สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

# การทดสอบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อการจัดระดับความร้อนของระบบฉนวนทางไฟฟ้า

# INSULATION TEST FOR INDUCTION MACHINE FOR DETERMINING THE THERMAL CLASSIFICATION OF ELECTRICAL INSULATION

T049912

โดย

นายยุทธพงษ์ แซ่ฮา

นายวินิจ อัมพวา

นายวิวัฒน์ รอดสุด

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.พิชิต ลำยอง

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 49912
วัน เดือน ปี 2 เม.ย. 2547
b.....
i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2545

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การทดสอบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อการจัดระดับความร้อนของระบบฉนวนทางไฟฟ้า

INSULATION TEST FOR INDUCTION MACHINE FOR DETERMINING THE THERMAL CLASSIFICATION OF ELECTRICAL INSULATION

ผู้จัดทำ

1. นายยุทธพงษ์ แซ่ฮา รหัสประจำตัว 42010283
2. นายวินิจ อัมพวา รหัสประจำตัว 42010331
3. นายวิวัฒน์ รอดสุด รหัสประจำตัว 42010333

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.พิชิต ล่ายอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การทดสอบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อการจัดระดับความร้อนของระบบฉนวนทางไฟฟ้า

นายยุทธพงษ์ แซ่ฮา 42010283
นายวินิจ อัมพวา 42010331
นายวิวัฒน์ รอดสุด 42010333
ผศ.พิชิต ลำยอง อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2545

## บทคัดย่อ

โครงงานนี้นำเสนอโครงร่างของกระบวนการทดสอบสำหรับการเปรียบเทียบอายุของระบบฉนวนตามระดับความร้อนที่ได้คาดไว้ เพื่อกำหนดระดับความร้อนของระบบฉนวนในเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่นำมาทดสอบ โดยพิจารณาตามความเกี่ยวข้องและความสำคัญของผลกระทบของสภาวะการใช้งานตามอัตราลักษณะความสัมพันธ์ทางเคมีของอาร์รีนีอุส โครงสร้างการทดสอบนี้จะอธิบายถึงลักษณะที่มีความเหมาะสมของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ ในการทดสอบการหาค่าของระบบฉนวนและแนะนำไปถึงการให้ความร้อนแก่แต่ละชิ้นงานซึ่งอาจเป็นไปตามลักษณะการสะสมของผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการใช้งานมายาวนานภายใต้สภาวะที่ก่อให้เกิดการเร่งอายุ พร้อมทั้งบอกถึงการใช้แรงดันไฟฟ้าในการตรวจสอบหลังจากการให้ความเค้นทางกลและการให้ความชื้นเพื่อก่อให้เกิดจุดสิ้นสุดอายุของระบบฉนวนโดยการเกิดการเสียหายทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Insulation Test for Induction Machine for Determining the Thermal Classification of Electrical Insulation**

Yootthapong Saha
Winij Umpawa
Wiwat Rodsud
Assist.Prof. Pichit Lumyong Advisor

**ABSTRACT**

This project outlines a test procedure for comparing expected life, at rated temperature. For determining the thermal class of unknown insulation systems in induction machine, by consider from their interrelationship and the influence of service condition, by the Arrhenius chemical rate relationship. This test procedure describes test specimens suitable for use in insulation evaluation tests, and recommends a series of exposures to heat to which the specimens may be subjected to represent cumulative effects of long service, under accelerated conditions. Procedure are given for applying periodic voltage checks, preceded by periods of mechanical stress and moisture to establish the end point of insulation life by electric failure

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจสำเร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และร่วมมือจากหลาย ๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ก็คือ ผศ. พิชิต ลำยอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำ และสนับสนุนการทำงานเสมอมา ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก นายเปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์ รุ่นพี่ที่ปรึกษาปริญญาโทที่คอยดูแลการทำงานทุกๆอย่างตลอดมา อาจารย์ วิภู ศรีสืบสาย เลขานุการโครงการภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ และบริษัทลาดกระบังสแตนเลสสตีลที่ให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือในการสร้างแบบจำลองร่องสลอต บริษัทไทยฮิตาชิลวดอาบน้ำยา จำกัด และบริษัทบูรพาการไฟฟ้า จำกัด ที่ให้โอกาสเข้าไปดูงานของบริษัท ศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรมที่ให้ความช่วยเหลือด้าน อุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ในการทำงาน และทุกๆท่านที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือซึ่งไม่ได้กล่าวไว้ ณ ที่นี้ ที่ได้สนับสนุนให้โครงงานนี้มีความสำเร็จในที่สุด ซึ่งต้องขอขอบคุณเป็นอย่างมาก

ท้ายสุดขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้วิชาความรู้ และให้คำปรึกษาแก่ศิษย์มาโดยตลอด จนกระทั่งประสบความสำเร็จไปด้วยดี

นายยุทธพงษ์ แซ่ฮา
นายวินิจ อัมพวา
นายวิวัฒน์ รอดสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ


| | หน้าที่ |
|---|---|
| บทคัดย่อภาษาไทย | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | II |
| กิตติกรรมประกาศ | III |
| สารบัญ | IV |
| สารบัญตาราง | V |
| สารบัญภาพ | VI |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความสำคัญและที่มา | 1 |
| 1.2 ขอบเขตของการทดสอบ | 1 |
| 1.3 จุดประสงค์ของการทดสอบ | 2 |
| 1.4 วิธีการดำเนินงาน | 2 |
| บทที่ 2 การหาค่าและคุณสมบัติของระบบฉนวนไฟฟ้า | 3 |
| 2.1 ประเภทของวัสดุฉนวน | 3 |
| 2.2 การเร่งอายุ | 4 |
| 2.3 การเตรียมวิธีการหาค่า | 8 |
| 2.3.1 วิธีการเบื้องต้นสำหรับการเตรียมวิธีการหาค่า | 8 |
| 2.3.1.1 วัตถุ | 9 |
| 2.3.1.2 สภาวะการใช้งาน | 9 |
| 2.3.1.3 จำนวนอายุ | 9 |
| 2.4 กระบวนการหาวิธีการหาค่าเพื่อจัดคุณสมบัติระบบฉนวนทางไฟฟ้า | 9 |
| 2.4.1 ข้อพิจารณา | 9 |
| 2.4.2 ประเภทของโครงสร้างการหาค่า | 10 |
| 2.4.2.1 การหาค่าจากข้อมูลที่ได้จากประสบการณ์การใช้งาน | 10 |
| 2.4.2.2 การเปรียบเทียบกระบวนการหาค่าของระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่นำมาทดสอบ และระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่นำมาอ้างอิง | 10 |
| 2.4.2.3 การเปรียบเทียบข้อมูลจากกระบวนการทดสอบของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบ กับข้อกำหนดการใช้งานของระบบฉนวน | 10 |
| 2.4.3 ข้อพิจารณาในทางปฏิบัติ | 11 |
| 2.4.3.1 การเลือกวัตถุที่ใช้ในการทดสอบ | 11 |
| 2.4.3.2 การทดลองกระบวนการทดสอบ | 12 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3.3 ข้อสรุปสำหรับการปฏิบัติเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐาน 13
2.5 องค์ประกอบการทดสอบการเร่งอายุ 13
2.5.1 วัตถุทดสอบ 13
2.5.1.1 โครงสร้างของวัตถุทดสอบ 13
2.5.1.2 จำนวนของวัตถุทดสอบ 13
2.5.1.3 การทดสอบเพื่อรับรองคุณลักษณะ 14
2.5.1.4 รอบย่อยของการปรับสภาพวัตถุทดสอบ 14
2.5.1.5 การทดสอบเพื่อวินิจฉัยเบื้องต้น 14
2.5.1.6 ระบบฉนวนทางไฟฟ้าอ้างอิง 14
2.5.2 เงื่อนไขการทดสอบ 14
2.5.2.1 การทดสอบแบบต่อเนื่องและแบบรอบการทดสอบ 14
2.5.2.2 ระดับของความเค้นในการทดสอบ, ปัจจัยการเร่งอายุ, ปัจจัยในการวินิจฉัย 14
2.5.3 การกำหนดอายุการใช้งานของระบบฉนวนทางไฟฟ้า 15
2.5.3.1 การตีความหมายผลการทดสอบอายุ 15
2.5.3.2 การเปรียบเทียบข้อมูลการทดสอบอายุ 15
2.6 การเร่งอายุ 16
2.6.1 ทั่วไป 16
2.6.2 การประเมินการเร่งอายุเครื่องจักร 16
2.6.3 การเพิ่มความเร็วในการเร่งอายุ 17
2.6.3.1 การเร่งอายุทางไฟฟ้า (ดูรูป ข-1) 17
2.6.3.2 การเร่งอายุทางความร้อน (ดูรูป ข-2) 18
2.6.3.3 การเร่งอายุทางกล (ดูรูป ข-3) 19
2.6.3.4 การเร่งอายุทางสิ่งแวดล้อม (ดูรูป ข-4) 20
2.6.4 ระดับความเค้น 20
2.6.5 ระยะเวลาและจำนวนรอบย่อยการเร่งอายุ 21
2.6.6 รอบย่อยการเร่งอายุ 21
2.6.6.1 ปัจจัยทางความเค้นเพียงปัจจัยเดียว 21
2.6.6.2 ปัจจัยทางความเค้นเพียงหลายปัจจัย 21
2.6.6.2.1 สภาวะในการปฏิบัติที่ใช้อ้างอิงที่มีลักษณะเป็นลำดับ 21
2.6.6.2.2 เงื่อนไขในการปฏิบัติที่ใช้อ้างอิงที่มีลักษณะเป็นลำดับซับซ้อน 21
2.7 การปรับสภาพก่อนการวินิจฉัย 22
2.8 การวินิจฉัย 22
2.8.1 การทดสอบเพื่อการวินิจฉัย-บรรทัดฐานของจุดสิ้นสุดอายุ 22
2.8.2 การเพิ่มการทดสอบโดยเฉพาะ 22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบ 23
2.9.1 กล่าวโดยทั่วไป 23
2.9.2 ประสบการณ์การใช้งาน 23
2.9.3 ไฟฟ้า 23
2.9.4 ความร้อน 23
2.9.5 ทางกล 24
2.9.6 สภาพแวดล้อม 24
2.9.7 ผลที่เกิดขึ้นจากหลายๆปัจจัย 24
2.10 การรายงานการทดสอบ 24
2.11 การเข้ารหัสระบบฉนวนทางไฟฟ้า 24
บทที่ 3 โครงสร้างกระบวนการการทดสอบเพื่อการหาค่าความคงทนทางความร้อน
ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุน 25
3.1 แนวทางโดยรวมของกระบวนการทดสอบ 25
3.2 รูปแบบกระบวนการทดสอบตามมาตรฐาน 25
3.2.1 รูปแบบกระบวนการทดสอบตามมาตรฐานสำหรับการพัน
แบบ WIRE-WOUND WINDINGS 25
3.2.2 รูปแบบกระบวนการทดสอบตามมาตรฐานสำหรับการพัน
แบบ FORM-WOUND WINDINGS 25
3.3 ระบบฉนวนที่ใช้ในการอ้างอิง 26
3.4 วัตถุที่ใช้ในการทดสอบและชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ 26
3.4.1 โครงสร้างของวัตถุที่ใช้ในการทดสอบ 26
3.4.2 จำนวนของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ 26
3.4.3 คุณภาพและความแน่นอนของการทดสอบ 26
3.4.4 การทดสอบเพื่อการวินิจฉัยเบื้องต้น 27
3.5 โครงสร้างของกระบวนการทดสอบโดยความร้อน 27
3.5.1 หลักการโดยทั่วไป 27
3.5.2 ขนาดอุณหภูมิและช่วงเวลาที่ใช้ในการเร่งอายุฉนวน 27
3.5.3 วิธีการให้ความร้อนในการทดสอบ 29
3.5.4 รอบย่อยของการเร่งอายุทางอุณหภูมิ 30
3.5.5 รอบย่อยของการทดสอบเพื่อการวินิจฉัย 30
3.5.5.1 การทดสอบทางกล 30
3.5.5.2 การทดสอบด้วยความชื้น 30
3.5.5.3 การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้า 31
3.5.5.4 การทดสอบเพื่อการวินิจฉัยอื่นๆ 31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 ผลของการทดสอบความทนทานของฉนวน 31
3.7 การวิเคราะห์ การรายงานและการจัดระดับอุณหภูมิ 32
3.7.1 บรรทัดฐานของการเกิดการเสียหาย 32
3.7.2 จุดสิ้นสุดอายุของฉนวน (End of life) 32
3.7.3 เวลาเฉลี่ย (Average time) 32
3.8 การแปลความหมายของข้อมูล 33
3.9 การรายงานผล 34
บทที่ 4 หลักการการทดสอบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้การพัน
แบบWIRE-WOUND WINDINGSโดยใช้แบบจำลองร่องสล็อต (Motorette)
เพื่อการจัดระดับความร้อนของระบบฉนวน ไฟฟ้า 35
4.1 บทนำ 35
4.2 ขอบเขตของการทดสอบ 35
4.3 จุดประสงค์ของการทดสอบ 35
4.4 การจัดประเภทของวัสดุฉนวนโดยแบ่งตามระดับความร้อน 36
4.5 วิธีการหาค่าระดับความร้อนของระบบฉนวน 36
4.6 แบบจำลองของชิ้นงานทดสอบ 37
4.6.1 ส่วนประกอบของชิ้นงานทดสอบ 37
4.6.2 โครงสร้างของชิ้นงานทดสอบ 37
4.7 กระบวนการทดสอบ 37
4.7.1 ขอบเขตของกระบวนการทดสอบ 37
4.7.2 กระบวนการเร่งอายุโดยการให้ความร้อน 38
4.7.3 กระบวนการทดสอบทางกล 39
4.7.4 กระบวนการทดสอบทางความชื้น 39
4.7.5 กระบวนการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้า 39
4.8 บรรทัดฐานของการเกิดการเสียหาย 40
4.9 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ 41
4.9.1 การเปรียบเทียบ 41
4.9.2 ความไม่เป็นเชิงเส้นหรือความไม่คล้ายคลึงกันของกราฟ 41
4.10 โครงสร้างแบบจำลองร่องสล็อต 41
4.10.1 คำแนะนำทั่วไป 41
4.10.1.1 วัสดุที่นำมาใช้ 41
4.10.1.2 ขนาดของวัสดุตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ 41
4.10.1. 3 โครงสร้าง 41
4.10.2 รายละเอียดของโครงสร้างแบบจำลองร่องสล็อต 42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.10.3 ส่วนประกอบของแบบจำลองร่องสลิ็อต 42
4.10.4 การประกอบแบบจำลองร่องสลิ็อต 43
4.11 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบทางความชื้น 45
4.11.1 ตู้อบไอน้ำ 45
4.11.2 ตู้อบไอน้ำสำหรับวัตถุทดสอบที่เย็นตัวลง (ที่อุณหภูมิห้อง) 45
บทที่ 5 การทดลอง ผลการทดลอง 51
5.1 ขอบเขตการทดสอบ 51
5.2 จุดประสงค์การทดสอบ 51
5.3 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบ 51
5.4 วิธีดำเนินการทดสอบ 51
5.5 แสดงขั้นตอนของกระบวนการทดสอบ 52
5.6 ผลการทดสอบทางไฟฟ้าเพื่อการวินิจฉัย 60
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์การทดสอบ 70
ภาคผนวก
บรรณานุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป


| | หน้าที่ |
|---|---|
| รูปที่ 2-1 แสดงอายุของระบบฉนวนไฟฟ้า | 5 |
| รูปที่ 2-2 ตัวอย่างของความเป็นไปได้ของการเกิดการเร่งอายุของเครื่องจักรกลโดยแบ่งการทำงานตามลำดับของเวลา | 6 |
| รูปที่ 2-3 แสดงการเกิดการเร่งอายุของเครื่องจักรกลโดยแบ่งการทำงานตามลำดับของเวลาตามรูปที่ 2 | 7 |
| รูปที่ 2-4 ตัวอย่างของความเป็นไปได้ของการเกิดการเร่งอายุของเครื่องจักรกลโดยแบ่งการทำงานตามลำดับของเวลา | 7 |
| รูปที่ 2-5 แสดงการเกิดการเร่งอายุของเครื่องจักรกลโดยแบ่งการทำงานตามลำดับของเวลาตามรูปที่ 4 | 7 |
| รูปที่ 2-6 วิธีการเบื้องต้นของวิธีการหาค่า | 8 |
| รูปที่ 2-7 ชนิดของโครงสร้างในการหาค่า | 11 |
| รูปที่ 2-8 แสดงเกณฑ์การเลือกวัตถุทดสอบ | 11 |
| รูปที่ 2-9 การสร้างวิธีทดสอบ | 12 |
| รูปที่ 3-1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างระบบฉนวนที่นำมาทดสอบและระบบฉนวนที่ใช้ในการอ้างอิงตามความสัมพันธ์ของอาร์รีนิอุส (Arrhenius) | 33 |
| รูปที่ 4-1 แสดงวงจรไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยด้วยแรงดัน | 46 |
| รูปที่ 4-2 ส่วนประกอบของแบบจำลองร่องสลอตก่อนทำการประกอบ | 47 |
| รูปที่ 4-3 แบบจำลองร่องสลอตที่ประกอบเสร็จแล้วและผ่านการชุบวาร์นิช | 47 |
| รูปที่ 4-4 แสดงการสร้างเฟรมของแบบจำลองร่องสลอต | 48 |
| รูปที่ 4-5 แสดงบล๊อคไดอะแกรมการสร้างตู้อบไอน้ำ | 49 |
| รูปที่ 4-6 แสดงตู้อบไอน้ำสำหรับวัตถุทดสอบที่เย็นตัวลง (ที่อุณหภูมิห้อง) | 49 |
| รูปที่ 5-1 เตาอบ | 54 |
| รูปที่ 5-2 ส่วนประกอบของแบบจำลองร่องสลอต | 55 |
| รูปที่ 5-3 แบบจำลองร่องสลอตหลังชุบวาร์นิช | 56 |
| รูปที่ 5-4 การเร่งอายุทางความร้อนต่อแบบจำลองร่องสลอต | 56 |
| รูปที่ 5-5 แบบจำลองร่องสลอตหลังจากได้รับการเร่งอายุทางความร้อน | 57 |
| รูปที่ 5-6 ตู้อบไอน้ำ | 57 |
| รูปที่ 5-7 การปรับสภาพทางความชื้นต่อแบบจำลองร่องสลอตด้วยตู้อบไอน้ำ | 58 |
| รูปที่ 5-8 การปรับสภาพทางกลต่อแบบจำลองร่องสลอตด้วยโต๊ะสั่น | 58 |
| รูปที่ 5-9 การทดสอบทางไฟฟ้าเพื่อการวินิจฉัย | 59 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง


| | หน้าที่ |
|---|---|
| ตารางที่ 2-1 ประเภทของวัสดุฉนวนและอุณหภูมิจำกัด | 3 |
| ตารางที่ 2-2 อุณหภูมิในการเร่งอายุ | 19 |
| ตารางที่ 3-1 ประเภทของวัสดุฉนวนและอุณหภูมิจำกัด | 28 |
| ตารางที่ 3-2 ขนาดอุณหภูมิและช่วงเวลาที่ใช้ในการเร่งอายุของระบบฉนวน | 28 |
| ตารางที่ 4-1 ประเภทของวัสดุฉนวนและอุณหภูมิจำกัด | 36 |
| ตารางที่ 4-2 อุณหภูมิและช่วงเวลาที่ใช้ในการเร่งอายุของระบบฉนวน | 38 |
| ตารางที่ 4-3 แสดงขนาดแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ | 40 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1
# บทนำ

## 1.1 ความสำคัญและที่มา

การเสื่อมสภาพของฉนวนจากความร้อนคือสาเหตุหลักของการเสียสภาพการใช้งานก่อนเวลาอันสมควรของฉนวนมอเตอร์ เราอาจจะกล่าวได้ว่าการให้มอเตอร์ทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่ออกแบบไว้ทุกๆ 10 องศาเซลเซียส จะทำให้อายุของฉนวนลดลงครึ่งหนึ่งนั่นคือค่าอุณหภูมิสูงเกินค่าที่ออกแบบไว้ 10 องศาเซลเซียส อายุของฉนวนควรจะเป็น 50 เปอร์เซ็นต์ของอายุที่ควรจะเป็น และถ้าอุณหภูมิสูงเกินกว่าค่าที่ออกแบบไว้ 20 องศาเซลเซียสอายุของฉนวนจะเป็น 25 เปอร์เซ็นต์การใช้งานมอเตอร์ที่อุณหภูมิแวดล้อมไม่เกินค่าที่ออกแบบไว้ ถ้าเกิดการใช้งานที่เกินพิกัดทางด้านไฟฟ้าและการใช้งานในทางที่ผิดทางกลหรือทางเคมี ก็จะทำให้ฉนวนของมอเตอร์อาจมีอายุยาวนานถึง 100,000 ชั่วโมงทำงาน นั่นคือใช้งานได้นานถึง 20 ปี หากใช้งานปีละ 5,000 ชั่วโมง

ความทนทานของวัสดุที่ใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับตัวประกอบหลายอย่าง เช่น อุณหภูมิ ความเค้นทางไฟฟ้าและทางกล การสั่นสะเทือน การเผยผึ่งต่อบรรยากาศและสารเคมีที่ทำให้เกิดความเสียหาย ความชื้นและสิ่งสกปรก โดยทั่วไปวัสดุฉนวนไฟฟ้าจะไม่สามารถทนทานต่ออุณหภูมิที่กำหนดให้โดยไม่จำกัดเวลาได้ แต่วัสดุฉนวนไฟฟ้าก็จะมีอายุการใช้งานที่พอเพียง ถ้าอุณหภูมิของบางคาบในช่วงเวลานั้นลดลงต่ำกว่าค่าที่กำหนดเป็นครั้งคราว ซึ่งโดยทั่วไปแล้ววัสดุฉนวนไฟฟ้าจะมีอายุการใช้งานที่นานพอถ้าให้ทำงานในภาวะการใช้งานตามปกติตามมาตรฐานของขีดจำกัดทางอุณภูมิ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทดสอบเพื่อหาค่าระดับความร้อนของวัสดุฉนวนไฟฟ้าก่อนที่จะนำเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้นไปใช้งานภายใต้สภาวะนั้นๆ เพื่อเป็นการแน่ใจและเพิ่มความน่าเชื่อถือว่าวัสดุฉนวนไฟฟ้านั้นสามารถที่จะนำไปใช้งานภายใต้สภาวะนั้นๆ ได้จริง และในอีกเหตุผลหนึ่งก็เนื่องจากว่าโรงงานใน ปัจุบันทั้งผู้ใช้และผู้ผลิตมักไม่ได้มีการตรวจสอบระดับความร้อนตามที่ระบุในเครื่งจักรก่อนเลยเนื่องจากไม่มีวิธีหรือแนวทางในการตรวจสอบเพราะมักใช้ตามที่ผู้ผลิตฉนวนซึ่งก็อยู่ภายนอกประเทศระบุมา ดั้งนั้นเพื่อให้เกิดความแน่ใจและเพิ่มความน่าเชื่อถือว่าวัสดุฉนวนไฟฟ้านั้นสามารถที่จะนำไปใช้งานภายใต้ระดับความร้อนที่กำหนดได้จริง เราจึงจำเป็นที่ต้องสร้างวิธีและแนวทางในการตรวจสอบสอบขึ้นมา

## 1.2 ขอบเขตของการทดสอบ

กระบวนการทดสอบนี้อยู่ในรูปแบบของการเปรียบเทียบอายุโดยรวมของระบบฉนวนตั้งแต่ 2 ระบบขึ้นไป ซึ่งรูปแบบกระบวนการทดสอบนี้ถูกจำกัดอยู่ในขอบเขตของเครื่องจักรไฟฟ้าที่มีการพันแบบ wire-wound winding โดยที่รูปแบบกระบวนการทดสอบนี้ใช้ในการหาค่าของระบบฉนวนที่มีระบบการทำความเย็นโดยอากาศภายใต้สภาพแวดล้อมซึ่งนำไปสู่การเสื่อมโทรมของระบบแต่ไม่รวมถึงการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่อยู่ในกรณีพิเศษเช่นการใช้งานภายใต้ของเหลวบางชนิด, ก๊าซบางอย่างหรือการใช้งานรวมกับเคมีภัณฑ์บางประเภท

**1.3 จุดประสงค์ของการทดสอบ**

จุดประสงค์ของการทดสอบ ก็เพื่อที่จะจัดระดับอุณหภูมิของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบ โดยการทดสอบตามรูปแบบกระบวนการทดสอบภายใต้ขอบเขตที่ได้กล่าวข้างต้นโดยทดสอบตามระดับความร้อนของระบบฉนวนซึ่งอาจเป็นการทดสอบเพิ่มเติมจากการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของฉนวนก็ได้ ข้อมูลที่ได้มาจากกระบวนการทดสอบสามรถนำไปสู่การจัดระดับความร้อนของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบก่อนที่จะได้รับการพิสูจน์จากการใช้งาน โดยการเปรียบเทียบอายุโดยรวมของระบบฉนวนจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบระหว่างระบบฉนวนที่นำมาทดสอบกับระบบฉนวนที่ใช้ในการอ้างอิงตามระดับความร้อนที่ได้คาดไว้

**1.4 วิธีการดำเนินงาน**

กระบวนการทดสอบนี้ได้ออกแบบรูปแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการหาค่าระดับความร้อนของระบบฉนวน โดยการให้ความร้อนซึ่งเป็นปัจจัยหลักมีค่ามากเกินกว่าระดับความร้อนปกติเพื่อที่จะเร่งอายุของระบบฉนวนให้เสื่อมสภาพเร็วยิ่งขึ้นตามลักษณะการสะสมของผลกระทบที่เกิดขึ้นจริงหลังจาการใช้งานที่ยาวนาน หลังจากนั้นจะเป็นการทดสอบด้วยความเค้นทางกลและความชื้นและแรงดันไฟฟ้าเป็นขั้นตอนสุดท้ายเพื่อเป็นการตรวจสอบสภาพของระบบฉนวน

เมื่อทำการทดสอบจนกระทั่งระบบฉนวนเกิดความเสียหายแล้ว ข้อมูลหรือจำนวนชั่วโมงที่ได้จากการทดสอบของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบและระบบฉนวนที่ใช้ในการอ้างอิงก็จะถูกนำมาพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบลักษณะของกราฟเพื่อหาระดับความร้อนของระบบฉนวน ซึ่งกระบวนการทดสอบนี้อาจเหมาะสมสำหรับการเปรียบเทียบเท่านั้นเนื่องจากในการใช้งานจริงนั้นมักจะมีปัจจัยหลายๆปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความทนทานของระบบฉนวนตามแต่ละช่วงเวลาแตกต่างกันดังนั้นจึงเป็นการเหมาะสมกว่าถ้าจะทำการหาค่าระดับความร้อนโดยการหาข้อมูลจากประสบการณ์การใช้งานจริง

ในบทที่ 2 จะเป็นการกล่าวถึงที่มาของการออกแบบกระบวนการทดสอบโดยทั่วไป ซึ่งก็เป็นการกล่าวถึงแนวทางในการออกแบบกระบวนการทดสอบทั้ง การทดสอบการคงทนทางความร้อน การทดสอบการคงทนทางความไฟฟ้า การทดสอบการคงทนทางความกล และการทดสอบการคงทนเนื่องจากผลของสิ่งแวดล้อม ในบทที่ 3 จะเป็นการกล่าวถึงโครงสร้างกระบวนการการทดสอบเพื่อการหาค่าความคงทนทางความร้อนในเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนทั้งหมด ส่วนในบทที่ 4 จะเป็นการออกแบบการทดสอบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบ WIRE-WOUND WINDINGS โดยใช้แบบจำลองร่องสล็อตและในบทที่ 5 จะเป็นส่วนของผลการทดสอบ การเปรียบเทียบผลของการทดสอบ การแปรความหมายและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 2
# การหาค่าและคุณสมบัติของระบบฉนวนไฟฟ้า

## 2.1 ประเภทของวัสดุฉนวน

วัสดุฉนวนแบ่งออกเป็นได้หลายประเภทด้วยกัน ซึ่งทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบและระดับความร้อนที่วัสดุฉนวนนั้นทนได้ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะแบ่งประเภทวัสดุฉนวนออกเป็นดังตารางที่ 1

ฉนวนแต่ละประเภท อาจมีวัสดุซึ่งอยู่ในประเภทจำกัดที่ต่ำกว่าเข้ามาเป็นอัตราส่วน เพื่อจุดประสงค์ทางโครงสร้างเท่านั้น ทั้งนี้ยังคงมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลพอเพียงในระหว่างใช้งานที่อุณหภูมิที่ยอมให้สูงสุด

การนำไปใช้งานบางอย่าง อาจใช้สารประกอบและเรซินที่ปราศจากตัวทำละลายแทนที่อากาศในช่องว่างระหว่างเส้นใย ฟิล์มและช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนต่างๆ ในการใช้ประโยชน์อย่างอื่นอาจใช้วาร์นิชหรือวัสดุชนิดอื่นที่มีตัวทำละลาย ซึ่งทำให้เกิดฟิล์มที่มีผิวติดต่อกันและผนึกบางส่วนของช่องว่างและยึดชิ้นส่วนต่างๆ ของโครงสร้างของฉนวน

| ประเภท | อุณหภูมิจำกัด องศาเซลเซียส |
|---|---|
| Y | 90 |
| A | 105 |
| E | 120 |
| B | 130 |
| F | 155 |
| H | 180 |
| 200 | 200 |
| 220 | 220 |
| 250 | 250 |

***ตารางที่ 2-1 ประเภทของวัสดุฉนวนและอุณหภูมิจำกัด***

ประเภท Y คือ ฉนวนที่ประกอบด้วยวัสดุจำพวกฝ้าย ไหมและกระดาษอย่างเดียว หรือหลายอย่างรวมกันโดยปราศจากการแทรกซึม ฉนวนประเภทนี้อาจรวมถึงวัสดุอื่นอย่างเดียวหรือหลายอย่างรวมกันได้ถ้าผลจากการใช้งานที่ผ่านมาหรือการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวัสดุนั้นสามารถทำงานที่อุณหภูมิจำกัดของประเภท Y ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภท A คือ ฉนวนที่ประกอบด้วยวัสดุจำพวกฝ้าย ไหมและกระดาษประเภท A คือ ฉนวนที่ประกอบด้วยวัสดุจำพวกซึ่งผ่านการแทรกซึม เคลือบหรือจุ่มด้วยไดอิเล็กโทนตริคเหลว เช่น น้ำมัน ฉนวนประเภทนี้อาจรวมถึงวัสดุอื่นอย่างเดียวหรือหลายอย่างรวมกันก็ได้ ถ้าผลจากการใช้งานที่ผ่านมาหรือการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวัสดุนั้นสามารถทำงานที่อุณหภูมิจำกัดของประเภท A ได้

ประเภท E คือ ฉนวนที่ประกอบด้วยวัสดุอย่างเดียวหรือหลายอย่างรวมกัน ซึ่งจากการใช้งานที่ผ่านมาหรือการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวัสดุนั้นสามารถทำงานที่อุณหภูมิจำกัดของประเภท E ได้ (วัสดุที่มีระดับเสถียรภาพความร้อนที่ยอมให้วัสดุนั้นทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่าของประเภท A อยู่ 15°C)

ประเภท B คือ ฉนวนที่ประกอบด้วยวัสดุจำพวกไมกา ใยแก้ว ใยหินฯลฯ อย่างเดียวหรือหลายอย่างรวมกันโดยมีสารยึด (bonding substance) ที่เหมาะสม ฉนวนประเภทนี้อาจรวมถึงวัสดุอื่นซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็นอนินทรีย์อย่างเดียวหรือหลายอย่างรวมกันก็ได้ ถ้าผลจากการใช้งานที่ผ่านมาหรือการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวัสดุนั้นสามารถทำงานที่อุณหภูมิจำกัดของประเภท B ได้

ประเภท F คือ ฉนวนที่ประกอบด้วยวัสดุจำพวกไมกา ใยแก้ว ใยหิน อย่างเดียวหรือหลายอย่างรวมกันโดยมีสารยึดที่เหมาะสม ฉนวนประเภทนี้อาจรวมถึงวัสดุอื่นซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็นอนินทรีย์อย่างเดียวหรือหลายอย่างรวมกันก็ได้ ถ้าผลจากการใช้งานที่ผ่านมาหรือการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวัสดุนั้นสามารถทำงานที่อุณหภูมิจำกัดของประเภท F ได้ (วัสดุที่มีระดับเสถียรภาพความร้อนที่ยอมให้วัสดุนั้นทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่าของประเภท B อยู่ 25°C)

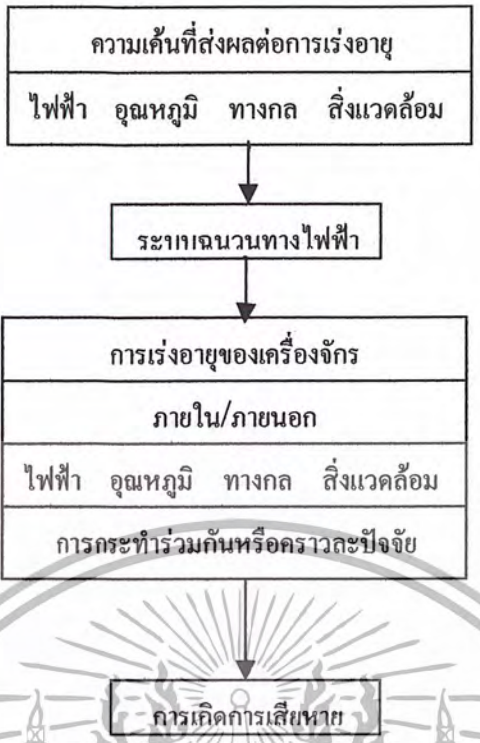
ประเภท H คือ ฉนวนที่ประกอบด้วยวัสดุจำพวกซิลิโคนอีลาสโตเมอร์ (silicone elastomer) และวัสดุจำพวกไมกา ใยแก้ว ใยหิน ฯลฯ รวมเข้าด้วยกันโดยมีสารยึดที่เหมาะสม เช่น ซิลิโคนเรซิน ฉนวนประเภทนี้อาจรวมถึงวัสดุอื่นอย่างเดียวหรือหลายอย่างรวมกันก็ได้ถ้าผลจากการใช้งานที่ผ่านมาหรือการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวัสดุนั้นสามารถทำงานที่อุณหภูมิจำกัดของประเภท H ได้

ประเภท C (มากกว่า 180°C) คือ ฉนวนที่ประกอบด้วยวัสดุจำพวกไมกา แก้วและหินเขี้ยวหนุมานอย่างเดียวหรือหลายอย่างรวมกันโดยไม่มีสารยึดอนินทรีย์ (inorganic binder) ก็ได้ ฉนวนประเภทนี้อาจรวมถึงวัสดุอื่นอย่างเดียวหรือหลายอย่างรวมกันก็ได้ถ้าผลจากการใช้งานที่ผ่านมาหรือการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวัสดุนั้นสามารถทำงานที่อุณหภูมิจำกัดของประเภท H ได้ วัสดุหรือวัสดุที่รวมเข้าด้วยกันดังกล่าวในประเภทนี้ จะมีขีดจำกัดทางอุณหภูมิซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางฟิสิกส์ เคมี และ ไฟฟ้าของวัสดุนั้น

**2. 2 การเร่งอายุ**

การเร่งอายุหมายถึงการที่ระบบฉนวนไฟฟ้าหนึ่งถูกกระทำโดยปัจจัยการเร่งอายุปัจจัยเดียวหรือหลายๆปัจจัยร่วมกันกระทำจนทำให้คุณสมบัติฉนวนเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวร ซึ่งความเค้นที่ส่งผลต่อการเร่งอายุนั้นอาจเป็นผลที่เกิดจากทั้งภายในและภายนอกระบบก็ได้ แต่โดยทั่วไปแล้วระบบฉนวนทางไฟฟ้ามักจะได้รับผลกระทบจากความเค้นที่ส่งผลต่อการเร่งอายุจากภายนอกมากกว่า ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นระบบฉนวนทางไฟฟ้าอาจได้รับสิ่งสกปรกหรือความไม่สมบูรณ์บางประการเข้าไปด้วยดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




***รูปที่ 2-1 แสดงอายุของระบบฉนวนทางไฟฟ้า***

ชนิดและระดับของสิ่งสกปรกและหรือขนาดของความไม่สมบูรณ์ของระบบฉนวนทางไฟฟ้ามักจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องจักรซึ่งการลดระดับของปัจจัยที่ได้กล่าวมาก็จะส่งผลให้คุณภาพการใช้งานของเครื่องจักรมีสภาพดีขึ้น ดังนั้นเพื่อที่จะให้ได้ผลจากการทดสอบมีค่าที่ได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง ระบบฉนวนที่นำมาทดสอบควรที่มีความเป็นไปได้ที่จะมีสิ่งสกปรกหรือความไม่สมบูรณ์ของระบบฉนวนทางไฟฟ้าตามที่เกิดขึ้นจริงในการใช้งาน

ปัจจัยการเร่งอายุที่เกิดจาก อุณหภูมิ ความเค้นทางไฟฟ้าและทางกล หรือสภาพแวดล้อมซึ่งทำการเร่งอายุเครื่องจักรอยู่นั้นท้ายสุดแล้วก็จะนำไปสู่ความเสียหายของเครื่องจักร แม้ความเค้นบางปัจจัยไม่อาจส่งผลกระทบต่อระบบฉนวนได้ในช่วงแรกแต่ก็อาจส่งผลกระทบได้ในภายหลังและทำให้ระดับการเกิดการเสื่อมสภาพของระบบฉนวนเปลี่ยนไป

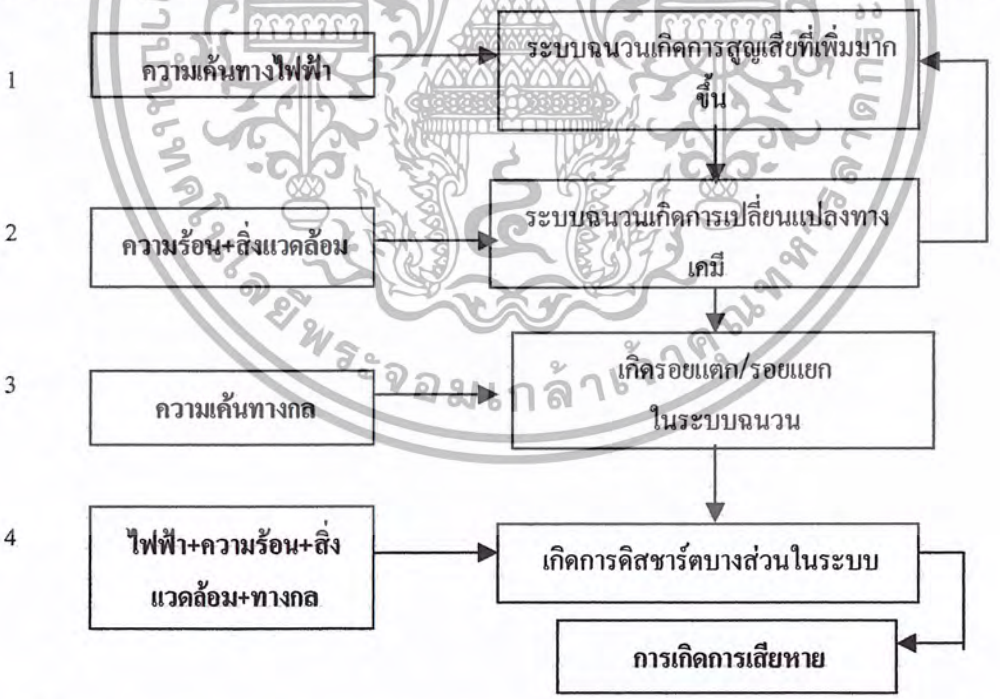
การเร่งอายุของระบบฉนวนนั้นอาจเกิดจากปัจจัยเพียงปัจจัยเดียวซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสภาพฉนวนหรืออาจเกิดจากปัจจัยหลายๆปัจจัยที่เป็นส่วนสำคัญที่ส่งผลต่อสภาพของระบบฉนวนพร้อมกันก็ได้ ซึ่งปัจจัยการเร่งอายุนั้นสามารถส่งผลกระทบร่วมกันซึ่งนี่อาจกล่าวได้ว่าเป็นการกระทำร่วมกันระหว่างความเค้นซึ่งการกระทำร่วมกันนี้อาจเสริมหรือหักล้างผลที่จะเกิดต่อสภาพฉนวนก็ได้ การเร่งอายุในทางปฏิบัตินั้นอาจมีความซับซ้อนและบ่อยครั้งที่ความเสียหายของเครื่องจักรมักเกิดจากการรวมกันของปัจจัยต่างๆกระทำอย่างสม่ำเสมอแม้ว่าความเสียหายนั้นอาจเกิดจากเพียงปัจจัยเดียวที่เป็นส่วนสำคัญก็ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกระบวนการทดสอบนั้นควรมีการกำหนดว่าควรมีการทดสอบเนื่องจากปัจจัยเพียงปัจจัยเดียวหรือเนื่องมากจากหลายปัจจัยตามความเหมาะสมอันเนื่องมาจากสภาพการใช้งานจริงเพื่อที่จะกำหนดเครื่องมือและแนวทางการทดสอบได้อย่างเหมาะสม

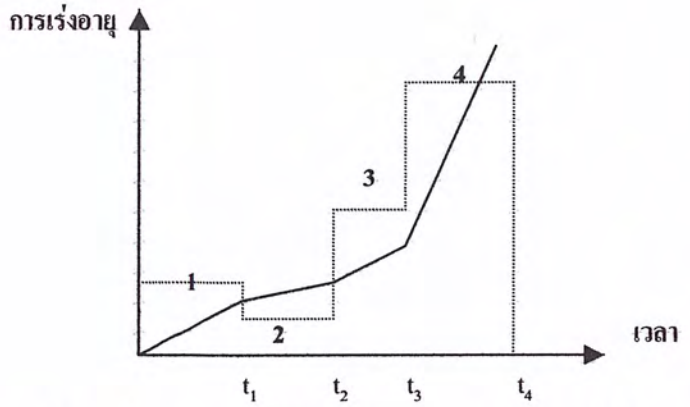
ในกระบวนการทดสอบเพื่อการหาค่านั้นแบบจำลองของการทดสอบนั้นควรประกอบไปด้วยปัจจัยการเร่งอายุเครื่องจักรตามที่เกิดขึ้นจริงในการใช้งาน แต่ในทางปฏิบัติแล้วมักเป็นการยากเสมอที่จะทำให้ได้ตามนั้นโดยเฉพาะเมื่อไม่สามารถเข้าใจถึงรายละเอียดของช่วงการกระทำของการเร่งอายุเครื่องจักรได้อย่างสมบูรณ์เนื่องมาจากปัจจัยการเร่งอายุนั้นอาจส่งผลกระทบต่อระบบฉนวนพร้อมกันหรืออาจส่งผลในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งเท่านั้น

ยกตัวอย่างเช่น สมมุติระบบฉนวนทางไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยความเค้นดังต่อไปนี้ คือ ความเค้นทางไฟฟ้าและทางกล ความร้อน และสภาพแวดล้อมดังรูปที่ 2-2 ในระหว่างขั้นตอนแรกความเค้นทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นสาเหตุของการสูญเสียทางฉนวนและด้วยเหตุนี้เป็นผลทำให้อุณหภูมิในฉนวนเพิ่มมากขึ้นในหนึ่งหรือหลายจุดของตัวฉนวน ในขอบเขตของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนี้ ความเค้นจากสภาพแวดล้อมและความร้อนกลายมาเป็นปัจจัยการเร่งอายุและทำให้คุณสมบัติทางเคมีเปลี่ยนไป (ในขั้นตอนที่ 2) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางเคมีนี้สามารถทำให้อัตราการเร่งอายุฉนวนโดยรวมเพิ่มมากขึ้นหรือลดลงก็ได้ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2-3 เมื่อคุณสมบัติทางกลของฉนวนได้รับผลกระทบจนเสื่อมสภาพถึงจุดวิกฤติซึ่งเป็นผลมาจากความเค้นทางกลนั้นก็จะเกิดการปริแตกที่บางจุด (ในขั้นตอนที่ 3) ต่อมาเมื่อขนาดของจุดที่ปริแตกนั้นมีขนาดมากพอก็จะมีการการดิสชาร์ตบางส่วนเกิดขึ้น และในขั้นตอนสุดท้ายนี้ก็จะนำไปสู่การสูญเสียอย่างสมบูรณ์ (ในขั้นตอนที่ 4) ด้วยเหตุนี้การเร่งอายุจึงไม่แปรตามโดยตรงต่อเวลาดังที่แสดงในรูปที่ 2-3



