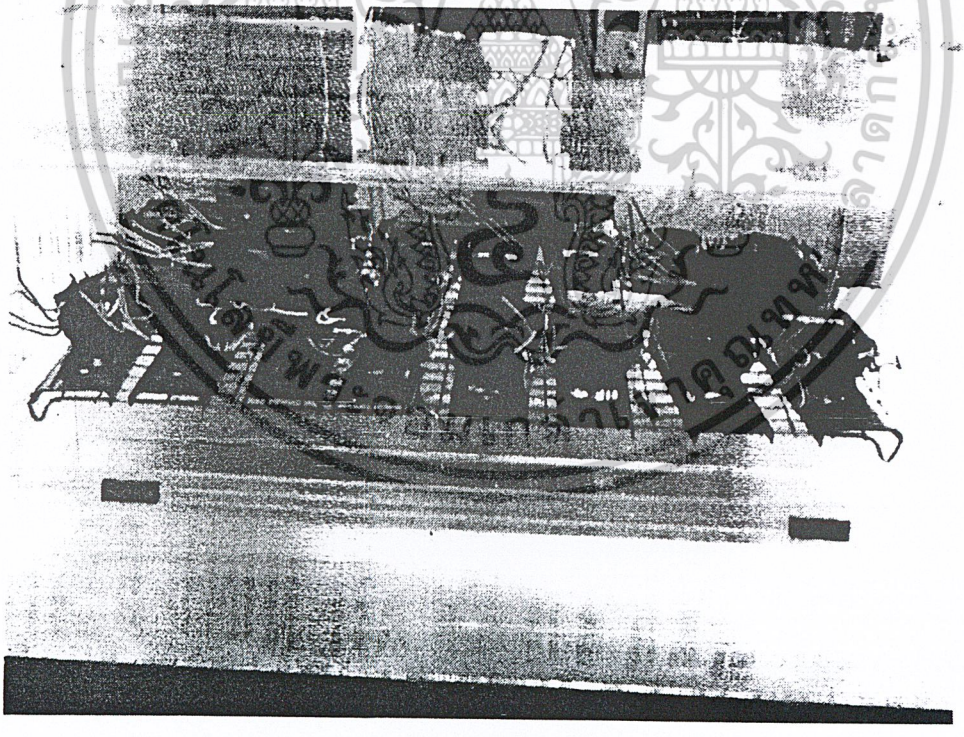
รูปที่ ข-3 ขดลวดที่กำลังทำการเร่งอายุทางความร้อน

รูปที่ ข-4 แบบจำลองร่องสล็อตที่ได้รับการเร่งอายุทางความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-5 การปรับสภาพทางกลต่อแบบจำลองร่องสลิ๊อตโดยโต๊ะสั่น



รูปที่ ข-6 ตู้อบความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ข-7 ตู้อบความชื้น

รูปที่ ข-8 การทดสอบทางไฟฟ้าเพื่อการวินิจฉัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] พิษณุ มีระหันนอก และคณะ , การทดสอบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ,ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2546

[2] ยุทธพงษ์ แซ่ฮา และคณะ, การทดสอบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อจัดระดับความร้อนของ ระบบฉนวน, ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2545

[3] เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์ และคณะ, การทดสอบฉนวนสำหรับเครื่องจักกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ,ปริญญานิพนธ์ ปีการศึก2544

[4] มีชัย พิจารณ์ และคณะ , การทดสอบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยการเปรียบเทียบผลของเสิร์จ, ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2543

[5] พิชิต ลำยอง ,เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2540

[6] IEC standard 34-18-21 ,Functional evaluation of insulation system Section 21 :Test procedure for wire wound windings –Thermal evaluation and classification,1992, FirstEdition

[7] IEC standard 34-18-1 ,Functional evaluationof insulation system for ritating eletrical machines Part1:General guidelines,1992 First Edition

[8] 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

[9] IEC standard 85 ,Determinng the thermal classification of electrical insulation,1984

[10] IEC standard 60505,Evaluation and qualification of electrical insulation systems,1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้