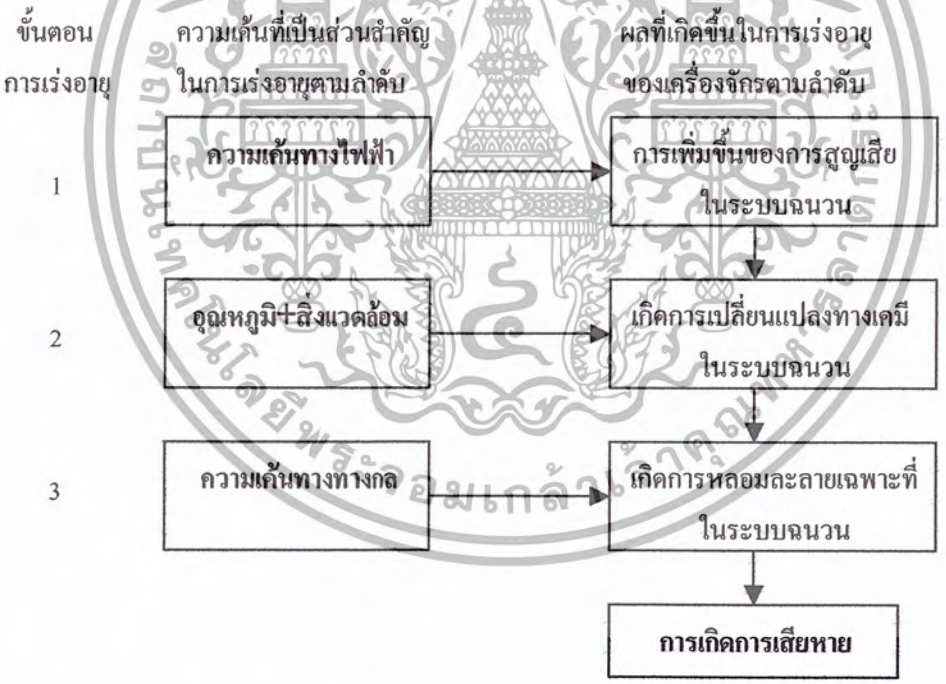

***รูปที่ 2-2 ตัวอย่างของความเป็นไปได้ของการเกิดการเร่งอายุของเครื่องจักรกลโดยแบ่งการทำงานตามลำดับของเวลา***

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



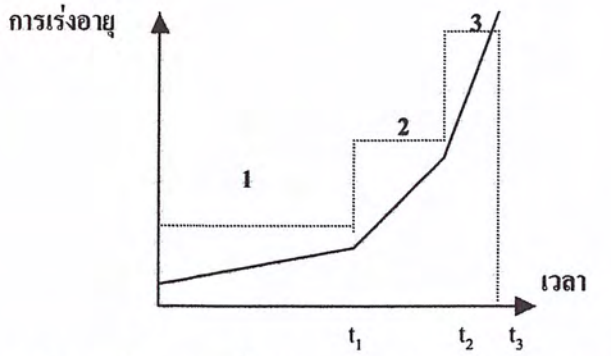

*รูปที่ 2- 3 แสดง การเกิดการเร่งอายุของเครื่องจักรกลโดยแบ่งการทำงานตามลำดับของเวลาตามรูปที่ 2-2*

ยังมีอีกลักษณะหนึ่งดังที่แสดงในรูปที่ 2-4 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีเกิดนานมากขึ้นในขั้นตอนที่ 2 และผลนี้ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของอุณหภูมิทำให้เกิดการหลอมในบางที่ ซึ่งผลที่ตามมาภายหลังในขั้นตอนที่ 3 นั้นการเกิดการสูญเสียความแข็งแรงทางกลก็พอที่จะเป็นสาเหตุของการเกิดความเสียหายได้ ซึ่งลักษณะ การเร่งอายุและเวลาแสดงได้ดังรูปที่ 2-5




***รูปที่ 2-4 ตัวอย่างของความเป็นไปได้ของการเกิดการเร่งอายุของเครื่องจักรกลโดยแบ่งการทำงานตามลำดับของเวลา***

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




*รูปที่ 2- 5 แสดง การเกิดการเร่งอายุของเครื่องจักรกลโดยแบ่งการทำงานตามลำดับของเวลาตามรูปที่ 2-4*

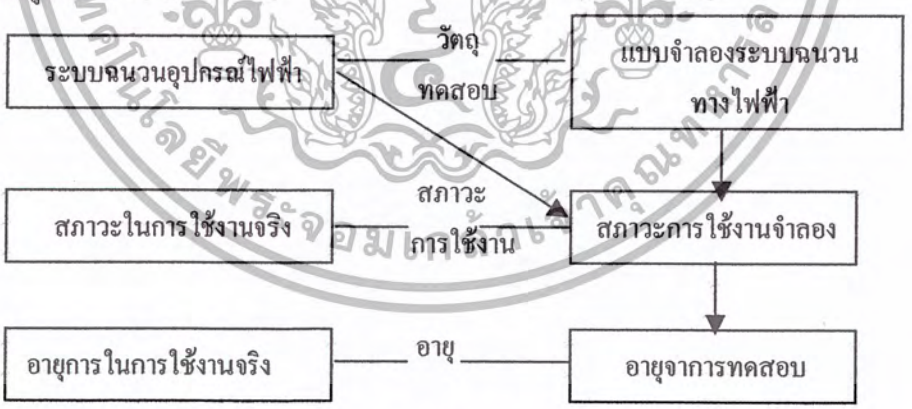
ดังจะเห็นได้จาก 2 ตัวอย่างที่ผ่านมาของการเร่งอายุที่เกิดจากหลายๆปัจจัยว่าเป็นการยากที่จะจำลองเข้าไปในกระบวนการทดสอบ

ด้วยเหตุนี้การเลือกสภาวะการทดสอบก็จะไม่สามารถก่อให้เกิดสัดส่วนที่เท่ากันระหว่างการทำงานได้และในปลายสุดของกรณีก็สามารถนำไปสู่วิธีการเกิดการเสียหายแบบอื่นตามการกระทำที่ไม่ปกติภายใต้สภาวะการทำงาน ซึ่งนี่ชี้ให้เห็นว่าผลของการทดสอบอาจมีค่าความผิดพลาดในการทำการทำนายอายุของระบบฉนวนทางไฟฟ้าจากกระบวนการทดสอบ

**2.3 การเตรียมวิธีการหาค่า**

**2.3.1 วิธีการเบื้องต้นสำหรับการเตรียมวิธีการหาค่า**

การเตรียมวิธีการหาค่าของระบบฉนวนควรพิจารณาอย่างรอบคอบตามแบบแผนวิธีการหาค่าเบื้องต้นดังรูปที่ 2-6




*รูปที่ 2-6 วิธีการเบื้องต้นของวิธีการหาค่า*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.3.1.1 วัตถุ**

วัตถุฉนวนทางไฟฟ้าควรเป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีมาแต่เดิมหรือเหมือนเดิม หรือเป็นส่วนหนึ่งของอุปกรณ์ หรือเป็นแบบจำลองของอุปกรณ์นั้น โดยทั่วไปควรหาข้อมูลทางเฉพาะของระบบฉนวนไฟฟ้าให้มากที่สุดเพื่อก่อให้เกิดผลที่ดีที่สุด เช่นเราอาจจำเป็นต้องใช้ข้อมูลเฉพาะเมื่อต้องการสร้างแบบจำลอง

**2.3.1.2 สภาวะการใช้งาน**

ก่อนการออกแบบกระบวนการทดสอบควรที่จะทราบถึงลักษณะบางส่วนของสภาวะการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าของแต่ละระบบฉนวนทางไฟฟ้านั้นซึ่งอาจทราบได้จาก

1) การระบุถึงความเค้นที่ปรากฏเมื่ออุปกรณ์และหรือระบบฉนวนใหม่นั้นถูกออกแบบสำหรับสภาวะการใช้งานในกรณีพิเศษรวมทั้งสภาพแวดล้อมและหน้าที่ของระบบฉนวนนั้น

2) บันทึกการใช้งานเมื่อการปรากฏของการทำงานได้ถูกนำมาใช้ในการหาค่าระบบฉนวน ระดับของความเค้นอาจถูกกำหนดโดยช่วงระยะเวลาของความเค้นที่กระทำต่อระบบฉนวนหรือโดยรายงานจากขีดระดับความเค้นสูงสุดที่เกี่ยวเนื่องกับหน้าที่ที่ปรากฏซึ่งแสดงตามลักษณะความสัมพันธ์ของความเค้นและเวลา

3) การรู้จักสภาวะการใช้งานของระบบฉนวนที่ใช้ในการอ้างอิงที่รู้ถึงคุณสมบัติเรียบร้อยแล้วบนพื้นฐานของของบันทึกการใช้งาน และเพื่อที่จะนำระบบฉนวนที่นำมาทดสอบมาทำการเปรียบเทียบโดยการทดสอบภายใต้กระบวนการเดียวกันภายใต้ความคล้ายคลึงหรือความสม่ำเสมอที่เท่ากันของสภาวะการใช้งาน

**2.3.1.3 จำนวนอายุ**

จำนวนอายุมักเป็นผลเกี่ยวเนื่องมาจากระบบฉนวนทางไฟฟ้าและสภาวะการใช้งาน ซึ่งจำนวนอายุนี้เองที่เป็นเป้าหมายหลักในการหาค่าซึ่งอาจเป็นไปตามข้อใดข้อหนึ่งดังที่แสดงข้างล่าง

1) เวลาการใช้งานของระบบฉนวนตั้งเริ่มการใช้งานจนถึงจุดสิ้นสุดอายุของระบบฉนวนที่เกิดการเสียหายของระบบฉนวนไฟฟ้า

2) ช่วงอายุหรือเวลาของการทำงานที่ปราศจากการเกิดการเสียหาย

3) ช่วงอายุหรือเวลาของกระบวนการทดสอบจนถึงจุดสิ้นสุดอายุของระบบฉนวนตามบรรทัดฐานที่กำหนด โดยอาจใช้หรือไม่ใช้การทดสอบโดยการเร่งอายุระบบฉนวนก็ได้

**2.4 กระบวนการหาวิธีการหาค่าเพื่อจัดคุณสมบัติระบบฉนวนทางไฟฟ้า**

**2.4.1 ข้อพิจารณา**

แนวทางของการกำหนดรายละเอียดกระบวนการหาวิธีการหาค่านี้จะเข้าไปเกี่ยวข้องกับการพิจารณาเทคนิคและการใช้งานที่เกี่ยวเนื่องกับปัจจัยที่ใส่เข้าไปสู่ระบบฉนวนทางไฟฟ้า และอายุตามการตัดสินการเร่งอายุของเครื่องจักร การปฏิบัติที่เป็นไปได้ตามที่คาดไว้นั้นย่อมขึ้นอยู่กับผู้ทดสอบ ซึ่งการกำหนดรายละเอียดของการดำเนินการนั้นควรง่ายที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้โดยที่ต้องไม่ขาดส่วนที่สำคัญตามที่ต้องการในการทดสอบ ทั้งนี้ควรพิจารณาถึงความประหยัดตามความเหมาะสมด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.4.2 ประเภทของโครงสร้างการหาค่า**

ประเภทของการหาค่าจะเป็นแบบใดนั้นขึ้นก็อยู่กับว่าเราได้มีข้อที่สำคัญของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบแบบใดซึ่งโครงสร้างนั้นมีอยู่ด้วยกัน 3 ประเภทด้วยกันดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2-7

**2.4.2.1 การหาค่าจากข้อมูลที่ได้จากประสบการณ์การใช้งาน**

บันทึกการใช้งานที่เกี่ยวกับสภาวะการใช้งาน ช่วงเวลาที่ใช้งาน โดยปราศจากหรือจนกระทั่งเกิดการเสียหาย ผลของการซ่อมบำรุง ฯลฯ จะถูกใช้ในการหาค่าโดยวิธีนี้

ตารางการตรวจสอบ ก-1ในภาคผนวก ก เป็นรูปแบบสำหรับการเก็บสะสมข้อมูลการใช้งานซึ่งก็ขึ้นอยู่กับชนิดของอุปกรณ์และระบบฉนวนทางไฟฟ้านั้นๆ โดยที่รายการดังกล่าวสามารถทำการเพิ่มเติมหรือปรับเปลี่ยนแก้ไขได้ตามความเหมาะสม

บันทึกการทำงานควรที่จะบันทึกสภาวะการทำงานที่สัมพันธ์กันที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบฉนวนและข้อมูลนั้นควรที่จะบันทึกตามที่เกิดขึ้นจริงในระบบเพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือแก่ข้อมูลในการปฏิบัติ

ความถูกต้องและแน่นอนของข้อมูลอาจไม่ถูกต้องเสมอไปในทางปฏิบัติ ดังนั้นจึงจำเป็นที่ต้องพิจารณาภายใต้ข้อมูลที่จำกัดให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

คุณสมบัติพื้นฐานของบันทึกการทำงานของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบควรที่จะเป็นรูปแบบเดียวกันกับคุณสมบัติพื้นฐานของบันทึกการทำงานของระบบฉนวนที่ใช้นำมาอ้างอิงเพื่อใช้เปรียบเทียบกระบวนการทดสอบ

**2.4.2.2 การเปรียบเทียบกระบวนการหาค่าของระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่นำมาทดสอบและระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่นำมาอ้างอิง**

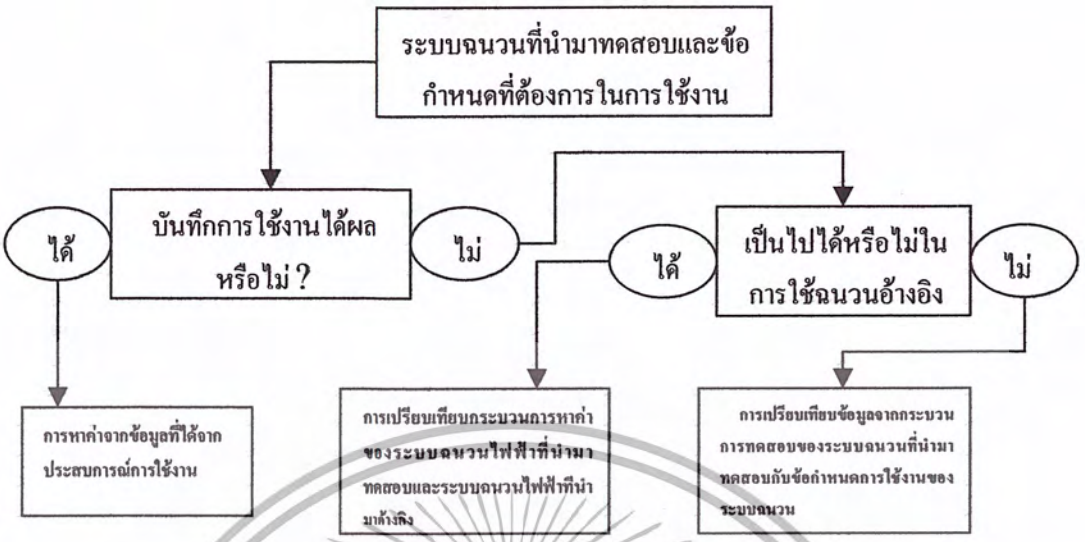
เราจะใช้โครงสร้างนี้ก็ต่อเมื่อระบบฉนวนที่ใช้ในการอ้างอิงนั้นมีคุณสมบัติที่ผ่านตามข้อกำหนดอยู่แล้วโดยอาจทราบได้จากกระบวนการหาค่าบนพื้นฐานของประสบการณ์การใช้งานหรือกระบวนการทดสอบ ระบบฉนวนไฟฟ้าที่นำมาทดสอบและระบบฉนวนไฟฟ้าที่นำมาอ้างอิงนั้นต้องมีการปฏิบัติในการเร่งอายุและการตรวจสอบสภาพระบบฉนวนที่เป็นรูปแบบเดียวกัน

**2.4.2.3 การเปรียบเทียบข้อมูลจากกระบวนการทดสอบของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบกับข้อกำหนดการใช้งานของระบบฉนวน**

เราจะใช้โครงสร้างนี้เมื่อปราศจากระบบฉนวนที่นำมาอ้างอิงและปราศจากข้อมูลจากประสบการณ์การใช้งาน ดังนั้นระบบฉนวนที่นำมาทดสอบจะถูกทดสอบตามข้อกำหนดว่าสามารถผ่านข้อกำหนดนั้นๆได้หรือไม่

โดยมากโครงสร้างนี้จะใช้เมื่อเลือกใช้ระบบฉนวนชนิดใหม่ที่ยังไม่เป็นที่รู้จัก (ระบบฉนวนทางไฟฟ้าชนิดใหม่, อุปกรณ์หรือเครื่องจักรชนิดใหม่ รวมทั้งการนำไปใช้งานที่สภาวะใหม่) กระบวนการทดสอบควรที่จะเป็นไปตามข้อกำหนดและต้องสามารถพิสูจน์ได้ถึงความสามารถของระบบฉนวนที่จะมีอายุตามข้อกำหนดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

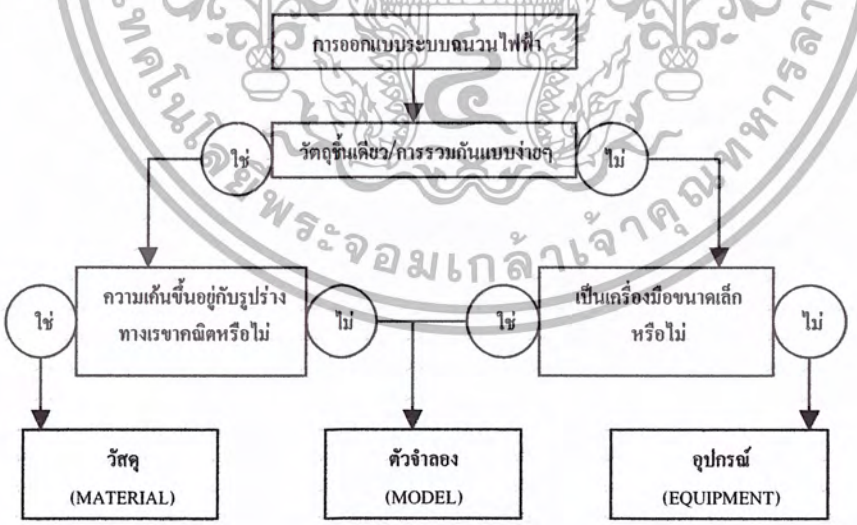



*รูปที่ 2-7 ชนิดของโครงสร้างในการหาค่า*

**2.4.3 ข้อพิจารณาในทางปฏิบัติ**

**2.4.3.1 การเลือกวัตถุที่ใช้ในการทดสอบ**

การเลือกวัตถุที่ใช้ในการทดสอบสามารถส่งผลกระทบต่อผลการทดสอบและส่งผลกระทบต่อค่าที่ได้จากสมการอีกด้วย จากแผนผังลำดับงานในรูปที่ 2- 8 แสดงบรรทัดฐานสำหรับการเลือกวัตถุทดสอบ




*รูปที่ 2-8 แสดงเกณฑ์การเลือกวัตถุทดสอบ*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

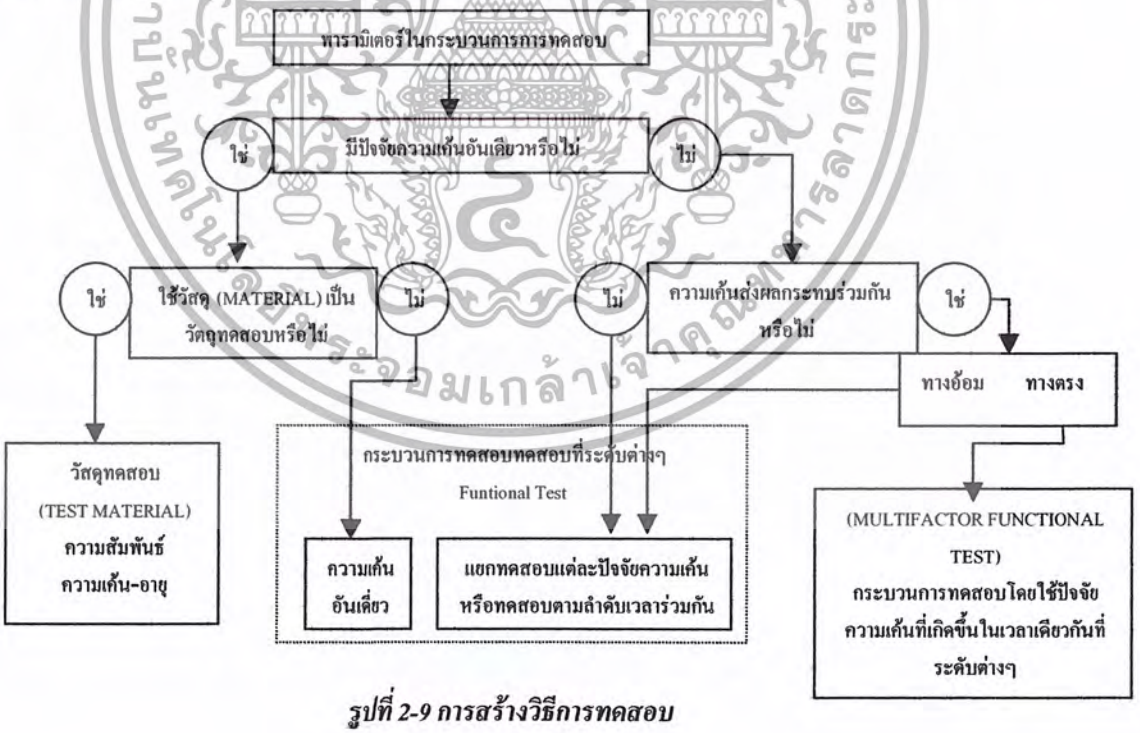
ขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุและข้อพิจารณาในทางปฏิบัติอื่นๆ รูปแบบการทดสอบที่ใช้กับอุปกรณ์หรือแบบจำลองจะถูกนำมาใช้ ถ้าระบบฉนวนทางไฟฟ้าอย่างง่ายที่ประกอบด้วยวัสดุที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าชนิดเดียวหรือประกอบด้วยการรวมกันอย่างง่ายๆของวัสดุหลายชนิดและความเค้นที่กระจัดกระจายจะไม่ขึ้นอยู่กับรูปร่างและขนาดของส่วนที่มีการฉนวน อายุของระบบฉนวนทางไฟฟ้าอาจจะได้จากค่าเฉลี่ยที่เหมาะสมจากการทดสอบความทนทานของวัสดุที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้า

บัญชี ก-2 รวบรวมคุณสมบัติทางเทคนิคของระบบฉนวน

**2.4.3.2 การทดลองกระบวนการทดสอบ**

ในการทดสอบหน้าที่ที่มีหรือไม่มีระบบฉนวนทางไฟฟ้าอ้างอิง วัตถุทดสอบถูกกำหนดตารางการเร่งอายุโดยความเค้น ซึ่งมักอยู่ในรูปรอบความเค้น เพื่อแทนอายุที่เกิดจากการใช้งานจริง กระบวนการวินิจฉัยที่เป็นช่วงเวลาถูกนำมาใช้เพื่อสร้างความก้าวหน้าของกระบวนการการวินิจฉัย ความซับซ้อนของการทดสอบกำหนดให้ต้องใช้ความพยายามและต้นทุนในการทดสอบ แผนผังลำดับการทำงานในรูปที่ 9 ชี้ให้เห็นถึงวิธีการทดสอบ 3 วิธีที่แตกต่างกัน ซึ่งความพยายามจะเพิ่มขึ้นจากซ้ายไปขวา โดยบรรทัดฐานจะเป็นจำนวนปัจจัยในการเร่งอายุ วัตถุทดสอบและผลกระทบร่วมกันที่อาจจะเป็นไปได้ระหว่างปัจจัยต่างๆที่มีผลกระทบ

บัญชี ก-1 ในภาคผนวก ก ถูกนำมาใช้สำหรับรวบรวมข้อมูลความสัมพันธ์เกี่ยวกับสภาวะการใช้งานจริงหรือสภาวะการใช้งานที่ต้องการของระบบฉนวนในคำถามต่างๆ ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำมาพิจารณาสำหรับหาค่าที่เหมาะสมของสภาวะการใช้งานระหว่างการทดสอบหน้าที่ รูปแบบนี้ทำให้มีความสะดวกในการเปรียบเทียบระหว่างข้อกำหนดการใช้งานกับประสบการณ์ที่ผ่านมา




*รูปที่ 2-9 การสร้างวิธีการทดสอบ*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.4.3.3 ข้อสรุปสำหรับการปฏิบัติเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐาน**

รูปที่ 2-7, 2-8 และ 2-9 จะช่วยในการตัดสินใจเกี่ยวกับกรณีต่างๆที่จะต้องพิจารณาก่อนการพัฒนามาตรฐานสำหรับการหาค่าระบบฉนวนทางไฟฟ้า

1) ข้อมูลจากประสบการณ์การใช้งานมีประโยชน์สำหรับการหาค่าโดยตรง กรณีนี้ต้องการกฎพิเศษเกี่ยวกับคำแนะนำที่จำเป็นและวิธีการในการวิเคราะห์
2) การทดสอบอายุอย่างง่ายของวัสดุที่เป็นฉนวน อาจจะถูกนำมาใช้เมื่อกระบวนการทดสอบวัสดุที่มีอยู่มีประโยชน์ต่อระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่นำมาทดสอบ
3) การทดสอบเปรียบเทียบการทำงานโยใช้แบบจำลองหรือชิ้นส่วนอุปกรณ์เป็นวัตถุทดสอบ ต้องการการวิเคราะห์การเร่งอายุทางกลภายใต้สภาวะจำลองการใช้งานจริง เพื่อตัดสินใจเลือกวิธีการทดสอบที่เหมาะสม

ในหลักการ การทดสอบเปรียบเทียบการทำงานอาจเป็นไปได้ที่จะไม่ใช้ความรู้ที่เป็นรายละเอียดของการเร่งอายุทางกล ความจำเป็นสำหรับการทดสอบการทำงานเป็นความรู้ของการแสดงความเค้นจากการใช้งาน การหาค่าที่ถูกต้องและรักษาความสมดุลของผลกระทบในการเร่งอายุ

**2.5 องค์ประกอบการทดสอบการเร่งอายุ**

**2.5.1 วัตถุทดสอบ**

**2.5.1.1 โครงสร้างของวัตถุทดสอบ**

วัตถุทดสอบอาจจะเป็นส่วนที่สมบูรณ์ซึ่งไม่ได้รวมอยู่ในระบบฉนวนทางไฟฟ้าหรืออาจจะถูกสร้างขึ้นมาอย่างเพียงพอที่จะแทนรูปร่างภายนอกที่มีส่วนประกอบสมบูรณ์เพื่อนำไปใช้ในการหาค่า วัตถุทดสอบทั้งหมดควรจะนำไปใช้โดยปกติอย่างเต็มที่หรือมุ่งสู่กระบวนการผลิตเท่าที่เป็นไปได้ในการปฏิบัติ เมื่อส่วนประกอบที่จะใช้ระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่นำมาทดสอบมีอุปกรณ์ที่เกี่ยวกับทางกลในการใช้งาน จึงถูกคำนึงถึงผลกระทบต่อกระบวนการเร่งอายุ ด้วยเหตุนี้จึงควรจะจำลองเป็นวัตถุทดสอบ วัตถุทดสอบควรจะถูกออกแบบขึ้นมาให้มีความคงทนต่อระดับของความเค้นซึ่งสามารถนำไปใช้งานระหว่างการเร่งอายุและรอบย่อยของการวินิจฉัย

วัตถุทดสอบที่รวมหลายๆส่วนประกอบที่นำไฟฟ้าจึงอาจจะมีความเค้นทางไฟฟ้าเกิดขึ้นระหว่างส่วนประกอบเหล่านี้ อาจจะเกิดขึ้นระหว่างการเร่งอายุหรือรอบย่อยของการวินิจฉัย ควรจะถูกออกแบบหรือสร้างขึ้นมาให้สามารถเป็นจริงได้ตามผลกระทบในการเร่งอายุ

**2.5.1.2 จำนวนของวัตถุทดสอบ**

เมื่อสามารถทำได้ วัตถุทดสอบอย่างน้อยที่สุดจำนวน 5 ชิ้นจะถูกทำให้มีอายุ สำหรับปัจจัยทางไฟฟ้า, ทางความร้อน, ทางกล, สิ่งแวดล้อม หรือการรวมหลายๆปัจจัยที่ทำให้เกิดความเค้นจะถูกรวมอยู่ในแบบแผนที่ใช้ในการหาค่า

หมายเหตุ สำหรับสถิติของวัตถุทดสอบที่ยังคงใช้งานได้นั้น วัตถุตัวอย่างอย่างน้อยที่สุดจำนวน 5 ชิ้นที่ต้องการให้สามารถเข้าสู่เกณฑ์ของจุดสิ้นสุดอายุได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.5.1.3 การทดสอบเพื่อรับรองคุณลักษณะ**

ก่อนเริ่มต้นรอบย่อยแรกของการเร่งอายุ การตรวจตราด้วยสายตาและการทดสอบเพื่อรับรองคุณลักษณะปกติทั้งหมดของวัตถุทดสอบควรจะทำกับวัตถุทดสอบทั้งหมด

**2.5.1.4 รอบย่อยของการปรับสภาพวัตถุทดสอบ**

ถ้าให้มีความเหมาะสม วัตถุทดสอบควรถูกปรับสภาพเพื่อสร้างสภาวะที่ดีกว่าของระบบฉนวนทางไฟฟ้าในการใช้งาน

**2.5.1.5 การทดสอบเพื่อวินิจฉัยเบื้องต้น**

วัตถุทดสอบแต่ละชิ้นควรจะถูกนำมาทดสอบเพื่อวินิจฉัย ถูกเลือกมาสำหรับกระบวนการหาค่าก่อนเริ่มต้นรอบย่อยแรกของการเร่งอายุ

**2.5.1.6 ระบบฉนวนทางไฟฟ้าอ้างอิง**

ระบบฉนวนทางไฟฟ้าอ้างอิงควรที่จะถูกนำมาทดสอบโดยใช้กระบวนการทดสอบที่เมือนกันกับระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่นำมาทดสอบ และอยู่ในห้องทดลองเดียวกันใช้อุปกรณ์ทดสอบชนิดเดียวกัน สภาพการใช้งานของระบบฉนวนทางไฟฟ้าอ้างอิงควรที่จะถูกสร้างขึ้นซึ่งอาจจะสร้างจากประสบการณ์การใช้งานภายใต้เงื่อนไขการปฏิบัติแบบธรรมดาหรือโดยกระบวนการทดสอบที่เหมาะสมซึ่งอยู่ในขอบเขตของเงื่อนไขการปฏิบัติแบบอ้างอิง

**2.5.2 เงื่อนไขการทดสอบ**

**2.5.2.1 การทดสอบแบบต่อเนื่องและแบบรอบการทดสอบ**

กระบวนการทดสอบอาจจะเป็นการทดสอบแบบเร่งอายุอย่างต่อเนื่อง ถ้าเกณฑ์ของจุดสิ้นสุดอายุถูกกำหนดโดยการเสียหายทางไฟฟ้าหรือทางกลหรือเบรคดาวน์ซึ่งอาจจะมีสาเหตุมาจากระดับความเค้นของการเร่งอายุหรือจากการให้ความเค้นอย่างต่อเนื่อง อีกทางหนึ่งการทดสอบแบบกำหนดเวลาซึ่งจะเป็นแบบเบรคดาวน์หรือการทดสอบเพื่อวินิจฉัยแบบอื่นก็มีความเหมาะสม

นอกจากนั้นยังมีกระบวนการทดสอบที่สามารถใช้ได้โดยทั่วไปคือการทดสอบรอบอายุซึ่งประกอบด้วยลำดับที่มีการทำซ้ำของการเร่งอายุต่างๆและรอบย่อยของการวินิจฉัย ลำดับของกระบวนการทดสอบนี้ยอมรับให้มีการใช้ปัจจัยเพียงปัจจัยเดียวหรือใช้หลายปัจจัยในการทดสอบการเร่งอายุ โดยให้มีการรบกวนที่เกิดขึ้นอย่างไม่ได้ตั้งใจน้อยที่สุดระหว่างปัจจัยในการเร่งอายุต่างๆกับปัจจัยทางกล

**2.5.2.2 ระดับของความเค้นในการทดสอบ, ปัจจัยการเร่งอายุ, ปัจจัยในการวินิจฉัย**

เงื่อนไขความเค้นในการทดสอบควรจะพิจารณาเงื่อนไขความเค้นทั้งหมดอย่างเข้มงวดมากที่สุดโดยใช้ประสบการณ์ในการใช้งานสำหรับออกแบบระบบฉนวนทางไฟฟ้า เงื่อนไขเหล่านี้ต้องการให้ไม่เกิดเหตุการณ์ที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ที่ค่าความเค้นสูงสุดของแต่ละความเค้น เงื่อนไขการปฏิบัติการแบบอ้างอิงควรจะกำหนดอย่างชัดเจนสำหรับกระบวนการหาค่า และระดับ ชนิด ของปัจจัยในการวินิจฉัยควรเกี่ยวกับเงื่อนไขการปฏิบัติการแบบอ้างอิง

ระดับความเค้นสำหรับรอบย่อยของการเร่งอายุควรจะถูกเลือก ดังนั้นเงื่อนไขทางกลของการเร่งอายุไม่ได้มีความสำคัญแตกต่างไปจากประสบการณ์ในการใช้งานปกติ การเพิ่มขึ้นของระดับความเค้นอาจจะสามารถยอมรับได้เมื่อไม่ได้มีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงการเร่งอายุทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบการเร่งอายุโดยอาศัยปัจจัยหลายปัจจัยจะนิยมใช้กันมากว่าเมื่อมีการจำลองการทำงานปกติขึ้นมาอย่างดีที่สุด เมื่อกระบวนการทดสอบนี้ไม่ถูกนำมาใช้ ดังนั้นการทดสอบโดยลำดับรอบย่อยของการทดสอบหรือรอบย่อยการทดสอบด้วยความเค้นหนึ่งความเค้นควรจะถูกนำมาใช้

รอบย่อยการเร่งอายุต่อจากนี้ เงื่อนไขของรอบย่อยและและการวินิจฉัยของรอบย่อยควรจะกระทำเมื่อมีความจำเป็น การเสียหายของส่วนต่างๆของวัตถุตัวอย่างที่ใช้ทดสอบระหว่างการทดสอบเพื่อวินิจฉัยประกอบขึ้นเป็นการเสียหายทั้งหมดของระบบควรจะมีการรายงานตามผลที่ได้ออกมานั้น ความเค้นทางไฟฟ้าควรจะนำมาใช้เป็นปัจจัยหลักในการวินิจฉัยเพื่อรับรองเงื่อนไขของการทำให้วัตถุทดสอบมีอายุ อุปกรณ์ที่ใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำมักจะจำเป็นที่จะมีกระบวนการนิจฉัยเบื้องต้นเพื่อที่จะทำให้แน่ใจได้ว่าความเค้นทางไฟฟ้าที่ใช้เป็นปัจจัยหนึ่งที่ช่วยในการตรวจสอบความอ่อนแอที่ถูกทำให้เพิ่มขึ้นระหว่างรอบของการเร่งอายุ

**2.5.3 การกำหนดอายุการใช้งานของระบบฉนวนทางไฟฟ้า**

อายุของระบบฉนวนทางไฟฟ้าถูกกำหนดจากรูปแบบการทดสอบวิเคราะห์เงื่อนไขการใช้งานแทนการประมาณค่าอายุการใช้งานของระบบฉนวนทางไฟฟ้า การที่จะเร่งกระบวนการเร่งอายุเพื่อลดเวลาในการทดสอบ ความเค้นในการทดสอบจะถูกปรับระดับขึ้น

**2.5.3.1 การตีความหมายผลการทดสอบอายุ**

ผลจากการทดสอบที่ถูกกำหนดไว้อย่างถูกต้องเหมาะสมโดยกระทำที่จุดต่ำสุดของการเพิ่มระดับความเค้นขึ้น 3 ระดับอาจจะอนุญาตให้มีการประเมินฟังก์ชันของความเค้นกับอายุในขอบเขตของความเค้นใช้งานที่ได้กำหนดไว้ สำหรับการประเมินที่เหมาะสม จุดร่วมกันของกราฟที่เป็นฟังก์ชันของความเค้นกับอายุควรที่จะถูกเลือก เมื่อใดก็ตามที่มีความเป็นไปได้ เช่น ไดอะแกรมความสัมพันธ์เชิงเส้นของความเค้นกับอายุบรรลุผลสำเร็จ ระดับของการประเมินควรไม่เกินสองอันดับของขนาดเสกลเวลาที่พลอตเป็นค่าลอกการิทึม

สำหรับการเร่งอายุทางไฟฟ้าและทางกล กฎทางคณิตศาสตร์ที่กำหนดไว้ของอายุได้แสดงไว้ในข้อ 2.6.3.1 และ 2.6.3.2 ตามลำดับ

**2.5.3.2 การเปรียบเทียบข้อมูลการทดสอบอายุ**

ค่าการเปรียบเทียบการทดสอบของระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบกับระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่ใช้อ้างอิงต้องการให้ระบบฉนวนทางไฟฟ้าทั้งสองถูกทดสอบตามข้อ 2.5.3.1 เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบ ระบบฉนวนที่ใช้ทดสอบอาจจะถูกพิจารณาความแตกต่างที่สามารถยอมรับได้ถ้าระบบฉนวนยังคงใช้งานได้ ที่ระดับความเค้นที่กำหนดไว้ ซึ่งไม่สำคัญน้อยกว่าการใช้งานได้ของระบบฉนวนไฟฟ้าอ้างอิง

ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะแสดงให้เห็นว่าอายุการใช้งานของระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบนั้นคาดว่าอาจจะเท่ากันหรือมากกว่าอายุการใช้งานที่ได้จากประสบการณ์ที่ผ่านมาของระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่ใช้อ้างอิงสำหรับเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.6 การเร่งอายุ**

**2.6.1 ทั่วไป**

ก่อนดำเนินการตามแบบแผนการทดสอบ ควรกำหนดการเร่งอายุเครื่องจักรและความสำคัญของเครื่องจักรสำหรับชนิดของอุปกรณ์หรือเครื่องมือซึ่งจะรวมกันเป็นระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ กระบวนการทดสอบโดยสรุปต่อจากนี้จะสามารถให้ความเข้าใจเกี่ยวกับปัจจัยสำคัญที่ถูกกำหนดไว้

**2.6.2 การประเมินการเร่งอายุเครื่องจักร**

ในภาคผนวก ข แสดงแผนผังลำดับการทำงาน 4 แผนผัง รูป ข-1, ข-2, ข-3 และ ข-4 ซึ่งอธิบายตามลำดับในบางรายละเอียดของปัจจัยทั้งภายในและภายนอกในการเร่งอายุทางไฟฟ้า,ทางความร้อน,ทางกลและสิ่งแวดล้อมของระบบฉนวนทางไฟฟ้า ในแต่ละแผนผังจะถูกยึดเป็นหลักประสบการณ์การใช้งานของชนิดระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันและแสดงความเป็นไปได้ของเครื่องจักรที่จะเกิดการเสื่อมและการเสียสภาพซึ่งสามารถเกิดขึ้นกับชนิดการเร่งอายุที่ต่างกันและการเกิดผลกระทบร่วมกันระหว่างปัจจัยในการเร่งอายุ แม้ว่าเครื่องจักรกลทั้งหลายที่เสียสภาพจะแสดงออกมา แผนผังไม่ได้เจตนาให้เกิดความชัดเจนกับเครื่องจักรที่อาจจะพบในขณะที่มีการใช้งานจริงของอุปกรณ์ทั้งหมด จึงมีความสำคัญที่ต้องบันทึกการเร่งอายุที่จะนำไปสู่การเสียสภาพในที่สุดเป็นสาเหตุที่มักเกิดขึ้นกับเครื่องจักรที่มากกว่า 1 เครื่อง

แผนผังลำดับการทำงานควรจะถูกนำมาใช้ในกรณีต่อไปนี้

1) เป็นบัญชีที่อธิบายการเร่งอายุของเครื่องจักรที่เป็นอุปกรณ์หรือเครื่องมือ เครื่องจักรสามารถเกิดขึ้นเป็นลำดับหรือพร้อมกัน

2) เพื่อพัฒนารูปแบบและการทดสอบโดยเพิ่มปัจจัยการเร่งอายุหรือการทดสอบเป็นรอบการทดสอบ ขนาดและชนิดของความเค้นที่ถูกนำมาใช้และระยะเวลาของการทดสอบจะขึ้นอยู่กับว่ามีผลกระทบอย่างไรต่อการเร่งอายุของเครื่องจักร

3) เพื่อพัฒนาการทดสอบเพื่อวินิจฉัยหรือรอบย่อยการทดสอบให้เหมาะสมเพื่อประเมินเงื่อนไขของระบบฉนวนทางไฟฟ้า

โดยตั้งอยู่บนพื้นฐานของความรู้จากประสบการณ์การใช้งาน เงื่อนไขในการปฏิบัติ และคุณสมบัติของส่วนประกอบของระบบฉนวนทางไฟฟ้าภายใต้การพิจารณา ควรเลือกหนึ่งแผนผังหรือมากว่าที่แสดงปัจจัยหนึ่งเป็นปัจจัยหลักหรือหลายๆปัจจัย การเร่งอายุของเครื่องจักรด้วยวิธีต่างๆที่นำไปสู่การเสียสภาพควรที่จะพิจารณาอย่างระมัดระวัง กระทำในระดับที่ทำให้เกิดความเปรอะเปื้อนและความเสียหายในระบบฉนวนทางไฟฟ้า แผนผังที่ปรับปรุงใหม่ซึ่งรวมเพียงความสัมพันธ์ของการเร่งอายุของเครื่องจักร ควรจะสร้างขึ้นมาเพื่อเป็นตัวช่วยในการปรับปรุงรูปแบบการเร่งอายุและรอบการทดสอบเพื่อวินิจฉัย แผนผังตัวอย่างแสดงอยู่ในรูป ข-5 ถึง รูป ข-8

ถ้ามีการแสดงรายละเอียดไม่เพียงพอที่จะให้ประโยชน์เกี่ยวกับประสบการณ์การใช้งาน หรือความเป็นไปได้ที่จะเร่งอายุของเครื่องจักร ดังนั้นเงื่อนไขการเร่งอายุควรตั้งอยู่บนพื้นฐานของความเค้นที่กำหนดไว้สำหรับระบบฉนวนที่ได้ออกแบบเอาไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง


**2.6.3 การเพิ่มความเร็วในการเร่งอายุ**

**2.6.3.1 ทางไฟฟ้า (ดูรูป ข-1)**

การเร่งอายุทางไฟฟ้า (แรงดันกระแสสลับ, กระแสตรงหรือแรงดันอิมพัลส์) เกี่ยวข้องกับ

1) ผลกระทบของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน เมื่อความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าเฉพาะจุดเกินกว่าความหนาแน่นสนามไฟฟ้าที่เกิดการเบรคดาวน์ในฉนวนที่เป็นของเหลวหรือแก๊ซที่อยู่ติดกัน หรือถูกรวมอยู่ในระบบฉนวนทางไฟฟ้า
2) ผลกระทบของการเกิดร่องรอย
3) ผลกระทบของการเกิดปรากฏการณ์ที่เกิดกับฉนวนแข็งโดยมีลักษณะการเบรคดาวน์คล้ายรูปต้นไม้ (electrical treeing)
4) ผลกระทบของการแยกวัตถุเหลวโดยกระแสไฟฟ้า
5) ผลกระทบที่สัมพันธ์กับบริเวณที่อยู่เหนือพื้นผิวที่อยู่ติดกันของวัสดุ 2 ชิ้นที่มีการฉนวน เมื่อเส้นสัมผัสสนามไฟฟ้าที่มีค่าค่อนข้างสูงสามารถเกิดขึ้นได้
6) ผลกระทบของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ถูกสร้างขึ้นมาจากการสูญเสียอย่างรุนแรงภายในฉนวน
7) ผลกระทบของการอัดประจุในที่ว่าง

รูป ข-1 แสดงปัจจัยทั้งภายในและภายนอกในการเร่งอายุทางไฟฟ้า เมื่อความเค้นทางไฟฟ้าได้ถูกนำมาพิจารณาเป็นปัจจัยหลักในการเร่งอายุ พิจารณาตัวอย่างจากระบบฉนวนทางไฟฟ้าอย่างง่ายที่ประกอบด้วยตัวนำระนาบที่ขนานกันสองแผ่นถูกตรึงอยู่ในวัสดุที่เป็นฉนวน ส่วนที่โผล่ออกมาซึ่งรู้ว่าเกิดขึ้นบนพื้นผิวของตัวนำ และสิ่งที่ปะปนเข้ามา เช่น อนุภาคของฝุ่น เป็นต้น สามารถนำมารวมอยู่ภายในฉนวน รูป ข-1 สามารถทำให้ดูง่ายขึ้น โดยแสดงอยู่ในแผนผังรูป ข-5 ซึ่งแสดงการอัดประจุที่นำไปสู่การเกิด electrical treeing ซึ่งเป็นผลกระทบหลักของการเร่งอายุเครื่องจักร การเพิ่มความเร็วในการเร่งอายุ ดังนั้นควรจะมีการทำให้บรรลุเป้าหมายโดยใช้ปัจจัยในการเร่งอายุซึ่งเป็นการเพิ่มการอัดประจุ เช่น การใช้แรงดันไฟฟ้าสูง การทดสอบเพื่อวินิจฉัยควรที่จะถูกออกแบบมาให้สามารถวัดผลกระทบจากการอัดประจุหรือเป็นลักษณะการดิสชาร์จเพียงบางส่วน

ในหลายๆระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่นำมาใช้ในการปฏิบัติ กระบวนการในการเร่งอายุทางไฟฟ้าที่นำไปสู่การเสียสภาพที่มีความซับซ้อนแสดงดังรูป ข-5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มีการพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ทำนายว่าปัจจัยในการเร่งอายุมีผลกระทบอย่างไรต่อการมีอายุของระบบฉนวนทางไฟฟ้า กฎความสัมพันธ์อย่างหนึ่งที่เป็นสมการกำลังที่แปรผันตรงกันข้าม จะนำมาใช้ให้มีความสัมพันธ์ของความเค้นทางไฟฟ้าที่เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับกับการมีอายุของระบบฉนวนทางไฟฟ้าซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$L \alpha V^{-n}$$

เมื่อ

$L$ คือ การมีอายุ

$V$ คือ แรงดัน

$n$ คือ เลขชี้กำลังของแรงดันไฟฟ้าในการมีอายุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
49912

กฎของสมการกำลังที่แปรผันตรงกันข้ามใช้ทำนายความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นระหว่างการมีอายุกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อพลอตลงในกระดาษกราฟแบบลอกการิทึม สมการอื่นๆที่อาจจะมีการนำมาใช้สามารถดูได้จาก IEC 60727-1

ระดับของความเค้นทางไฟฟ้าที่ถูกปรับเพื่อที่จะเพิ่มความเร็วในการเร่งอายุ ในรอบการทดสอบย่อย ตั้งอยู่บนพื้นฐานของช่วงระยะเวลาในการเร่งอายุที่เท่ากันอย่างน้อยที่สุด 2 ช่วงเวลา แบบแผนในการเร่งอายุควรที่จะนำมาใช้กับระดับความเค้นที่เพิ่มขึ้นน้อยที่สุด ซึ่งจะนำไปสู่จุดเสียสภาพของวัตถุทดสอบหลังจากค่าต่ำสุด 5 เปอร์เซ็นต์ของการมีอายุที่ตั้งใจไว้ของระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบระดับความเค้นถัดไปที่สูงกว่า ควรได้มาจากความชัน และลักษณะของเส้นโค้งการมีอายุ

หมายเหตุ ถ้าข้อมูลที่มีอยู่อย่างเพียงพอไม่สามารถนำมาใช้อนุญาติให้มีการสร้างระดับของความเค้นที่เพิ่มขึ้นต่ำสุด ดังนั้นค่าต่างๆอาจจะถูกกำหนดโดยเลือกการทดสอบที่เหมาะสม

การเร่งอายุทางไฟฟ้าอาจเพิ่มความเร็วได้โดยการทดสอบที่ความถี่ที่สูงกว่าประสบการณ์ในการใช้งานปกติ ความถี่ที่เพิ่มขึ้นควรจะแสดงให้เห็นถึงผลกระทบที่เหมือนกันต่อระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ และระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่ใช้อ้างอิง

**2.6.3.2 การเร่งอายุทางความร้อน (ดูรูป ข-2)**

การเร่งอายุทางความร้อนประกอบด้วย

1) กระบวนการ ในการเปลี่ยนแปลงค่าทางเคมี และฟิสิกส์ ตัวอย่างผลของการเสื่อมสภาพทางเคมี เช่น โพลิเมอไรเซชั่น , ดีโพลีเมอไรเซชั่น , การแพร่ อื่นๆ
2) ผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิทางกลที่เป็นสาเหตุมาจากแรงที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากจากการแผ่หรือการรวมตัวของความร้อน

ระดับที่เพิ่มขึ้นของการะบวนการทางเคมีและฟิสิกส์ที่ดำเนินต่อไปสู่สภาวะสมดุลเทอร์โมไดนามิคเป็นสาเหตุใหญ่ของการเร่งอายุทางความร้อน การเปลี่ยนแปลงทางเคมีตามสมการอาร์รีนีอุส (Arrhenius equation) เป็นไปตามสมการ

$$L = A \exp(-E/kT)$$

เมื่อ

$L$ คือ การมีอายุ

$A$ คือ ค่าคงที่

$E$ คือ พลังงานกระตุ้น

$k$ คือ ค่าคงที่โบลท์มานน์ ( Boktzmann constant )

$T$ คือ อุณหภูมิสมบูรณ์ (absolute temperature)

การมีอายุที่อุณหภูมิเฉพาะอุณหภูมิหนึ่งสามารถหาได้จากการตีความหมายข้อมูล ที่พลอตจากการใช้ค่าลอกการิทึมของการมีอายุกับ $1/T$ สำหรับคำแนะนำที่มากว่านี้สามารถดูได้จาก IEC 60216

อุณหภูมิสำหรับระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่ต้องหาค่า ควรเลือกมาจากตารางที่ 2-1 เพื่อที่จะสร้างการเพิ่มความเร็วในการเร่งอายุ อุณหภูมิที่ต่ำที่สุดใน 3 อุณหภูมิทดสอบที่สูงกว่าควรถูกเลือกมาใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิที่ต่ำที่สุดควร ถูกเลือกมาซึ่งนำไปสู่จุดเสียสภาพหลังจากจุดต่ำสุด 5 เปอร์เซ็นต์ของการมีอายุที่ตั้งใจไว้ของระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ อุณหภูมิสองอุณหภูมิที่สูงกว่าควรเลือกในช่วง 20 องศาเซลเซียส ถ้าต้องการอุณหภูมิทดสอบที่มากกว่า 3 อุณหภูมิ ดังนั้นช่วงอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส อาจจะถูกเลือกนำมาใช้ อุณหภูมิในการเร่งอายุได้แสดงไว้ในตารางที่ 2-2

หมายเหตุ การทดสอบได้รับการรับรองว่าการมีอายุจะถูกแบ่งครึ่งที่ทุกๆการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ X อุณหภูมิ สำหรับระบบฉนวนทางไฟฟ้าส่วนใหญ่ X เปลี่ยนแปลงจาก 8 องศาเซลเซียส ถึง 15 องศาเซลเซียส

สำหรับระบบฉนวนทางไฟฟ้าบางระบบอุณหภูมิในการทดสอบสูงสุดควรต่ำกว่าจุดเปลี่ยนสถานะของระบบ (เช่น จุดหลอมเหลว, จุดเดือด เป็นต้น)

| อุณหภูมิในการทำงาน °C | 55 | 75 | 90 | 105 | 120 | 130 | 155 | 180 | 200 | 220 | 250 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ระดับอุณหภูมิ | | | (Y) | (A) | (E) | (B) | (F) | (H) | | | |
| อุณหภูมิในการเร่งอายุ °C | 135 | 155 | 170 | 185 | 200 | 210 | 235 | 260 | 280 | 300 | 330 |
| | 125 | 145 | 160 | 175 | 190 | 200 | 225 | 250 | 270 | 290 | 320 |
| | 115 | 135 | 150 | 165 | 180 | 190 | 215 | 240 | 260 | 280 | 310 |
| | 105 | 125 | 140 | 155 | 170 | 180 | 205 | 230 | 250 | 270 | 300 |
| | 95 | 115 | 130 | 145 | 160 | 170 | 195 | 220 | 240 | 260 | 290 |
| | 85 | 105 | 120 | 135 | 150 | 160 | 185 | 210 | 230 | 250 | 280 |
| | 75 | 95 | 110 | 125 | 140 | 150 | 175 | 200 | 220 | 240 | 270 |

*ตารางที่ 2- 2 อุณหภูมิในการเร่งอายุ*

**2.6.3.3 การเร่งอายุทางกล (ดูรูป ข-3)**

การเร่งอายุทางกลประกอบด้วย

1) การเสียสภาพอย่างยากลำบากของส่วนประกอบที่เป็นฉนวนมีสาเหตุมาจากรอบของความเค้นที่ระดับต่ำๆจำนวนมาก

2) ผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิทางกลที่เป็นสาเหตุมาจากแรงที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากจากการแผ่หรือการรวมตัวของความร้อน

3) การปริแตกของฉนวนเนื่องจากความเค้นทางกลที่ระดับสูง เช่น สาเหตุที่สามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากแรงภายนอกหรือเงื่อนไขในการปฏิบัติของอุปกรณ์

4) การเกิดรอยสึกเนื่องจากการเคลื่อนไหวที่สัมพันธ์กันระหว่างส่วนประกอบต่างๆของอุปกรณ์

5) การค่อยๆเสื่อมลงของฉนวนภายใต้ความเค้นทางไฟฟ้า, ทางความร้อน หรือทางกล

หมายเหตุ ปรากฏการณ์นี้ควรสามารถจำกัดอยู่ในบางจุดได้เพื่อที่จะได้ไม่ให้มีการกระจายออกไปสู่ส่วนต่างๆของตัวฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลที่สามารถนำมาใช้ได้อย่างจำกัดแสดงให้เห็นว่าความเค้นและการมีอายุทางกลมีความสัมพันธ์ตามกฎกำลังผกผัน ดังเช่น การพลอตลงในกราฟลอกการิทึมของความเค้นทางกลกับการมีอายุเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น นอกจากนั้นการมีความสัมพันธ์ร่วมกันพบว่ามีเหตุผล โดยเพิ่มความถี่ของประโยชน์จากความเค้น อย่างไรก็ตามการใช้ความถี่เป็นจำนวนมากๆ จะนำไปสู่การเสียสภาพทางกลอื่นๆ ที่ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในทางปฏิบัติ เมื่อคำแนะนำที่ชัดเจนซึ่งสามารถยอมรับได้ ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงควรที่จะนำมาใช้เพื่อเอาช่วงความเค้นที่จำเป็นต้องเท่ากันมาใช้ให้เป็นประโยชน์กับวัตถุทดสอบ เมื่อเป็นไปได้การทดสอบควรที่จะกระทำที่ระดับต่ำสุดของระดับความเค้นทางกล 3 ระดับ ระดับความเค้นสูงสุดควรเป็นเงื่อนไขความเค้นทางกลที่มีการนำมาใช้งานอย่างเข้มงวดมากที่สุด

หมายเหตุ ข้อแนะนำนอกเหนือจากนี้สำหรับการเลือกระดับการทดสอบความเค้นทางกลนั้นยังไม่สามารถนำมาใช้ได้ในขณะนี้

**2.6.3.4 การเร่งอายุทางสิ่งแวดล้อม (ดูรูป ข-4)**

การเร่งอายุทางสิ่งแวดล้อมประกอบด้วยกระบวนการการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งเกี่ยวเนื่องกับการเร่งอายุทางความร้อน ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมก็สามารถส่งผลกระทบได้เช่นกัน ในด้านอื่นๆ ชนิดและระดับการเสื่อมถอยซึ่งมีสาเหตุมาจากความเค้นต่างๆ ที่ใช้ในการเร่งอายุของระบบฉนวนทางไฟฟ้า ส่วนด้านอื่นๆที่สำคัญก็เป็นการแบ่งประเภทความเค้นจากการเปลี่ยนแปลงภายในสิ่งแวดล้อม และผลกระทบจากอนุภาคของฝุ่นละอองและสิ่งปนเปื้อนอื่นๆต่อพฤติกรรมทางไฟฟ้า จนกระทั่งได้ข้อมูลที่นำสามารถไปใช้งานได้ กระบวนการทดสอบที่สามารถยอมรับได้เพียงอันเดียวคือการใช้เงื่อนไขทางสิ่งแวดล้อมในการใช้งานอย่างเข้มงวดมากที่สุดระหว่างรอบย่อยของการเร่งอายุ เช่น ใช้ระดับตั้งไว้

หมายเหตุ ปัจจุบันนี้ยังไม่มีการยืนยันในหลักทั่วไปที่มีความสัมพันธ์กับปัจจัยในการเพิ่มความเร็วในการเร่งอายุเกี่ยวกับการเร่งอายุทางสิ่งแวดล้อม

**2.6.4 ระดับความเค้น**

รอบย่อยการเร่งอายุควรมีการจำลองความเค้นต่างๆที่จะนำมาใช้งาน เมื่อทำการหาค่าของระบบฉนวนทางไฟฟ้า ผลกระทบที่เกิดขึ้นร่วมกันระหว่างความเค้นที่สามารถให้ความสำคัญและจะส่งผลกระทบกับการมีอายุในการทำงาน เมื่อกำหนดตารางของความเค้นที่จะนำไปใช้ภายใต้เงื่อนไขการเพิ่มความเร็วการเร่งอายุ ผลกระทบที่เกิดขึ้นร่วมกันเหล่านี้สามารถทำให้กระบวนการหาค่าถูกยกเลิกได้ ก่อนที่จะตัดสินใจกำหนดแบบแผนการเร่งอายุ ความเค้นที่ใช้ในการเพิ่มความเร็วการเร่งอายุเพียงความเค้นเดียวและความเค้นหลายๆความเค้น การลือกการทดสอบอาจต้องการการดำเนินการเพื่อตัดสินใจเลือกความสำคัญของผลกระทบที่เกิดขึ้นร่วมกัน ถ้าผลกระทบที่เกิดขึ้นร่วมกันโดยตรงได้รับการรับรอง หรือรู้ว่าเป็นจริงตามรูปแบบความสัมพันธ์ในการหาค่าอื่นๆ ดังนั้นรอบย่อยการเร่งอายุควรประกอบด้วยความเค้นที่ถูกนำมาใช้พร้อมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.6.5 ระยะเวลาและจำนวนรอบย่อยการเร่งอายุ**

เมื่อการทดสอบแบบรอบทดสอบได้ถูกนำมาใช้ นั้นควรที่จะใช้ความสำพันธ์ที่เป็นเหตุเป็นผล ระหว่างระยะเวลาของรอบทดสอบ ความเค้นที่นำมาใช้และความเค้นในทางปฏิบัติที่คาดไว้ มีข้อแนะนำอยู่ว่าระยะเวลาของรอบการเร่งอายุในแต่ละความเค้นที่นำมาใช้ควรเลือกมาโดยประมาณคือ 1ใน10 ของการมีอายุโดยเฉลี่ยของวัตถุทดสอบที่คาดไว้ ค่าของความเค้นในการเร่งอายุควรสร้างขึ้นสำหรับอุปกรณ์เฉพาะ เวลาและขนาดของความเค้นควรพิจารณาการทดสอบที่นำมาใช้ได้ง่ายและดีที่สุด

**2.6.6 รอบย่อยการเร่งอายุ**

**2.6.6.1 ปัจจัยทางความเค้นเพียงปัจจัยเดียว**

ในรอบย่อยการเร่งอายุนี้ วัตถุทดสอบถูกทดสอบด้วยปัจจัยเพียงปัจจัยเดียวที่เวลาหนึ่ง ปัจจัยการเร่งอายุในรอบย่อยการเร่งอายุนี้เป็นปัจจัยจากเงื่อนไขในการปฏิบัติที่ใช้อ้างอิง ซึ่งเกิดขึ้นในการทำงานเพียงอย่างเดียวหรือในลักษณะที่เป็นลำดับ (ดูในข้อ 2.6.6.2.1) และไม่มีปัจจัยในการเร่งอายุอื่นๆที่เกิดขึ้นพร้อมกันซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบที่เกิดขึ้นร่วมกันโดยตรง ดังนั้นในแต่ละความเค้นเหล่านั้นอาจจะถูกนำมาใช้ในรอบย่อยการเร่งอายุที่ใช้ปัจจัยเพียงปัจจัยเพียงปัจจัยเดียว

**2.6.6.2 ปัจจัยทางความเค้นหลายปัจจัย**

เมื่อผลกระทบร่วมกันระหว่างความเค้นที่เกิดขึ้นโดยทางตรง ปัจจัยในการเร่งอายุเหล่านี้ถ้าเป็นไปได้ควรที่จะนำมาใช้พร้อมกัน ในรอบย่อยการเร่งอายุนี้ ปัจจัยในการเร่งอายุ 2 ปัจจัยหรือมากกว่าควรนำมาใช้กับวัตถุทดสอบพร้อมกัน

หมายเหตุ ปัจจุบันนี้ยังไม่มีการยืนยันในหลักทั่วไปที่มีความสัมพันธ์กับปัจจัยในการเพิ่มความเร็วในการเร่งอายุเกี่ยวกับการเร่งด้วยปัจจัยทางความเค้นหลายปัจจัย

**2.6.6.2.1 สภาวะในการปฏิบัติที่ใช้อ้างอิงที่มีลักษณะเป็นลำดับ**

เมื่อผลกระทบร่วมกันระหว่างความเค้นที่เกิดขึ้นโดยทางอ้อม ความเค้นเหล่านี้อาจถูกนำมาใช้ในลักษณะที่เป็นลำดับมากว่าลักษณะที่นำมาใช้พร้อมกัน เมื่อมีความเป็นไปได้ระดับความเค้นของแต่ละปัจจัยการเร่งอายุอาจจะถูกเลือกมาเพื่อให้การเพิ่มความเร็วในการเร่งอายุเหมือนกันและควรนำมาใช้กับช่วงระยะเวลาที่เหมือนกัน

**2.6.6.2.2 เงื่อนไขในการปฏิบัติที่ใช้อ้างอิงที่มีลักษณะเป็นลำดับซับซ้อน**

ในกรณีที่เป็นเครื่องมือหรืออุปกรณ์ นอกจากการเร่งอายุโดยมีสาเหตุมาจากรูปแบบในการเร่งอายุที่ใช้ความเค้นหนึ่งความเค้นหรือมากกว่าแล้ว สภาวะการใช้งานรวมช่วงเวลาสั้นๆของความเค้นที่เพิ่มขึ้นหรือระดับของความเค้นปลี่ยนแปลงตามเวลา รอบการเร่งอายุที่ซับซ้อนควรมีการนำมาใช้ การเร่งอายุที่เป็นรอบการทดสอบนี้ควรรวมอัตราส่วนที่ถูกต้องของความเค้นที่เพิ่มเข้าไป ตัวอย่างเช่น ทางไฟฟ้า (แรงดันอิมพัลส์), ทางความร้อน (รอบการทดสอบด้วยความเย็น), ทางกล (แรงสะเทือนจากการสั่นสะเทือน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.7 การปรับสภาพก่อนการวินิจฉัย**

หลังจากในแต่ละรอบย่อยของการเร่งอายุแล้ว ควรที่จะมีช่วงสั้นๆของการปรับสภาพระบบฉนวนเพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิผลและค่าความสามารถของช่วงการทดสอบเพื่อการวินิจฉัย เช่น

1) การให้ความสั่นสะเทือนทางกลเพื่อที่จะให้ปรากฏผลของการปริแตกของฉนวนในระบบฉนวน

2) การให้ความชื้นเพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิผลของการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยด้วยแรงดันไฟฟ้าในภายหลัง

3) การให้ความเค้นทั้งจากทางไฟฟ้า ความร้อน หรือทางกลร่วมกันโดยให้เป็นช่วงเพื่อที่จำลองสภาวะของระบบฉนวนที่เกิดขึ้นเมื่อนำไปใช้งาน

โดยทั่วไปแล้วระดับของความรุนแรงและช่วงระยะเวลาหรือจำนวนของการปรับสภาพควรถูกกำหนดตามลักษณะระบบฉนวนที่นำมาทดสอบจะถูกนำไปใช้งาน

**2.8 การวินิจฉัย**

**2.8.1 การทดสอบเพื่อการวินิจฉัย-บรรทัดฐานของจุดสิ้นสุดอายุ**

จุดประสงค์สำคัญในโครงสร้างของการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยนั้นก็เพื่อที่จะกำหนดรูปแบบของจุดสิ้นสุดอายุ ซึ่งในการหาจุดสิ้นสุดอายุนั้นจะกระทำในช่วงรอบย่อยของการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยโดยทำหลังจากการทำให้เกิดการเสื่อมทางกายภาพต่อระบบฉนวนหรือการปรับสภาพระบบฉนวนก่อนแล้วนั่นเอง ดังนั้นการเกิดการเสียหายที่ชี้ถึงจุดสิ้นสุดอายุของฉนวนก็จะได้มาโดยการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยนี่เอง จุดสิ้นสุดอายุควรเป็นผลที่ได้มาจากลักษณะของในแต่ละสภาวะนั้น (เช่น ระดับ X ของคุณสมบัติสภาวะของ A), หรือหนึ่งในหลายสภาวะที่ทำสลับกัน (เช่น ระดับ X ของคุณสมบัติสภาวะของ A หรือ ระดับ Y ของคุณสมบัติสภาวะของ B), หรือจากการร่วมกันของสภาวะ (เช่น ระดับ X ของคุณสมบัติสภาวะของ A และ ระดับ Y ของคุณสมบัติสภาวะของ B)

ประเภทของบรรทัดฐาน

1) การตรวจสอบด้วยแรงดันสูง

2) การตรวจสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์หรือเสิร์จ

3) เปอร์เซ็นต์การในการเพิ่มขึ้นของ loss tangent, ระดับของการดิสชาร์จบางส่วน เป็นต้น ซึ่งสูงกว่าค่าแรงดันหรือช่วงแรงดันที่กำหนดตั้งแต่เริ่มต้นซึ่งยังไม่มีการเร่งอายุ

4) เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของกระแสรั่วซึ่งสูงกว่าค่าที่ถูกกำหนดตั้งแต่ตอนแรก

5) เปอร์เซ็นต์การสูญเสียของคุณสมบัติที่ได้ทำการเลือกไว้

**2.8.2 การเพิ่มการทดสอบโดยเฉพาะ**

ในบางกรณีอาจต้องมีการเพิ่มการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยเพื่อที่จะหาจุดสิ้นสุดของอายุของอุปกรณ์หรือเครื่องมือบางชนิด ซึ่งในการเพิ่มการทดสอบนั้นควรสัมพันธ์กับเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.9 การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบ**

**2.9.1 กล่าวโดยทั่วไป**

การกำหนดหรือระบุกฎสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบถ้าการออกแบบค่าปัจจัยหรือตัวประกอบต่างๆสำหรับระบบฉนวนที่นำมาทดสอบได้ระบุถึงระดับความเค้นว่ามีระดับสูงกว่าค่าที่เกิดขึ้นในระบบฉนวนที่ใช้ในการอ้างอิง ดังนั้นต้องแน่ใจได้ว่ากระบวนการทดสอบของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบนั้นต้องได้ค่าข้อมูลหรืออายุของระบบฉนวน หรือการถึงจุดสิ้นสุดอายุของระบบฉนวนในลักษณะเดียวกันแม้ระดับความเค้นที่ใช้สำหรับระบบฉนวนที่ใช้อ้างอิงจะมีค่าต่ำกว่าก็ตาม

**2.9.2 ประสบการณ์การใช้งาน**

เมื่อการประเมินค่าระบบฉนวนจำเป็นต้องหาค่าจากการใช้ข้อมูลจากประสบการณ์การใช้งาน จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการออกแบบระบบให้ผลที่ได้จากการทดสอบมีคุณภาพและความน่าเชื่อถือโดยการออกแบบให้ใกล้เคียงกับลักษณะการใช้งานจริงมากที่สุด

**2.9.3 ไฟฟ้า**

เมื่อทำการประเมินค่าความคงทนทางไฟฟ้า ช่วงระยะเวลาจนถึงจุดที่เกิดการเสียหายของทั้งระบบฉนวนที่นำมาทดสอบและระบบฉนวนที่ใช้อ้างอิงควรที่จะพล็อตให้อยู่ในรูป log-log ด้วยผลอย่างใดอย่างหนึ่งของค่าเฉลี่ยทางเลขณิตหรือค่าที่จุดกึ่งกลางของแต่ละความเค้นในการเร่งอายางไฟฟ้า (สามารถดูรายละเอียดได้จาก IEC 60727-1 และ IEC 60727-2) โดยทั่วไปรูปกราฟความคงทนทางไฟฟ้าที่ได้ควรที่จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงเพื่อที่จะกำหนดขอบเขตของความเค้นทางไฟฟ้าซึ่งผลการทดสอบที่ได้จากช่วงเวลาที่ยมรับได้นั้น ได้อธิบายในหัวข้อที่ 2.6.3.1

**2.9.4 ความร้อน**

เมื่อทำการประเมินค่าความคงทนทางความร้อน ควรใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นตามลักษณะความสัมพันธ์ของอาร์รีนีอุส (Arrhenius) (ค่าอายุเชิงลอการิทึมกับค่าอุณหภูมิสมบูรณ์) ตามข้อแนะนำใน IEC 60216-3 โดยการเปรียบเทียบระหว่างระบบฉนวนที่นำมาทดสอบและระบบฉนวนที่ใช้อ้างอิงจากการแปรความหมายของกราฟที่ได้ตามขนาดอุณหภูมิและค่าอายุเชิงลอการิทึมที่ได้จากการทดสอบ ระบบฉนวนที่นำมาทดสอบควรที่จะ ไดรับการยอมรับ ถ้าระบบฉนวนนั้นมี่ค่าอายุเชิงลอการิทึมที่ได้จากการทดสอบเท่ากับ หรือมากกว่าที่ได้จากระบบฉนวนที่ใช้ในการอ้างอิงทั้งนี้ต้องคำนึงด้วยว่าในบางครั้งค่าอายุที่ต้องการในการใช้งานหรือค่าอุณหภูมิที่กำหนดของทั้งระบบฉนวนที่นำมาทดสอบและระบบฉนวนที่ใช้อ้างอิงมีความแตกต่างกัน

ถ้าลักษณะกราฟที่ได้แสดงลักษณะที่เด่นชัดของส่วนโค้งหรือการไม่เป็นเส้นตรง นี่เป็นการแสดงให้เห็นว่าได้มีการเปลี่ยนแปลงปัจจัยที่เป็นส่วนสำคัญในการเร่งอายุของเครื่องจักร ในกรณีที่เกิดพฤติกรรมนี้ขึ้นอาจเป็นไปได้ว่าประเภทของฉนวนมีระดับอุณหภูมิที่ต่ำกว่าที่ได้คาดไว้ ดังนั้นควรที่จะทำการลดอุณหภูมิทดสอบลงเพื่อที่จะทำให้ลักษณะกราฟที่ได้มีความถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.9.5 ทางกล**

เมื่อทำการประเมินค่าความคงทนทางกล ข้อมูลควรที่จะถูกพล็อตให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นทางกลเชิงลอการิทึมและค่าอายุเชิงลอการิทึม ซึ่งในการทดสอบนั้นควรกระทำคล้ายกับการทดสอบสำหรับการทดสอบทางไฟฟ้าและการทดสอบโดยความร้อน

**2.9.6 สภาพแวดล้อม**

ยังไม่ได้มีการกำหนดแนวทางในการทดสอบเพื่อการวิเคราะห์ผลที่เกิดจากสิ่งแวดล้อม

**2.9.7 ผลที่เกิดขึ้นจากหลายๆปัจจัย**

เนื่องจากเราไม่สามารถเข้าใจถึงรายละเอียดของช่วงการกระทำของการเร่งอายุเครื่องจักรได้อย่างสมบูรณ์เนื่องมาจากปัจจัยการเร่งอายุนั้นอาจส่งผลกระทบต่อระบบฉนวนพร้อมกันหรืออาจส่งผลในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งเท่านั้น ดั้งนั้นจึงเป็นการยากมากที่จะกำหนดรูปของกระบวนการทดสอบ ซึ่งก็ยังไม่ได้กำหนดแนวทางในการทดสอบสำหรับพฤติกรรมนี้

**2.10 การรายงานการทดสอบ**

รายงานการทดสอบควรที่จะประกอบไปด้วย

1) คำอธิบายมาตรฐานการหาค่าที่ใช้ในการทดสอบ
2) ลักษณะของระบบฉนวนทางไฟฟ้า
3) ลักษณะของประสบการณ์การใช้งานที่เกี่ยวเนื่องกับระบบฉนวนที่ใช้อ้างอิง เช่นผลกระทบที่เกิดขึ้น เป็นต้น
4) ลักษณะและคำอธิบายของแบบจำลอง (ถ้าใช้)
5) สภาวะการใช้งานที่ใช้อ้างอิง
6) รายละเอียดของการปรับสภาพก่อนการวินิจฉัยหรือก่อนการเร่งอายุ
7) ความเค้นในการเร่งอายุและระดับของความเค้นที่ใช้ในการทดสอบ
8) ลำดับการทดสอบและช่วงระยะเวลาพร้อมทั้งจำนวนวัตถุทดสอบ
9) ปัจจัยที่ใช้สำหรับการวินิจฉัยพร้อมทั้งวิธีการตรวจสอบ การวัดและเครื่องมือวัด
10) บรรทัดฐานของการเกิดจุดสิ้นสุดของอายุ
11) กราฟตามลักษณะความสัมพันธ์ (รายละเอียดอยู่ใน IEC 60493-1)
12) ระยะเวลาจนถึงจุดสิ้นสุดอายุ, ค่าเฉพาะค่ากึ่งกลาง, สถิติของการปฏิบัติการทดสอบ
13) รายละเอียดในการเปรียบเทียบระหว่างระบบฉนวนใหม่กับระบบฉนวนที่ใช้อ้างอิง
14) ข้อกำหนดของคุณสมบัติ

**2.11 การเข้ารหัสระบบฉนวนทางไฟฟ้า**

โครงสร้างของการเข้ารหัสควรที่จะทำร่วมกับมาตรฐาน IEC TC 98 เพื่อที่ให้เป็นไปตามความสัมพันธ์กับเครื่องมือวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3
# โครงสร้างกระบวนการการทดสอบเพื่อการหาค่าความคงทนทางความร้อนในเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุน

## 3.1 แนวทางโดยรวมของกระบวนการทดสอบ

จุดประสงค์ของการทดสอบโดยความร้อนนี้ เป็นไปเพื่อการจัดหาข้อมูลเพื่อที่จะนำไปสู่การกำหนดขีดจำกัดทางความร้อนของระบบฉนวนใหม่ก่อนที่จะนำระบบฉนวนนั้นไปใช้งานในสภาวะนั้นๆ โดยอยู่ในลักษณะของการเปรียบเทียบผลในรูปแบบของกราฟระหว่างระบบฉนวนที่นำมาทดสอบ (ระบบฉนวนที่ยังไม่ได้รับการพิสูจน์ในการใช้งาน)กับระบบฉนวนที่ใช้ในการอ้างอิง (ระบบฉนวนที่ได้รับการพิสูจน์ในการใช้งานแล้ว) โดยที่โครงสร้างของกระบวนการทดสอบนี้ตั้งอยู่บนพื้นฐานตามมาตรฐาน IEC 85, 505, 610 และ 611

โดยทั่วไปรูปแบบของกระบวนการทดสอบจะอยู่ในรูปการทดสอบในหลายๆรอบการทดสอบ ซึ่งในแต่ละรอบการทดสอบก็จะประกอบไปด้วยรอบย่อยของการเร่งอายุทางความร้อน และรอบย่อยของการทดสอบเพื่อการวินิจฉัย ซึ่งก็จะเป็นไปตามลำดับ คือ หลังจากที่นำวัตถุทดสอบเข้าสู่รอบย่อยของการเร่งอายุทางความร้อนแล้ว ก็จะเข้าสู่รอบย่อยของการทดสอบเพื่อการวินิจฉัย ซึ่งก็จะประกอบไปด้วย การปรับสภาพก่อนการทดสอบเพื่อการวินิจฉัย (โดยการให้ความเค้นทางกลและการให้ความชื้น) และการทดสอบเพื่อการวินิจฉัย (โดยการตรวจสอบด้วยแรงดันไฟฟ้า) เพื่อที่จะทำการตรวจสอบสภาพของระบบฉนวนเพื่อที่จะกำหนดถึงจุดสิ้นสุดอายุของระบบฉนวนและเป็นการวัดค่าคุณสมบัติของฉนวนในขณะนั้นด้วย

## 3.2 รูปแบบกระบวนการทดสอบตามมาตรฐาน

รูปแบบกระบวนการทดสอบตามมาตรฐานสำหรับเครื่องจักรกลทางไฟฟ้าหมุน เป็นสิ่งที่ผู้ทดลองควรคำนึงถึงว่ารูปแบบใดเหมาะกับการนำมาใช้กับการทดสอบทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับลักษณะ ชนิดหรือขนาดของระบบฉนวนที่ต้องการนำมาทดสอบ

รูปแบบกระบวนการทดสอบตามมาตรฐานแบ่งออกเป็นสองรูปแบบดังนี้

### 3.2.1 รูปแบบกระบวนการทดสอบตามมาตรฐานสำหรับการพันแบบ WIRE-WOUND WINDINGS

- มอเตอร์
- แบบจำลองร่องสล็อต (Motorette)
- กระบวนการทดสอบสำหรับขดลวดในร่องสล็อตที่สเตเตอร์
- กระบวนการทดสอบ Pole winding
- กระบวนการทดสอบสำหรับขดลวดในร่องสล็อตที่โรเตอร์

### 3.2.2 รูปแบบกระบวนการทดสอบตามมาตรฐานสำหรับการพันแบบ FORM-WOUND WINDINGS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3.3 ระบบฉนวนที่ใช้ในการอ้างอิง**

คุณสมบัติของระบบฉนวนที่สามารถใช้เป็นระบบฉนวนที่ใช้อ้างอิงได้ คือ

- ระบบฉนวนนั้นต้องสามารถแสดงให้เห็นถึงความสำเร็จสำหรับการใช้งานที่ระดับขีดจำกัดในช่วงระยะเวลาที่ยาวนานเพียงพอซึ่งเป็นไปตามลักษณะตามที่ต้องการทดสอบได้
- ระบบฉนวนนั้นต้องมีสถิติการใช้งานในเครื่องจักรกลไฟฟ้าในจำนวนที่มากและเพียงพอ

**3.4 วัตถุที่ใช้ในการทดสอบและชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ**

**3.4.1 โครงสร้างของวัตถุที่ใช้ในการทดสอบ**

วัสดุหรือส่วนประกอบที่ใช้ในการประกอบเป็นระบบฉนวนเพื่อใช้ในการทดสอบเพื่อหาค่านั้นควรที่จะทำการตรวจสอบหรือแยกแยะส่วนผสมตามมาตรฐาน IEC 216 ก่อนเพื่อที่จะทำการเปรียบเทียบองค์ประกอบ เพื่อที่จะนำไปสู่การคาดระดับความร้อนที่ใช้สำหรับการทดสอบ

แบบจำลองที่ใช้ในการเทดสอบควรเป็นเครื่องจักรหรือส่วนประกอบของเครื่องจักรที่ใช้งานตามสภาพแวดล้อมจริง ส่วนประกอบของเครื่องจักรหรือรูปแบบจำลองของเครื่องจักรควรประกอบด้วยส่วนที่สำคัญของระบบฉนวนนั้นและควรพิจารณาตามความเหมาะสมของ ความหนาของฉนวน, ระยะครีพเอจ (creepage distance) การป้องกันการดิสชาร์จควรถูกประมาณค่าเพื่อที่จะระบุแรงดันสูงสุดและลักษณะวัสดุที่ใช้ในการทดสอบหรือแนวการทดสอบ ในกรณีของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแรงสูง เราสามารถใช้ขดลวดหรือแท่งตัวนำของเครื่องจักรเป็นแบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบ ถ้าขดลวดนั้นได้รับผลกระทบจากปัจจัยการเร่งอายุมากจนเป็นสาเหตุทำให้เกิดความเสื่อมของเครื่องจักรนั้นโดยตรง

**3.4.2 จำนวนของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ**

จำนวนที่เพียงพอของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบควรที่จะมากพอที่จะกระจายความเป็นไปได้ของการเกิดการเสียหายได้ทั่วถึง เพื่อป้องกันและกระจายความเป็นไปได้ของความผิดพลาดที่จะเกิดต่อชิ้นงานของระบบเพื่อให้ข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

**3.4.3 คุณภาพและความแน่นอนของการทดสอบ**

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบควรที่จะนำมาทดสอบเพื่อรู้ถึงสภาพของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบและเพื่อกำหนดลักษณะให้มีความเป็นมาตรฐานของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบและเพื่อทำการคัดแยกชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบว่ามีความสมบูรณ์หรือไม่ ซึ่งอาจทำได้โดยการสังเกตชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบโดยสายตาว่ามีส่วนใดแตกหักหรือแตกต่างกันในส่วนใดหรือไม่แล้วทำการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้า เพื่อเป็นการแน่ใจว่าระบบฉนวนที่ใช้ทดสอบนั้นนั้นไม่ได้เสื่อมสภาพอยู่ก่อนแล้ว

หมายเหตุ การทดสอบเบื้องต้นเพื่อคุณภาพและความแน่นอนของการทดสอบแบบจำลองวัสดุที่ใช้ในการทดสอบอาจทำได้โดยวิธีการดังเช่น

- การวัดค่าความต้านทานของฉนวน
- การวัดค่าloss tangent และ capacitance
- การวัดค่าแรงดันเริ่มต้นในการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความสมดุลของกระแสเฟสในขณะทำงาน
- repetitive surge
- กระแสไฟฟ้ารั่ว (leakage current)
- การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้าสูง

**3.4.4 การทดสอบเพื่อการวินิจฉัยเบื้องต้น**

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบหลังจากทำการประกอบเสร็จแล้วควรจะนำไปทำการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยทั้งหมดตามที่เรากำหนดไว้ก่อนที่จะนำเข้าไปสู่รอบย่อยการเร่งอายุทางอุณหภูมิครั้งแรก เพื่อจะได้ทราบว่าแบบจำลองวัสดุที่ใช้ในการทดสอบสามารถทนหรือแสดงว่าสามารถผ่านการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยได้โดยไม่เกิดความเสียหายเกิดขึ้น

**3.5 โครงสร้างของกระบวนการทดสอบโดยความร้อน**

**3.5.1 หลักการโดยทั่วไป**

การหาค่าความเสื่อมถอยของระบบฉนวนอันเนื่องมาจากการเร่งอายุระบบฉนวนโดยความร้อนนั้นอาจแปรไปตามขนาดของเครื่องจักรหรือส่วนประกอบของเครื่องจักรที่เราสนใจ (เช่นขดลวด หรือส่วนของสล็อตเป็นต้น) และจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการควบคุมให้สภาวะต่างที่ใช้ในการทดสอบของทั้งระบบฉนวนที่นำมาทดสอบกับระบบฉนวนที่ใช้อ้างอิงมีลักษณะผิดเพี้ยนน้อยที่สุดเพื่อที่จะสามารถนำข้อมูลมาเปรียบเทียบผลกันและเกิดค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด

ในหลายๆกรณีจากประสบการณ์ของการทดสอบมายาวนานทำให้ทราบว่าการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยที่ดีนั้นคือ กระทำหลังจากรอบการเร่งอายุทางอุณหภูมิเสร็จแล้ว แล้วทำปรับสภาพเพื่อการวินิจฉัยโดยให้ความเค้นทางกล ซึ่งอาจก่อให้เกิดการปริหรือแตกของฉนวน หลังจากนั้นทำการปรับสภาพเพื่อการวินิจฉัยโดยให้ความชื้น และสุดท้ายทำการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยทางไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบสภาพฉนวนและหาจุดสิ้นสุดอายุของฉนวน

ในบางกรณีของการวินิจฉัยเนื่องจากความเค้นทางกล ความชื้น หรือแรงดันไฟฟ้าอาจไม่ได้เป็นการวินิจฉัยที่ดีที่สุดกว่าได้ เนื่องจากอาจมีการวินิจฉัยสภาพของฉนวนที่เหมาะสมกว่า เช่น การทดสอบทางไดอิเลคตริก (เช่น การวัดค่าความต้านทานของฉนวน, การวัดค่าloss tangent และ capacitance, การวัดค่าแรงดันเริ่มต้นในการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน) ซึ่งการเพิ่มเติมการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยที่นอกเหนือจากความเค้นทางกล ความชื้น หรือแรงดันไฟฟ้า อาจมีขึ้นได้ตามความเหมาะสมซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะการใช้งานของเครื่องจักรนั้น

**3.5.2 ขนาดอุณหภูมิและช่วงเวลาที่ใช้ในการเร่งอายุฉนวน**

ขนาดอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบควรขึ้นอยู่กับลักษณะหรือจำนวนของวัตถุที่ใช้ในการทดสอบและควรทำการทดสอบที่ขนาดอุณหภูมิที่ต่างกันอย่างน้อย 3 ระดับ การระบุถึงขีดจำกัดอุณหภูมิของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบโดยเป็นการคาดถึงขีดจำกัดอุณหภูมิตามระบบฉนวนที่ใช้อ้างอิง ควรใช้ตามค่าที่ระบุในตารางที่ 3-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| ประเภท | อุณหภูมิจำกัด องศาเซลเซียส |
|---|---|
| Y | 90 |
| A | 105 |
| E | 120 |
| B | 130 |
| F | 155 |
| H | 180 |
| C(≥ 200°C) | ≥ 200 |

*ตารางที่ 3-1 ประเภทของวัสดุฉนวนและอุณหภูมิจำกัด*

| อุณหภูมิจำกัดองศาเซลเซียส | | | | | | | | จำนวนวัน/รอบ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 90°C | 105°C | 120°C | 130°C | 155°C | 180°C | 200°C | 220°C | |
| 155-165 | 170-180 | 185-195 | 195-205 | 220-230 | 245-255 | 265-275 | 285-295 | 1-2 |
| 145-155 | 160-170 | 175-185 | 185-195 | 210-220 | 235-245 | 255-265 | 275-285 | 2-3 |
| 135-145 | 150-160 | 165-175 | 175-185 | 200-210 | 225-235 | 245-255 | 265-275 | 4-6 |
| 125-135 | 140-150 | 155-165 | 165-175 | 190-200 | 215-225 | 235-245 | 255-265 | 7-10 |
| 115-125 | 130-140 | 145-155 | 155-165 | 180-190 | 205-215 | 225-235 | 245-255 | 14-21 |
| 105-115 | 120-130 | 135-145 | 145-155 | 170-180 | 195-205 | 215-225 | 235-245 | 28-35 |
| 95-105 | 110-120 | 125-135 | 135-145 | 160-170 | 185-195 | 205-215 | 225-235 | 45-66 |

การเลือกจำนวนวันทดสอบควรเป็นไปตามลักษณะดังต่อไปนี้คือ 1, 2, 4, 8, 16, 32 และ 64 หรือ 1, 2, 4, 7, 14, 28 และ 49 หรือ 3, 10, 17, 31 และ 59 วัน

*ตารางที่ 3-2 ขนาดอุณหภูมิและช่วงเวลาที่ใช้ในการเร่งอายุของระบบฉนวน*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในตารางที่ 3-2 เป็นการแนะนำถึงขนาดอุณหภูมิและช่วงเวลาที่ใช้ในการเร่งอายุของระบบฉนวนในรอบย่อยของการเร่งอายุโดยความร้อนตามลักษณะที่แปรตามอุณหภูมิจำกัด ขนาดอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่ใช้ในการเร่งอายุฉนวนควรเป็นค่าที่ก่อให้เกิดอายุโดยรวมของฉนวน ( log mean test life) ประมาณ 5,000 ชั่วโมงหรือมากกว่าและขนาดอุณหภูมิที่สูงกว่านี้ควรมีค่าห่างระหว่างกันประมาณ 20 องศาเซลเซียส หรือมากกว่า ส่วนค่าห่างระหว่าง 10 องศาเซลเซียสนั้นควรใช้เมื่อมีการทดสอบโดยใช้ขนาดอุณหภูมิ มากกว่า 3 ระดับ

เป็นข้อแนะนำว่า อายุโดยเฉลี่ยของระบบฉนวนที่ทดสอบในแต่ละขนาดอุณหภูมิจะมีค่าประมาณ 10 รอบ (เนื่องจากตารางที่ 3-2 มีโครงสร้างพื้นฐานมาจากการทดสอบการใช้งานจริง ทำให้ทราบว่าอายุโดยเฉลี่ยของอายุฉนวนโดยมากจึงมีค่าประมาณ 10 รอบ ตามประสบการณ์การทดสอบการใช้งานที่ผ่านมา)

การเร่งอายุของฉนวนทางอุณหภูมิโดยทั่วไปแล้วจะมีอยู่ 2 วิธี คือ

1.การคงที่เวลาแต่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Fixed time; variable temperature)

2. การคงที่อุณหภูมิแต่เปลี่ยนแปลงเวลา (Fixed temperature; variable time)

หมายเหตุ รายละเอียดทั้งสองวิธีสามารถดูได้จาก IEEE Std 98-2002, Annex A และ Annex B

**3.5.3 วิธีการให้ความร้อนในการทดสอบ**

วิธีการให้ความร้อนโดยเตาอบแม้จะเป็นวิธีที่มีข้อเสียอยู่บ้างแต่จากประสบการณ์ทำให้ทราบว่าการให้ความร้อนโดยวิธีนี้ก็เป็นวิธีที่สะดวก เหมาะสมและประหยัดเมื่อต้องการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงๆ ซึ่งวิธีการให้ความร้อนโดยเตาอบจะเป็นการให้ความร้อนแก่ทุกส่วนของระบบฉนวนและจะมีอุณภูมิที่เท่ากันทุกส่วน ในขณะที่การใช้งานจริงนั้นอุณหภูมิทุกส่วนอาจไม่เท่ากันเนื่องจากอาจมีบางจุดที่ได้รับความร้อนเป็นพิเศษหรือระบายความร้อนได้ยาก แต่อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากใช้งานจริงข้างต้นก็ยังจะใกล้เคียงกับผลของการให้ความร้อน โดยตู้อบอยู่ ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับว่าการไหลเวียนของอากาศภายในตู้อบใกล้เคียงกับความเป็นจริงหรือไม่ ความร้อนที่ใช้ในการเร่งอายุควรมีการควบคุมให้คงที่โดยไม่เกิน $\pm 2$ องศาเซลเซียส ระหว่างในช่วงเริ่มต้นจนถึง 180 องศาเซลเซียส และ $\pm 3$ องศาเซลเซียส ตั้งแต่ 180 องศาเซลเซียสจนถึง 300 องศาเซลเซียส

อย่างไรก็ตามการให้ความร้อนแก่วัสดุที่ใช้ในการทดสอบอาจให้โดยวิธีอื่นได้หากวิธีนั้นมีความเหมาะสมมากกว่าหรือเนื่องจากวิธีนั้นมีลักษณะการให้ความร้อนและการไหลเวียนของอากาศแก่วัสดุที่ใช้ในการทดสอบใกล้เคียงกับความเป็นจริงของเครื่องจักร เช่น

- การให้ความร้อนโดยตรงจากกระแสไฟฟ้า
- การ starting หรือการ reversing (การทดสอบมอเตอร์)
- การ superimposition ของกระแสไฟฟ้าตรงบนเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับที่สภาวะไม่มีโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3.5.4 รอบย่อยของการเร่งอายุทางอุณหภูมิ**

การให้ความร้อนที่เหมาะสมและมีการไหลเวียนของอากาศที่เพียงพอในการเร่งอายุของฉนวน และมีวิธีการวัดอุณหภูมิที่เหมาะสมก็จะเป็นสิ่งที่เพิ่มความน่าเชื่อถือ และความแน่นอนของการทดลองเพิ่มมากขึ้น

ในการเคลื่อนย้ายวัตถุทดสอบควรที่จะนำวัตถุทดสอบ (ขณะมีอุณหภูมิเท่าอุณหภูมิห้อง) เคลื่อนย้ายเข้าไปสู่เตาอบหลังจากที่อุณหภูมิของเตาอบถึงระดับที่ได้เลือกไว้ในทำนองเดียวกันการเคลื่อนย้ายวัตถุหลังจากเสร็จสิ้นการเร่งอายุโดยความร้อน ก็ควรเคลื่อนย้ายมาสู่อุณหภูมิห้องโดยตรงหลังจากทำการเร่งอายุทางอุณหภูมิเสร็จในทันที ด้วยการปฏิบัติเช่นนี้ก็จะทำให้เกิดการช็อคโดยการได้รับความร้อนหรือความเย็นในทันทีทันใด ซึ่งในการทดสอบนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องสร้างสภาวะการทดสอบให้เหมือนกันสำหรับทั้งระบบฉนวนที่นำมาทดสอบและระบบฉนวนที่ใช้อ้างอิง

**3.5.5 รอบย่อยของการทดสอบเพื่อการวินิจฉัย**

หลังจากรอบย่อยของการเร่งอายุโดยความร้อนแล้วก็จะเข้าสู่รอบย่อยของการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยตามที่ได้กำหนดไว้ตามความเหมาะสม ทั้งนี้การทดสอบเพื่อการวินิจฉัยก็จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือการปรับสภาพก่อนการวินิจฉัยและการทดสอบเพื่อการวินิจฉัย

**3.5.5.1 การทดสอบทางกล**

ข้อแนะนำอย่างหนึ่งสำหรับการทดสอบทางกลซึ่งเป็นการปรับสภาพอย่างหนึ่งก่อนการวินิจฉัย ซึ่งการทดสอบทางกลนี้ก็คล้ายกับการเกิดการสั่นของเครื่องจักรนั่นเอง ซึ่งรูปแบบการทดสอบโดยความเค้นทางกลนี้ก็จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุที่ใช้ในการทดสอบและชนิดของการใช้งานของเครื่องจักร

วิธีการทดสอบที่เหมาะสมและใช้โดยทั่วไปคือ การแขวนวัตถุทดสอบบนโต๊ะสั่นเป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง ด้วยความถี่ 50 หรือ 60 Hz หรืออาจใช้วิธีอื่นนอกเหนือจากนี้ได้ตามความเหมาะสม

การสตาร์ท สต็อป หรือการกลับทิศการหมุนของเครื่องจักรก็อาจเป็นวิธีการอย่างหนึ่งของการให้ความเค้นทางกลในการใช้งานจริงซึ่งขนาดและระดับก็จะเพิ่มไปตามขนาดเครื่องจักรนั่นเอง

**3.5.5.2 การทดสอบด้วยความชื้น**

ความชื้นในหลายๆกรณี เป็นส่วนหนึ่งของการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวน ซึ่งอาจเป็นสาเหตุของความแตกต่างกันของการเกิดการเสียหายเนื่องจากความเค้นทางไฟฟ้า ผลของความชื้นอาจส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของการสูญเสียทางไดอิเลกตริก (Dielectric loss) และเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของฉนวน และยังอาจส่งผลต่อความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวน ซึ่งความชื้นบนฉนวนยังเป็นการช่วยการทดสอบด้วยแรงดันทางไฟฟ้า เพื่อแสดงถึงรอยแตกและรูรั่วซึมในฉนวน ซึ่งในการให้ความชื้นนี้ก็เป็นวิธีหนึ่งของการปรับสภาพฉนวนเช่นกัน

จากการทดสอบมายาวนานทำให้ทราบว่าเวลาที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบความชื้นประมาณ 48 ชั่วโมงเพื่อที่จะทำให้ค่าความต้านทานของฉนวนถึงจุดที่เหมาะสม ในระหว่างการทดสอบนี้ต้องไม่มีการจ่ายไฟให้กับวัตถุที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3.5.5.3 การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้า**

ในการตรวจสอบสภาพของฉนวนหรือในการตัดสินว่าฉนวนถึงจุดสิ้นสุดอายุของฉนวนหรือไม่ ซึ่งการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้าถูกนำมาใช้ในการวินิจฉัยในกรณีนี้ ซึ่งขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบก็จะขึ้นอยู่กับวัตถุที่ใช้ในการทดสอบ และขนาดการใช้งานของเครื่องจักรไฟฟ้านั้น โดยทั่วไปความถี่ไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบจะมีค่าอยู่ระหว่าง 49 ถึง 60 Hz

การทดสอบแรงดันไฟฟ้าของวัตถุที่ใช้ในการทดสอบระหว่างเส้นลวดตัวนำในขดเดียวกัน (wire to wire) หลังจากนั้นทดสอบที่ระหว่างขดลวดกับขดลวด (phase to phase) และสุดท้ายทำการทดสอบที่ระหว่างขดลวดกับกราวนด์ (winding to ground) และถ้ามีการทดสอบด้วยความชื้นด้วย การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้าต้องกระทำขณะที่วัตถุที่ใช้ในการทดสอบยังคงเปียกชื้นอยู่ที่อุณหภูมิห้อง

การเกิดการเสียหาย (Failure) ในส่วนประกอบของระบบฉนวนนั้น ถ้าหากเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์ก็เป็นสิ่งที่แสดงให้เห็นว่าระบบฉนวนนั้นถึงจุดสิ้นสุดของฉนวนแล้ว การเกิดความร้อนหรือควันที่ส่วนใดส่วนหนึ่งของวัตถุที่ใช้ในการทดสอบก็เป็นการแสดงถึงความเสียหายได้เช่นกัน การเกิดการกระเด็นเล็กน้อย และการเกิดการการเกิดประกายไฟที่ผิวฉนวนนั้นไม่ถือว่าเป็นความเสียหายแต่ควรมีการบันทึกไว้

**3.5.5.4 การทดสอบเพื่อการวินิจฉัยอื่นๆ**

เนื่องมาจากการใช้งานภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน ดังนั้นการทดสอบด้วยการวินิจฉัยย่อมมีความแตกต่างกันไปตามความเหมาะสม การทดสอบเพื่อการวินิจฉัยที่นอกเหนือจากข้างต้นในบางกรณีอาจใช้ร่วมหรือแทนที่การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้าเพื่อตัดสินจุดสิ้นสุดอายุของฉนวนก็ได้ การวัดค่าความต้านทานของฉนวน, การวัดค่า loss tangent และ capacitance, การวัดแรงดันเริ่มต้นในการเกิด partial discharge ก็เป็นการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยอีกรูปแบบหนึ่งซึ่งควรกระทำก่อนและหลังเกิดความเสียหายของระบบฉนวน ซึ่งทำให้เรารู้ถึงสภาพตามธรรมชาติของฉนวนได้

**3.6 ผลของการทดสอบความทนทานของฉนวน**

ผลของการทดสอบสามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้โดยกฎของอาร์รีนีอุส (Arrhenius) ระหว่างผลรวมทางเวลา (logarithm of time) กับขนาดอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งการกระทำการทดสอบระบบฉนวนที่ขนาดอุณหภูมิต่างกันอย่างน้อย 3 ระดับก็เพื่อ 2 จุดประสงค์ด้วยกัน คือ เพื่อเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือว่าระดับอุณหภูมิจำกัดที่ได้จากการทดสอบใกล้เคียงความเป็นจริงและเพื่อตรวจสอบว่ารูปแบบความสัมพันธ์ข้างต้นมีรูปแบบความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น (linear relationship) หรือไม่ เช่นถ้าหากเส้นกราฟนั้นเกิดการโค้งงอก็แสดงว่ามีปัจจัยอื่นที่มีความสำคัญที่นอกเหนือจากอุณหภูมิเป็นตัวเร่งอายุของฉนวน

แต่อย่างไรก็ตามถ้าหากเส้นกราฟที่ได้นั้นมีความแตกต่างของระดับความชันของเส้นกราฟมาก (เช่นเกิดการแกว่งขึ้นลงของเส้นกราฟ) แสดงว่าระดับอุณหภูมิของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบนั้นต่ำกว่าระบบฉนวนที่ใช้อ้างอิง

ถ้ากราฟที่ได้จากผลของการทดสอบของทั้งระบบฉนวนที่นำมาทดสอบและระบบฉนวนที่ใช้อ้างอิงนั้นไม่มีความคล้าย นั่นเป็นการแสดงให้เห็นว่ากรรมวิธีการเร่งอายุนั้นมีความแตกต่างกัน ดังนั้นอาจมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนแปลงระบบฉนวนโดยเปลี่ยนระบบฉนวนที่นำมาทดสอบใหม่ตามความต้องการของระดับอุณหภูมิหรือเปลี่ยนระบบฉนวนที่ใช้อ้างอิงก็ได้

**3.7 การวิเคราะห์ การรายงานและการจัดระดับอุณหภูมิ**

**3.7.1 บรรทัดฐานของการเกิดการเสียหาย**

บรรทัดฐานที่จะใช้ในการตัดสินใจว่าเป็นการเสียหายหรือไม่นั้นควรที่จะถูกกำหนดและอธิบายก่อนที่จะทำการทดสอบ ควรมีการเพิ่มการทดสอบที่เพียงพอเข้าไปในรอบการทดสอบเพื่อที่จะตรวจเมื่อมีการเสียหายเกิดขึ้นซึ่งเป็นสิ่งที่แสดงถึงจุดสิ้นอายุของฉนวน การใช้บรรทัดฐานที่มากเกินไปในการชี้ถึงจุดสิ้นอายุของฉนวนก็อาจที่จะทำให้การแปลความหมายของผลการทดสอบมีความยุ่งยากมากเกินไป ดังนั้นจึงควรใช้เพียงบรรทัดฐานของจุดสิ้นอายุของฉนวนเดียวก็เพียงพอ

การเกิดความเสียหายที่ส่วนประกอบใดๆของระบบฉนวนจะถือว่าระบบฉนวนนั้นเกิดเสียหายขึ้นทั่วทั้งระบบและเป็นจุดสิ้นอายุของฉนวนด้วยแต่ถ้าความเสียหายนั้นไม่เกิดขึ้นภายในระบบฉนวนนั้น เช่น การเปิดออกของจุดเชื่อมต่อทางไฟฟ้าและสามารถซ่อมให้คืนได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อระบบฉนวน วัตถุทดสอบนั้นควรถูกนำไปสู่กระบวนการทดสอบต่อไป

**3.7.2 จุดสิ้นสุดอายุของฉนวน (End of life)**

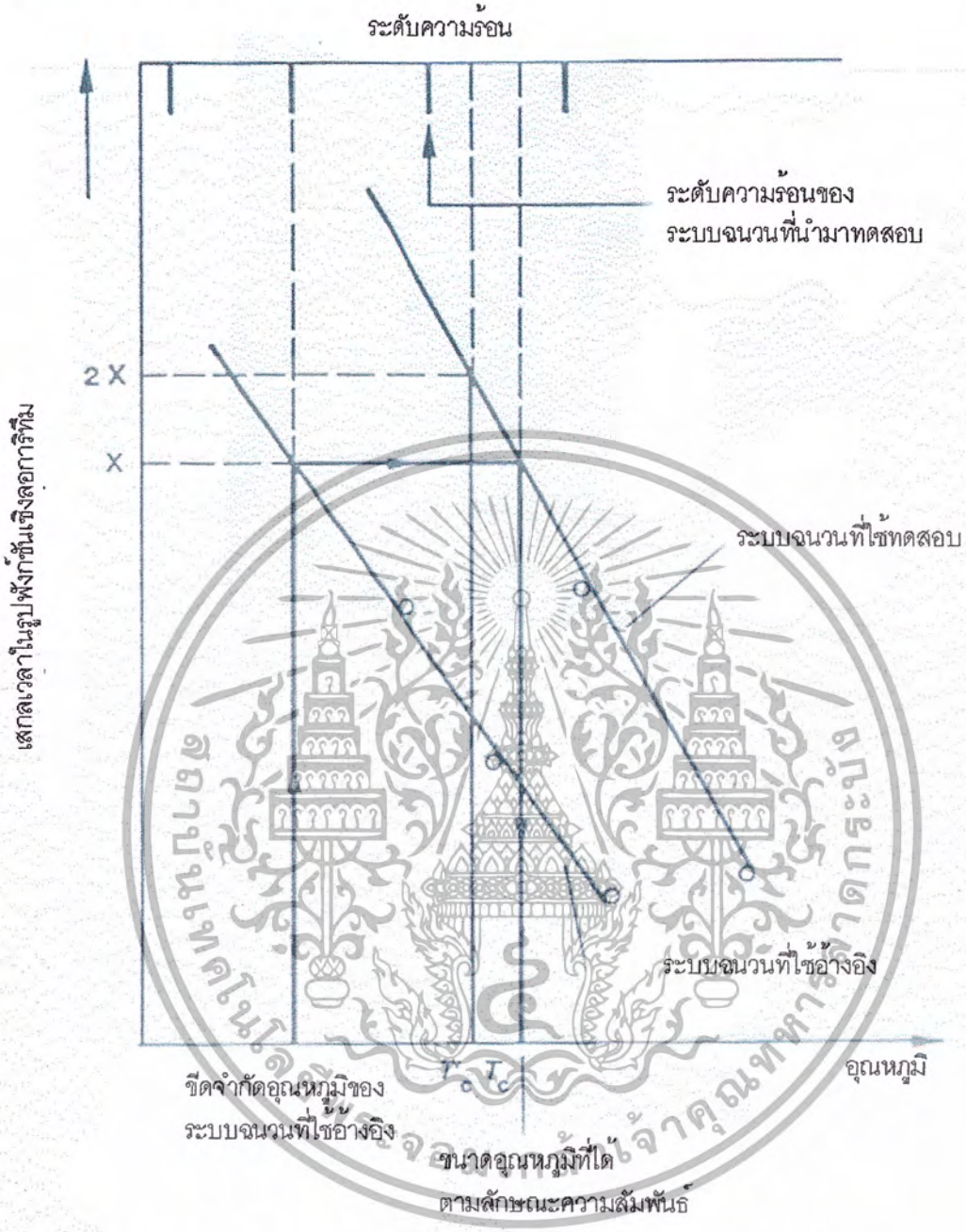
จุดสิ้นสุดอายุของฉนวนถูกสันนิษฐานว่าเกิดขึ้นที่จุดกึ่งกลางของช่วงเวลาระหว่างรอบของก่อนการเกิดความเสียหายของระบบฉนวนและรอบที่เกิดความเสียหายของระบบฉนวน

**3.7.3 เวลาเฉลี่ย (Average time)**

จำนวนชั่วโมงทั้งหมดของการเร่งอายุจนถึงจุดสิ้นสุดอายุของฉนวน ควรถูกบันทึกโดยการแปลงอยู่ในรูปลอการิทึม แล้วแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมทางเวลาการเร่งอายุและระดับอุณหภูมิที่ใช้ตามความสัมพันธ์ของอาร์รีนีอุส (Arrhenius) (log life versus reciprocal of absolute temperature)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3.8 การแปลความหมายของข้อมูล**




***รูปที่ 3- 1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างระบบฉนวนที่นำมาทดสอบและระบบฉนวนที่ใช้ในการอ้างอิงตามความสัมพันธ์ของอาร์รีนีอุส ( Arrhenius)***

จากเส้นกราฟตามความสัมพันธ์ของอาร์รีนีอุส (Arrhenius) (log life versus reciprocal of the absolute temperature) ในกรณีปกติที่อายุการใช้งานของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบและระบบฉนวนที่ใช้อ้างอิงมีความต้องการใช้งานให้อายุของการใช้งานมีระดับเดียวกัน ใช้ผลของการทดสอบที่ได้จากการทดสอบระบบฉนวนที่ใช้อ้างอิง ทำการคำนวณอายุในรูปเวลา (X) ที่ระดับอุณหภูมิที่ระบุของระบบฉนวน ($T_R$) ที่ใช้อ้างอิงใช้ผลของการทดสอบที่ได้จากการทดสอบระบบฉนวนที่นำมาทดสอบทำการคำนวณอายุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปเวลา ($T_C$) ที่จำนวนชั่วโมงเดียวกันกับ X ซึ่งระดับอุณหภูมิของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบก็จะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าของ $T_C$

ในกรณีปกติที่อายุการใช้งานของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบ และระบบฉนวนที่ใช้อ้างอิงมีความต้องการใช้งานให้อายุของการใช้งานมีระดับ แตกต่างกัน อุณหภูมิ $T'_C$ จะขึ้นอยู่กับอายุของระบบฉนวนที่แตกต่างไป (เช่นเมื่อมีความต้องการใช้งานให้อายุของการใช้งานมีมากกว่าระดับปกติอยู่ 2 เท่าของระบบฉนวนที่ใช้อ้างอิง ดังนั้น $T'_C$ ก็จะเป็นไปตามเงื่อนไขที่จำนวนชั่วโมงเดียวกันกับ 2X) ซึ่งระดับอุณหภูมิของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบก็จะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าของ $T'_C$

**3.9 การรายงานผล**

การรายงานผลของการทดสอบนี้ควรที่จะเพิ่ม การบันทึกรายละเอียดต่างๆที่เกี่ยวกับการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ และควรเพิ่มสิ่งต่อไปนี้ในการรายงาน

- การอ้างอิงถึงมาตรฐานการทดสอบ IEC
- คำอธิบายการทดสอบระบบฉนวน (ทั้งCandidate และ Reference insulation system)
- ขนาดอุณหภูมิและช่วงเวลาการเร่งอายุของฉนวนของแต่ละระบบฉนวน
- การทดสอบการวินิจฉัยที่ใช้เป็นการทดสอบหรือเป็นการเพิ่มความเค้นของแต่ละระบบฉนวน
- โครงสร้างของแบบจำลองของวัตถุทดสอบและวัตถุทดสอบ
- จำนวนของแบบจำลองของวัตถุทดสอบที่แต่ละอุณหภูมิของแต่ละระบบฉนวน
- วิธีการให้ความร้อนในการเร่งอายุฉนวน
- อัตราการไหลของอากาศ
- เวลาที่เกิดการเสียหายและวิธีการเกิดการเสียหาย
- ผลรวมทางเวลาของแต่ละขนาดอุณหภูมิที่ใช้ในการเร่งอายุของฉนวน
- กราฟตามความสัมพันธ์ของอาร์รีนีอุส (Arrhenius)
- ระดับอุณหภูมิของระบบฉนวนที่ใช้อ้างอิง (Reference system)
- ระดับอุณหภูมิของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบ (Candidate system) ที่ถูกตัดสิน โดยการทดสอบ

**หมายเหตุ** รายละเอียดเพิ่มเติมอาจศึกษาได้จาก IEC 34-18-1 หัวข้อ 5.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 4
# การทดสอบระบบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการพันแบบ WIRE-WOUND WINDINGS โดยใช้แบบจำลองร่องสล็อต (Motorette) เพื่อการจัดระดับความร้อนของระบบฉนวนไฟฟ้า

## 4.1 บทนำ

ความทนทานของวัสดุที่ใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับตัวประกอบหลายอย่าง เช่น อุณหภูมิ ความเค้นทางไฟฟ้าและทางกล การสั่นสะเทือน การเผยผึ่งต่อบรรยากาศและสารเคมีที่ทำให้เกิดความเสียหาย ความชื้นและสิ่งสกปรก โดยทั่วไปวัสดุฉนวนไฟฟ้าจะไม่สามารถทนทานต่ออุณหภูมิที่กำหนดให้โดยไม่จำกัดเวลาได้ แต่วัสดุฉนวนไฟฟ้าก็จะมีอายุการใช้งานที่พอเพียง ถ้าอุณหภูมิของบางคาบในช่วงเวลานั้นลดลงต่ำกว่าค่าที่กำหนดเป็นครั้งคราว ซึ่งโดยทั่วไปแล้ววัสดุฉนวนไฟฟ้าจะมีอายุการใช้งานที่นานพอถ้าให้ทำงานในภาวะการใช้งานตามปกติตามมาตรฐานของขีดจำกัดทางอุณภูมิ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทดสอบเพื่อหาค่าระดับความร้อนของวัสดุฉนวนไฟฟ้าก่อนที่จะนำเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้นไปใช้งานภายใต้สภาวะนั้นๆ เพื่อเป็นการแน่ใจและเพิ่มความน่าเชื่อถือว่าวัสดุฉนวนไฟฟ้านั้นสามารถที่จะนำไปใช้งานภายใต้สภาวะนั้นๆ ได้จริง

## 4.2 ขอบเขตของการทดสอบ

กระบวนการทดสอบนี้อยู่ในรูปแบบของการเปรียบเทียบอายุโดยรวมของระบบฉนวนตั้งแต่ 2 ระบบขึ้นไป ซึ่งรูปแบบกระบวนการทดสอบนี้ถูกจำกัดอยู่ในขอบเขตของเครื่องจักรไฟฟ้าที่มีการพันแบบ wire-wound winding โดยที่รูปแบบกระบวนการทดสอบนี้ใช้ในการหาค่าของระบบฉนวนที่มีระบบการทำความเย็นโดยอากาศภายใต้สภาพแวดล้อมซึ่งนำไปสู่การเสื่อมโทรมของระบบแต่ไม่รวมถึงการใช้งานที่อยู่ในกรณีพิเศษเช่นการใช้งานภายใต้ของเหลวบางชนิด, ก๊าซบางอย่างหรือการใช้งานร่วมกับเคมีภัณฑ์บางประเภท

## 4.3 จุดประสงค์ของการทดสอบ

จุดประสงค์ของการทดสอบ ก็เพื่อที่จะจัดระดับอุณหภูมิของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบ โดยการทดสอบตามรูปแบบกระบวนการทดสอบภายใต้ขอบเขตที่ได้กล่าวข้างต้นโดยทดสอบตามระดับความร้อนของระบบฉนวนซึ่งอาจเป็นการทดสอบเพิ่มเติมจากการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของฉนวนก็ได้ ข้อมูลที่ได้มาจากกระบวนการทดสอบสามารถนำไปสู่การจัดระดับความร้อนของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบก่อนที่จะได้รับการพิสูจน์จากการใช้งาน โดยการเปรียบเทียบอายุโดยรวมของระบบฉนวนจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบระหว่างระบบฉนวนที่นำมาทดสอบกับระบบฉนวนที่ใช้ในการอ้างอิงตามระดับความร้อนที่ได้คาดไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**4.4 การจัดประเภทของวัสดุฉนวนโดยแบ่งตามระดับความร้อน**

| ประเภท | อุณหภูมิจำกัด องศาเซลเซียส |
|---|---|
| Y | 90 |
| A | 105 |
| E | 120 |
| B | 130 |
| F | 155 |
| H | 180 |
| 200 | 200 |
| 220 | 220 |
| 250 | 250 |

*ตารางที่ 4-1 ประเภทของวัสดุฉนวนและอุณหภูมิจำกัด*

**4.5 วิธีการหาค่าระดับความร้อนของระบบฉนวน**

กระบวนการทดสอบนี้ได้ออกแบบรูปแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการหาค่าระดับความร้อนของระบบฉนวน โดยการให้ความร้อนซึ่งเป็นปัจจัยหลักมีค่ามากเกินกว่าระดับความร้อนปกติเพื่อที่จะเร่งอายุของระบบฉนวนให้เสื่อมสภาพเร็วยิ่งขึ้นตามลักษณะการสะสมของผลกระทบที่เกิดขึ้นจริงหลังจากการใช้งานที่ยาวนาน หลังจากนั้นจะเป็นการทดสอบด้วยความเค้นทางกลและความชื้นและแรงดันไฟฟ้าเป็นขั้นตอนสุดท้ายเพื่อเป็นการตรวจสอบสภาพของระบบฉนวน

จำนวนของชิ้นงานทดสอบในแต่ละขนาดอุณหภูมิที่ทำการทดสอบควรมีจำนวนที่เพียงพอเพื่อที่จะกระจายความเป็นไปได้ของการเกิดความเสียหายต่อชิ้นงาน เพื่อความเหมาะสมชิ้นงานควรมีจำนวนอย่างน้อย 10 ชิ้นงานในแต่ละขนาดอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ (ควรทดสอบอย่างน้อย 3 ขนาดอุณหภูมิ)

เมื่อทำการทดสอบจนกระทั่งระบบฉนวนเกิดความเสียหายแล้ว ข้อมูลหรือจำนวนชั่วโมงที่ได้จากการทดสอบของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบและระบบฉนวนที่ใช้ในการอ้างอิงก็จะถูกนำมาพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบลักษณะของกราฟเพื่อหาระดับความร้อนของระบบฉนวน ซึ่งกระบวนการทดสอบนี้อาจเหมาะสมสำหรับการเปรียบเทียบเท่านั้นเนื่องจากในการใช้งานจริงนั้นมักจะมีปัจจัยหลายๆปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความทนทานของระบบฉนวนตามแต่ละช่วงเวลาแตกต่างกันดังนั้นจึงเป็นการเหมาะสมกว่าถ้าจะทำการหาค่าระดับความร้อนโดยการหาข้อมูลจากประสบการณ์การใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**4.6 แบบจำลองของชิ้นงานทดสอบ**

ชิ้นงานทดสอบนี้จะเป็นการจำลองระบบฉนวนที่ร่องสล็อตของสเตเตอร์

**4.6.1 ส่วนประกอบของชิ้นงานทดสอบ**

- ส่วนที่เป็นโลหะโดยใช้สแตนเลสในการทำ
- ตัวอินซูเลเตอร์หรือเทอมินอลโดยใช้เซรามิคเทอมินอล
- ขดลวดและวัสดุฉนวนไฟฟ้าซึ่งเลือกใช้ตามการใช้งานในเครื่องจักรกลไฟฟ้า

**4.6.2 โครงสร้างของชิ้นงานทดสอบ**

แบบจำลองร่องสล็อตที่เสร็จแล้วจะประกอบไปด้วยส่วนโลหะแข็งที่เป็นฐานซึ่งยึดไปพร้อมกับตัวเทอมินอลและตัวร่องสล็อตซึ่งประกอบไปด้วยแผ่นโลหะภายนอกและภายใน โดยเจาะรูที่ฐานเพื่อแขวนขณะที่ทำการสั่น ในแต่ละร่องสล็อตนั้นจะประกอบไปด้วยขดลวด 2 ขดด้วยกันซึ่งในแต่ละขดนั้นพันไว้จำนวน 20 รอบโดยพันขนานกัน 2 เส้น ดังนั้นในแต่ละขดและในแต่ละด้านจะประกอบไปด้วยลวดจำนวน 40 เส้น หรือ 80 เส้นในแต่ละด้านนั่นเอง ซึ่งในแต่ละด้านนั้นจะมีฉนวนคั่นระหว่างขดลวดกับกราวด์ (สล็อตอินซูเลชั่น) และฉนวนคั่นระหว่างขดลวด (เฟสอินซูเลชั่น) ในกรณีที่เกิดการหลวมสามารถแก้ปัญหาได้โดยใส่สล็อตเวดจ์เพื่อทำให้แน่นขึ้นและในขั้นตอนสุดท้ายก็จะเป็นการชุบวาร์นิชเพื่อทำให้ขดลวดอยู่ตัวนั่นเอง

**4.7 กระบวนการทดสอบ**

**4.7.1 ขอบเขตของกระบวนการทดสอบ**

ในการให้ความร้อนที่เหมาะสมเพื่อที่จะเร่งอายุของระบบฉนวนให้เสื่อมสภาพเร็วยิ่งขึ้นตามลักษณะการสะสมของผลกระทบที่เกิดขึ้นจริงหลังจากการใช้งานที่ยาวนาน และในกระบวนการทดสอบนี้จะแสดงให้เห็นถึงปัจจัยที่นำไปสู่การทดสอบการวินิจฉัย (ความเค้นทางกล, ความชื้น และการใช้แรงดันไฟฟ้าหลังจากการเร่งอายุทางอุณหภูมิเพื่อตรวจสอบสภาพของระบบฉนวน) ดังนั้นในแต่ละรอบของการทดสอบและในแต่ละชิ้นงานทดสอบก็จะ ได้รับการเร่งอายุทางอุณหภูมิโดยความร้อน การทดสอบทางกล การทดสอบทางความชื้น และการทดสอบด้วยแรงดันทาง ไฟฟ้า ตามลำดับ จนกระทั่งเกิดความเสียหายที่ระบบฉนวนซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยการทดสอบด้วยแรงดันทางไฟฟ้า

จากประสบการณ์ทำให้เราทราบว่าวิธีที่ดีที่สุดสำหรับการหาค่าการเสื่อมสภาพจากความร้อนซึ่งนำไปสู่การการแตกหักหรือเสื่อมสภาพของระบบฉนวนนั้น หลังจากระบบฉนวนได้รับการเร่งอายุโดยความร้อนแล้วควรเพิ่มความเค้นทางกลเข้าไปซึ่งจะนำไปสู่การแตกของฉนวนเนื่องจากความเค้นทางกล หลังจากนั้นก็เพิ่มปัจจัยทางความชื้น โดยการให้ความชื้นแก่ระบบฉนวน และทำการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้าซึ่งเป็นขั้นตอนการทดสอบสุดท้ายของกระบวนการทดสอบ

วิธีการให้ความร้อน โดยเตาอบเป็นวิธีแม้จะเป็นวิธีที่มีข้อเสียอยู่บ้างแต่จากประสบการณ์ทำให้ทราบว่าการให้ความร้อนโดยวิธีนี้ก็เป็นวิธีที่สะดวก เหมาะสมและประหยัดเมื่อต้องการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงๆ ในการทดสอบนี้จะให้ความร้อนที่เกินกว่าระดับอุณหภูมิปกติของระบบฉนวน แต่ในการใช้งานจริงระบบฉนวนจะถูกใช้งานที่ระดับต่ำกว่าระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ อย่างไรก็ตามผลที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการใช้งานจริงข้างต้นก็ยังจะใกล้เคียงกับผลของการให้ความร้อนโดยตู้อบอยู่ ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับว่าการไหลเวียนของอากาศภายในตู้อบใกล้เคียงกับความเป็นจริงหรือไม่

**4.7.2 กระบวนการเร่งอายุโดยการให้ความร้อน**

ขนาดอุณหภูมิและช่วงเวลาที่ใช้ในการเร่งอายุฉนวนที่ใช้ในการทดสอบนั้นควรขึ้นอยู่กับลักษณะหรือจำนวนของวัตถุที่ใช้ในการทดสอบและควรทำการทดสอบที่ขนาดอุณหภูมิที่ต่างกันอย่างน้อย 3 ระดับ การคาดหมายถึงระดับความร้อนของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบนั้น ควรใช้ตามค่าที่ระบุในตารางที่ 4-1

| อุณหภูมิจำกัด | | | | | | | | จำนวนวัน/รอบ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 90°C | 105°C | 120°C | 130°C | 155°C | 180°C | 200°C | 220°C | |
| 155-165 | 170-180 | 185-195 | 195-205 | 220-230 | 245-255 | 265-275 | 285-295 | 1-2 |
| 145-155 | 160-170 | 175-185 | 185-195 | 210-220 | 235-245 | 255-265 | 275-285 | 2-3 |
| 135-145 | 150-160 | 165-175 | 175-185 | 200-210 | 225-235 | 245-255 | 265-275 | 4-6 |
| 125-135 | 140-150 | 155-165 | 165-175 | 190-200 | 215-225 | 235-245 | 255-265 | 7-10 |
| 115-125 | 130-140 | 145-155 | 155-165 | 180-190 | 205-215 | 225-235 | 245-255 | 14-21 |
| 105-115 | 120-130 | 135-145 | 145-155 | 170-180 | 195-205 | 215-225 | 235-245 | 28-35 |
| 95-105 | 110-120 | 125-135 | 135-145 | 160-170 | 185-195 | 205-215 | 225-235 | 45-66 |

***ตารางที่ 4-2 อุณหภูมิและช่วงเวลาที่ใช้ในการเร่งอายุของระบบฉนวน***

อุณหภูมิที่เลือกใช้ในการให้ความร้อนขณะทำการทดสอบควรควบคุมให้คงที่โดยอยู่ในช่วง $\pm 2°C$ (ที่อุณหภูมิ $\leq 180°C$) หรือ $\pm 3°C$ (ที่อุณหภูมิ $>180°C$)

ในตารางที่ 2 เป็นการแนะนำถึงขนาดอุณหภูมิและช่วงเวลาที่ใช้ในการเร่งอายุของระบบฉนวน ขนาดอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่ใช้ในการเร่งอายุฉนวนควรเป็นค่าที่ก่อให้เกิดอายุโดยรวมของฉนวน (log mean test life) ประมาณ 5,000 ชั่วโมงหรือมากกว่าและขนาดระดับอุณหภูมิที่สูงกว่านี้ควรมีค่าห่างระหว่างกันประมาณ 20 องศาเซลเซียส หรือมากกว่า ส่วนค่าห่างระหว่าง 10 องศาเซลเซียสนั้นควรใช้เมื่อมีการทดสอบโดยใช้ขนาดอุณหภูมิ มากกว่า 3 ระดับ และจำนวนชิ้นงานที่ใช้สำหรับการทดสอบอย่างน้อยที่สุดเป็นจำนวน 10 ชิ้น ซึ่งควรนำเข้าสู่รอบการทดสอบอย่างต่อเนื่องที่แต่ละอุณหภูมิของการทดสอบจนกระทั่งได้ข้อมูลที่พอใจหรือเกิดการเสียหายเกิดขึ้น อุณหภูมิที่ทำการทดสอบควรได้จากการนำชิ้นงานทดสอบเข้าสู่ตู้อบที่ปิดสนิท และปรับอัตราการไหลของอากาศเพื่อให้อุณหภูมิภายในตู้อบเท่ากันอย่างทั่วถึง ชิ้นงานทดสอบควรนำเข้าสู่ตู้อบที่อุณหภูมิที่ต้องการทดสอบหลังจากที่อุณหภูมิความร้อนภายในตู้อบถึงระดับที่ต้องการแล้ว ในทำนองเดียวกัน ควรนำชิ้นงานทดสอบออกจากตู้โดยตรงสู่อุณหภูมิห้อง อัตรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไหลของอากาศและอุณหภูมิภายในตู้อบควรควบคุมให้คงที่และเท่ากันในแต่ละรอบการทดสอบเพื่อให้ได้ผลการเปรียบของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบและระบบฉนวนที่ใช้อ้างอิง

ตามประสบการณ์การทดสอบที่ผ่านมา อายุโดยเฉลี่ยของระบบฉนวนที่ทดสอบในแต่ละขนาดอุณหภูมิจะมีค่าประมาณ 10 รอบการทดสอบ ดั้งนั้นในแต่ละขนาดอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบก็จะให้ค่าอายุโดยเฉลี่ยประมาณ 10 รอบการทดสอบ

**4.7.3 กระบวนการทดสอบทางกล**

หลังจากทำการเร่งอายุโดยความร้อนแล้ว เมื่อชิ้นงานทดสอบเย็นลงจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง เราจะทำการให้ความเค้นทางกลในแต่ละชิ้นงานทดสอบโดยการแขวนไว้บนบนโต๊ะสั่น เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เนื่องจากชิ้นงานทดสอบถูกแขวนจึงทำให้เกิดการเคลื่อนไหวจึงเกิดขึ้นที่มุมขวาไปสู่แผ่นรองของขดลวด ดังนั้นที่จุดสิ้นสุดของขดลวด จะถูกกระตุ้นให้เกิดการสั่น ดังที่มักจะเกิดขึ้นภายใต้แรงในแนวรัศมีที่จุดสิ้นสุดของการพันขดลวดตามที่เกิดขึ้นจริงในมอเตอร์

ช่วงความกว้างของการสั่นสะเทือนที่ใช้ในการทดสอบ คือ 0.3 มิลลิเมตรจากยอดสู่ยอด ที่ความถี่ของการสั่นเป็น 50 Hz

**4.7.4 กระบวนการทดสอบทางความชื้น**

ความชื้นในหลายๆกรณี เป็นส่วนหนึ่งของการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของฉนวน ซึ่งแตกต่างจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเนื่องจากแรงดันทางไฟฟ้า ผลของความชื้นอาจส่งผลให้เกิดการสูญเสียทางไดอิเลกตริก (Dielectric loss) และเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของฉนวน และยังอาจส่งผลต่อความคงทนของฉนวน ซึ่งความชื้นบนฉนวนยังเป็นการช่วยการทดสอบด้วยแรงดันทางไฟฟ้า เพื่อแสดงถึงรอยแตกและรูรั่วซึมในฉนวน

หลังจากการให้ความเค้นทางกลแก่ชิ้นงานทดสอบแล้วชิ้นงานทดสอบต้องได้รับความชื้นที่ความชื้นบรรยากาศ 100 เปอร์เซ็นต์ นานต่อเนื่องประมาณ 48 ชั่วโมงเป็นอย่างน้อยเพื่อที่จะทำให้ค่าความต้านทานของฉนวนถึงจุดที่เหมาะสม ในระหว่างการทดสอบนี้ต้องไม่มีการจ่ายไฟให้กับวัตถุที่ใช้ในการทดสอบ

**4.7.5 กระบวนการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้า**

การทดสอบด้วยแรงดันทางไฟฟ้าหลังจากกระบวนการทดสอบทางความชื้นเสร็จสิ้น เพื่อตรวจสอบชิ้นงานทดสอบว่าชิ้นงานที่ทดสอบถึงจุดสิ้นสุดอายุของฉนวนแล้วหรือไม่ ควรทำการทดสอบตามตารางที่ 4-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งาน | ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ ($V_{r.m.s}$) | | |
|---|---|---|---|
| | ระหว่างขดลวดกับกราวน์ | ระหว่างขดลวดบนและล่าง | ระหว่างเส้นลวดขดเดียวกัน* |
| 110-400<br>401-660<br>661-1000 | 400<br>660<br>ขึ้นอยู่กับการตัดสินใจ | 400<br>660<br>ขึ้นอยู่กับการตัดสินใจ | 110±10<br>110±10<br>ขึ้นอยู่กับการตัดสินใจ |
| *ระดับแรงดันนี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม | | | |

*ตารางที่ 4-3 แสดงขนาดแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ*

แรงดันไฟฟ้าที่ถูกใช้กับแต่ละส่วนของชิ้นงานทดสอบควรเป็นไปตามระดับแรงดันที่กำหนดตามตารางที่ 4-3 ตามแต่ละที่ระบบฉนวนนั้นได้ระบุไว้ แรงดันไฟฟ้าที่นอกเหนือจากขนาด 660 โวลต์ สามารถนำมาใช้ในการทดสอบได้ เช่นการใช้ขนาดแรงดัน 600 โวลต์ ในการทดสอบ ซึ่งระดับแรงดันอื่นๆอาจถูกใช้ตามความเหมาะสมเพื่อที่จะชี้จุดสิ้นสุดอายุของระบบฉนวน

ในการทดสอบในแต่ละรอบควรทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าเป็นเวลา 10 นาที ในขณะที่ชิ้นงานทดสอบยังคงเปียกเนื่องจากผลของความชื้นอยู่ การทดสอบแรงดันควรเริ่มต้นที่ระหว่างเส้นลวดตัวนำในขดเดียวกัน (wire to wire) หลังจากนั้นทดสอบที่ระหว่างขดลวดกับขดลวด (phase to phase) และสุดท้ายทำการทดสอบที่ระหว่างขดลวดกับกราวนด์ (winding to ground)

แรงดันระหว่างเส้นลวดขดเดียวกันที่ใช้สำหรับการทดสอบนั้นอาจเป็นค่าที่มีขนาดเท่ากับแรงดันที่ใช้งานจริงก็ได้ ซึ่งหากทำการทดสอบตามเงื่อนไขนี้จำเป็นต้องมีการบันทึกในรายงานการทดสอบด้วย

**4.8 บรรทัดฐานของการเกิดการเสียหาย**

ความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการตรวจสอบด้วยแรงดันไฟฟ้าสามารถบอกได้โดยการเปิดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ การเกิดการกระเด็นเล็กน้อยหรือการเกิดประกายไฟที่ผิว ไม่ถือว่าเป็นการเกิดการเสียหายแต่ควรมีการบันทึกไว้ในรายงานการทดสอบ

การเกิดการเสียหายที่ส่วนประกอบใดๆของระบบฉนวนที่เกิดขึ้นตลอดทั่วทั้งขดลวดถือเป็นจุดสิ้นสุดอายุของระบบฉนวน

เราสามารถประมาณเวลาการเกิดการเสียหายได้โดยถือว่า การเกิดการเสียหายนั้นเกิดที่จุดกึ่งกลางระหว่างช่วงรอบการทดสอบที่ยังไม่เกิดการเสียหายเกิดขึ้นกับรอบการทดสอบที่เกิดการเสียหายเกิดขึ้นยกตัวอย่างเช่นการเกิดการเสียหายในรอบที่ 11 เราจะถือว่าจุดสิ้นสุดอายุของฉนวนคืออรอบที่ 10.5 และช่วงเวลาทั้งหมดก็คือตั้งแต่รอบแรกจนถึงรอบที่ 10.5 นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**4.9 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ**

**4.9.1 การเปรียบเทียบ**

การเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้เพื่อที่จะกำหนดระดับอุณหภูมิสามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบรูปกราฟที่ได้จากการทดสอบซึ่งจะอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ของค่าอายุโดยรวมในรูปของลอการิทึมกับขนาดอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งการเปรียบเทียบผลการทดสอบนั้นสามารถดูได้จากการแปลความหมายของข้อมูล ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 8

**4.9.2 ความไม่เป็นเชิงเส้นหรือความไม่คล้ายคลึงกันของกราฟ**

ความไม่เป็นเชิงเส้นหรือความไม่คล้ายคลึงกันของกราฟอาจเกิดขึ้นเมื่อระบบฉนวนถูกเร่งอายุโดยระดับอุณหภูมิที่สูงเกินไปซึ่งจะเห็นว่าเส้นกราฟที่ได้จะมีลักษณะที่ตั้งชันหรือโก่งงอ ซึ่งแนวทางในการแก้ไขก็คือ การลดอุณหภูมิต่ำสุดที่ใช้ในการทดสอบลงไปอย่างน้อยประมาณ 10 °C

**4.10 โครงสร้างแบบจำลองร่องสล็อต**

**4.10.1 คำแนะนำทั่วไป**

**4.10.1.1 วัสดุที่นำมาใช้**

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

**4.10.1.2 ขนาดของวัสดุตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ**

- ขนาดของวัสดุตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบควรประมาณขนาดที่ใช้ตามการใช้งานในเครื่องจักรกล ระยะครีพเอจ (creepage distance), ความหนาของวัสดุที่ใช้เป็นฉนวน และที่ว่างอากาศควรเหมือนหรือใกล้เคียงกับการใช้งานในเครื่องจักรกล

**4.10.1. 3 โครงสร้าง**

ขดลวดสองขดถูกใส่เข้าไปในคู่ร่องสล็อตที่เหมือนกันซึ่งเป็นส่วนประกอบที่จำเป็นของแบบจำลองร่องสล็อต ร่องสล็อตถูกสร้างจากแผ่นสแตนเลสในรูปแบบโดยประมาณและถูกยึดอยู่บนฐานของแบบจำลองร่องสล็อต อินซูเลเตอร์หรือเทอมินอลทั้ง 4 ชิ้นจะถูกยึดอยู่บนฐานของแบบจำลองร่องสล็อต ดูในรูปที่ 4-3 แสดงแบบจำลองร่องสล็อตที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์

ขดลวดทั้งสองขดนั้นได้จากการพันด้วยลวดตัวนำสองเส้นขนานกัน จำนวนรอบควรจะประมาณให้พอดีกับร่องสล็อตโดยให้เหมือนกับการใช้งานในเครื่องจักรกล

ขดลวดทั้งสองขดถูกต่อเข้ากับอินซูเลเตอร์หรือเทอมินอลเพื่อให้ง่ายในการทดสอบแรงดันระหว่างขดลวดกับกราวด์, ระหว่างขดลวดกับขดลวด และระหว่างลวดตัวนำในขดเดียวกัน

แบบจำลองร่องสล็อตไม่สามารถจำลองผลกระทบจากกระบวนการผลิตจริง เช่นเทคนิคในการพันขดลวด เนื่องจากผลกระทบจากกระบวนการผลิตนั้นมีค่าน้อยมาก แบบจำลองร่องสล็อตอาจจะประกอบด้วยมือเพราะง่ายและสะดวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองร่องสล็อตมีประโยชน์ในการหาค่าการเปรียบเทียบของวัสดุที่ถูกนำมาใช้ในระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ

**4.10.2 รายละเอียดของโครงสร้างแบบจำลองร่องสล็อต**

ในห้องทดสอบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบของแบบจำลองร่องสล็อตที่กำหนดไว้ อาจจะสร้างขึ้นเพื่อปรับปรุงหรือเพื่อให้สะดวกมากยิ่งขึ้นที่จะสร้างเป็นวัตถุทดสอบ คำแนะนำที่แสดงรายละเอียดในภาคผนวกนี้อาจจะไม่มีความจำเป็น อย่างไรก็ตามถ้าประสบการณ์ที่ผ่านมาในการหาค่าฉนวนไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หรือถ้าความพยายามทั้งหลายที่จะสร้างการเปรียบเทียบข้อมูลทดสอบระหว่างการทดสอบ โครงสร้างของแบบจำลองร่องสลอตที่ได้แสดงรายละเอียดในภาคผนวกนี้ควรปฏิบัติตามอย่างพิถีพิถัน ประสบการณ์ได้แสดงให้เห็นว่าเพียงการพิถีพิถันในการออกแบบและการเตรียมแบบจำลองร่องสล็อตจะมีผลต่อวัสดุตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งสามารถนำไปทดสอบในห้องทดสอบที่ต่างกันด้วยผลกระทบที่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้

การออกแบบแบบจำลองร่องสล็อตซึ่งมีการนำมาใช้และใช้กันเมื่อหลายปีมาแล้วในห้องทดสอบที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลกระทบที่ทำให้เปลี่ยนแปลงได้ง่าย

รูปที่แสดงรายละเอียดแบบจำลองร่องสล็อต

- รูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบทั้งหมดของแบบจำลองร่องสล็อตก่อนทำการประกอบ รวมทั้งวัสดุที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้า, ขดลวด และส่วนประกอบที่เป็นโลหะ
- รูปที่ 2 แบบจำลองร่องสล็อตที่ประกอบสมบูรณ์แล้ว
- รูปที่ 3 ส่วนประกอบที่เป็นโลหะของเฟรมและฐานของแบบจำลองร่องสล็อตก่อนทำการประกอบ

แบบจำลองร่องสล็อตที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์แล้วก็จะประกอบด้วยฐานโลหะรองรับที่มีความแข็งสำหรับยึดเทอมินอลที่ทำจากโพซีเลนหรือวัสดุอื่นๆที่เหมาะสม และยึดร่องสล็อตทั้งสองที่ประกอบขึ้นมาจากแผ่นโละภายในและภายนอก ฐานรองรับมีรูไว้สำหรับแขวนแบบจำลองร่องสล็อตขณะที่ทำการทดสอบการสั่นสะเทือน ร่องสล็อตที่นำมาใช้ได้สะดวกจะทำมาจากแผ่นโลหะสแตนเลส ร่องสล็อตที่ประกอบขึ้นภายในจะบรรจุขดลวดสองขด โดยมีฉนวนคั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรม (slot insulation) ฉนวนคั่นระหว่างขดลวดทั้งสอง (phase insulation) และยึดให้ติดอยู่กับที่ด้วยลิ่ม (slot wedges) ส่วนประกอบเหล่านี้เป็นส่วนที่เหมือนกันกับที่ใช้ในมอเตอร์ ขดลวดแต่ละขดนั้นได้จากการพันลวดตัวนำสองเส้นขนานกันดังนั้นการทดสอบแรงดันระหว่างลวดตัวนำกับลวดตัวนำอาจสามารถทดสอบได้ การพันขดลวดของเครื่องจักรกลนั้นสามารถพันลงในแบบที่ต้องการได้ เมื่อมีความเหมาะสมแล้วโครงสร้างและกระบวนการในการสร้างอาจจะถูกปรับปรุงจำลองให้ตรงกับความตั้งใจในการนำไปใช้

**4.10.3 ส่วนประกอบของแบบจำลองร่องสล็อต**

1) ลวดตัวนำขนาด 1.12 มิลลิเมตร หุ้มด้วยแผ่นฟิล์มหนา เกรด 2
2) ฉนวนคั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรม (slot insulation) แผ่นฉนวนหนา 0.25 มิลลิเมตร ตัดออกมาเพื่อทำเป็นม้วน โดยมีความกว้างทั้ง 4 ด้าน 70 มิลลิเมตรและพับขอบ 2 ด้านเข้ามา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านละ 3.2 มิลลิเมตร สุดท้ายด้านทั้งสองก็จะเหลือความยาว 64 มิลลิเมตร และมีส่วนที่ยื่นออกมาจากขอบสล็อต 4.8 มิลลิเมตร

3) ฉนวนคั่นระหว่างขดลวดทั้งสอง (phase insulation) แผ่นฉนวนบาง 0.25 มิลลิเมตร ประกอบด้วยส่วนที่เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความยาว 75 มิลลิเมตร กว้าง 64 มิลลิเมตร และมีช่องว่างตรงกลางซึ่งมีความกว้าง 38 มิลลิเมตร เมื่อวัดจากจุดกึ่งกลาง ทำให้เหลือขอบกว้าง 13 มิลลิเมตร สำหรับส่วนที่เป็นส่วนโค้งที่ต่อกับด้านกว้างของสี่เหลี่ยมผืนผ้าทั้งสองด้าน ตัดส่วนโค้งโดยใช้ด้านกว้างทั้งสองด้านของสี่เหลี่ยมผืนผ้า 64 มิลลิเมตรเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของขอบนอก และตัดส่วนโค้งที่เป็นขอบในซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 มิลลิเมตร เมื่อวัดจากจุดกึ่งกลางของสี่เหลี่ยมผืนผ้า

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

5) ปลอกปลายสาย (sleeving) ปลอกปลายสายที่เป็นฉนวน มีขนาดและความยาวพอดีที่จะหุ้มปลายสายของขดลวดที่ยื่นออกมาจากจุดกึ่งกลางของสล็อตเพื่อแบ่งขดลวดทั้งสองขดต่อเข้ากับเทอมินอล

6) เชือก (tie cord) มีความยาวพอดีที่จะใช้มัดขดลวดกับปลายสายของขดลวดเข้าด้วยกัน

7) เทปพันขดลวด เทปที่มีระดับทางไฟฟ้า กว้าง 13 มิลลิเมตร

8) วาร์นิชหรือเรซินที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้า อธิบายอยู่ใน IEC 455 หรือ IEC 464

วัสดุทั้งหมดที่กล่าวไปข้างต้นเป็นส่วนประกอบของระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบหรือระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่ใช้อ้างอิง

**4.10.4 การประกอบแบบจำลองร่องสล็อต**

1) การพันขดลวด ขดลวดแต่ละขดควรมีการพันที่แน่น โดยมีรูปร่างคล้ายรูปไข่ ด้านที่ขนานกันมีความยาว 64 มิลลิเมตร และห่างกัน 44 มิลลิเมตร ส่วนโค้งของรูปไข่เป็นครึ่งวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 44 มิลลิเมตร ขดลวดแต่ละขดประกอบด้วยการพันลวดตัวนำ 2 เส้นด้วยมือจำนวน 20 รอบ (40 เส้น) เมื่อใส่ขดลวดทั้งสองลงในร่องสล็อต นั่นก็หมายความว่าในแต่ละร่องสล็อตจะมีลวดตัวนำ 80 เส้น และได้ส่วนปลายสายของขดลวดแต่ละขดออกมา 4 เส้น และปลายสายด้านใดด้านหนึ่งของลวดตัวนำเส้นเดียวกันจะถูกตัดออกโดยเหลือความยาวเส้นละ 5 มิลลิเมตรออกมาจากขดลวดใกล้กับตรงกลางด้านหนึ่งของครึ่งวงกลม ส่วนที่เหลือ 5 มิลลิเมตรนี้จะถูกพันให้อยู่กับที่ด้วยเทปพันขดลวด ซึ่งเป็นปลายสายที่ไม่ได้นำไปต่อกับเทอมินอลโดยพันห่างกันอย่างน้อยที่สุด 5 มิลลิเมตร และส่วนของปลายสาย 2 เส้นที่เหลือออกมาจากขดลวดจะมีการใส่ปลอกปลายสาย ปลายสายและปลอกปลายสายจะถูกมัดเข้าด้วยกันด้วยเชือก โดยแสดงในรูปที่ 4-3

2) การทำความสะอาดและประกอบชิ้นส่วนที่เป็นโลหะ ก่อนที่จะทำการประกอบชิ้นส่วนที่เป็นโลหะของแบบจำลองร่องสล็อตแต่ละชิ้นจะถูกจุ่มลงในตัวทำละลายที่ประกอบด้วยโทลู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีนและแอลกอฮอล์สังเคราะห์ในอัตราส่วนที่เท่ากันเป็นเวลาอย่างน้อยที่สุด 30 นาที เมื่อนำแต่ละชิ้นส่วนออกจากตัวทำละลาย และล้างออกด้วยตัวทำละลายบริสุทธิ์แล้วเช็ดให้แห้งด้วยผ้าสำลี ส่วนประกอบที่เป็นโลหะของแบบจำลองร่องสล็อตควรประกอบด้วยความระมัดระวังเพื่อให้มั่นใจว่าตรงส่วนที่เป็นร่องสล็อตมีระยะห่างเท่ากันและด้านทั้งสองขนานกัน เพื่อความง่ายในการประกอบให้ตัดชิ้นไม้ที่มีขนาดเท่ากับความกว้างของร่องสล็อตและพื่อให้สล็อตอยู่ตรงกลางควรใส่ชิ้นไม้ในร่องสล็อตก่อนที่จะทำการอัดนอตให้แน่น

3) การใส่ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรม ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรมจะถูกตัดออกมาแล้วม้วนให้พอดีกับร่องสล็อต และให้มีส่วนของฉนวนยื่นออกมาจากขอบร่องสล็อตด้านละ 5 มิลลิเมตร ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรมจะถูกใส่เข้าไปในร่องสล็อตอย่างระมัดระวังเพื่อให้ส่วนของฉนวนที่ยื่นออกมาจากขอบร่องสล็อตแต่ละด้านเท่ากัน

4) การใส่ขดลวด ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรมจะถูกม้วนออกมาเหนือส่วนที่มีลักษณะคล้ายฟันปลาตรงด้านบนของร่องสล็อตเพื่อให้มั่นใจว่าขดลวดจะไม่ถลอกเมื่อใส่ลงไปในร่องสล็อต ใส่ขดลวดขดล่างลงในร่องสล็อตให้ปลายสายที่ไม่ต่อกับเทอมินอลอยู่ด้านล่างส่วนที่ใช้ต่อกับเทอมินอลอยู่ด้านบน หลังจากใส่ขดลวดขดล่างแล้ว ใส่ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสอง และระมัดระวังในการใส่เพื่อให้มั่นใจว่าฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองปิดทับขดลวดขดล่างทั้งหมดถ้าฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองมีขนาดใหญ่มากขอบของฉนวนจะถูกพับขึ้นไปทางด้านบนของร่องสล็อต ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองจะต้องมีขนาดและวางในตำแหน่งที่แน่ใจว่าปิดทับขดลวดขดล่างทั้งหมด ปลายของขดลวดขดล่างจะต้องวางในแนวราบเพื่อหลีกเลี่ยงการทำให้ขอบของฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองเสียหาย การใส่ขดลวดขดบนก็ทำในลักษณะเดียวกันกับการใส่ขดลวดขดล่าง แต่ปลายที่ไม่ได้ต่อกับเทอมินอลอยู่ด้านบนและส่วนที่ใช้ต่อกับเทอมินอลอยู่ด้านล่าง จัดขอบของขดลวดขดบนให้อยู่ในตำแหน่งเดียวกับขดลวดขดล่างเพื่อแน่ใจว่าลวดตัวนำของขดลวดขดบนไม่เลื่อนออกมานอกฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสอง

5) การต่อปลายสายกับเทอมินอล ปลายสายจะต้องวัดขนาดให้พอดีที่จะต่อเข้ากับเทอมินอล ปอกส่วนปลายของปลายสายออก 13 มิลลิเมตรแล้วทำการบัดกรีก่อนที่จะต่อเข้ากับเทอมินอล ปลายสายของขดลวดขดล่างต่อเข้ากับเทอมินอลที่อยู่ด้านใน ส่วนปลายสายของขดลวดขดบนต่อเข้ากับเทอมินอลที่อยู่ด้านนอก ถ้าขดลวดที่ใส่เข้าไปในฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรมเกิดเลื่อนให้ใส่ลิ่มเข้าไปโดยให้อยู่บนฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรม

6) การทดสอบทางไฟฟ้า วัดความต้านทานของขดลวดถ้าต้องการและแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการวัดความต้านทานได้แนะนำไว้ในข้อ 3.4.3 ถ้าพบว่าขดลวดผ่านการทดสอบ ก็ทำการชุบวาร์นิชหรือเรซินที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) การชุบวาร์นิชหรือเรซิน น้ำยาวาร์นิชหรือเรซินควรมีการนำมาใช้ในลักษณะเดียวกันกับที่ใช้ในเครื่องจักรกลทั่วไป

8) การติดตั้งแบบจำลองร่องสล็อต แบบจำลองร่องสล็อตควรบรรจุอยู่ในภาชนะ ซึ่งภาชนะนั้นจะต้องมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรองรับน้ำหนักแบบจำลองร่องสลอตจำนวน 10 ชิ้นหรือ 20 ชิ้นในกรณีที่ทดสอบพร้อมกัน โดยที่ภาชนะนั้นต้องมีระยะห่างระหว่างแบบจำลองร่องสล็อตที่เพียงพอต่อการไหลเวียนของอากาศ และขนาดของภาชนะนั้นควรที่จะสามารถนำเข้าตู้อบ ตู้อบไอน้ำและโต๊ะสั่นได้

**4.11 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบทางความชื้น**

**4.11.1 ตู้อบไอน้ำ**

สภาพบรรยากาศภายในตู้อบไอน้ำที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 เปอร์เซ็นต์จะมีไอน้ำมาเกาะบริเวณผนังของตู้อบไอน้ำ ถาดที่รองรับน้ำจะมีเครื่องทำความร้อนจุ่มอยู่เพื่อให้ความร้อนแก่น้ำให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 5 ถึง 10 องศาเซลเซียสจากอุณหภูมิห้อง ฝาครอบของตู้อบไอน้ำควรไม่มีการฉนวนและควรไม่มีความลาดเอียงเพื่อป้องกับการหยดของหยดน้ำลงบนวัตถุทดสอบ ภายในของตู้อบไอน้ำควรสร้างด้วยวัสดุที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อน ควรหลีกเลี่ยงจุดต่อที่ไม่ใช่โลหะ ฝาเปิดควรสร้างให้มีขอบยื่นออกมาเพื่อที่จะให้ความชื้นที่อยู่รอบๆฝาปิดถ่ายเทเข้าสู่ภายในตู้อบ

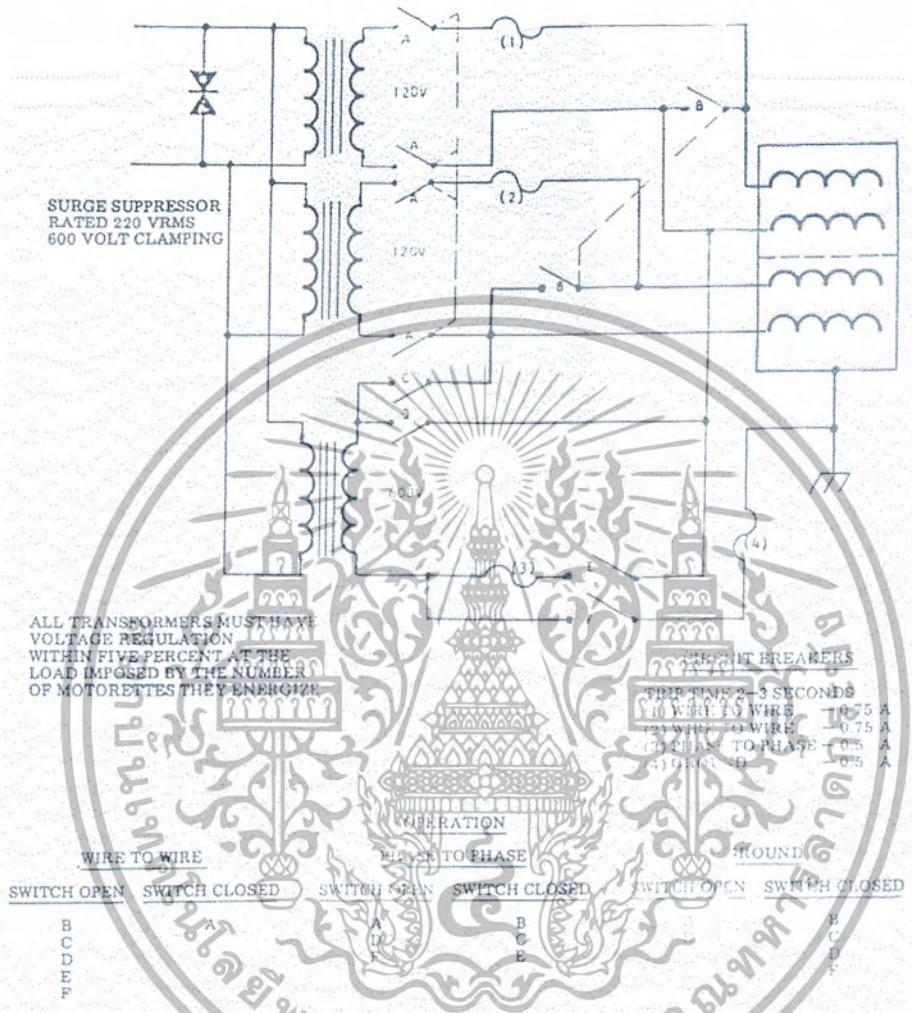
**4.11.2 ตู้อบไอน้ำสำหรับวัตถุทดสอบที่เย็นตัวลง (ที่อุณหภูมิห้อง)**

ฐานของวัตถุทดสอบควรติดตั้งโดยให้ตัววัตถุทดสอบเย็นกว่าอากาศที่อยู่รอบๆ เพื่อให้แน่ใจว่าระบบฉนวนมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดที่ทำให้เกิดไอน้ำของอากาศ รูปที่ 4-5 แสดงบล็อคไดอะแกรมการสร้างตู้อบไอน้ำ ภาชนะที่ใส่วัตถุทดสอบอยู่ในลิ้นชักของตู้อบไอน้ำซึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ 4-6โดยถูกทำให้เย็นโดยตัวทำความเย็น (น้ำ) ตัวทำความเย็นเป็นตัวควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งซึ่งได้กำหนดไว้โดยให้มีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของวัตถุทดสอบกับอุณหภูมิของอากาศที่อยู่ภายในตู้อบ ทำให้มีไอน้ำเกาะที่วัตถุทดสอบ ความแตกต่างนี้ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิห้องที่เปลี่ยนแปลง เมื่อถาดรองรับน้ำและตัวทำความเย็นเป็นตัวควบคุมอุณหภูมิและมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของวัตถุทดสอบกับอุณหภูมิของอากาศที่อยู่ภายในตู้อบนี้ถูกจำกัดด้วยปริมาตรของตู้อบไอน้ำ

การควบคุมอุณหภูมิต้องระวังเหตุการณ์การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิห้องจนถึงระดับเดียวกันกับอุณหภูมิน้ำ ซึ่งความร้อนที่สูญเสียให้แก่ภาชนะที่ให้ความเย็นแก่วัตถุทดสอบสามารถทดแทนได้โดยการให้ความร้อนแก่น้ำ ซึ่งก็จะทำให้เกิดความสมดุลของอุณหภูมิทั่วทั้งตู้อบไอน้ำตามที่กำหนด ถ้าอุณหภูมิห้องลดระดับลงจนต่ำกว่าภาชนะที่ให้ความเย็นแก่วัตถุทดสอบสามารถควบคุมอุณหภูมิได้โดยการให้ความร้อนแก่น้ำโดยเครื่องทำความร้อน เพื่อให้มีความชัดเจนยิ่งขึ้นในการมีไอน้ำเกิดขึ้น ซึ่งนี่ก็คือการทำงานร่วมกันของการให้ความร้อนและความเย็นแก่ระบบเพื่อให้เกิดความสมดุล ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งต่อการควบคุมอุณหภูมิของตู้อบไอน้ำ ภายในตู้อบ

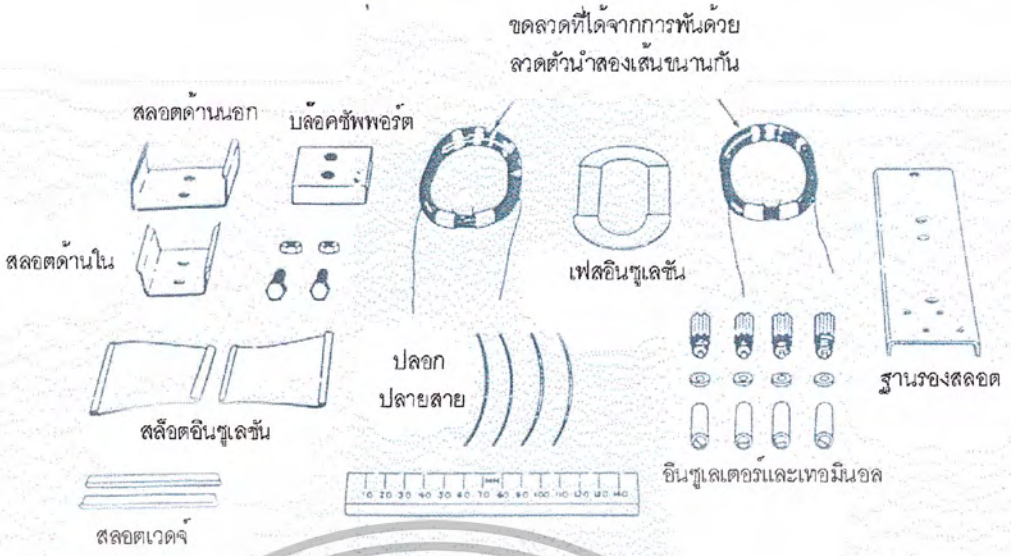
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอน้ำควรถูกออกแบบให้ระยะห่างของวัตถุทดสอบทั้งหมดกับน้ำและระยะห่างของวัตถุทดสอบกับตู้อบไอน้ำมีขนาดเท่ากัน ซึ่งก็จะทำให้แต่ละวัตถุทดสอบได้รับปัจจัยเช่น การเกาะของไอน้ำที่ผิววัตถุทดสอบ อุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในระดับที่เท่ากัน

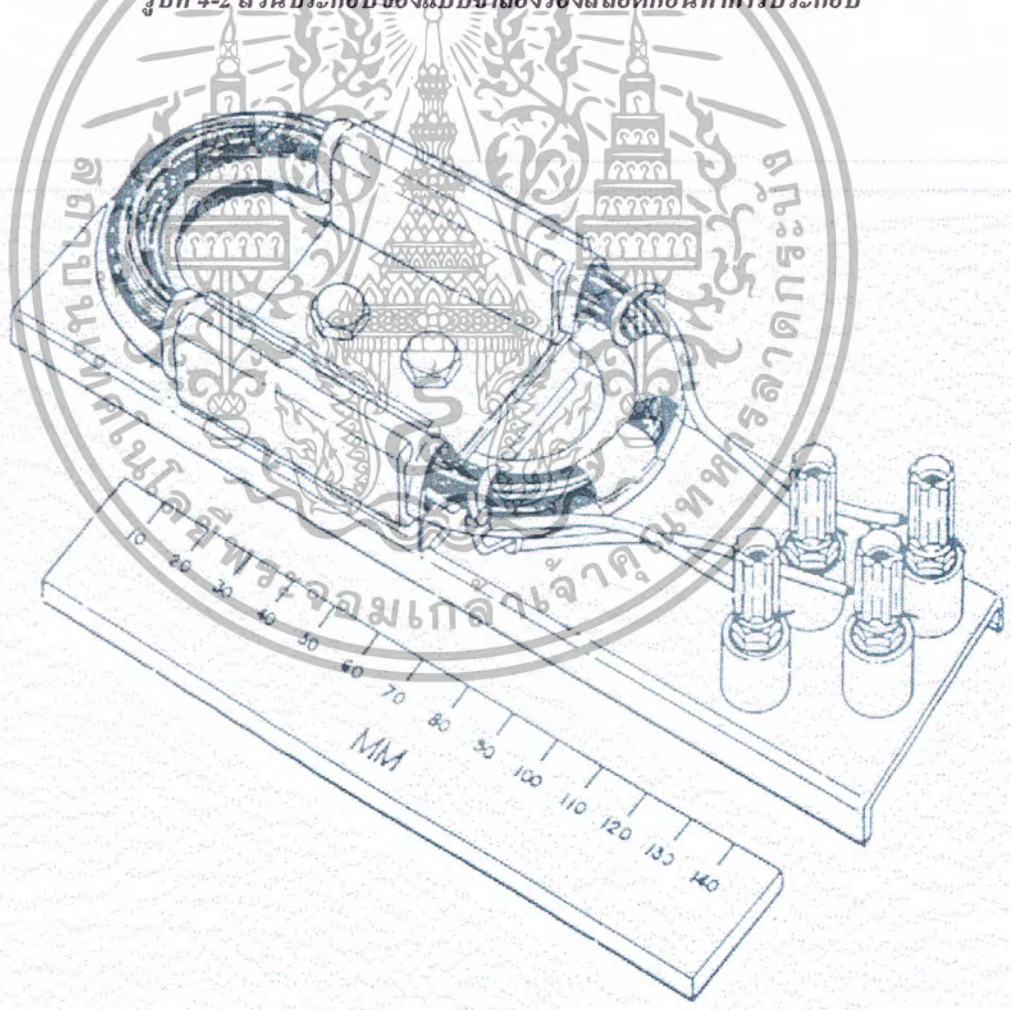



*รูปที่ 4-1 แสดงวงจรไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยด้วยแรงดัน*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

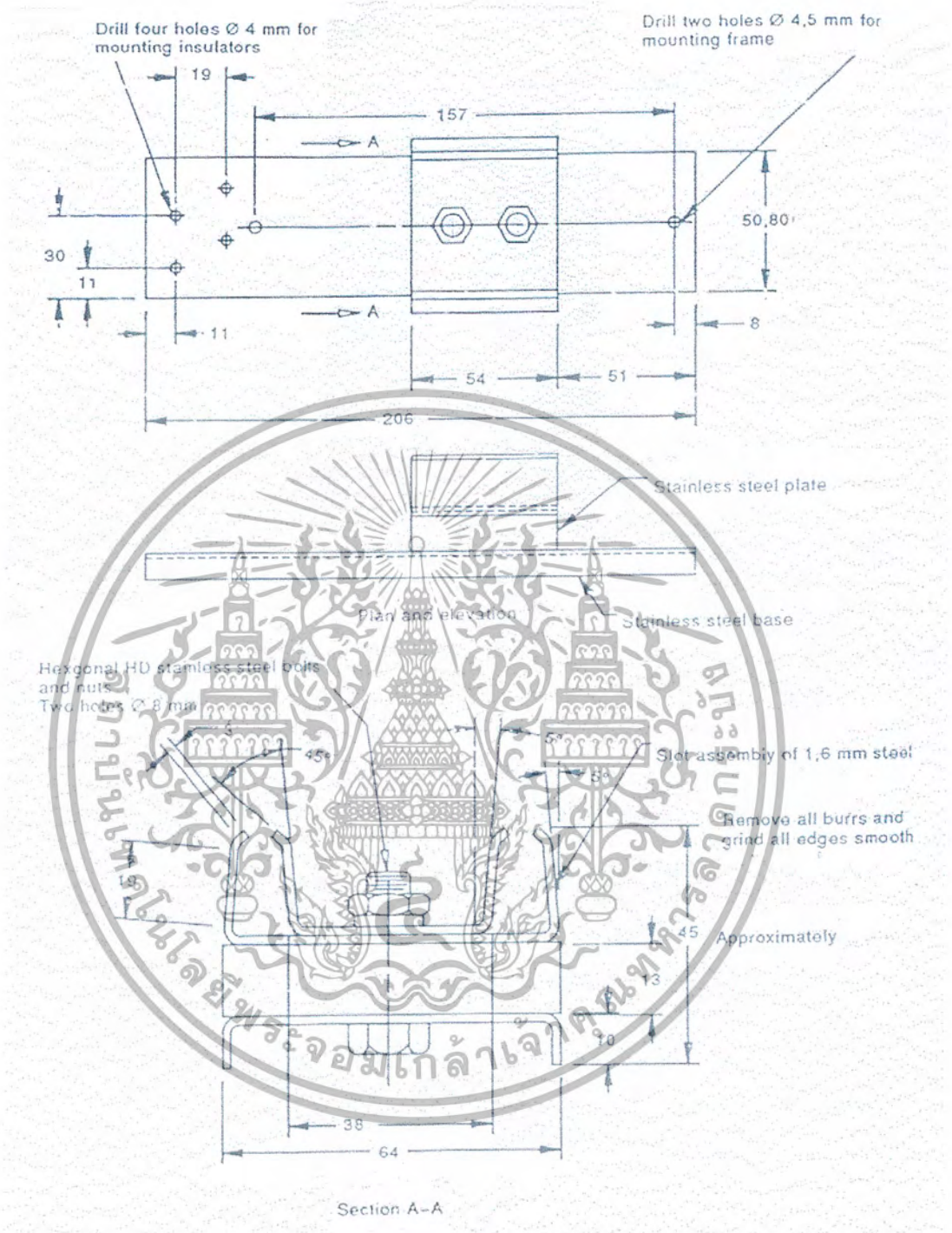



*รูปที่ 4-2 ส่วนประกอบของแบบจำลองร่องสล็อตก่อนทำการประกอบ*



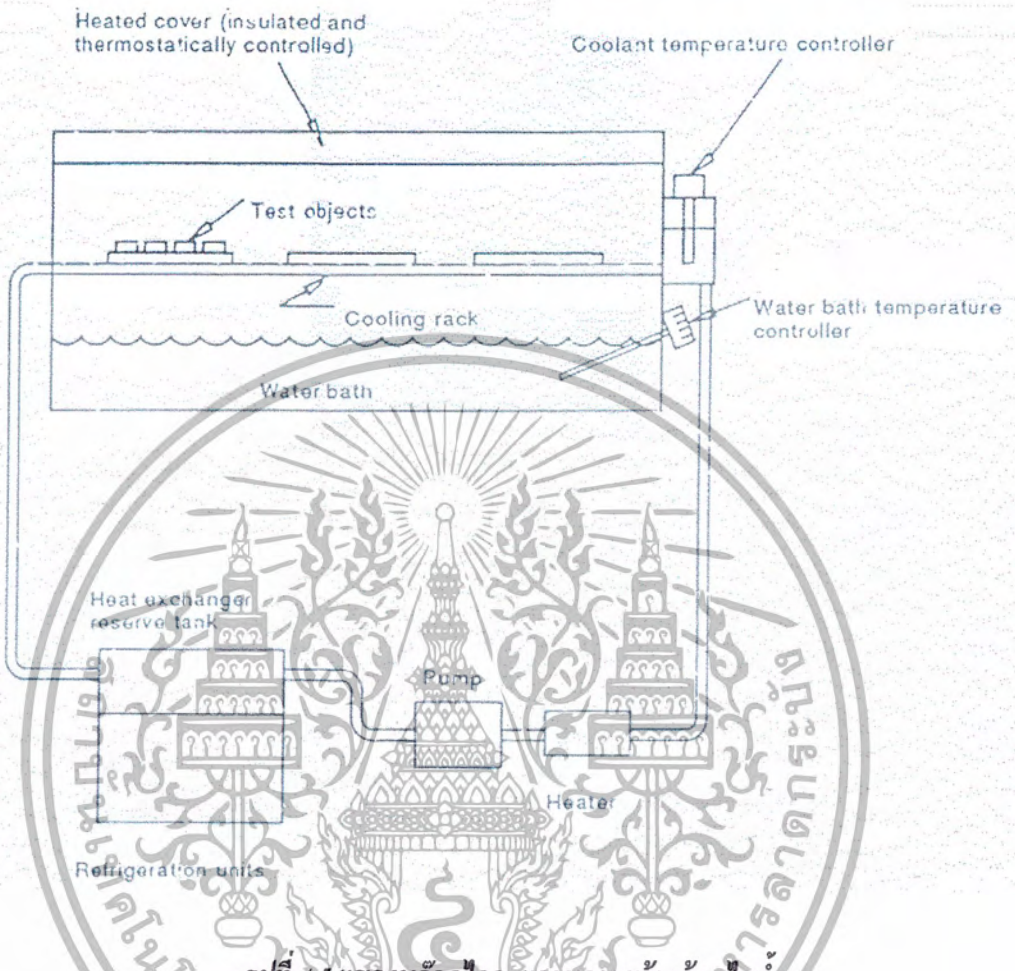

*รูปที่ 4-3 แบบจำลองร่องสล็อตที่ประกอบเสร็จแล้วและผ่านการชุบวาร์นิช*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



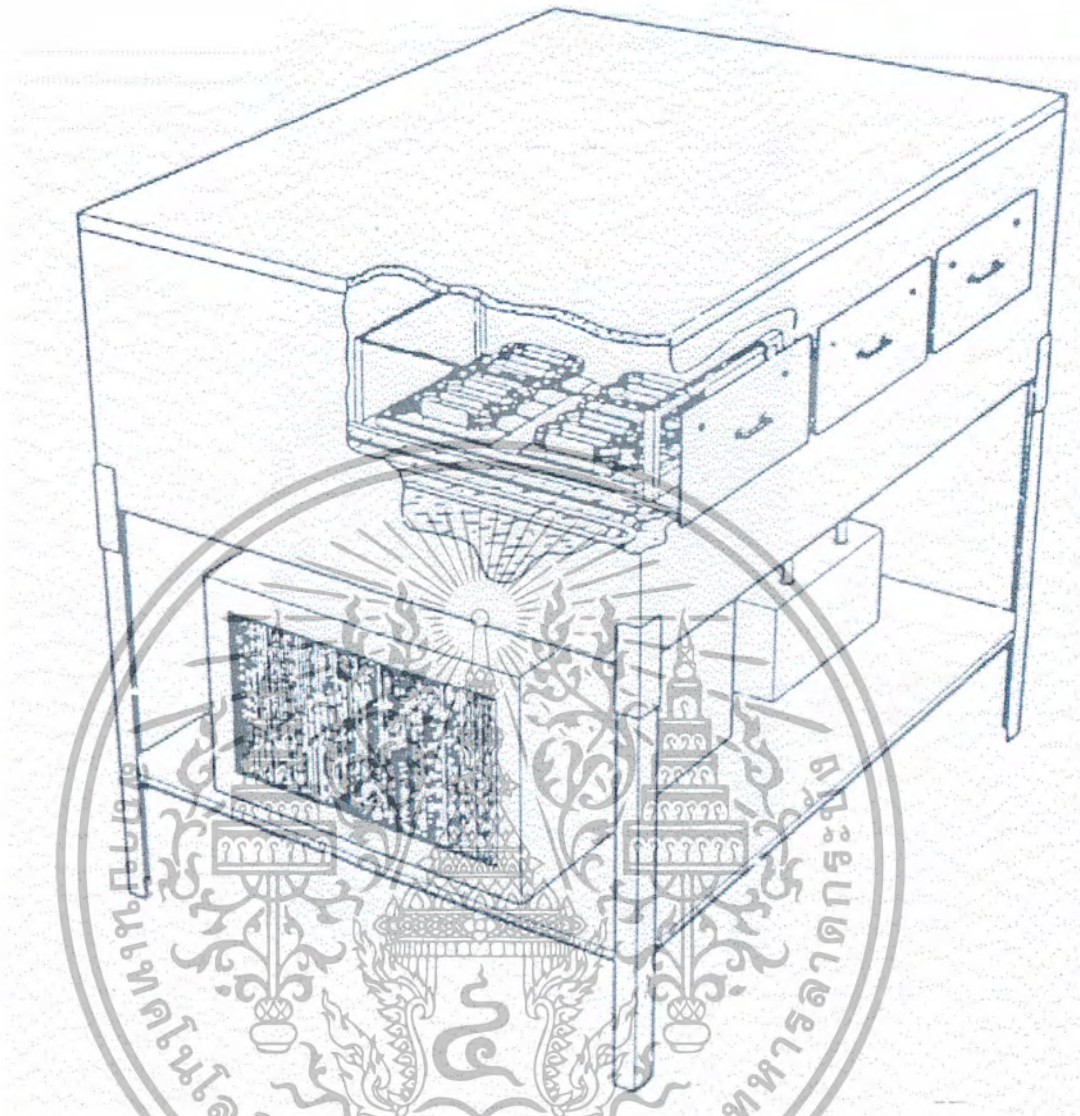

***รูปที่4-4 แสดงการสร้างเฟรมของแบบจำลองร่องสล็อต***

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




*รูปที่ 4-5 แสดงบล็อคไดอะแกรมการสร้างตู้อบไอน้ำ*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



*รูปที่ 4-6 แสดงตู้อบไอน้ำสำหรับวัตถุทดสอบที่เย็นตัวลง (ที่อุณหภูมิห้อง)*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 5
# การทดสอบและผลการทดสอบระบบฉนวนทางไฟฟ้า

## 5.1 ขอบเขตการทดสอบ

กระบวนการทดสอบนี้เป็นการทดสอบระบบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าแหนี่ยวนำที่ใช้การพันแบบ wire-wound windings โดยใช้แบบจำลองร่องสล็อตตามมาตรฐาน IEC 34-18-21

## 5.2 จุดประสงค์การทดสอบ

จุดประสงค์การทดสอบนี้ก็เพื่อที่จะสร้างวิธีการทดสอบให้มีความเหมาะสมตามที่มาตรฐานได้กำหนด เพื่อนำไปสู่การทดสอบระบบฉนวนทางไฟฟ้าเพื่อการจัดระดับความร้อนของระบบฉนวนทางไฟฟ้า

## 5.3 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบ

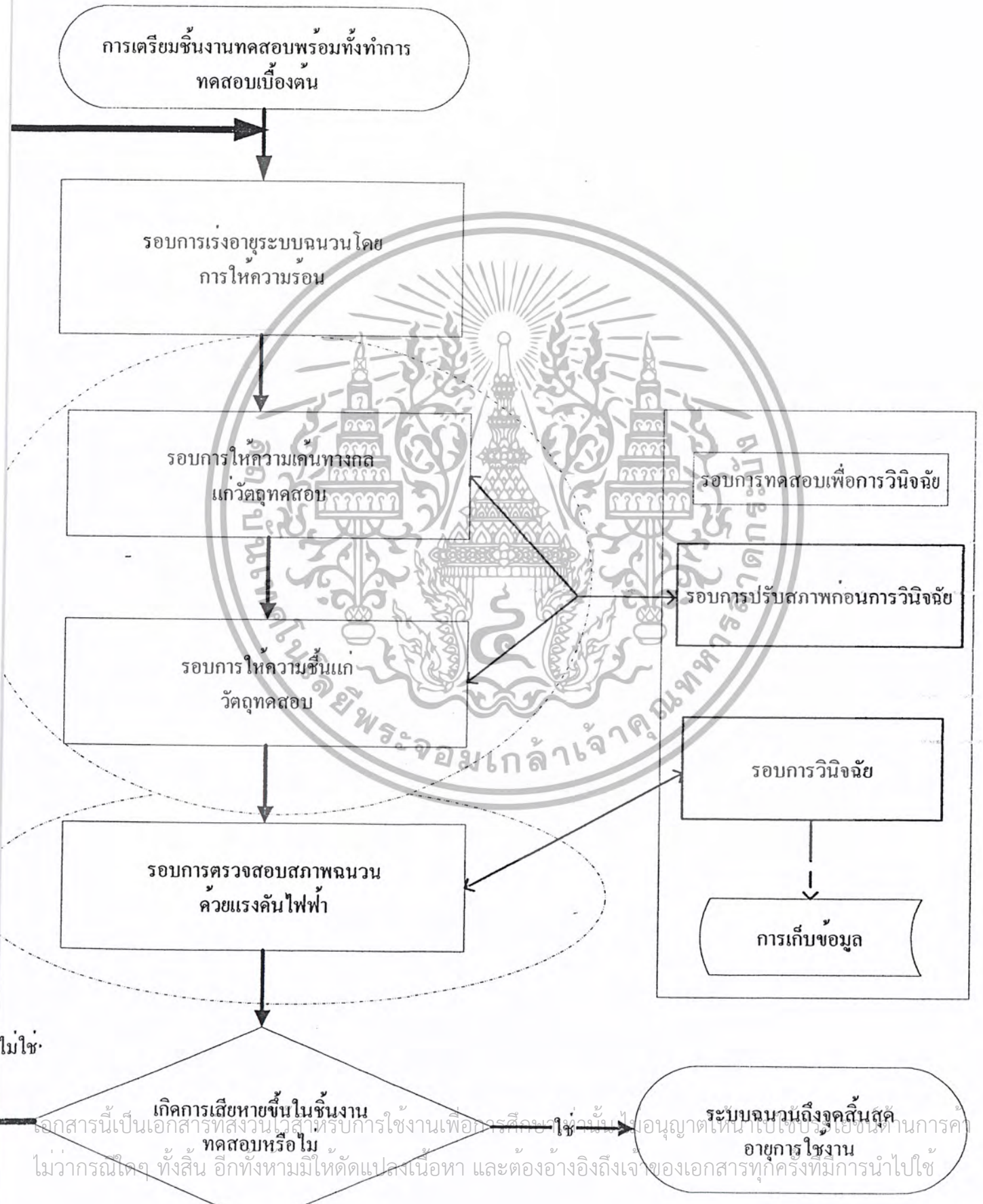
1) แบบจำลองร่องสล็อต
2) เตาอบ
3) โต๊ะสั่น
4) ตู้อบไอน้ำ
5) อุปกรณ์ทดสอบทางแรงดันไฟฟ้า

## 5.4 วิธีดำเนินการทดสอบ

การทดสอบนี้จะเป็นการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ ระหว่างระบบฉนวน 2 ระบบภายใต้สภาวะการทดสอบเดียวกันทั้งหมด คือ ระบบฉนวนที่นำมาทดสอบและระบบฉนวนที่ใช้อ้างอิง หลังจากที่ทำการเตรียมวัตถุทดสอบและทำการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยเบื้องต้นแล้วก็จะเข้าสู่รอบย่อยของการเร่งอายุโดยความร้อนตามขนาดอุณหภูมิและช่วงเวลาที่ได้เลือกไว้ หลังจากนั้นก็จะเข้าสู่ขั้นตอนรอบย่อยของการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยซึ่งก็จะประกอบไปด้วย การปรับสภาพก่อนการวินิจฉัยเพื่อเพิ่มประสิทธิผลของการทดสอบเพื่อการวินิจฉัย ซึ่งก็จะประกอบไปด้วยการปรับสภาพก่อนการวินิจฉัยโดยการให้ความเค้นทางกลและหลังจากนั้นก็จะเป็นการปรับสภาพก่อนการวินิจฉัยโดยการให้ความชื้น และการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยตามบรรทัดฐานการเกิดการเสียหายซึ่งในที่นี้ก็คือ การทดสอบด้วยแรงดันฟ้านั่นเองซึ่งในขั้นตอนนี้ก็จะมีการเก็บข้อมูลของกระแสรั่ว หลังจากนั้นก็จะทำการทดสอบวนรอบอย่างนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดการเสียหายขึ้นจนครบทุกชิ้นนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**5.5 แสดงขั้นตอนของกระบวนการทดสอบ**




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# รูปแบบกระบวนการทดสอบเพื่อการจัดระดับอุณหภูมิของระบบฉนวนทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

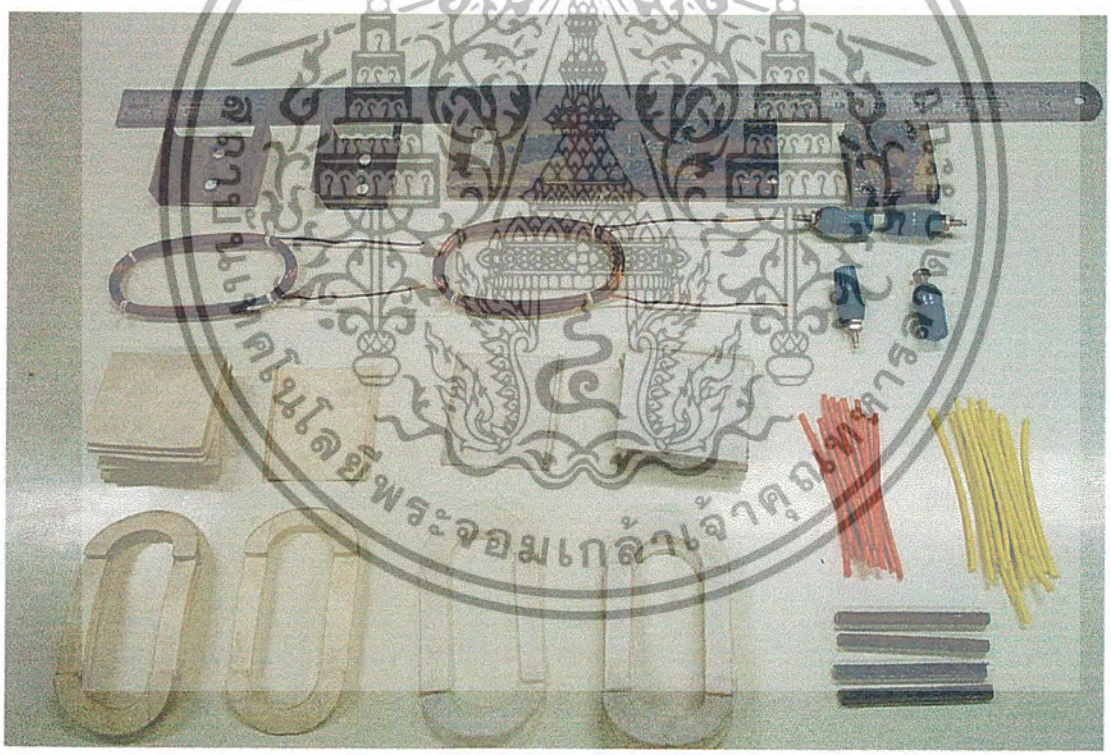
*รูปที่ 5-1 เตาอบ*

**รายละเอียดเกี่ยวกับเตาอบที่ใช้ในการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อน**

| | |
|---|---|
| ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งาน | 380 $V_{ac}$ |
| ขนาดของกระแส | 30 A |
| ขนาดกำลังของเครื่องทำความร้อน (Heater) | 6000 w |
| ขนาดของตู้อบภายใน | $60 \times 6060\ cm^3$ |
| ขนาดของตู้อบภายนอก | $70 \times 70 \times \times 70\ cm^3$ |
| น้ำหนักของตู้อบ | 10 kg |
| ช่วงอุณหภูมิที่สามารถปรับได้ | 0-500°C |
| ชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature control) ชนิด PID control type k | 0-500°C |
| ช่วงอุณหภูมิที่สามารถปรับค่าได้ (Temperature spread) | ± 0.1°C |
| ค่าความเที่ยงตรงของอุณหภูมิภายในตู้อบ | ± 0.2° C |
| ตัววัดอุณหภูมิ (Thermocouple type k) วัดได้ | 0-1200°C |
| ชุดตัดต่ออุณหภูมิ Solid state relay | DC 4-32 V 40 A |
| ชุดตั้งเวลา (Timer type AH5R-2) | 0-999 ชั่วโมง |
| ระบบการตั้งเวลาแบบอัตโนมัติ ตั้งได้ | 0-999 ชั่วโมง |

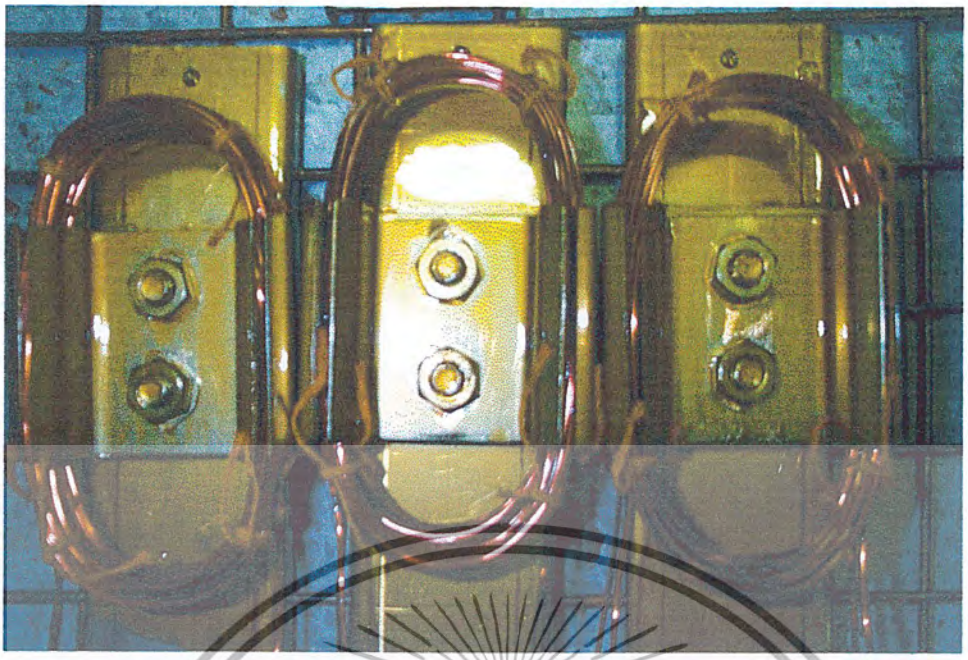
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลอดไฟแสดงสัญญาน
สวิตซ์กดติดปล่อยดับ 25 mm
กระปุกฟิวส์
มอเตอร์ 1 เฟส ½ แรงม้า
โครงตู้ภายในภายนอกเป็นสแตนเลส
ฉนวนกันความร้อน เซรามิคไฟเบอร์
เซอร์กิตเบรคเกอร์ 3 เฟส 1 ตัว
โวลต์มิเตอร์ 500 V
แอมมิเตอร์ 30 A

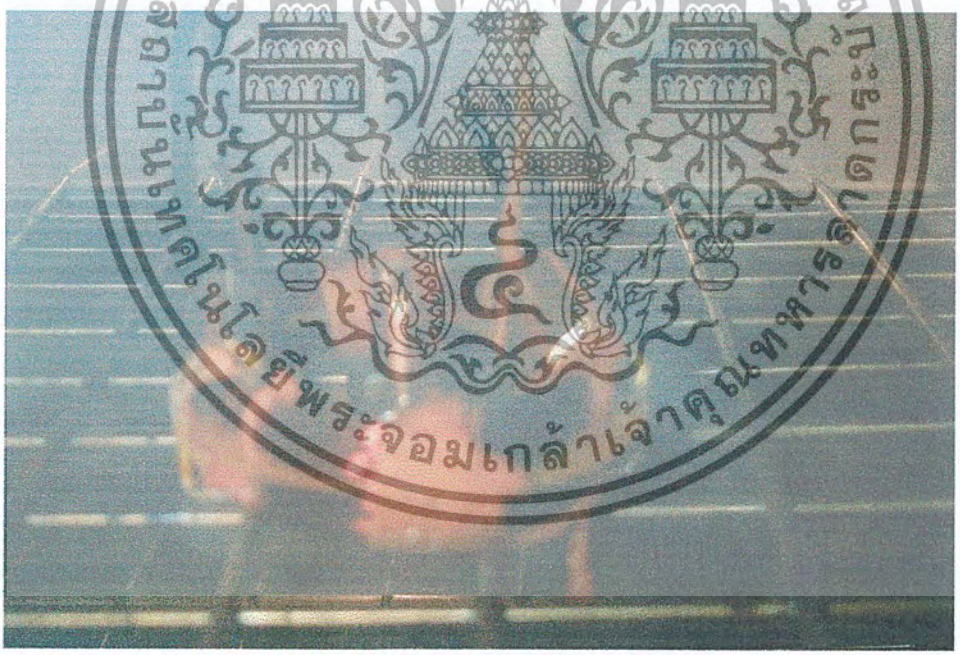


*รูปที่ 5-2 ส่วนประกอบของแบบจำลองร่องสล็อต*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

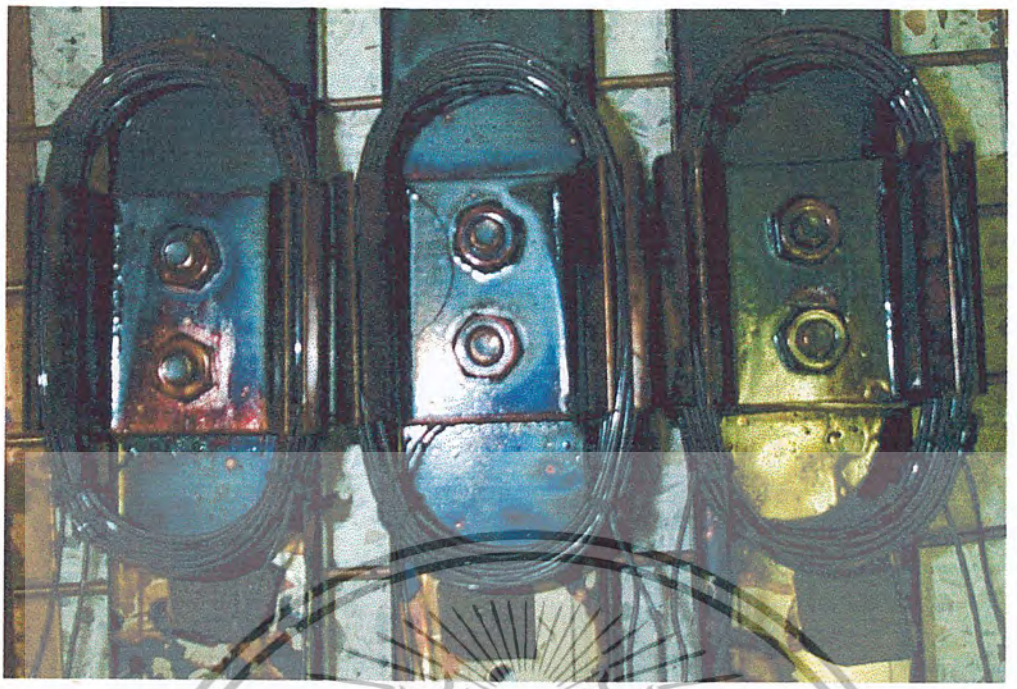


*รูปที่ 5-3 แบบจำลองร่องสล็อตหลังชุบวาร์นิช*



*รูปที่ 5-4 การเร่งอายุทางความร้อนต่อแบบจำลองร่องสล็อต*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

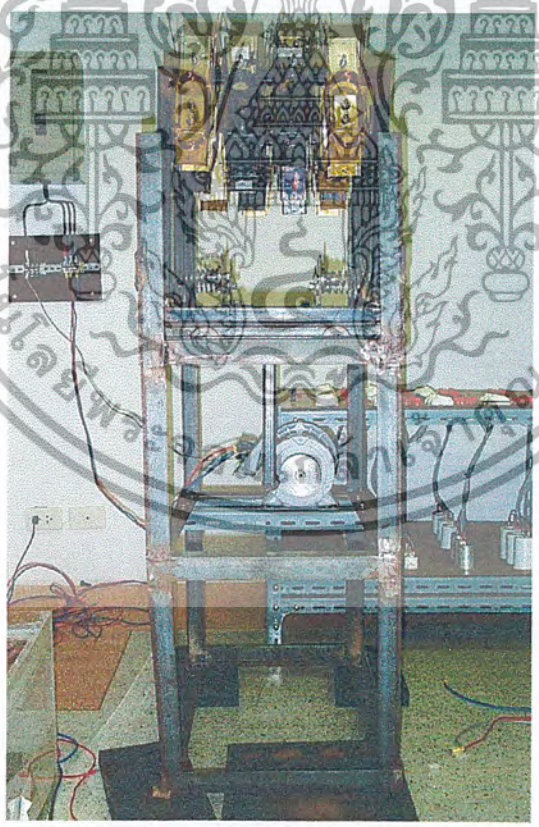


*รูปที่ 5-5 แบบจำลองร่องสล็อตหลังจากได้รับการเร่งอายุทางความร้อน*

*รูปที่ 5-6 ตู้อบไอน้ำ*

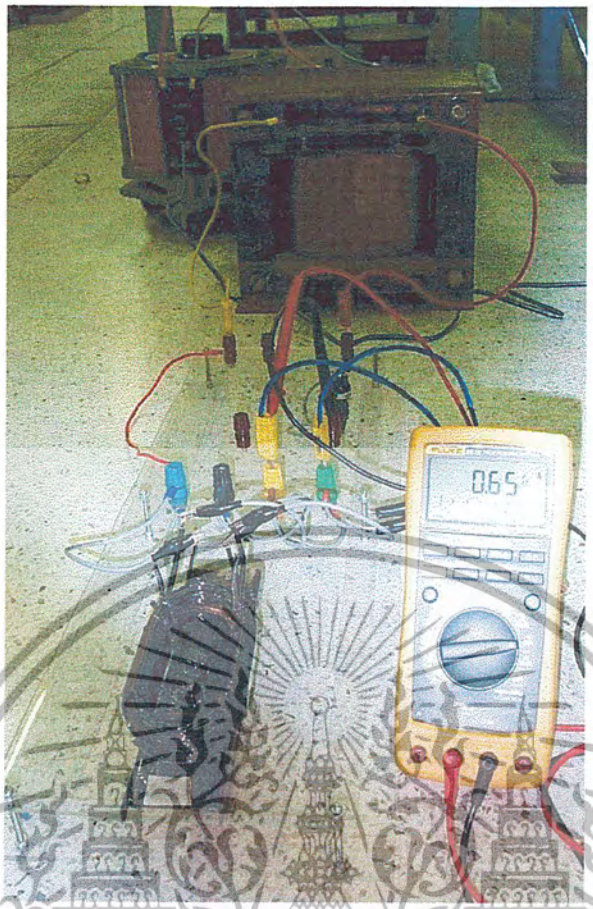
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*รูปที่ 5-7 การปรับสภาพทางความชื้นต่อแบบจำลองร่องสล็อตด้วยตู้อบไอน้ำ*



*รูปที่ 5-8 การปรับสภาพทางกลต่อแบบจำลองร่องสล็อตด้วยโต๊ะสั่น*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




*รูปที่ 5-9 การทดสอบทางไฟฟ้าเพื่อการวินิจฉัย*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**5.6 ผลการทดสอบทางไฟฟ้าเพื่อการวินิจฉัย**

**แบบจำลองร่องสล็อตที่ 1**

**ระบบฉนวนระดับความร้อน F**

**อุณหภูมิในการเร่งอายุทางความร้อน 225°C**

**ระยะเวลาของรอบย่อยการเร่งอายุทางความร้อน 24 ชั่วโมง**

**ระยะเวลาของรอบย่อยการปรับสภาพทางกล 1 ชั่วโมง, ทางความชื้น 48 ชั่วโมง**

| รอบย่อยการเร่งอายุ/ การเร่งอายุทางไฟฟ้า | ก่อนเร่งอายุ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | หมายเหตุ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ระหว่างลวดตัวนำกับลวดตัวนำ (110±10โวลต์) | 110 µA/ 141 µA | 55 µA/ 54 µA | 60 µA/ 60 µA | 62 µA/ 290 mA * | 64 µA/ 290 mA * | 61 µA/ 280 mA * | 66 µA/ 300 mA * | 280 mA*/ 280 mA * | | | | ขดบน/ ขดล่าง |
| ระหว่างขดลวดกับขดลวด (400 โวลต์) | 54 µA | 27 µA | 24 µA | 24 µA | 25 µA | 14 µA | 16 µA | 360 µA | | | | |
| ระหว่างขดลวดกับกราวนด์ (400 โวลต์) | 33 µA | 18 µA | 16 µA | 23 µA | 23 µA | 23 µA | 27 µA | 400 µA | | | | |

หมายเหตุ 1. ระบบฉนวนประกอบด้วยลวดตัวนำชนิดไทยฮิตาชิ

2. ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรมและคั่นระหว่างขดลวดขดบนกับขดลวดขดล่างชนิดที่ 1, 3. * หมายถึงการเกิดการเสียหายทางไฟฟ้า

**แบบจำลองร่องสล็อตที่ 2**

**ระดับความร้อน F**

**อุณหภูมิในการเร่งอายุทางความร้อน 225°C**

**ระยะเวลาของรอบย่อยการเร่งอายุทางความร้อน 24 ชั่วโมง**

**ระยะเวลาของรอบย่อยการปรับสภาพทางกล 1 ชั่วโมง, ทางความชื้น 48 ชั่วโมง**

| รอบย่อยการเร่งอายุ/ การเร่งอายุทางไฟฟ้า | ก่อนเร่งอายุ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | หมายเหตุ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ระหว่างลวดตัวนำกับลวดตัวนำ (110±10โวลต์) | 102 µA/ 144 µA | 52 µA/ 53 µA | 55 µA/ 59 µA | 58 µA/ 61 µA | 61 µA/ 115 µA | 55 µA/ 88 µA | 59 µA/ 66 µA | 280 mA*/ 280 mA * | | | | ขดบน/ ขดล่าง |
| ระหว่างขดลวดกับขดลวด (400 โวลต์) | 50 µA | 30 µA | 24 µA | 24 µA | 25 µA | 36 µA | 40 µA | 240 µA | | | | |
| ระหว่างขดลวดกับกราวนด์ (400 โวลต์) | 34 µA | 18 µA | 18 µA | 60 µA | 35 µA | 22 µA | 33 µA | 45 µA | | | | |

หมายเหตุ 1. ระบบฉนวนประกอบด้วยลวดตัวนำชนิดไทยฮิตาชิ

2. ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรมและคั่นระหว่างขดลวดขดบนกับขดลวดขดล่างชนิดที่ 1

3. * หมายถึงการเกิดการเสียหายทางไฟฟ้า

**แบบจำลองร่องสล็อตที่ 3**

**ระดับความร้อน F**

**อุณหภูมิในการเร่งอายุทางความร้อน 225°C**

**ระยะเวลาของรอบย่อยการเร่งอายุทางความร้อน 24 ชั่วโมง**

**ระยะเวลาของรอบย่อยการปรับสภาพทางกล 1 ชั่วโมง, ทางความชื้น 48 ชั่วโมง**

| รอบย่อยการเร่งอายุ/ การเร่งอายุทางไฟฟ้า | ก่อนเร่งอายุ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | หมายเหตุ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ระหว่างลวดตัวนำกับลวดตัวนำ (110±10โวลต์) | 110 µA/ 122 µA | 53 µA/ 49 µA | 59 µA/ 54 µA | 61 µA/ 55 µA | 62 µA/ 600 µA | 60 µA/ 280 mA * | 61 µA/ 280 mA * | 260 mA*/ 280 mA * | | | | ขดบน/ ขดล่าง |
| ระหว่างขดลวดกับขดลวด (400 โวลต์) | 57 µA | 34 µA | 27 µA | 27 µA | 28 µA | 17 µA | 22 µA | 107 µA | | | | |
| ระหว่างขดลวดกับกราวนด์ (400 โวลต์) | 34 µA | 23 µA | 17 µA | 20 µA | 22 µA | 26 µA | 29 µA | 86 µA | | | | |

หมายเหตุ 1. ระบบฉนวนประกอบด้วยลวดตัวนำชนิดไทยฮิตาชิ

2. ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรมและคั่นระหว่างขดลวดขดบนกับขดลวดขดล่างชนิดที่ 1

3. * หมายถึงการเกิดการเสียหายทางไฟฟ้า

**แบบจำลองร่องสล็อตที่ 4**

**ระดับความร้อน F**

**อุณหภูมิในการเร่งอายุทางความร้อน 225°C**

**ระยะเวลาของรอบย่อยการเร่งอายุทางความร้อน 24 ชั่วโมง**

**ระยะเวลาของรอบย่อยการปรับสภาพทางกล 1 ชั่วโมง, ทางความชื้น 48 ชั่วโมง**

| รอบย่อยการเร่งอายุ/ การเร่งอายุทางไฟฟ้า | ก่อนเร่งอายุ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | หมายเหตุ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ระหว่างลวดตัวนำกับลวดตัวนำ (110±10โวลต์) | 95 µA/ 124 µA | 45 µA/ 48 µA | 49 µA/ 53 µA | 51 µA/ 54 µA | 53 µA/ 55 µA | 51 µA/ 52 µA | 54 µA/ 65 µA | 215 µA/ 280 mA * | | | | ขดบน/ ขดล่าง |
| ระหว่างขดลวดกับขดลวด (400 โวลต์) | 55 µA | 31 µA | 22 µA | 27 µA | 22 µA | 15 µA | 21 µA | 1 A* | | | | |
| ระหว่างขดลวดกับกราวนด์ (400 โวลต์) | 36 µA | 23 µA | 16 µA | 21 µA | 21 µA | 19 µA | 21 µA | 3.4 mA | | | | |

หมายเหตุ 1. ระบบฉนวนประกอบด้วยลวดตัวนำชนิดไทยฮิตาชิ

2. ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรมและคั่นระหว่างขดลวดขดบนกับขดลวดขดล่างชนิดที่ 2

3. * หมายถึงการเกิดการเสียหายทางไฟฟ้า

**แบบจำลองร่องสล็อตที่ 5**

**ระดับความร้อน F**

**อุณหภูมิในการเร่งอายุทางความร้อน 225°C**

**ระยะเวลาของรอบย่อยการเร่งอายุทางความร้อน 24 ชั่วโมง**

**ระยะเวลาของรอบย่อยการปรับสภาพทางกล 1 ชั่วโมง, ทางความชื้น 48 ชั่วโมง**

| รอบย่อยการเร่งอายุ/ การเร่งอายุทางไฟฟ้า | ก่อนเร่งอายุ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | หมายเหตุ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ระหว่างลวดตัวนำกับลวดตัวนำ (110±10โวลต์) | 111 µA/ 150 µA | 52 µA/ 56 µA | 56 µA/ 63 µA | 58 µA/ 64 µA | 280 mA*/ 65 µA | 280 mA*/ 280 mA * | 280 mA */ 290 mA * | 280 mA*/ 280 mA * | | | | ขดบน/ ขดล่าง |
| ระหว่างขดลวดกับขดลวด (400 โวลต์) | 53 µA | 34 µA | 23 µA | 22 µA | 22 µA | 17 µA | 23 µA | 1 A* | | | | |
| ระหว่างขดลวดกับกราวนด์ (400 โวลต์) | 37 µA | 27 µA | 18 µA | 22 µA | 22 µA | 20 µA | 30 µA | 1 A* | | | | |

หมายเหตุ 1. ระบบฉนวนประกอบด้วยลวดตัวนำชนิดไทยฮิตาชิ

2. ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรมและคั่นระหว่างขดลวดขดบนกับขดลวดขดล่างชนิดที่ 2

3. * หมายถึงการเกิดการเสียหายทางไฟฟ้า

**แบบจำลองร่องสล็อตที่ 6**

**ระดับความร้อน F**

**อุณหภูมิในการเร่งอายุทางความร้อน 225°C**

**ระยะเวลาของรอบย่อยการเร่งอายุทางความร้อน 24 ชั่วโมง**

**ระยะเวลาของรอบย่อยการปรับสภาพทางกล 1 ชั่วโมง, ทางความชื้น 48 ชั่วโมง**

| รอบย่อยการเร่งอายุ/ การเร่งอายุทางไฟฟ้า | ก่อนเร่งอายุ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | หมายเหตุ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ระหว่างลวดตัวนำกับลวดตัวนำ (110±10โวลต์) | 89 µA/ 109 µA * | 300 mA*/ 50 µA | 290 mA*/ 70 µA | 290 mA*/ 280 mA * | 290 mA*/ 290 mA * | 280 mA*/ 280 mA * | 280 mA*/ 280 mA * | 287 mA*/ 282 mA * | | | | ขดบน/ ขดล่าง |
| ระหว่างขดลวดกับขดลวด (400 โวลต์) | 55 µA | 29 µA | 42 µA | 29 µA | 27 µA | 18 µA | 90 µA | 7.2 mA | | | | |
| ระหว่างขดลวดกับกราวนด์ (400 โวลต์) | 35 µA | 21 µA | 25 µA | 27 µA | 20 µA | 23 µA | 30 µA | 41 µA | | | | |

หมายเหตุ 1. ระบบฉนวนประกอบด้วยลวดตัวนำชนิดสยาม

2. ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรมและคั่นระหว่างขดลวดขดบนกับขดลวดขดล่างชนิดที่ 1

3. * หมายถึงการเกิดการเสียหายทางไฟฟ้า

**แบบจำลองร่องสล็อตที่ 7**

**ระดับความร้อน F**

**อุณหภูมิในการเร่งอายุทางความร้อน 225°C**

**ระยะเวลาของรอบย่อยการเร่งอายุทางความร้อน 24 ชั่วโมง**

**ระยะเวลาของรอบย่อยการปรับสภาพทางกล 1 ชั่วโมง, ทางความชื้น 48 ชั่วโมง**

| รอบย่อยการเร่งอายุ/ การเร่งอายุทางไฟฟ้า | ก่อนเร่งอายุ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | หมายเหตุ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ระหว่างลวดตัวนำกับลวดตัวนำ (110±10โวลต์) | 82 µA/ 76 µA | 46 µA/ 35 µA | 50 µA/ 37 µA | 52 µA/ 42 µA | 53 µA/ 41 µA | 54 µA/ 37 µA | 52 µA/ 38 µA | 101 µA/ 54 µA | | | | ขดบน/ ขดล่าง |
| ระหว่างขดลวดกับขดลวด (400 โวลต์) | 50 µA | 26 µA | 23 µA | 22 µA | 24 µA | 17 µA | 16 µA | 150 µA | | | | |
| ระหว่างขดลวดกับกราวนด์ (400 โวลต์) | 29 µA | 19 µA | 15 µA | 23 µA | 25 µA | 24 µA | 22 µA | 1.1 mA | | | | |

หมายเหตุ 1. ระบบฉนวนประกอบด้วยลวดตัวนำชนิดสยาม

2. ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรมและคั่นระหว่างขดลวดขดบนกับขดลวดขดล่างชนิดที่ 1

3. * หมายถึงการเกิดการเสียหายทางไฟฟ้า

**แบบจำลองร่องสล็อตที่ 8**

**ระดับความร้อน F**

**อุณหภูมิในการเร่งอายุทางความร้อน 225°C**

**ระยะเวลาของรอบย่อยการเร่งอายุทางความร้อน 24 ชั่วโมง**

**ระยะเวลาของรอบย่อยการปรับสภาพทางกล 1 ชั่วโมง, ทางความชื้น 48 ชั่วโมง**

| รอบย่อยการเร่งอายุ/ การเร่งอายุทางไฟฟ้า | ก่อนเร่งอายุ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | หมายเหตุ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ระหว่างลวดตัวนำกับลวดตัวนำ (110±10โวลต์) | 65 µA/ 75 µA | 33 µA/ 29 µA | 35 µA/ 270 mA * | 40 µA/ 270 mA* | 40 µA/ 290 mA * | 280 mA*/ 280 mA* | 63 µA/ 280 mA * | 290 mA*/ 280 mA * | | | | ขดบน/ ขดล่าง |
| ระหว่างขดลวดกับขดลวด (400 โวลต์) | 53 µA | 24 µA | 20 µA | 18 µA | 19 µA | 15 µA | 15 µA | 20 mA | | | | |
| ระหว่างขดลวดกับกราวนด์ (400 โวลต์) | 35 µA | 18 µA | 16 µA | 24 µA | 20 µA | 16 µA | 17 µA | 5.5 mA | | | | |

หมายเหตุ 1. ระบบฉนวนประกอบด้วยลวดตัวนำชนิดสยาม

2. ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรมและคั่นระหว่างขดลวดขดบนกับขดลวดขดล่างชนิดที่ 2

3. * หมายถึงการเกิดการเสียหายทางไฟฟ้า

**แบบจำลองร่องสล็อตที่ 9**

**ระดับความร้อน F**

**อุณหภูมิในการเร่งอายุทางความร้อน 225°C**

**ระยะเวลาของรอบย่อยการเร่งอายุทางความร้อน 24 ชั่วโมง**

**ระยะเวลาของรอบย่อยการปรับสภาพทางกล 1 ชั่วโมง, ทางความชื้น 48 ชั่วโมง**

| รอบย่อยการเร่งอายุ/ การเร่งอายุทางไฟฟ้า | ก่อนเร่งอายุ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | หมายเหตุ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ระหว่างลวดตัวนำกับลวดตัวนำ (110±10โวลต์) | 74 µA/ 78 µA | 34 µA/ 35 µA | 36 µA/ 37 µA | 37 µA/ 40 µA | 40 µA/ 42 µA | 37 µA/ 60 µA | 61 µA/ 780 µA | 4.5 mA/ 7.5 mA | | | | ขดบน/ ขดล่าง |
| ระหว่างขดลวดกับขดลวด (400 โวลต์) | 63 µA | 27 µA | 22 µA | 20 µA | 21 µA | 16 µA | 120 µA | 1 A* | | | | |
| ระหว่างขดลวดกับกราวนด์ (400 โวลต์) | 36 µA | 19 µA | 17 µA | 22 µA | 20 µA | 1 A* | 1 A* | 1 A* | | | | |

หมายเหตุ 1. ระบบฉนวนประกอบด้วยลวดตัวนำชนิดสยาม

2. ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรมและคั่นระหว่างขดลวดขดบนกับขดลวดขดล่างชนิดที่ 2

3. * หมายถึงการเกิดการเสียหายทางไฟฟ้า

**แบบจำลองร่องสล็อตที่ 10**

**ระดับความร้อน F**

**อุณหภูมิในการเร่งอายุทางความร้อน 225°C**

**ระยะเวลาของรอบย่อยการเร่งอายุทางความร้อน 24 ชั่วโมง**

**ระยะเวลาของรอบย่อยการปรับสภาพทางกล 1 ชั่วโมง, ทางความชื้น 48 ชั่วโมง**

| รอบย่อยการเร่งอายุ/ การเร่งอายุทางไฟฟ้า | ก่อนเร่งอายุ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | หมายเหตุ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ระหว่างลวดตัวนำกับลวดตัวนำ (110±10โวลต์) | 88 µA/ 76 µA | 43 µA/ 34 µA | 46 µA/ 60 µA | 55 µA/ 1.3 mA | 50 µA/ 2.3 mA | 49 µA/ 6 mA | 51 µA/ 90 µA | 13 mA/ 260 mA * | | | | ขดบน/ ขดล่าง |
| ระหว่างขดลวดกับขดลวด (400 โวลต์) | 52 µA | 25 µA | 20 µA | 20 µA | 19 µA | 15 µA | 14 µA | 1 A* | | | | |
| ระหว่างขดลวดกับกราวนด์ (400 โวลต์) | 31 µA | 17 µA | 15 µA | 24 µA | 20 µA | 18 µA | 19 µA | 1 A* | | | | |

หมายเหตุ 1. ระบบฉนวนประกอบด้วยลวดตัวนำชนิดสยาม

2. ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรมและคั่นระหว่างขดลวดขดบนกับขดลวดขดล่างชนิดที่ 1

3. * หมายถึงการเกิดการเสียหายทางไฟฟ้า

# บทที่ 6
# สรุปและวิจารณ์การทดสอบ

จากการทดสอบที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองของวัตถุทดสอบสามารถแสดงการเกิดการเสียหายเนื่องมาจากกระบวนการการเร่งโดยความร้อนและการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยได้ โดยที่อุปกรณ์การทดสอบเพื่อการวินิจฉัยนั้นไม่ได้แสดงให้เห็นว่าก่อให้เกิดการเสียหายแก่แบบจำลองของวัตถุทดสอบก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการทดสอบแต่อย่างใด และการลัดวงจรทางไฟฟ้าของวัตถุทดสอบที่เกิดขึ้นก็แสดงให้เห็นว่าบรรทัดฐานของการเกิดการเสียหายโดยการตรวจสอบด้วยแรงดันไฟฟ้านั้นสามารถเกิดขึ้นได้จริง

ในการทดสอบพบว่าเป็นข้อควรระวังอย่างยิ่งในการที่จะเคลื่อนย้ายวัตถุทดสอบเนื่องจากในการตรวจสอบสภาพระบบฉนวนด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า จุดที่เกิดการเสียหายเกิดขึ้นนั้นมักเกิดจากการเคลื่อนย้ายวัตถุทดสอบไม่ถูกวิธีเช่นการวางหรือกระแทกวัตถุทดสอบแรงเกินไป การสัมผัสหรือขยับเส้นลวดตัวนำที่รุนแรงเกินไป เป็นต้น

การออกแบบวัตถุทดสอบนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่ ควรคำนึงถึงการที่วัสดุฉนวนของระบบฉนวนทางไฟฟ้าจะได้รับความร้อนอย่างไร เช่น ในการทดสอบครั้งหนึ่งได้มีการออกแบบวัตถุทดสอบสำหรับการทดสอบขดในสเตเตอร์ ซึ่งแบบจำลองวัตถุทดสอบนั้นจะคล้ายกับแบบจำลองร่องสล็อตแต่มิได้มีการใส่ฉนวนคั่นระหว่างเฟสและฉนวนคั่นช่องสล็อตลงไปด้วยซึ่งก็จะเหลือแต่ช่องสล็อตกับขดลวดคู่ขนานเท่านั้นซึ่งนี่ก็จะทำให้ขดลวดสัมผัสกับร่องสล็อตซึ่งเป็นโลหะสเตนเลส โดยตรง ซึ่งปรากฏว่าหลังจากที่ทำการให้ความร้อนในรอบการเร่งอายุความร้อนครั้งแรกหลังจากนั้นทำการทำตามขั้นตอนการทดสอบจนกระทั่งถึงขั้นตอนการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยโดยการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้าระหว่างขดลวดกับกราวนด์ ปรากฏว่าวัตถุทดสอบได้เกิดการเสียหายขึ้นทุกชิ้น ทั้งนี้ก็เป็นเพราะวัสดุฉนวนหรือน้ำยาอาบขดลวดนั้นได้รับความร้อนโดยตรงจากโลหะสเตนเลสทำให้น้ำยาอาบขดลวดเกิดการละลายในส่วนที่ติดกับโลหะสเตนเลสซึ่งเป็นร่องสล็อตนั่นเอง

ในการออกแบบบการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยควรเป็นการออกแบบเพื่อการตรวจสอบสภาพวัสดุฉนวนของระบบฉนวนตามหน้าที่ของวัสดุฉนวนนั้นโดยเฉพาะ เช่น ในแบบจำลองร่องสล็อตจะเป็นการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยด้วยแรงดันไฟฟ้า ซึ่งก็จะแบ่งการทดสอบเป็น 3 อย่างคือ การทดสอบระหว่างเส้นลวดในขดเดียวกันเพื่อที่จะตรวจสอบสภาพวัสดุฉนวนที่ทำหน้าที่ป้องกันการลัดวงจรระหว่างเส้นลวดหรือก็คือน้ำยาอาบขดลวดนั่นเอง ส่วนในระหว่างขดลวดกับขดลวดและระหว่างขดลวดกับกราวนด์ก็เป็นไปเพื่อตรวจสอบสภาพฉนวนคั่นระหว่างเฟส (phase insulation) ฉนวนคั่นช่องสล็อต (slot insulation) ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันการเกิดการลัดวงจรระว่างขดลวดระหว่างเฟสและขดลวดกับช่องสล็อตตามลำดับ

แม้วัสดุฉนวนบางชนิดซึ่งทางผู้ผลิตได้ระบุถึงระดับความร้อนของวัสดุฉนวนนั้นไว้ที่ค่าหนึ่ง แต่หลังจากที่เรานำมาทดสอบ โดยการเร่งอายุโดยความร้อนตามขนาดอุณหภูมิที่มาตรฐานได้กำหนดต่อระดับความร้อนของวัสดุฉนวนนั้น ปรากฏว่าวัสดุฉนวนหลายๆชนิดไม่สามารถ นำเข้ามาใช้ในกระบวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบได้เนื่องจากระดับความร้อนที่แท้จริงของวัสดุฉนวนนั้นอาจมีค่าต่ำกว่าระดับความร้อนที่ทางผู้ผลิตระบุไว้มาก ซึ่งจะเห็นได้จากการที่วัสดุฉนวนนั้นเกิดการปริแตกหักออกเป็นแผ่น หรือร่วนออกเป็นชิ้นๆหลังจากเข้าสู่รอบย่อยรอบแรกของการเร่งอายุโดยความร้อนเท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามจากการตรวจสอบวัสดุฉนวน บางอย่างโดยการตรวจด้วยสายตา ซึ่งทำหลังจากรอบย่อยของการเร่งอายุโดยความร้อน แม้สภาพของวัสดุฉนวนจากการตรวจสอบด้วยสายตานั้น ไม่น่าที่จะสามารถคงสภาพความเป็นฉนวนอยู่ได้ เช่น การไหม้จนดำของขดลวดอาบน้ำยาและวาร์นิช การกรอบหรือเกรียมของวัสดุฉนวนดั่นระหว่างเฟสและร่องสล็อต เป็นต้น แต่หลังจากที่เรานำเข้าสู่กระบวนการทดสอบต่อไปก็ยังปรากฏว่าวัสดุฉนวนนั้นยังสามารถคงสภาพความเป็นฉนวนได้อยู่ และเป็นที่น่าสังเกตอย่างหนึ่งว่า ค่ากระแสรั่วซึ่งอยู่ในขั้นตอนของการทดสอบเพื่อการวินิจฉัยด้วยแรงดันไฟฟ้าของวัตถุทดสอบก่อนการนำเข้าสู่รอบย่อยของการเร่งอายุโดยความร้อนครั้งแรก ปรากฏว่ามีค่ามากกว่าหลังจากที่นำวัตถุทดสอบเข้าสู่กระบวนการเร่งอายุโดยความร้อนครั้งแรกเสียอีก ซึ่งนี่ก็แสดงให้เห็นว่า ความร้อนก็อาจเป็นสาเหตุหนึ่งของการเพิ่มสภาพความเป็นฉนวนของวัสดุฉนวนให้มีค่าความเป็นฉนวนมากขึ้นก็ได้ ซึ่งอาจกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่า แม้ลักษณะความเป็นฉนวนของวัสดุฉนวนทางไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ลักษณะทางกายภาพของวัสดุฉนวนทางไฟฟ้าก็ยังจะมีค่าเสื่อมและลดค่าลงซึ่งอาจจะมีลักษณะเช่นนี้อีกในรอบการให้ความร้อนต่อไปหรืออาจเป็นไปในทางที่ลักษณะความเป็นฉนวนของวัสดุฉนวนทางไฟฟ้าจะมีค่าคงที่หรือใกล้เคียงค่าเดิมแต่ลักษณะทางกายภาพของวัสดุฉนวนทางไฟฟ้ามีค่าเสื่อมและลดค่าลงต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

| การเตรียมเครื่องมือ ชนิด .....<br>แรงดัน/อัตรากำลัง .....<br>จำนวนหน่วย ..... | | ประสบการณ์การใช้ข้อมูล | การใช้เงื่อนไข/ สิ่งต้องการข้อมูล |
|---|---|---|---|
| ระดับประสบการณ์ | -การตรวจตราโดยการมอง<br>-ความเสื่อมโทรม<br>-คำตักเตือน<br>-การบำรุงรักษา, การแก้ไข | | |
| การปฏิบัติ | - เวลาการใช้งาน,รวม<br>(ตั้งแต่การตรวจตราครั้งหลังมา)<br>- จำนวนของการเริ่มต้น<br>- ชั่วโมงต่อการเริ่มต้น<br>- ชั่วโมงสำรอง | | |
| หน้าที่ | - ความต่อเนื่องการใช้งาน<br>- วัฏจักรที่ใช้งาน<br>- ความสั้น-เวลา<br>- ขอบเขตของภาระ<br>- การสำรอง<br>- การเก็บ, การขนส่ง | | |
| | | ปัจจัยที่มีผลกระทบ | |
| ความร้อน | - ค่า max-min ของอุณหภูมิ<br>- ค่าสูง-ต่ำ ของอุณหภูมิที่แวดล้อม<br>- ขั้นของอุณหภูมิ<br>- อัตราการเปลี่ยนแปลงของ อุณหภูมิ | | |
| ไฟฟ้า | - ระดับแรงดัน<br>- Overvoltage,transients frequency<br>- ระดับของ Protection<br>-Partial discharge<br>- Tracking<br>- Flashover | | |
| ทางกล | - การสั่น , การเคลื่อนที่โดยไฟฟ้า<br>- ผลกระทบ, ทางไฟฟ้า<br>- การสั่น, โดยทางกล<br>- ผลกระทบ, ทางกล<br>- การโก่งงอ<br>- การอัดกัน<br>- การบิดเป็นเกลียว<br>- ส่วนที่โยกหลวม | | |
| สิ่งแวดล้อม | - Gases<br>- การกัดกร่อน, การผุพังในบรรยากาศ<br>- สุญญากาศ<br>- สารหล่อลื่น,ทางเคมี<br>- ความชื้น<br>- ผงฝุ่น,ทราย<br>- การแผ่รังสี<br>- หนู,ปลวก, เห็ดรา | | |

***ตาราง ก-1 แสดงตารางสำหรับประสบการณ์การใช้งาน, ความต้องการในการใช้งาน /สภาพ , หน้าที่และข้อมูลการปฏิบัติที่ใช้หาค่าระบบฉนวนทางไฟฟ้า***

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

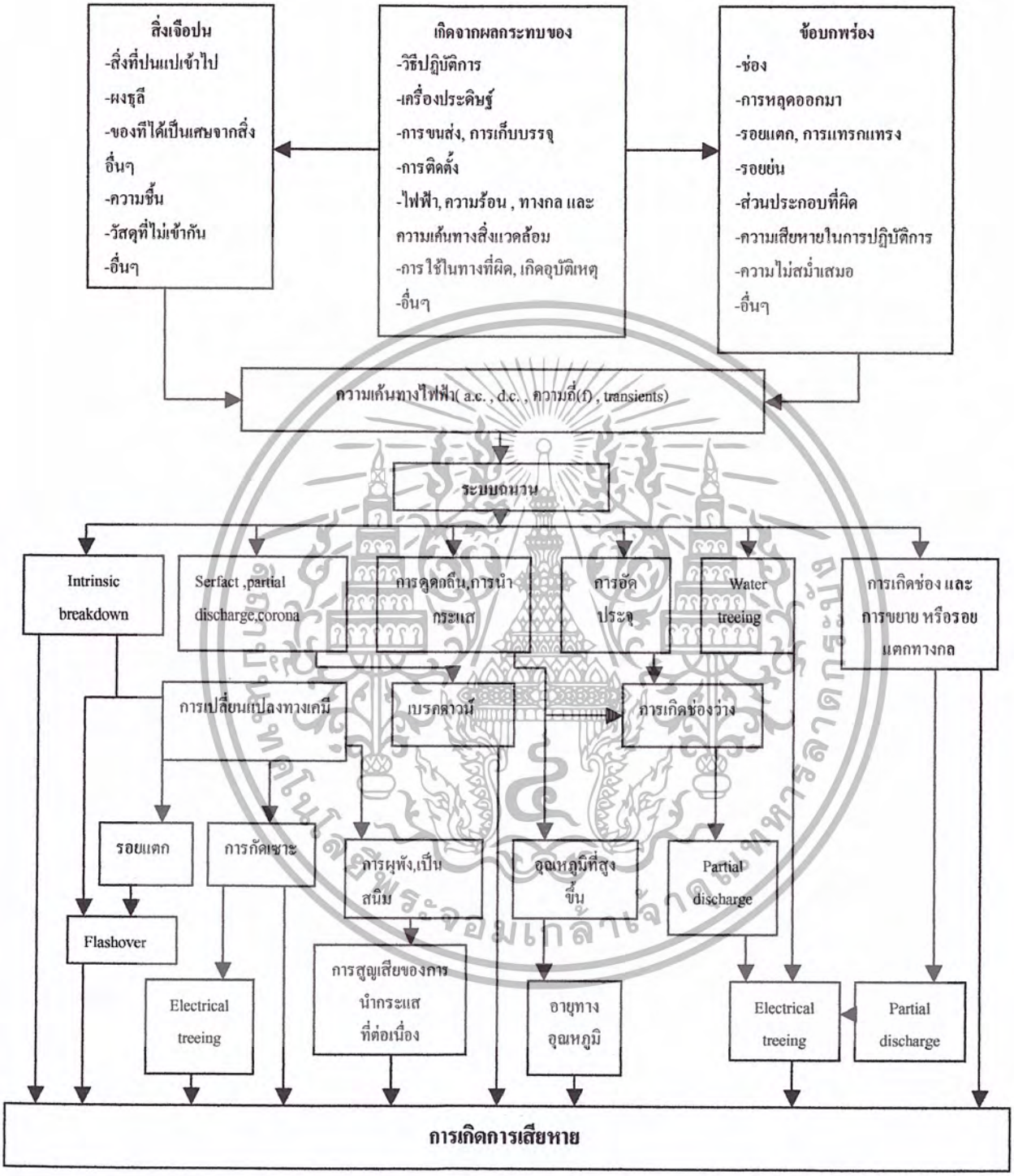
| | |
|---|---|
| การเตรียมอุปกรณ์ ชนิด.....<br>แรงดัน / อัตรากำลัง..... | |
| ระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่รวมตัวกันในส่วนสำคัญ ของฉนวน อุปกรณ์<br>ภายใต้การพิจารณา<br>( ทำให้สัมพันธ์กับคำตอบ) | ฉนวนหลัก |
| | ฉนวนระหว่างวงจร |
| | ฉนวนระหว่างรอบ |
| | การเป็นเกรียว , ลวด, ฉนวน |
| | อื่นๆ |
| การออกแบบระบบฉนวนทางไฟฟ้า | |
| ชนิดของการมีส่วนร่วม ส่วนที่เป็นสื่อตัวนำ | แท่งลวด, สายเคเบิล, ขดลวด |
| | สวิตช์/รีเรย์ ,หน้าสัมผัส |
| | โลหะ เชื่อม/แผ่นโลหะกลวง, ตัวนำที่ฝังอยู่ |
| | ของแข็ง - ข้อกำหนดสวิตช์ |
| | (สารกึ่งตัวนำ) ตัวนำที่ทาสีหรือตีเกรียว |
| | แกนแม่เหล็ก : ตันหรือแผ่น |
| | หม้อครอบ, แท้งค์,กล่อง, ส่วนรองรับเครื่องกล |
| | ฉนวนป้องกันไฟฟ้าแม่เหล็ก |
| การออกแบบชนิดของระบบฉนวนทางไฟฟ้า | ลวด,ฉนวน,วาร์นิช,การใช้แก๊ส |
| | ฉนวน : การไหลหลุดออกมา,การหล่อ,การบรรจุ |
| | ระยะที่หลุดออกมา |
| | ความซึมซาบ : ของเหลวที่ไหล/การแก้ |
| | โครงสร้างของแผ่นเหล็กที่เป็นชั้นๆ,เทปพันฉนวน |
| จำนวน และธรรมชาติของวัตถุ | มีหนึ่งสิ่ง หรือมากกว่า ,ก๊าซ,ของเหลวหรือของแข็ง เทอร์โมพลาสติก, เทอร์โมอีลาสติก, เซรามิก, เยื่อหุ้ม อินทรีย์, กระดาษ, ก๊าซ, ไมก้า ,อื่นๆ |

***ตาราง ก-2 แสดงตารางรูปร่างภายนอกของระบบฉนวนทางไฟฟ้า***

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

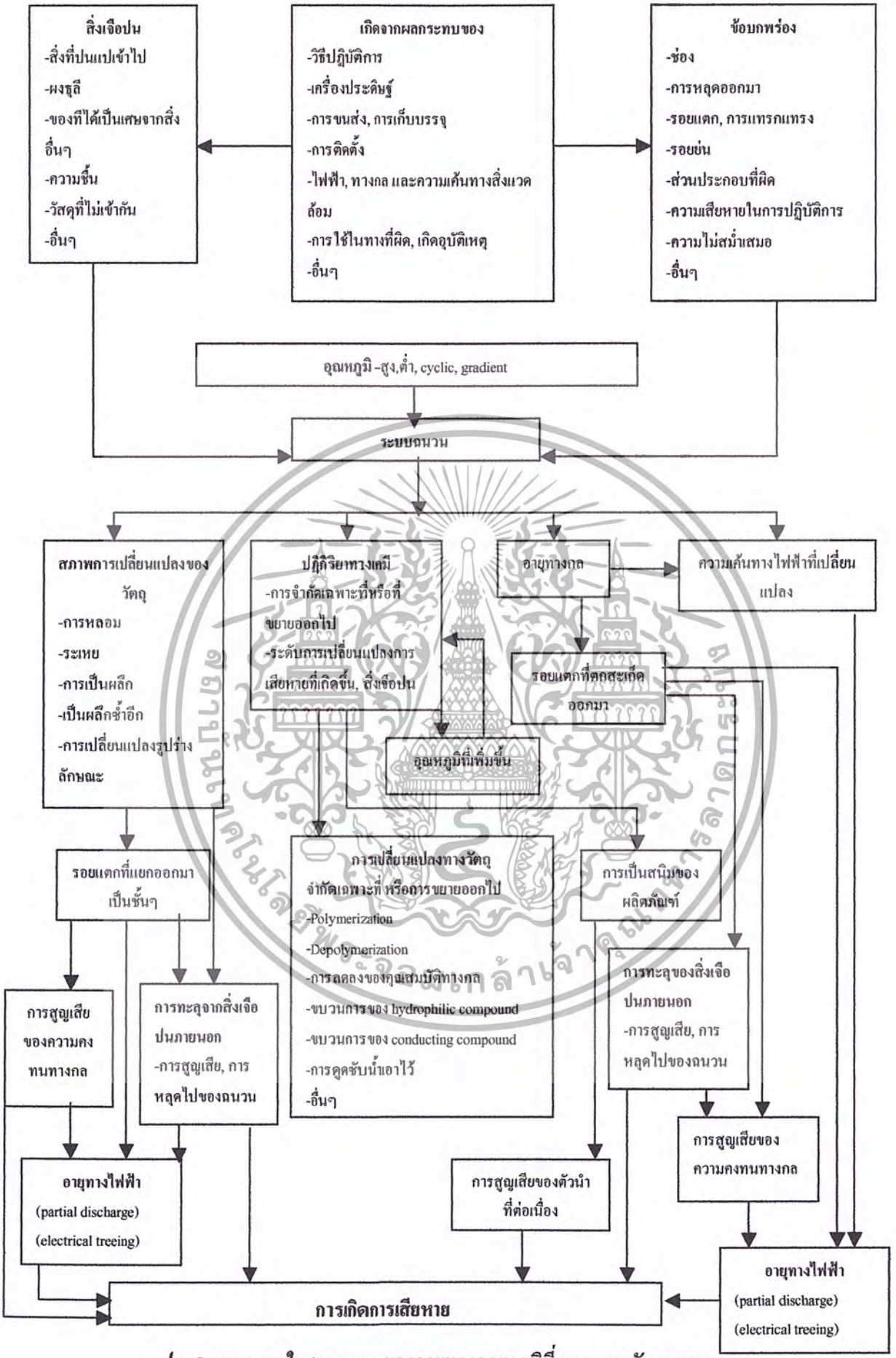
## ภาคผนวก ข

## ลำดับการทำงาน



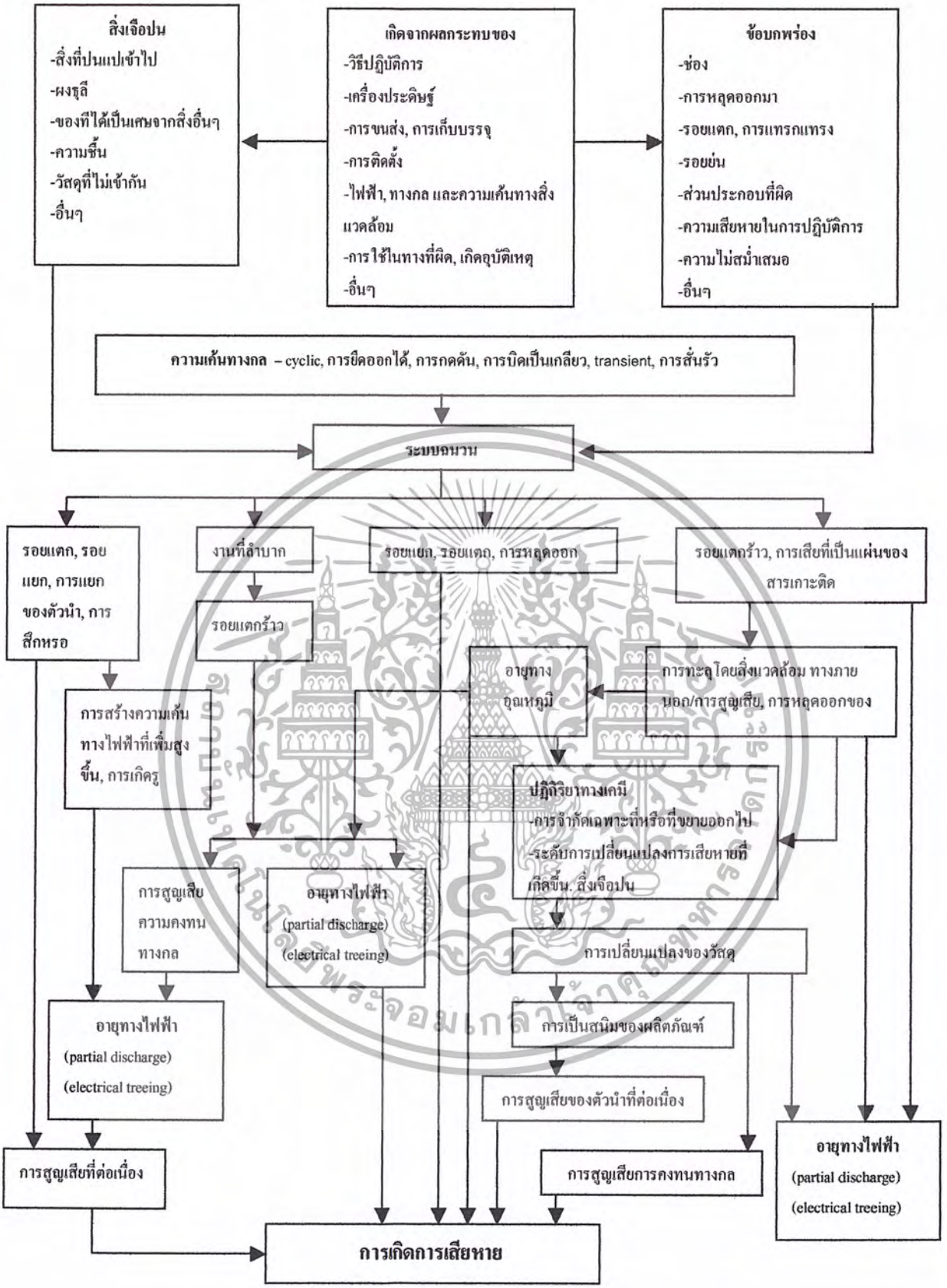

*รูป ข-1 แสดง ภายนอก/ภายใน ของอายุทางไฟฟ้าที่เหมาะสมกับระบบฉนวน*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



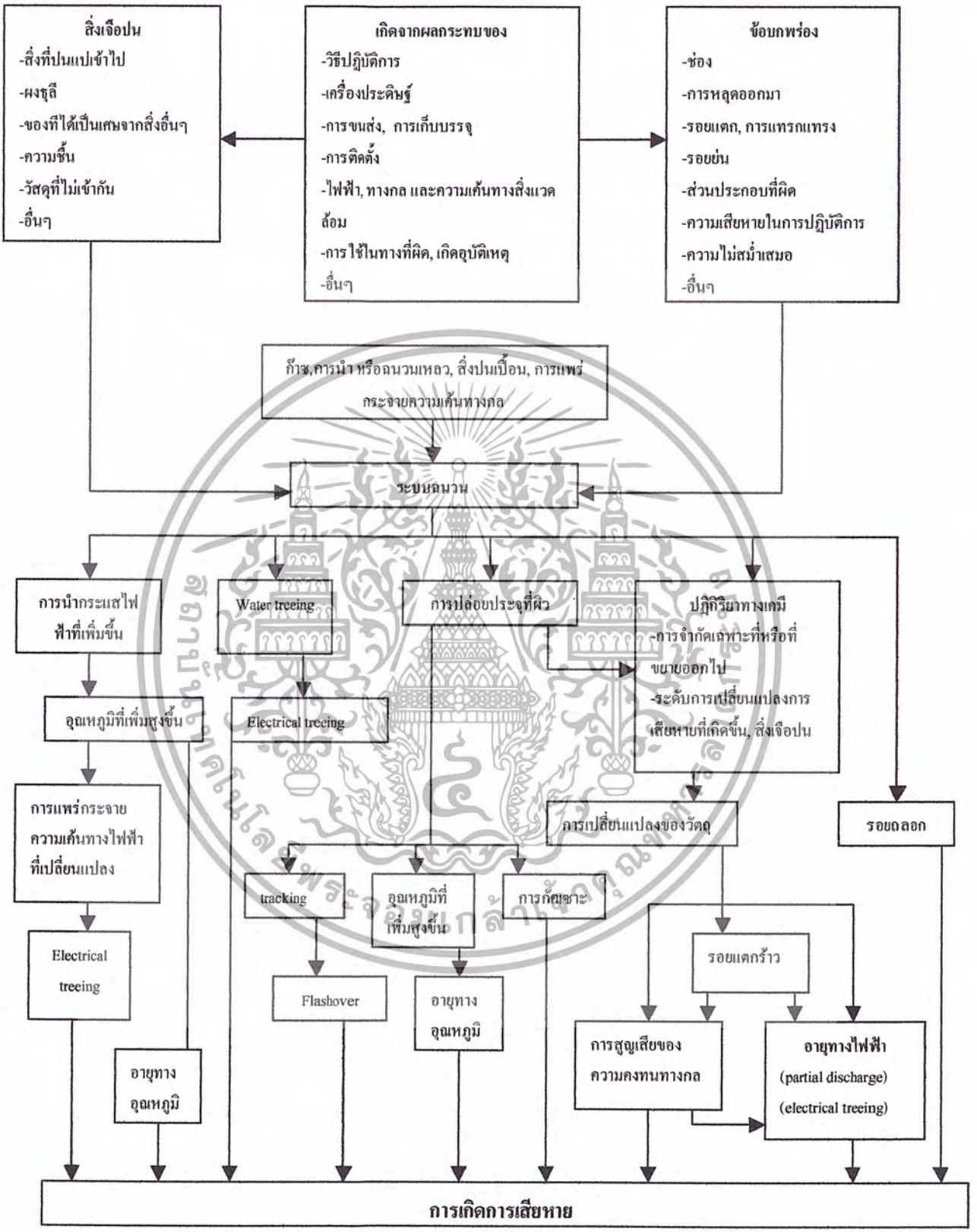

***รูป ข-2 แสดง ภายใน/ภายนอก ของอายุทางอุณหภูมิที่เหมาะสมกับฉนวนระบบ***

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



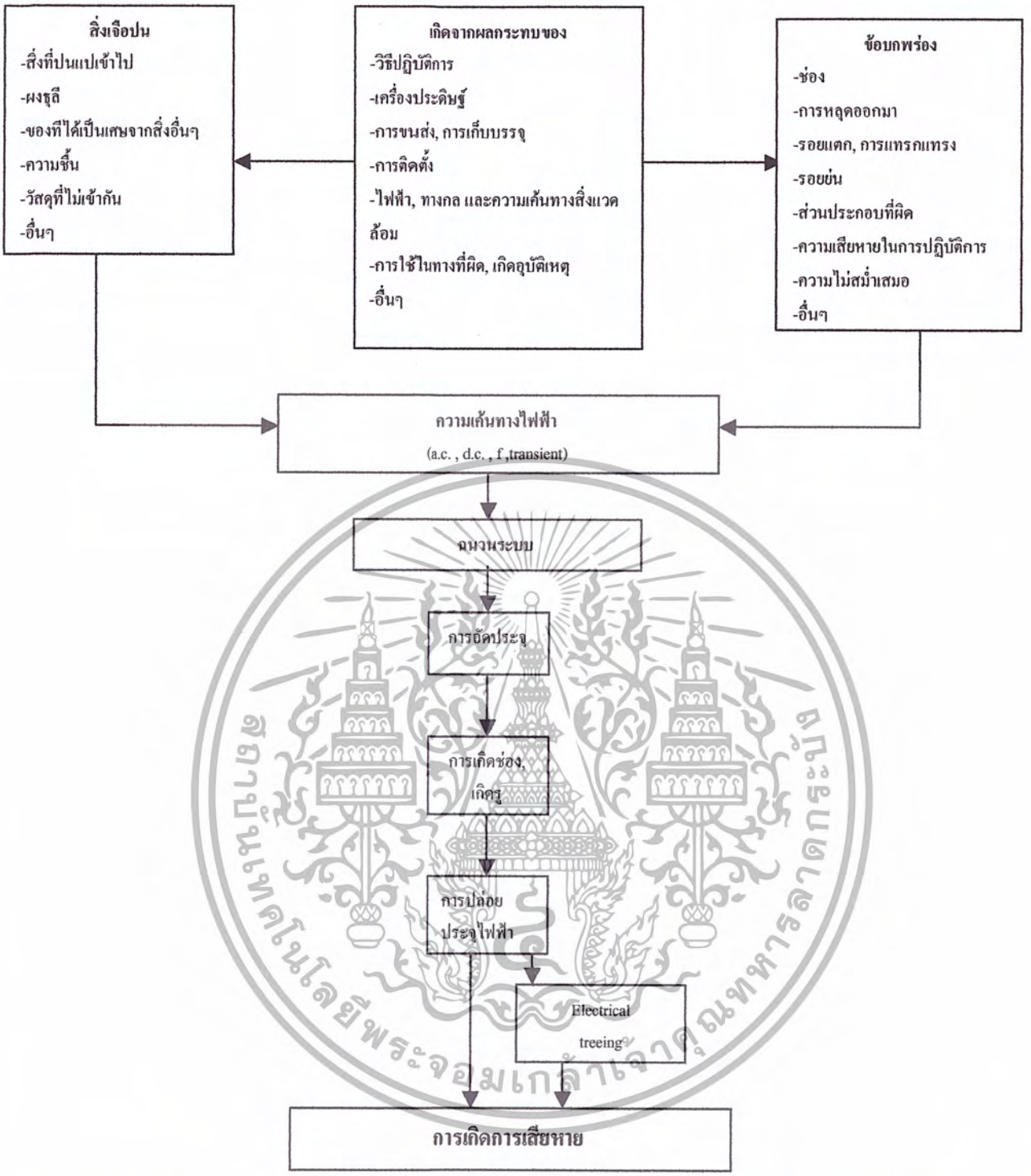

***รูป ข-3 แสดง ภายใน/ภายนอก ของอายุทางกลที่เหมาะสมกับระบบฉนวน***

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



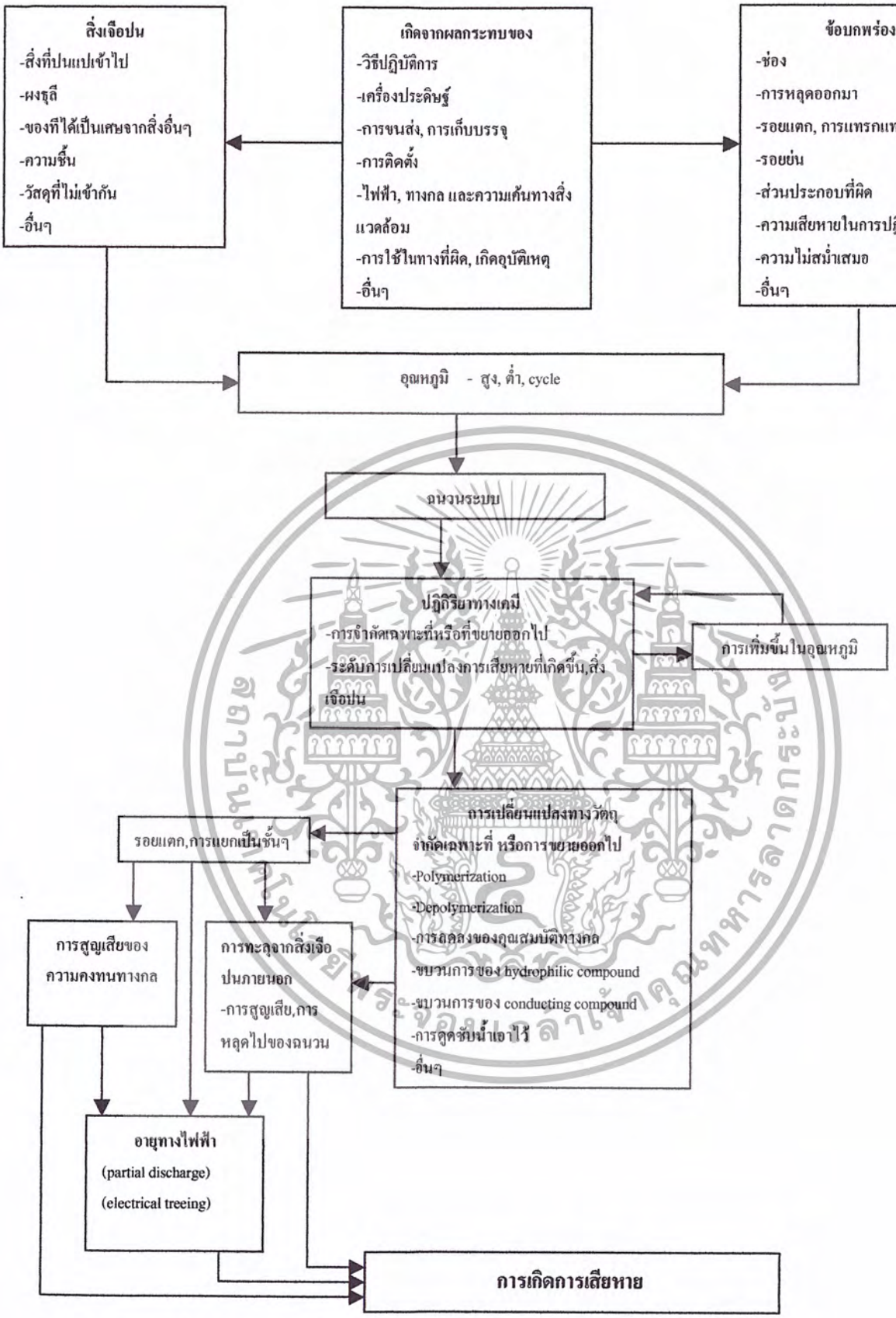

***รูป ข-4 แสดง ภายใน/ภายนอก ของอายุทางสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมกับระบบฉนวน***

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



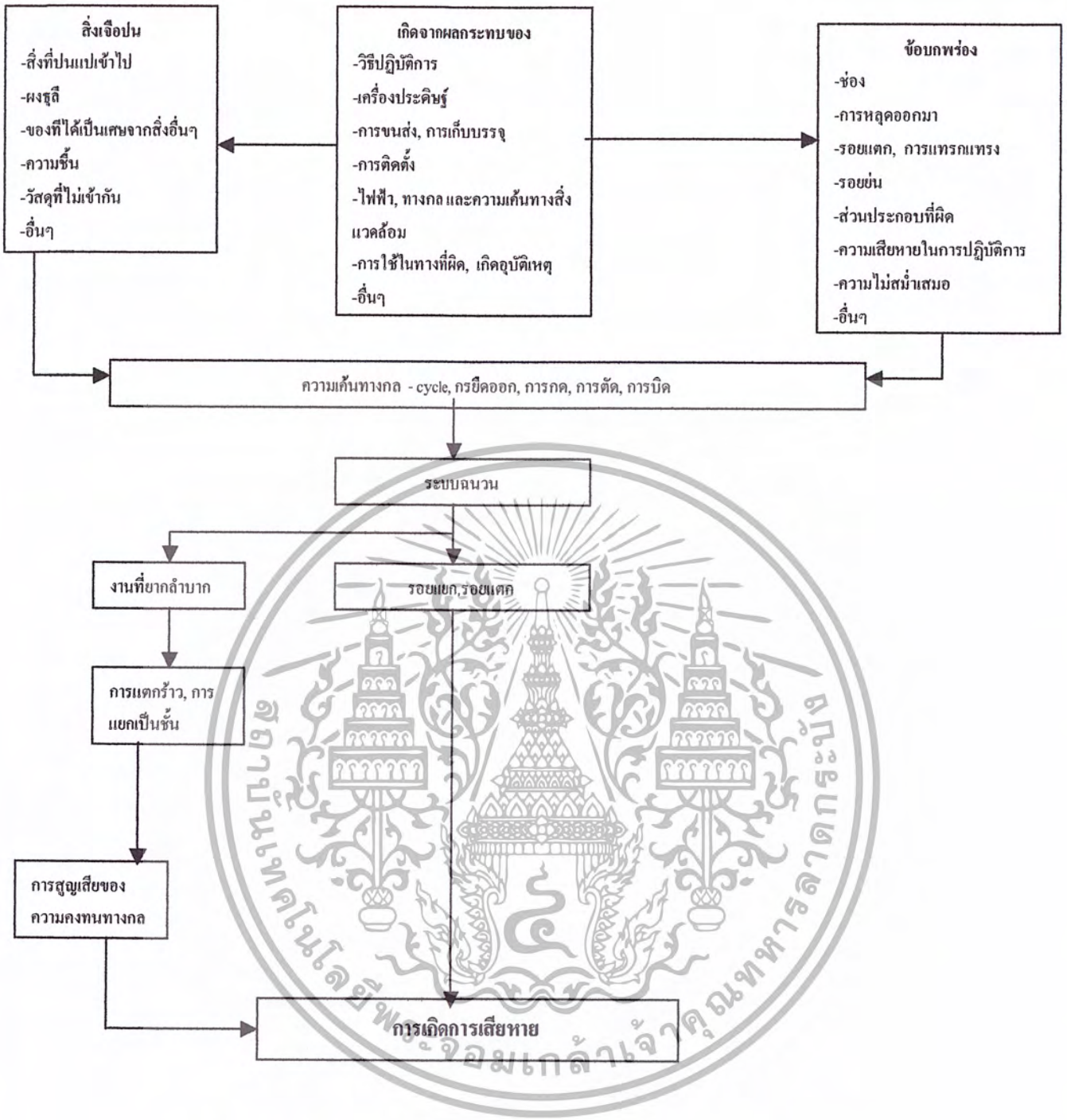

***รูป ข-5 แสดงตัวอย่างของอายุที่เหมาะสมกับระบบฉนวนที่มีอายุทางไฟฟ้าเป็นปัจจัยที่สำคัญ***

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



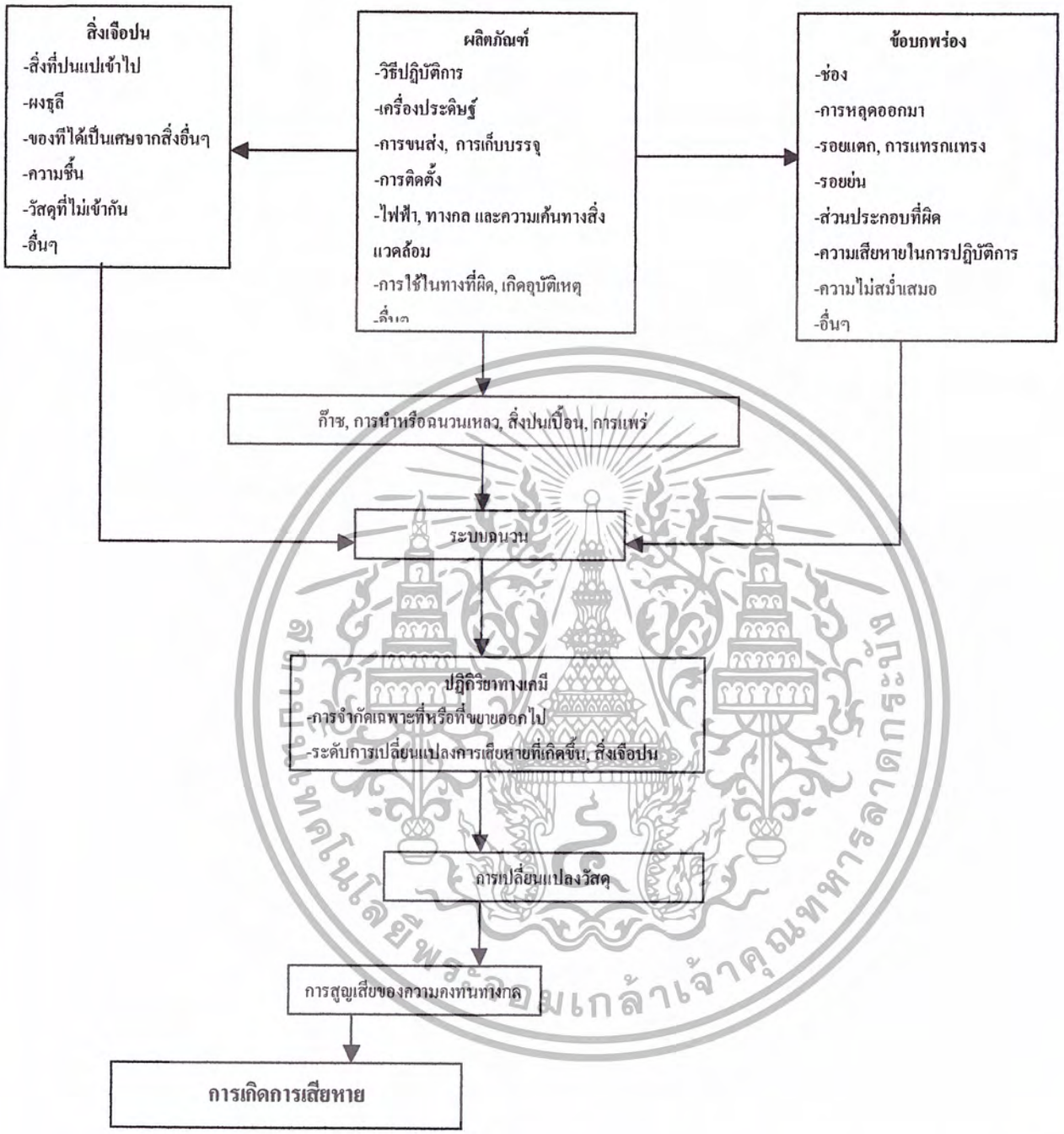

***รูป ข-6 แสดงตัวอย่างของอายุที่เหมาะสมกับระบบฉนวนที่มีอายุทางอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญ***

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




*รูป ข-7 แสดงตัวอย่างของอายุที่เหมาะสมกับระบบฉนวนที่มีอายุทางกลเป็นปัจจัยที่สำคัญ*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




***รูป ข-8 แสดงตัวอย่างของอายุที่เหมาะสมกับระบบฉนวนที่มีอายุทางสิ่งแวดล้อมเป็นปัจจัยที่สำคัญ***

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ประเภทโดยพื้นฐานของวัสดุฉนวน**

ในทางปฏิบัติเมื่อพิจารณาวัสดุสำหรับติดตั้งในเครื่องจักรไฟฟ้าหมุนนั้นจะสามารถแบ่งได้ดังนี้

(1) ฉนวนหุ้มตัวนำ (Conductor insulation)

(2) แผ่นเทปและแผ่นยืดหยุ่น (Tapes and flexible sheets )

(3) แผ่นฉนวนแข็งและแผ่นฉนวนบาง (Rigid sheets and laminates)

(4) ปลอกและเคเบิล (Sleevings and cables )

(5) สารกึ่งตัวนำที่ใช้ป้องกันปรากฏการโคโรนาและระดับความเครียดวัสดุ (Semi-conducting corona shield and stress grading materials)

(6) แผ่นเทปสำหรับยึด,สายมัด,เชือก (Bracing tapes,cords,ropes)

(7) วาร์นิชและเรซินอิ่มตัว (Impregnating varnishes and resins)

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## (1) ฉนวนหุ้มตัวนำ (Conductor insulation)

การหุ้มตัวนำโดยทั่วไป หมายถึง ลวดทองแดง (หรือโลหะตัวนำอื่นๆ) ถูกหุ้มด้วยชั้นที่ต่อเนื่องของวัสดุฉนวน ทั้งแบบตัวนำกลมและแบบตัวนำสี่เหลี่ยม การหุ้มตัวนำด้วยวัสดุฉนวนสามารถหุ้มด้วยวัสดุฉนวนชนิดเดียว (Single covering) หรือหลายชนิด (Composite covering)

**ชนิดของวัสดุฉนวนหุ้มตัวนำ**

ตารางที่ 1 ชนิดของอีนาเมล (Enamel) ที่ใช้หุ้มตัวนำ

| วัสดุฉนวน | รายละเอียด |
|---|---|
| Enamel<br>Oleoresinous (105°C)*<br>Polyvinyl acetal/polyvinyl formal (105°C)*<br>Polyurethane (solderable) (105°C)*<br>Polyamide (nylon) (105°C)*<br>Polyurethane(non-solderable(130°C)*<br>Polyester (terephthalate ester) (155°C)*<br>Epoxy (155°C)*<br>Acrylic (155°C)*<br>Polyhydantin (155°C)*<br>Polyesterimide (180°C)*<br>Polyesrimide/amide (dual coat) (180°C)*<br>Alkyd-modified silicone (180°C)*<br>Silicone (180+°C)*<br>Polyimide (200°C)*<br>Polytetrafluoroethylene (200°C)* | 1.ในอดีตวัสดุเคลือบลวดจำพวก โอเลโอ-เรซินัส (oleoresinous) ได้ถูกนำมาใช้ แต่การหุ้มด้วยวัสดุชนิดนี้มีความคงทนทางกลน้อยและมีความต้านทานต่อการฉีกขาดต่ำ สำหรับการปรับปรุงเมื่อตัวนำถูกนำมาใช้กับงานทางด้านทางกลและงานที่มีโอกาสทำให้เกิดการฉีกขาดได้ง่าย โดยทั่วไปในการปฏิบัตินั้นสามารถปรับปรุงได้โดยการเพิ่มการหุ้มด้วยวัสดุฉนวนจำพวก ฝ้าย (cotton), เรยอง (rayon), ไหมธรรมชาติ(silk), ใยหิน(asbestos) หรือใยแก้ว<br>2.เมื่อ 30 ปีที่ผ่านมานั้นได้มีการปรับปรุงวัสดุฉนวนที่สำคัญอันหนึ่งซึ่งประสบความสำเร็จโดยการรวม PF กับ PVA ที่มีความยืดหยุ่นสูงเพื่อสร้างเป็นวัสดุฉนวนจำพวกอีนาเมล (enamel) การหุ้มตัวนำด้วยระบบเรซินชนิดนี้ได้ถูกนำมาใช้แทนวัสดุฉนวนจำพวกอีนาเมล (enamel) ชนิดเก่าอย่างรวดเร็ว การหุ้มด้วย PVA-PF พบว่ามีความน่าพอใจสำหรับใช้ในกระบวนการพันขดลวด ซึ่งสามารถใช้ได้ที่ระดับอุณหภูมิจำกัดถึงประเภทอี (class E) การปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของวัสดุฉนวนได้กำจัดความต้องการการหุ้มที่เพิ่มวัสดุฉนวนจำพวกเส้นใย (fibrous) ซึ่งอยู่ในหลายๆ การปรับปรุง<br>3.โดยส่วนใหญ่การพันขดลวดตัวนำของเครื่องจักรกลไฟฟ้าขนาดกลางและขนาดเล็กซึ่งการหุ้มด้วยวัสดุฉนวนจำพวกอีนาเมล (enamel) ก็เพียงพอต่อการพิจารณานำมาใช้ ซึ่งอาจจะเป็นการหุ้มตัวนำแบบที่ใช้วัสดุฉนวนชนิดเดียวของโพลีเอสเทอร์ไมด์ อีนาเมล (polyesterimide enamel) หรือแบบที่ใช้วัสดุฉนวนสองชนิดซึ่งประกอบด้วยโพลีเอสเทอริไมด์ อีนาเมล (polyesterimide enamel) ถูกหุ้มทับด้วยชั้นบางๆของโพลีเอไมด์ (polyamide) ได้ถูกนำมาใช้ การหุ้มตัวนำทั้งสองแบบแสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในกระบวนการพันขดลวดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าอุตสาหกรรมทั่วไป ซึ่งสามารถใช้ได้ที่ระดับอุณหภูมิจำกัดถึงประเภทอี (class E) |

**หมายเหตุ; * หมายถึงอุณหภูมิจำกัด (Normal maximum operating temperature (°c))**

เมื่อต้องการให้มีความทนทานทางกลพบว่าไม่สามารถใช้วัสดุฉนวนจำพวกอีนาเมล (enamel) เพียงอย่างเดียว การหุ้มตัวนำที่เติมวัสดุฉนวนจำพวกเส้นใย (fibrous) หรือ ฟิล์ม (film) จะถูกเพิ่มเข้าไป

ตารางที่ 2 ชนิดของวัสดุฉนวนหุ้มตัวนำ (ไม่รวมอีนาเมล (enamel))

| วัสดุฉนวน | รายละเอียด |
|---|---|
| Fibrous:<br>asbestos lappings<br>cotton lappings<br>rayon lappings<br>silk lappings<br>polyamide (nylon) lappings<br>polyester lappings<br>glass/polyester lappings<br>glass lappings<br>glass braid | 1.การหุ้มตัวนำด้วยเส้นใย (fibrous covering) โดยปกติจะถูกทำให้ติดกับตัวนำด้วยเทอร์โมเซ็ตติงวาร์นิช (thermosetting varnish)<br>2.สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าขนาดใหญ่ซึ่งมีค่าความเครียดทางไฟฟ้าระหว่างตัวนำที่อยู่ติดกันต่ำ การหุ้มตัวนำด้วยวัสดุฉนวนจำพวกเส้นใย (fibrous covering) เพียงอย่างเดียวจำเป็นต้องนำมาใช้ แต่ถ้าความเครียดทางไฟฟ้าระหว่างตัวนำที่อยู่ติดกันสูง เช่น ในขดลวดสเตเตอร์แรงดันไฟฟ้าสูง (high-voltage stator coils) การหุ้มตัวนำที่ประกอบด้วยวัสดุฉนวนหลายชนิด (composite covering) ของวัสดุฉนวนจำพวกอีนาเมล (enamel) เช่น โพลีเอสเตอร์ฟิล์ม (polyester film),โพลีอิไมด์ ฟิล์ม (polyimide film) หรือ กระดาษอารามิด (aramid paper) กับ วัสดุฉนวนจำพวกเส้นใย (fibrous covering) เช่น glass lapping หรือ glass braid ได้ถูกนำมาใช้ |
| Paper and films:<br>aramid (Nomex) paper<br>polyester (melinex,mylar,terphane,etc.) film<br>polycarbonate film<br>polyimide (Kapton) film | 1..สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าขนาดใหญ่ซึ่งมีค่าความเครียดทางไฟฟ้าระหว่างตัวนำที่อยู่ติดกันต่ำ การหุ้มตัวนำด้วยวัสดุฉนวนจำพวกเส้นใย (fibrous covering) เพียงอย่างเดียวจำเป็นต้องนำมาใช้ แต่ถ้าความเครียดทางไฟฟ้าระหว่างตัวนำที่อยู่ติดกันสูง เช่น ในขดลวดสเตเตอร์แรงดันไฟฟ้าสูง (high-voltage stator coils) การหุ้มตัวนำที่ประกอบด้วยวัสดุฉนวนหลายชนิด (composite covering) ของวัสดุฉนวนจำพวกอีนาเมล (enamel) เช่น โพลีเอสเตอร์ฟิล์ม (polyester film),โพลีอิไมด์ ฟิล์ม (polyimide film) หรือ กระดาษอารามิด (aramid paper) กับ วัสดุฉนวนจำพวกเส้นใย (fibrous covering) เช่น glass lapping หรือ glass braid ได้ถูกนำมาใช้ |

ตารางที่ 2 ชนิดของวัสดุฉนวนหุ้มตัวนำ (ไม่รวมอีนาเมล (enamel)) (ต่อ)

| วัสดุฉนวน | รายละเอียด |
|---|---|
| Mica-paper base:<br>polyester film -backed mica paper<br>polycarbonate film -backed mica paper<br>polyimide film-backed mica paper<br>woven glass-backed mica paper<br>woven glass and polyester film -backed mica paper<br>unidirectional glass and polyester film -backed mica paper<br>double-sided polyester film -backed mica paper | 1.ตัวนำสำหรับเครื่องจักรกลแรงดันไฟฟ้าสูง (high-voltage machine) เช่น สำหรับไลน์โวลต์เตจ(line voltage) ที่มีขนาดมากกว่า 4 กิโลโวลต์ มักจะถูกหุ้มด้วยชั้นของไมกาเบสเทป (mica-base tape) ตัวนำเหล่านี้สามารถทนต่อความเครียดทางไฟฟ้าสูงที่สร้างจากเครื่องจักรกลแรงดันไฟฟ้าสูง (high-voltage machine) ขณะที่กำลังใช้งาน วัสดุฉนวนหุ้มตัวนำจำพวกไมกาเทป (micaceous conductor tape) ต้องการสารที่ทำหน้าที่เสริม (backing)ให้มันมีความคงทนทางกลพอต่อการใช้งาน<br>2.ชนิดของสารที่ทำหน้าที่เสริม คือ woven glass cloth, glass fleece, woven polyester cloth, polyester fleece, polyester film, polycarbonate film และ กระดาษอารามิด (aramid paper) เทปหุ้มตัวนำ (conductor tape) ของวัสดุฉนวนชนิดนี้จะถูกทำให้ติดกับตัวนำด้วยเรซิน หรือ วาร์นิช ซึ่งจะด้วยวิธีถนอมเต็มที่ (fully cure) หรือดูแลที่สภาวะ B stage ชนิดของเรซินที่ใช้สำหรับการทำให้ติดกัน (typical bonding resins) คือ โพลีเอสเตอร์ (polyesters), อะครายลิก (acrylics), โพลียูรีเทน (polyurethanes), อีปอกไซด์ (epoxidesc) และซิลิโคน (silicone) |

หมายเหตุ; 1.วัสดุฉนวนหุ้มตัวนำทั้งหมดในตารางที่ 2 สามารถใช้หุ้มบนวัสดุฉนวนจำพวกอีนาเมล (enamel) ได้

2.วัสดุฉนวนจำพวกเส้นใย (Fibrous covering) โดยทั่วถูกนำไปใช้หุ้มตัวนำ หรือนำไปทำให้อิ่มตัว (impregnated) ด้วยวาร์นิช หรือ เรซิน

3. การหุ้มตัวนำที่ประกอบด้วยวัสดุฉนวนหลายชนิด (Composite covering) ของฟิล์ม (film) หรือ กระดาษ (paper) กับ fibrous lapping ได้ถูกนำมาใช้เช่นกัน

ในบางการปรับปรุงเช่นที่ใช้สำหรับขดลวดฟีลด์ (Field coil) วัสดุฉนวนหุ้มตัวนำจำพวกอีนาเมล หรือ เส้นใย จะถูกหุ้มด้วยการเพิ่มชั้นของอีปอกซีเรซิน (epoxy resin) หลังจากทำการปรับปรุง เรซินจะถูกนำไปถนอมเพียงบางส่วนเพื่อทำให้แห้ง โดยห้ามสัมผัสบริเวณผิวซึ่งอนุญาตให้จับตัวนำได้โดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาตามมา

## (2) แผ่นเทปและแผ่นยืดหยุ่น (Tapes and flexible sheets )

โดยทั่วไปส่วนประกอบหลายๆส่วนที่มีรูปร่างธรรมดาและที่มีรูปร่างซับซ้อนจะมีความสัมพันธ์กับเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุน (rotating machine) เช่น ในส่วนที่เป็นร่องสลอต (slot) และ end-winding ของขดลวด (coil) และ บาร์ (bar),การเชื่อมต่อ (connection),ส่วนปลายของลวดตัวนำ(terminal lead),ตัวโพล(pole bodies) และอื่นๆ ต้องการการหุ้มด้วยวัสดุฉนวนที่มีระดับความเหมาะสมต่อแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งาน

ในส่วนประกอบที่มีรูปร่างธรรมดา เช่นสำหรับส่วนปลายของลวดตัวนำ(Terminal lead) หรือส่วนที่เป็นร่องสลอต (slot) ของขดลวด (coil) เหล่านี้สามารถทำได้โดยการพันด้วยแผ่นที่มีความกว้างของวัสดุฉนวนที่มีความคงทนไดอิเลกตริก (dielectric strength) หลายๆเวลาซึ่งมากกว่าที่เป็นส่วนที่มีช่องว่างอากาศเท่ากัน (equivalent air space)

ในส่วนประกอบที่มีรูปร่างซับซ้อน เช่น สำหรับขดลวดที่ได้ถูกพัฒนาดังนั้นวัสดุฉนวนสามารถได้รับการปรับปรุงให้สามารถใช้ได้ง่ายขึ้นด้วยการใช้แผ่นเทปแคบๆ (Narrow tapes) วัสดุฉนวนจำพวกแผ่นเทปหลายชนิดถูกทำขึ้นโดยการตัดแผ่นที่มีความกว้างออกเป็นแถบให้ได้ความกว้างที่ต้องการ

วัสดุที่นำมาใช้งานได้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทพื้นฐาน คือ

(1) ประเภทที่ไม่ใช่ไมกา (non-micaceous) ซึ่งที่ความเครียดทางไฟฟ้าปรากฏผ่านสารไดอิเลกตริกเมื่อเปรียบเทียบแล้วมีค่าต่ำและไม่เกิดการดิสชาร์จ ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ขณะที่ใช้งาน วัสดุฉนวนประเภทนี้สามารถนำมาใช้งานได้

(2) ประเภทที่เป็นไมกา (micaceous) ซึ่งที่ความเครียดทางไฟฟ้าอาจมีค่าสูงและเกิดการดิสชาร์จขณะใช้งาน วัสดุฉนวนจำพวกไมกาแบส (mica-base) มีความจำเป็นที่จะนำมาใช้

### 1.วาร์นิชที่มีความยืดหยุ่นถูกทำให้อิ่มตัวด้วยแผ่นเทปและแผ่นบางที่ไม่ใช่ไมกา (Flexible varnish impregnated non-micaceous tapes and sheets)

ตารางที่ 3 วัสดุฉนวนที่ไม่ใช่ไมกาเคลือบด้วยน้ำมันชักเงา (non-micaceous varnished materials)

| เส้นใยที่เป็นฐาน (base fabric) | วัสดุฉนวนจำพวกวาร์นิช หรือ เรซิน | | รายละเอียด |
|---|---|---|---|
| Woven cotton cloth<br>Woven silk cloth<br>Woven nylon cloth<br>Woven polyester cloth<br>Woven glass cloth<br>Woven aramid cloth<br>Polyester fleece<br>Glass fleece | impregnated with (ทำให้อิ่มตัวด้วย) | bitumen<br>shellac<br>oleoresinous<br>alkyd<br>acrylic<br>polyester<br>epoxide<br>polyurethane<br>silicone<br>polyimide | 1. แผ่นเทปมาตรฐานหลายชนิดจะยึดวัสดุจำพวก woven fabric, fleece, หรือวัสดุที่มีลักษณะคล้ายกระดาษเป็นหลักโดยถูกหุ้มด้วยวาร์นิชยืดหยุ่น<br>2. วัสดุหลักหลายชนิดที่แตกต่างกันประกอบด้วย woven silk, cotton, nylon, polyester และ glass cloth และpolyester และ glass mats ได้ถูกนำมาใช้ในการทำวัสดุที่มีความยืดหยุ่น<br>3. ชนิดของเรซินที่นำมาใช้ในการทำให้อิ่มตัว เช่น glyptals, polyurethanes, epoxides, polyester และsiliconeได้ถูกปรับปรุงโดยผู้ผลิตต่างๆ |

2.แผ่นฟิล์มยืดหยุ่นและกระดาษเทปสังเคราะห์และแผ่นบาง(Flexible films and synthetic paper tapes and sheets)

ตารางที่ 4 แผ่นฟิล์มยืดหยุ่นและกระดาษเทปสังเคราะห์และแผ่นบาง (Flexible films and synthetic paper tapes and sheets)

| วัสดุฉนวน | รายละเอียด |
|---|---|
| แผ่นฟิล์ม (films):<br>polyester<br>polycarbonate<br>polyimide<br>กระดาษ (paper):<br>cellulose<br>polyester<br>aramid<br>asbestos<br>glass<br>ceramic<br>ใช้ร่วมกัน (composites):<br>cellulose paper/polyester film<br>cellulose paper/polyester film/cellulose film<br>polyester paper/polyester film<br>polyester paper/polyester film /polyester film<br>aramid paper/polyester film<br>aramid paper/polyester film/aramid film<br>aramid paper/polyimide film<br>aramid paper/polyimide film/aramid paper | 1.เมื่อหลายปีก่อน วัสดุยืดหยุ่นที่ไม่ใช่ไมกา (non-micaceous) ส่วนใหญ่จะยึดถือ woven cloth เป็นหลัก สภาวะนี้ได้เปลี่ยนแปลงไปเมื่อประมาณ 25 ปีที่ผ่านมา ด้วยการ พัฒนาของแผ่นฟิล์มชนิดใหม่ที่ทนความร้อนสูงและกระดาษเส้นใย<br>2.วัสดุทั้งหมดที่สามารถนำมาใช้งานได้แต่ก่อน เช่น ฝ้าย,กระจกบางใส,และ polyester cloths and fleeces ต้องการการทำให้อิ่มตัวด้วยวาร์นิช เพื่อทำให้มันมีความเหนียว ทางไฟฟ้าเพิ่มถึงระดับที่สามารถยอมรับได้<br>3.วัสดุที่พัฒนาขึ้นมาใหม่นั้นอย่างไรก็ตามก็จะมีความเหนียวทางไฟฟ้าภายใน แผ่นบางจะยึดถือแผ่นฟิล์มโพลีเอสเตอร์ แผ่นฟิล์มโพลีอิไมด์ และกระดาษอะรามิดเป็นหลัก ได้พิสูจน์ว่าสามารถนำมาใช้งานได้ ดังในร่องสลอตของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้าต่ำและกลาง<br>4.แผ่นเทปกระดาษอะรามิด ซึ่งในการติดตั้งสามารถทำได้โดยสมบูรณ์ถึงระดับอุณหภูมิจำกัดที่ +180 องศาเซลเซียส และถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางกับตัวนำและฉนวนกราวด์หลัก (main ground insulation) ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้าต่ำ<br><br>หมายเหตุ: 1. กระดาษมักจะถูกทำให้อิ่มตัวหรือถูกหุ้มด้วยอีปอกไซด์ โพลีเอสเตอร์ หรือ ซิลิโคนเรซิน<br>2.สามารถทราบได้โดยทั่วไป ดังนี้ D/M/D,N/M/M และ N/K/N ตามลำดับ |

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3.สารเหนียวที่มีความยืดหยุ่นหุ้มแผ่นเทปและแผ่นฟิล์ม (Flexible adhesive-coated tapes and films)

ตารางที่ 5 ประเภทโดยทั่วไปของแผ่นเทปเหนียว (Typical types of adhesive tapes)

| วัสดุฉนวน | | | รายละเอียด |
|---|---|---|---|
| วัสดุฉนวนทั่วไป (basic type) | สารเหนียว (adhesive) | ระดับอุณหภูมิ (thermal class) | |
| Paper | Rubber rasin | A | 1.ในการหุ้มแผ่นเทป woven cloth และแผ่นฟิล์มด้วยเรซินที่มีความเหนียวดีและมีคุณสมบัติขึ้นรูปได้ ขอบเขตของผลิตภัณฑ์จะถูกสร้างขึ้นเพื่อการประยุกต์ใช้กับส่วนเล็กๆมากมายในเครื่องจักรกลไฟฟ้า<br>2.วัสดุฉนวนประเภทนี้มีการใช้งานเพียงเล็กน้อยแต่ก็เป็นส่วนที่มีความสำคัญในหลายๆระบบฉนวน แผ่นเทปที่มีความเหนียวภายในตัวเองจะยึดวัสดุจำพวกเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) เป็นหลัก เช่น PVC,บิวทิล (butly),ยางซิลิโคน ซึ่งถูกนำมาใช้เพื่อวัตถุประสงค์เฉพาะอย่างด้วย |
| Creped paper | Rubber rasin | A | |
| Acetate film | Rubber rasin | A | |
| Acetate cloth | Rubber rasin | A | |
| Polyester film | Rubber or acrylic | B | |
| Woven glass cloth | Acrylic | F | |
| Woven glass cloth | Silicone | H | |
| Polyimide film | Acrylic | F | |
| Polyimide film | Silicone | H | |
| PTFE film | Silicone | H | |
| Vinyl/PVC | Rubber | Y | |

หมายเหตุ: ขอบเขตความหนาอยู่ระหว่าง 0.05-0.30 มิลลิเมตร

4.แผ่นเทปและแผ่นบางถูกยึดติดด้วย B-stage เรซิน (Tapes and sheets bonded with B-stage resins)

ในการรักษา Woven glass cloth ด้วยอีปอกไซด์เรซินเหลวและหลังจากนั้นทำการอบวัสดุเพื่อดูแลเรซินเข้าสู่ขั้นตอนการทำให้แห้งที่มีความยืดหยุ่น ผลผลิตที่เรียกว่า B-stage ได้ถูกสร้างขึ้นมา วัสดุเหล่านั้นสามารถนำมาพันรอบส่วนประกอบต่างๆที่ซึ่งถูกกดดันอยู่ภายใต้ความร้อนและความดันเพื่อผลิตฉนวนแข็ง (rigid insulation) วัสดุของประเภทนี้จะยึดถือวัสดุพวก woven cloth, random mats และ unidirectionally arranged fibres ซึ่งถูกนำมาใช้กับหลายส่วนประกอบ

## 5.แผ่นเทปและแผ่นบางจำพวกไมกายืดหยุ่น (Flexible micaceous tapes and sheets)

ตาราง 6 วัสดุจำพวกไมกา (Micaceous materials)

| วัสดุฉนวน | | | |
|---|---|---|---|
| วัสดุที่ทำหน้าที่เป็นตัวพาหะหรือตัวสนับสนุน (Carrier or backing material) | ไมกา | เรซินหรือวาร์นิชยึดติดหรืออิ่มตัว | รายละเอียด |
| Cellulose paper<br>Woven polyester cloth<br>Woven glass cloth<br>Polycarbonate film<br>Polyimide film<br>Polyester fleece<br>Glass fleece | แผ่นไมกาบาง + กระดาษไมกา + | (1) การดูแลอย่างเต็มที่<br>bitumen polyurethane<br>shellac polyester<br>copal epoxide<br>alkyd silicone<br>(2) B-stage-high bond content<br>(B-stage ที่มีปริมาตรการยึดติดสูง)<br>ดังนี้ resin-rich<br>epoxide<br>modified silicone<br>(3) Low bond content<br>(มีปริมาตรการยึดติดต่ำ) ดังเช่น<br>แผ่นเทปแห้งสำหรับความดัน<br>สุญญากาศอิ่มตัว<br>epoxide<br>polyester<br>silicone | 1.แผ่นเทปและแผ่นบางยึดถือไมกาเป็นหลัก ซึ่งมีความสำคัญสูงสุดในการพันขดลวดแรงดันไฟฟ้าสูง<br>2.การใช้ไมกาแยก (mica splitting) นั้นมีกระบวนการในการผลิตเพื่อที่สร้างแผ่นฉนวนบาง มีขั้นตอนดังนี้<br>2.1 ชั้นของวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นตัวสนับสนุน เช่น woven glass cloth จะถูกหุ้มด้วยเรซินเหลว<br>2.2 นำไมกาแยก (mica splitting) วางบนวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นตัวสนับสนุนแต่ละการแยกหรือแผ่นบางๆ จะมีการวางเยื้องกันกับแผ่นที่อยู่ติดกันเพื่อที่จะสร้างรูปแบบที่ต่อเนื่องของไมกา<br>2.3 ถ้าต้องการวัสดุที่มีความหนามากกว่า ดังนั้นวาร์นิชชนิดพิเศษและชั้นของไมกาแยก (mica splitting) จะถูกเพิ่มเข้าไปถ้าจำเป็น<br>3. ในอดีต โดยส่วนใหญ่ของแผ่นเทปไมกามาตรฐานจะถูกสร้างโดยกระบวนการนี้ ในฝรั่งเศสตอนต้นทศวรรษ 1940 ความก้าวหน้าอย่างมากได้เกิดขึ้น เมื่อกระบวนการสร้างได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อที่นำแผ่นไมกาบางๆ หลายขนาดหลายรูปร่าง กลับมาอยู่ในรูปกระดาษไมกา (mica-paper) เทคนิคการสร้างนี้ใช้ปฏิกิริยาทางเคมีและปฏิกิริยาทางกลที่แข็งแรงเพื่อทำให้แผ่นไมกาแยก (mica splitting) เกิดการเบรกดาวน์กลายเป็นแผ่นเล็กๆ<br>4. ความเข้มข้นของไมกาและน้ำที่สร้างขึ้นซึ่งมีสภาวะเป็นกลาง หลังจากนั้นก็ใส่เข้าไปในเครื่องดัดแปลงการสร้างกระดาษ (a modified papermaking machine) เพื่อสร้างไมกาให้กลับมาอยู่ในรูปแผ่นบางของการจัดองค์ประกอบที่มีลักษณะคล้ายกระดาษเหมือนการสร้างกระดาษไมกาที่มีคุณสมบัติทางกลต่ำ แต่การเพิ่มชั้นของวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นตัวสนับสนุนของ woven glass cloth หรือ เส้นใยโพลีเอสเตอร์ (polyester fibre) ซึ่งสามารถแตะต้องได้ทันทีและทำให้อิ่มตัวด้วยชนิดส่วนใหญ่ของเรซินธรรมชาติหรือเรซินสังเคราะห์ |

6. แผ่นเทปและแผ่นบางจำพวกไมกาที่ถูกยึดติดด้วย B-stage resin (Micaceous tapes and sheets bonded with B-stage resins)

6.1 ในจำพวกที่เหมือนกันที่ถูกนำมาใช้ในการผลิตเรซินที่ผ่านกระบวนการทางเคมีจำพวก woven glass cloth (ดูในหัวข้อที่ 4) ซึ่งสามารถทำการปฏิบัติเพื่อผลิตกระดาษไมกา หรือแผ่นไมกาบางๆ หรือแผ่นบางที่ถูกสนับสนุนด้วยวัสดุหลายชนิด เช่น woven glass cloth, polyester mat และ โพลีเอสเตอร์ฟิล์ม (polyester film) เป็นต้น

6.2 วัสดุของประเภทนี้สร้างระดับความสำคัญของผลผลิตที่ถูกนำมาใช้สำหรับหุ้มวัสดุฉนวนการพันขดลวด Resin-rich ที่แรงดันไฟฟ้าสูง ชนิดที่แตกต่างกันของเรซินยึดติด (bonding resin) มีการใช้โดยทั่วไป

6.3 กลุ่มที่มีความสำคัญมากที่สุด สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าอุตสาหกรรม สามารถดำเนินการได้เต็มที่สูงสุดถึงระดับคลาส F

6.4 แผ่นเทปและแผ่นบางจะยึดถือเรซินเหล่านี้เป็นหลัก โดยถูกสนับสนุนด้วย woven glass cloth ซึ่งได้มีการนำมาใช้เมื่อ 30 ปีก่อน กับทุกๆขนาดและทุกระดับแรงดันไฟฟ้าจนถึง 30 กิโลโวลต์

6.5 วัสดุที่ถูกสนับสนุนด้วยโพลีเอสเตอร์ฟิล์ม ถูกใช้ในการพันขดลวดที่ดำเนินการได้ถึงระดับแรงดันไฟฟ้า 13.8 กิโลโวลต์เช่นกัน

7. แผ่นเทปและแผ่นบางจำพวกไมกาที่มีปริมาตรการยึดติดต่ำ (Low bond content micaceous tapes and sheets)

7.1 ด้วยความสำคัญที่เท่ากันต่อแผ่นเทป resin-rich ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 6 ซึ่งเป็นวัสดุที่ถูกทำขึ้นในจำพวกที่เหมือนๆกันแต่ถูกยึดติดเข้าด้วยกันด้วยเปอร์เซ็นต์เพียงเล็กน้อยของเรซิน

7.2 เหล่านี้ถูกเรียกว่า “แผ่นไมกาแห้ง” (dry mica tape) ถูกนำมาใช้เหมือนวัสดุฉนวนกราวด์หลัก (main ground insulation) สำหรับการพันขดลวดความดันสุญญากาศอิ่มตัว (vacuum pressure impregnated windings)

7.3 วัสดุของประเภทนี้ถูกผลิตขึ้นด้วยตัวสนับสนุน (backing) หลายชนิดที่ต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับกระบวนการการใช้งานและชนิดของเรซินที่นำมาใช้สำหรับการทำให้อิ่มตัวครั้งสุดท้าย

### (3) แผ่นแข็งและแผ่นบาง (Rigid sheets and laminates)

ในการผลิตเครื่องจักรกลไฟฟ้าทั้งหลายนั้นมีความต้องการอย่างหนึ่งสำหรับส่วนประกอบที่ทำด้วยวัสดุฉนวนแข็ง เช่น slot wedge, separator, ขอบยึดขดลวดฟิลด์ (field coil flanges), end-winding packing block, terminal supports เป็นต้น ซึ่งถูกนำมาใช้ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าขนาดกลางและขนาดเล็ก และการสร้างโดยทั่วไปจะทำจากวัสดุที่มีความแข็ง

ตารางที่ 7 แผ่นบางแข็งและกระดาษหยาบ (Rigid laminates and mats)

| วัสดุฉนวน | | | รายละเอียด |
|---|---|---|---|
| วัสดุพื้นฐาน (base materials) | ระบบเรซิน (resin system) | | |
| Cellulose paper<br>Asbestos paper<br>Aramid paper<br>Mica paper<br>Cotton cloth<br>Silk cloth<br>Linen cloth<br>Glass cloth<br>Asbestos cloth<br>Aramid cloth<br>Polyester cloth<br>Glass mat<br>Polyester mat | ทำให้อิ่มตัวด้วย impregnated with | phenolic resin<br>melamine resin<br>polyester resin<br>alkyd resin<br>epoxide resin<br>polyimide resin<br>silicone resin | 1.วัสดุในยุคแรกๆ<br>1.1 ในช่วงแรกของการผลิตเครื่องจักรกลไฟฟ้ามีเพียงวัสดุฉนวนแข็งที่สามารถนำมาใช้งานได้ง่าย ซึ่งได้แก่ ไม้เนื้อแข็ง กระเบื้อง (porcelain) แร่เขี้ยวหนุมาน (quartz) กระจกบางใส ไมกา และหินชนวน<br>1.2 หลังจากนั้นได้มีการพัฒนา phenolic resin การจัดกลุ่มใหม่ทั้งหมดของวัสดุ ได้มีการนำเสนอซึ่งแสดงการออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้า ในหลายโอกาสที่ทำการปรับปรุงคุณภาพที่สร้างเข้าไปภายในเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้น<br>1.3 ในการใช้วัสดุ เช่น กระดาษ ฝ้าย ผ้าลินิน ซึ่งนำวัสดุเหล่านี้ไปผ่านกระบวนการทางเคมีกับวาร์นิชและนำไปดูแลเพียงบางส่วนให้อยู่ในสภาวะที่แข็ง (a dry stage) หรือสภาวะ (a pre-preg) ได้ถูกสร้างขึ้นและถ้ามีจำนวนชั้นของ pre-preg หลายชั้น สามารทำให้มีความแข็งแรงเข้าด้วยกันภายใต้ความร้อน และความดัน ก็จะได้ออกมาเป็นแผ่นบางแข็ง<br>1.4 วัสดุประเภทนี้จะถูกผลิตขึ้นมาที่มีความหนาอยู่ในช่วงระหว่าง 0.1 ถึง 150 มิลลิเมตร จากส่วนประกอบของแผ่นบางๆนี้ สามารถนำมาตัดได้ตามความต้องการ<br>2. วัสดุสมัยใหม่<br>2.1 ในช่วงระหว่าง 50 ปีก่อน วัสดุหลักใหม่ๆหลายชนิด และในระบบเรซินได้ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับการสร้างแผ่นบางแข็งชนิดใหม่<br>2.2ด้วยคุณสมบัติทางความร้อน ทางกล และทางไฟฟ้า ของวัสดุที่นำมาใช้งานโดยทั่วไปได้มีการขยายออกไปอย่างกว้างขวาง<br>2.3 ดังนั้นโดยส่วนใหญ่ของวัสดุแข็งจะถูกที่นำมาใช้กับระบบการจ่ายไฟขนาดใหญ่ที่ยึดเอาวัสดุเรซินจำพวกเทอร์โมเซตติง เป็นหลัก โดยเฉพาะ อีปอกไซด์ และโพลีเอสเตอร์ และมีวัสดุแผ่นบางที่เป็นเรซินจำพวกเทอร์โมพลาสติกจำนวนหนึ่งเช่นกัน ที่มีการพิสูจน์ว่าสามารถใช้ประโยชน์สำหรับการทำเป็นส่วนประกอบที่ใช้ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าขนาดกลางและขนาดเล็ก |
| Unidirectional glass | | | |

## (4) ปลอกและเคเบิล (sleeving and cable)

ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าหลายชนิดมีความต้องการอย่างหนึ่งที่จะเชื่อมต่อขดลวดหลายๆขดที่แยกกันให้รวมเข้าด้วยกัน เพื่อที่จะทำการพันเป็นขดลวดที่สมบูรณ์

ตารางที่ 8 วัสดุฉนวนที่เป็นปลอกยืดหยุ่น (Flexible insulating sleeving)

| วัสดุฉนวน | | | รายละเอียด |
|---|---|---|---|
| ด้ายถักพื้นฐาน (basic yarn-braided or knitted) | เคลือบด้วยน้ำมันชักเงาหรือหุ้มด้วย (varnished impregnation or coating) | ระดับอุณหภูมิ (thermal class) | |
| Polyester fibre | Polyurethane | B | สำหรับการพันขดลวดแบบแรงดันต่ำ หลังจากที่ทำการต่อระหว่างขดลวดกับขดลวด (coil- to- coil) แล้ว วัสดุฉนวนของการเชื่อมต่อที่สามารถนำมาใช้งานได้บ่อยก็จะเป็นแผ่นใยแก้วที่เคลือบน้ำมันชักเงาที่มีความยาวขนาดหนึ่งหรือโพลีเอสเตอร์ที่ถักเป็นปลอก |
| Glass fibre | Polyurethane | B | |
| Polyester fibre | Isophthalic | F | |
| Glass fibre | Isophthalic | F | |
| Polyester fibre | Acrylic | F | |
| Glass fibre | Acrylic | F | |
| Glass fibre | Silicone elastomer | H | |
| -- | Extrude Silicone elastomer | H | |
| Glass fibre | Silicone | C | |

หมายเหตุ: 1 ขนาดความกว้างของปลอกจะอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 25 มิลลิเมตร

2 ความหนาของผนังปลอกจะอยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 1.0 มิลลิเมตร

ธนาคารนวัตกรรมโดยพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ตารางที่ 8 เคเบิลและจุดสิ้นสุดของขดลวดที่มีความยืดหยุ่น (Cable and coil-end flexibles)

| วัสดุฉนวน | รายละเอียด |
|---|---|
| Elastomeric and similar coverings:<br>Polychloroprene (PCP)<br>Nitrile<br>Silicone<br>Chlorosulphonated polyethylene<br>Butyl/CSP<br>Ethylene propylene rubber (EPR)<br>EPR/CSP<br>Polyvinyl chloride<br>Cross-linked polyethylene propylene (XLPE)<br>Fluorinate ethylene propylene (FEP)<br>Ethylene tetrafluoroethylene (ETFE)<br>Polytetrafluoroethylene (PTFE)<br>การหุ้มโดยแผ่นเทป (taped coverings):<br>Woven glass tape impregnated with { Polyester, polyurethane; acrylic, silicone; epoxide } resin<br>Woven glass or polyester film-baced resin-impregnated mica paper<br>Aramid paper<br>Polyester or polycarbornate film<br>Silicone elastomer-impregnated woven glass | เมื่อไม่สามารถนำไปใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างขดลวดกับขดลวดได้โดยการต่อตัวนำเข้าด้วยกัน ก็สามารถใช้การหุ้มฉนวนด้วยสายเคเบิล เพื่อจะเชื่อมต่อจุดสิ้นสุดของขดลวดที่ความยาวของจุดต่อของเครื่องจักร ซึ่งสายเคเบิลที่มีความยืดหยุ่นจะถูกนำมาใช้ |

## (5) วัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำ (Semi-conducting materials)

ตารางที่ 10 วัสดุที่เป็นตัวนำและวัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำ (Conducting and semi-conducting materials)

| วัสดุฉนวน | รายละเอียด |
|---|---|
| วัสดุป้องกันปรากฏการณ์โคโรนา (Corona shield materials)<br>(1) Applied by brush:<br>Graphite-loaded resin or varnish<br>(2) Applied as tape:<br>Graphite-loaded resin –impregnated { Woven glass tape, Woven polyester tape, Woven asbestos tape / Woven aramid, Polyester fleece }<br>Conducting slot packing:<br>(1) วัสดุยืดหยุ่น<br>Graphite-loaded resin-impregnated { Woven glass cloth, Woven polyester cloth, Polyester fleece }<br>(2) วัสดุแข็ง<br>Graphite-loaded resin-impregnated { Woven glass cloth, Woven polyester cloth, Polyester fleece (pressed) } | 1.วัสดุป้องกันปรากฏการณ์โคโรนาและวัสดุที่ใช้หุ้มร่องสลอตที่เป็นสารกึ่งตัวนำ<br>1.1 สำหรับสเตเตอร์ของระบบไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันไฟฟ้าสูงมีข้อกำหนดอย่างหนึ่งซึ่งพื้นผิวภายนอกของขดลวดควรมีการติดต่อกับระบบไฟฟ้าเป็นอย่างดีกับแกนเหล็กบางๆ เป็นความจำเป็นที่จะต้องมีเพื่อป้องกันการดิสชาร์จทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในช่องว่างอากาศต่างๆ ระหว่างพื้นผิวของขดลวดกับแกนเหล็ก<br>1.2 ดังนั้นในทางปฏิบัติ เฉพาะขดลวดที่นำมาใช้หรือที่ใกล้เคียง จุดสิ้นสุดของสายจะมีความเค้นทางไฟฟ้าที่ระดับที่มากพอที่จะทำให้เกิดสลอตดิสชาร์จ วิธีปฏิบัติโดยปกติที่จะหุ้มพื้นผิวภายนอกของขดลวดทั้งหมดด้วยสารกึ่งตัวนำที่เหมาะสมปานกลาง<br>1.3 ในการปฏิบัติ การป้องกันปรากฏการณ์โคโรนาสามารถทำได้ไม่ว่าจะเป็นการหุ้มของ graphite-impregnate varnish หรือจะเป็น ชั้นของ graphite-impregnate polyester, glass, asbestos, หรือวัสดุที่เป็นเส้นใยอื่นๆ<br>1.4 ในตอนนี้วัสดุป้องกันปรากฏการณ์โคโรนาที่มีการนำมาใช้งานอย่างปกติมากที่สุดก็จะประกอบด้วยชั้นของ graphite-impregnated polyester fleece วัสดุชนิดนี้ได้ถูกนำมาใช้ไม่ว่าจะเป็นแผ่นบางที่นำมาพันรอบขดลวด (coil-side) หรือจะเป็นที่ขดลวดสองอันมาต่อกันหรือจะเป็นที่สิ่งหนึ่งของการพันเป็นชั้น<br>1.5 อีกวิธีหนึ่งคือการทาสีขดลวดกับการหุ้มด้วย graphite-loaded varnish<br>1.6 เมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมา woven asbestos tape ถูกทำให้อิ่มตัวด้วย graphite-loaded epoxide resin ได้ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุป้องกันปรากฏการณ์โคโรนากับหลายๆการพันขดลวดขนาดใหญ่ที่แรงดันไฟฟ้าสูง และเนื่องจากความเสี่ยงต่อความสมบูรณ์ที่สัมพันธ์กับ asbestos fibre วัสดุเหล่านี้จะถูกกำจัดออกไปอย่างช้าๆ<br>1.7 ดังนั้นวัสดุป้องกันปรากฏการณ์โคโรนา บางครั้งมีความเหมาะสมที่ 3.3 หรือ 4.16 กิโลโวลต์ของขดลวด โดยปกติที่มากไปกว่านั้นในปัจจุบันการกำหนดความเหมาะสมเฉพาะกับขดลวดสำหรับกระบวนการพันขดลวดที่ 6 กิโลโวลต์และที่แรงดันไฟฟ้าที่สูงกว่า ถูกทำให้มีผลกระทบต่อความต้านทานที่ผิววัสดุป้องกันปรากฏการณ์โคโรนา และความต้องการความต้านทานที่ผิวนี้จะอยู่ระหว่าง 1 ถึง 30 กิโลโอห์ม<br>1.8 เพื่อให้ขดลวดหรือแท่งโลหะมีการเชื่อมต่อที่ดีกับแกนเหล็กจึงจำเป็นต้องทำการบรรจุเข้าไปในร่องสลอตให้แน่น การลดขนาดช่องว่างอากาศโดยการทำเป็นร่องรูปตัว U หรือตัว L หรือบรรจุวัสดุจำพวก graphite-impregnated แม้ว่าวัสดุที่มีลักษณะคล้ายกระดาษหลายชนิดที่ถูกหุ้มทั้งสองด้านด้วย graphite varnish ได้มีการนำมาใช้ในอดีต วิธีปฏิบัติที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนั้นคือการจัดรูปร่องสลอตจะทำจาก graphite-impregnated polyester fleece |

ตารางที่ 10 วัสดุที่เป็นตัวนำและสารกึ่งตัวนำ (Conducting and semi-conducting materials) (ต่อ)

| วัสดุฉนวน | รายละเอียด |
|---|---|
| Stress grading (semi-conducting) materials:<br>(1) Applied by brush:<br>Silicone carbine-loaded resin or varnish<br>(2) Applied as tape:<br>Silicone carbine-loaded resin-impregnated { Woven glass tape / Woven polyester tape / Woven glass/polyester tape; Woven aramid / Polyester fleece } | 2. Stress-grading materials<br>2.1 ที่สเตเตอร์แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูง ส่วนที่ยื่นเกินออกมาของ lined-end coil จากแกนเหล็ก มีแนวโน้มที่จะมีความเค้นทางไฟฟ้าสูง<br>2.2 ความเค้นที่สูงนี้จะต้องถูกทำให้ลดลงและอีกอย่างหนึ่ง การดิสชาร์จทางไฟฟ้าจะเกิดขึ้นในอากาศมีใกล้กับจุดสิ้นสุดของขดลวด<br>2.3 ในการป้องกันปัญหานี้ การปฏิบัติโดยทั่วไปจะใช้วัสดุจำพวก stress-grading ที่จะขยายร่องสลอตของขดลวด ซึ่งถูกออกแบบสำหรับการใช้งานที่ 6 กิโลโวลต์<br>2.4 ในความเป็นจริงความต้องการความเค้นที่ลดลงสู่ระดับกลาง จะมีคุณสมบัติแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ไม่คงที่<br>2.5 ในทางปฏิบัติ silicone carbide-loaded epoxide resin ถูกนำมาใช้ไม่ว่าจะเป็นวาร์นิชหรือตัวพาหะ (carrier) เช่น woven glass หรือ polyester fibre tape |

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## (6) แผ่นเทปสำหรับยึด สายมัด และเชือก (Bracing tapes, cords and ropes)

ในโครงสร้างของขดลวดและการพันขดลวดส่วนใหญ่ วัสดุที่มีความแข็งแรงทางกลถูกนำมาใช้ในการดึงหรือมัดส่วนประกอบที่ถูกหุ้มด้วยฉนวนให้เข้าที่อย่างมั่นคง เส้นใยที่มีความยืดหยุ่นส่วนมากถูกนำมาใช้ ในโครงสร้างเหล่านี้จะเป็นเหมือนวัสดุพื้นฐานที่นำมาใช้เป็นตัวพาหะ (carrier) สำหรับ varnish-impregnated tapes

ตารางที่ 11 วัสดุสำหรับพันเกลียวและมัดการพันขดลวดและส่วนประกอบต่างๆ (Material for overtaping and bracing winding and components)

| วัสดุฉนวน | รายละเอียด |
|---|---|
| ใช้สำหรับดึง,ตัวยึดสุดท้ายและแผ่นเทปที่ใช้มัด (Pull up, final binder, bracing tapes)<br>Woven asbestos<br>Woven aramid<br>Woven glass<br>Woven polyester<br>Woven glass/polyester<br>Unidirectional glass<br>ทำให้อิ่มตัวด้วย impregnated with<br>phenolic varnish<br>epoxide varnish<br>polyester varnish<br>alkyd varnish<br>acrylic varnish<br>silicone varnish<br>Polyurethane varnish<br>สายยึด และเชือก (bracing cord and ropes)<br>Twisted aramid fibre cord<br>Twisted polyester fibre cord<br>Twisted glass fibre cord<br>Braided polyester fibre sleeving<br>Braid glass fibre sleeving<br>ทำให้อิ่มตัวด้วย impregnated with<br>phenolic varnish<br>epoxide varnish<br>polyester varnish<br>acrylic varnish | แบบการใช้งาน 4 แบบที่ใช้งานส่วนใหญ่โดยทั่วไปของวัสดุประเภทนี้<br>1. ทำหน้าที่เป็นตัวรองรับน้ำหนักบนวัสดุไดอิเลกตริกหลัก ไม่ว่าจะอยู่ในรูปของแผ่นบางหรือแผ่นเทป สามารถนำมาใช้โดยไม่มีอันตรายจากความเสียหายซึ่งได้กำหนดไว้กับส่วนประกอบที่ทำการฉนวน ตัวอย่างเช่น การปฏิบัติทั่วไปสำหรับการปรับปรุงชั้นของเส้นใยเทปที่มีความคงทนมากกว่าการมัดครีด้วยทองเหลืองหรือการบัดครีจุดเชื่อมต่อในการปรับปรุงการหุ้มด้วยฉนวนหลัก<br>2. ทำหน้าที่เป็นแผ่นเทปที่ใช้ดึง (pull up) ซึ่งส่วนประกอบหนึ่งถูกหุ้มด้วยวัสดุฉนวนหลายๆชั้น ตัวอย่างเช่น เมื่อส่วนประกอบหนึ่ง เช่น ขดลวดสำหรับการพันแบบแรงดันไฟฟ้าสูงจะถูกหุ้มด้วยฉนวนหลายๆชั้นของแผ่นเทป ซึ่งเป็นการปฏิบัติโดยทั่วไปที่จะกระจายการดึงแผ่นเทปให้แข็งแรง ระหว่างทุกๆ 4 หรือ 5 ชั้นของแผ่นเทปไดอิเลกตริกหลัก<br>3. ทำหน้าที่เป็นตัวที่ใช้มัดสุดท้าย (final binder) ที่ด้านนอกของขดลวดหรือที่ส่วนประกอบหรือส่วนประกอบที่ถูกฉนวน นอกจากนั้นยังทำหน้าที่เป็นตัวพาหะ (carrier) สำหรับการหุ้มครั้งสุดท้ายด้วยวัสดุจำพวกวาร์นิชเพื่อให้ได้การพันขดลวดและส่วนประกอบที่สมบูรณ์<br>4. ทำหน้าที่เป็นตัวที่ใช้มัดตรงกลางสำหรับส่วนประกอบที่ต้องการมัดให้เข้าที่อย่างแข็งแรง ดังนั้นจึงไม่สามารถเคลื่อนไหวได้ในขณะที่ใช้งาน ตัวอย่างเช่น ความต้องการอย่างหนึ่งที่จะมัดจุดสิ้นสุดของขดลวดสเตเตอร์แบบแรงดันไฟฟ้าสูง เพื่อให้มีความคงทนต่อแรงทางกลที่สูงขึ้น ซึ่งถูกสร้างขึ้นมาระหว่างการสตาร์ตโดยตรง (directed-on-line DOL) แรงที่ถูกสร้างขึ้นมานั้นสามารถเกิดขึ้นได้มากกว่า 100 ครั้ง และจะเกิดขึ้นระหว่างที่มีการใช้งานปกติ ซึ่งมีความต้องการอย่างหนึ่งที่ชั้นต่างๆที่ต้องการมัดจะถูกยึดเข้าด้วยกัน เป็นการปฏิบัติโดยทั่วไปที่ใช้วัสดุซึ่งถูกทำให้อิ่มตัว (impregnated) ด้วยอีปอกไซด์เรซินและการดูแลเพียงบางส่วนที่สภาวะ B-stage ในอีกด้านหนึ่งวัสดุที่ใช้ในการมัดสามารถทำความสะอาดโดยการใช้แปรงปัดระหว่างการใช้งานกับเรซินสังเคราะห์ร้อนหรือเย็น (hot-or cold-setting synthetic resin) ชนิดของวัสดุที่ใช้มัดได้แก่ woven หรือ unidirectional แผ่นเทป เชือก สายมัดหรือปลอกที่ยืด อะระมิด โพลีเอสเตอร์ โพลีเอสเตอร์/glass glassหรือเส้นใยอื่นๆ วัสดุที่นำมาใช้จะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบที่ถูกมัดและอุณหภูมิสูงสุดขณะใช้งาน |

## (7) เรซินและวาร์นิช (Resins and varnishes)

เรซินโดยพื้นฐานแล้วจะมีน้ำหนักโมเลกุลสูง เป็นสารประกอบคาร์บอนธรรมชาติหรือสังเคราะห์ขึ้นมา เป็นวัสดุที่เป็นของแข็งหรือกึ่งของแข็ง ส่วนวาร์นิชจะเป็นสารละลายเรซินในตัวทำละลายที่เหมาะสม

การพัฒนาเรซินธรรมชาติและเรซินสังเคราะห์ ในช่วงต้นของการผลิตเครื่องจักรกลไฟฟ้า วัสดุจากธรรมชาติ เช่น asphalt , เชลแลก(shellac), น้ำมันพืชหลายชนิดและผลิตภัณฑ์โอริโอเรซิเนียส (oleoresinous products) ได้ถูกนำมาใช้ในการทำเรซินและวาร์นิช วัสดุเหล่านี้จะถูกนำมาใช้หุ้มหรือทำให้อิ่มตัว(impregnate)กับการหุ้มตัวนำ การหุ้มด้วยแผ่นเทป ขดลวดและการพันขดลวดที่สมบูรณ์ ตั้งแต่ที่มีการพัฒนาเรซินสังเคราะห์ phenolic aldehyde ซึ่งเป็นเรซินสังเคราะห์ชนิดแรกในปี 1870 ได้มีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องของสารเคมีจำพวกที่นำมาใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติต่างๆที่เหมาะสมอย่างเด่นชัดที่จะนำมาใช้สำหรับผลิตเรซินและวาร์นิช ในปี 1930 อัลไคด์เรซิน(alkyd resin)ได้ถูกพัฒนาขึ้นมา และการพัฒนาที่ตามมาอีกทศวรรษให้หลัง วัสดุหลายชนิดรวมถึงประเภทใหญ่ๆของ อีปอกไซด์(epoxide) โพลีเอสเตอร์(polyester) และซิลิโคน(silicone) ซึ่งเรซินทั้งสามชนิดนี้ได้ปฏิวัติระบบฉนวนที่นำมาใช้กับการพันลวดในเครื่องจักรกลไฟฟ้า

ตารางที่ 12 ประเภทหลักๆของเรซินสังเคราะห์

| วัสดุฉนวน | | รายละเอียด |
|---|---|---|
| (1) เทอร์โมพลาสติกเรซิน (Thermoplastic resins): | | 1. เทอร์โมพลาสติกเรซิน (Thermoplastic resins) วัสดุชนิดนี้จะไม่เปลี่ยนสภาพทางเคมีไปโดยถาวรเมื่อได้รับความร้อน และจะอ่อนตัวลงหรือละลายได้สม่ำเสมอเมื่อถูกทำให้อุ่น และสามารถนำไปขึ้นรูปโดยยังคงรูปไว้เมื่อทำให้เย็นลงกลับมาสู่สภาวะของแข็ง เทอร์โมพลาสติก(Thermoplastics) มักจะถูกอ้างอิงว่าเป็น โพลิเมอร์เชิงเส้น (linear polymer) |
| Cellulose acetate | Polyvinyl acetate | |
| Cellulose nitrate | Polyvinyl butyral | |
| Polyamide | Polyvinyl fluoride | |
| Polycarbonate | Ethylenetetrafluoroethylene (ETFE) | |
| Polyester (linear) | | |
| Polyethylene | | |
| Polypropylene | | |
| Polystyrene | | |
| Polytetrafluoroethylene (PTFE) | | |
| Polyvinyl chloride (PVC) | | |
| Polyvinylidene chloride | | |

ตารางที่ 12 ประเภทหลักๆของเรซินสังเคราะห์ (ต่อ)

| วัสดุฉนวน | | รายละเอียด |
|---|---|---|
| (2) เทอร์โมเซตเรซิน (Thermoset resins): | | 2.เทอร์โมเซตติงเรซิน (Thermosetting resins): |
| Phenol formaldehyde | | สภาวะที่ถูกทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับสามารถเป็นได้ทั้งของแข็งหรือของเหลว และโดยปกติจะประกอบด้วยองค์ประกอบสองอย่างหรือมากกว่า เช่น เรซินพื้นฐาน, hardener, ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) เป็นต้น ผสมเข้าด้วยกันที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อเริ่มให้ความร้อนเรซินจะหลอมละลายถ้าสภาวะเริ่มต้นเป็นของแข็งหรือมีความหนืดลดลง และถ้าสภาวะเริ่มต้นเป็นของเหลวที่มีการให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องความหนืดของของเหลวจะถูกทำให้เพิ่มขึ้นโดยปฏิกิริยาเคมีภายในระหว่างองค์ประกอบพื้นฐานจนกระทั่งเวลาผ่านไปซึ่งเปลี่ยนจากนาทีเป็นชั่วโมง ก็จะก่อรูปเป็นของแข็ง ภายหลังการให้ความร้อนของเทอร์โมเซตติงเรซินไม่เป็นสาเหตุให้วัสดุหลอมละลาย การก่อรูปนี้ก็ถือว่าสำเร็จโดยกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่าโพลีเมอร์ไรเซชัน (polymerization) วัสดุจำพวกเทอร์โมเซตติงเรซินมักมีการอ้างอิงว่าเป็น cross-linked polymer |
| Aniline formaldehyde | | |
| Cresol formaldehyde | | |
| melamine formaldehyde | | |
| urea formaldehyde | | |
| epoxide | | |
| polyester (closs-linked) | | |
| polyurethane | | |
| alkyd | | |
| glyptal | | |
| silicone | | |
| polyimide | | |
| diallyl phthalate | | |
| (3) อีลาสตอมเมอร์ (Elastomers): | | |
| acrylonitrile rubber | ethylene propylene rubber (EPR) | |
| butadiene rubber | fluorinated propylene copolymer | |
| chloroprene rubber | chlorinated polyethylene (CPE) | |
| polysulphide rubber | | |
| silicone rubber | | |
| butyl rubber | | |
| chlorosulphonated polyethylene (CSP) | | |
| polyurethane rubber | | |

# ภาคผนวก ง

## การจัดประเภทของวัสดุฉนวนโดยแบ่งตามระดับอุณหภูมิ

**ตารางที่ 1 ประเภทของวัสดุฉนวนและอุณหภูมิจำกัด**

| ประเภท | อุณหภูมิจำกัด<br>องศาเซลเซียส |
|---|---|
| Y | 90 |
| A | 105 |
| E | 120 |
| B | 130 |
| F | 155 |
| H | 180 |
| 200 | 200 |
| 220 | 220 |
| 250 | 250 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางแสดงตัวอย่างการแบ่งประเภทของวัสดุฉนวน

### ตารางที่ 2 วัสดุฉนวน

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
| ประเภท | บัญชี | วัสดุฉนวน | สารยึด,แทรกซึม, หรือเคลือบ(*) ที่ใช้ทำวัสดุฉนวน | สารแทรกซึม(*) ที่อาจใช้ปรับสภาพของ ส่วนที่ประกอบกันเป็นฉนวน |
| Y (90°C) | หลัก | ฝ้าย<br>ไหมธรรมชาติ<br>เส้นใยเซลลูโลสที่ผ่านการรีเจนเนอเรต (regenerate cellulose fibre)<br>เส้นใยเซลลูโลส อะซีเตต (cellulose acetate fibre)<br>เส้นใยโพลีอาไมด์ (polyamide fibre)<br>กระดาษและผลิตภัณฑ์กระดาษ<br>กระดาษอัด (pressboard)<br>เส้นใยที่ผ่านการวัลคะไนซ์ (vulcanized fibre)<br>ไม้<br>อะนิลีน-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน (aniline-formaldehyde resins)<br>ยูเรีย –ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน | ไม่มี | ไม่ต้องการ |
| | รอง | โพลีอะคริเลต (polyacrtlates)<br>โพลีเอทิลีน (polyethylene)<br>โพลีไสตรีน (polystylene)<br>โพลไวนิลคลอไรด์ที่เติมหรือไม่เติมปลาสติกไซเซอร์<br>ยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคะไนซ์ (vulcanized natural rubber) | ไม่มี | ไม่ต้องการ |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 2 วัสดุฉนวน (ต่อ)**

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
| ประเภท | บัญชี | วัสดุฉนวน | สารยึด,แทรกซึม, หรือเคลือบ(*) ที่ใช้ทำวัสดุฉนวน | สารแทรกซึม(*) ที่อาจใช้ปรับสภาพของ ส่วนที่ประกอบกันเป็นฉนวน |
| A (105°C) | หลัก | ฝ้าย<br>ไหมธรรมชาติ<br>เส้นใยเซลลูโลสที่ผ่านการรีเจนเนอเรต (regenerate cellulose fibre)<br>เส้นใยเซลลูโลส อะซีเตต (cellulose acetate fibre)<br>เส้นใยโพลีอาไมด์ (polyamide fibre)<br>กระดาษและผลิตภัณฑ์กระดาษ<br>กระดาษอัด (pressboard)<br>เส้นใยที่ผ่านการวัลคะไนซ์ (vulcanized fibre)<br>ไม้ | ไม่มี | เรซินธรรมชาติที่ปรุงแต่งด้วยน้ำมันซักแห้ง;เชลแลก, โคบัล (copal) และเรซินธรรมชาติอื่นๆ ; สารละลายหรือสารแขวนลอยของเซลลูโลสเอสเตอร์และอีเทอร์เช่นเดียวกับในบัญชีของประเภทอุณหภูมิที่สูงกว่า<br><br>น้ำมันฉนวนและของเหลวฉนวนสังเคราะห์ |
| | | สิ่งทออาบวาร์นิชทำจากฝ้าย,ไหมธรรมชาติ, เซลลูโลสที่ผ่านการเจนเนอเรต,เซลลูโลส อะซีเตต หรือเส้นใยโพลีอาไมด์<br>กระดาษอาบวาร์นิช | เรซินวาร์นิชธรรมชาติหรือสังเคราะห์ที่ปรุงแต่งด้วยน้ำมันซักแห้ง | |
| | | ไม้แผ่นบางอัด (laminated wood) | ฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน (phenol-formaldehyde resin) | |
| | | เซลลูโลส อะซีเตต ฟิล์ม (cellulose acetate film)<br>เซลลูโลส อะซีเตต บิวติเรต ฟิล์ม (cellulose acetate butyrate film)<br>ครอสส์-ลิงก์ โพลิเอสเตอร์ เรซิน (cross-linked polyester resins)<br>วัสดุเคลือบลวดชนิดโอลิโอ-เรซินนัส (oleo-resinous)<br>วัสดุเคลือบลวดชนิดที่ทำจากโพลีอาไมด์ เรซิน | ไม่มี | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 2 วัสดุฉนวน (ต่อ)**

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
| ประเภท | บัญชี | วัสดุฉนวน | สารยึด,แทรกซึม, หรือเคลือบ(*) ที่ใช้ทำวัสดุฉนวน | สารแทรกซึม(*) ที่อาจใช้ปรับสภาพของ ส่วนที่ประกอบกันเป็นฉนวน |
| A | รอง | โพลิคลอโรปรีน อีลาสโตเมอร์ (polychloroprene elastomer)<br>บิวตาไดอีน อะคริโลไนไตรล์ อีลาสโตเมอร์ (butadiene acrylonitrile elastomer) | ไม่มี | เช่นเดียวกับในบัญชีหลักและในบัญชีของประเภทอุณหภูมิที่สูงกว่า |

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 2 วัสดุฉนวน (ต่อ)**

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
| ประเภท | บัญชี | วัสดุฉนวน | สารยึด,แทรกซึม, หรือเคลือบ(*) ที่ใช้ทำวัสดุฉนวน | สารแทรกซึม(*) ที่อาจใช้ปรับสภาพของ ส่วนที่ประกอบกันเป็นฉนวน |
| E (120°C) | หลัก | -- | -- | -- |
| | รอง | วัสดุเคลือบลวดชนิดที่ทำจากโพลิไวนิลฟอร์มัล, โพลิยูรีเทนหรืออีปอกซีเรซิน (epoxy resins) | ไม่มี | ยางมะตอย และเรซิน สังเคราะห์ที่ปรุงแต่งด้วยน้ำมัน ,ครอสส์-ลิงก์ โพลิเอสอตอร์ เรซิน เช่นดียวกับในบัญชีของประเภทอุณหภูมิที่สูงกว่า |
| | | สิ่งขึ้นรูปที่มีตัวเติมเป็นเซลลูโลส ผ้าฝ้ายอัด กระดาษซ้อนกันเป็นชั้นๆ | เมลามีน-ฟอร์มัลดีไฮด์ (melamine-formaldehyde) ฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ (phenol-formaldehyde) และฟีนอล-เฟอร์ฟิวรัลเรซิน (phenol-furfural resins) | |
| | | ครอสส์-ลิงก์ โพลิเอสเตอร์ เรซิน เซลลูโลส ไตรอะซีเตต ฟิล์ม (cellulose triacetate film) โพลิเอทิลีน เตเรฟทาเลต ฟิล์ม (polyethylene terephthalate film) เส้นใย โพลิเอทิลีน เตเรฟทาเลต | ไม่มี | |
| | | สิ่งทอทำจากโพลิเอทิลีน เตเรฟทาเล อาบวาร์นิช | วาร์นิชที่ทำจากอัลคีลเรซิน (alkyd resin) ปรุงแต่งด้วยน้ำมัน | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 2 วัสดุฉนวน (ต่อ)**

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
| ประเภท | บัญชี | วัสดุฉนวน | สารยึด,แทรกซึม, หรือเคลือบ(*) ที่ใช้ทำวัสดุฉนวน | สารแทรกซึม(*) ที่อาจใช้ปรับสภาพของ ส่วนที่ประกอบกันเป็นฉนวน |
| **B (130°C)** | หลัก | ใยแก้ว<br>ใยหิน | ไม่มี | ยางมะตอย และเรซิน สังเคราะห์ที่ปรุงแต่งด้วยน้ำมัน ,ครอสส์-ลิงก์ โพลิเอสอตอร์ เรซิน; อีปอกซี เรซิน (ภายใต้ความเค้นทางกลที่มีค่าสูงวัสดุข้างบนอาจจำเป็นต้องใช้ฟีนอลเรซิน ที่ไม่ปรุงแต่ง) เช่นเดียวกับในบัญชีของประเภทอุณหภูมิที่สูงกว่า |
| | | สิ่งทอที่ทำจากใยแก้วอาบวาร์นิช<br>ใยหินอาบวาร์นิช | วาร์นิชที่ทำจากเรซินสังเคราะห์ปรุงแต่งด้วยน้ำมัน | |
| | | ไมกาสำเร็จรูปซึ่งมีหรือไม่มีวัสดุอื่นเสริม (built-up mica with or without supporting materials) | แชลแลค,ยางมะตอย หรือสารประกอบบิทูเมน<br>เรซินสังเคราะห์ที่ปรุงแต่งด้วยน้ำมันอัลคีดเรซิน<br>ครอสส์-ลิงก์ โพลิเอสอตอร์ เรซิน<br>อีปอกซี เรซิน | |
| | | ใยแก้วแผ่นบางซ้อนเป็นชั้นๆ<br>ใยหินแผ่นบางซ้อนเป็นชั้นๆ<br>สิ่งขึ้นรูปที่มีแร่เป็นตัวเติม (mouldings with mineral fillers) | เมลามีน-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน<br>ฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน | |
| | รอง | สิ่งขึ้นรูปที่มีแร่เป็นตัวเติม | ครอสส์-ลิงก์ โพลิเอสเตอร์ เรซิน | เช่นเดียวกับในบัญชีหลักของประเภทนี้และเช่นเดียวกับในบัญชีของประเภทอุณหภูมิที่สูงกว่า |
| | | โพลีโมโนคลอโรไตรฟลูออโรเอทิลีน (polymonochlorotrifluoroethylene) | ไม่มี | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 2 วัสดุฉนวน (ต่อ)**

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
| ประเภท | บัญชี | วัสดุฉนวน | สารยึด,แทรกซึม, หรือเคลือบ(*) ที่ใช้ทำวัสดุฉนวน | สารแทรกซึม(*) ที่อาจใช้ปรับสภาพของส่วนที่ประกอบกันเป็นฉนวน |
| **F (155°C)** | หลัก | -- | -- | -- |
| | รอง | ใยแก้ว<br>ใยหิน | ไม่มี | อัลคีล,อีปอกซี,ครอสส์-ลิงก์ โพลิเอสเตอร์ และโพลิยูรีเทน เรซินที่มีเสถียรภาพความร้อนดีเยี่ยม<br>ซิลิโคน-อัลคีล และซิลิโคน ฟีนอลิกเรซินเช่นเดียวกับในบัญชีของประเภทอุณหภูมิที่สูงกว่า |
| | | สิ่งทอที่ทำจากใยแก้วอาบวาร์นิช<br>ใยหินอาบวาร์นิช<br>ไมกาสำเร็จรูปซึ่งมีหรือไม่มีวัสดุอื่นเสริม (built-up mica with or without supporting materials) | อัลคีล,อีปอกซี, ครอสส์-ลิงก์ โพลิเอสเตอร์ และโพลิยูรีเทน เรซินที่มีเสถียรภาพความร้อนดีเยี่ยม<br>ซิลิโคน-อัลคีลเรซิน | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 2 วัสดุฉนวน (ต่อ)

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
| ประเภท | บัญชี | วัสดุฉนวน | สารยึด,แทรกซึม, หรือเคลือบ(*) ที่ใช้ทำวัสดุฉนวน | สารแทรกซึม(*) ที่อาจใช้ปรับสภาพของ ส่วนที่ประกอบกันเป็นฉนวน |
| **H (180°C)** | หลัก | ใยแก้ว<br>ใยหิน | ไม่มี | ซิลิโคนเรซินที่เหมาะสม |
| | | สิ่งทอที่ทำจากใยแก้วอาบวาร์นิช<br>ใยหินอาบวาร์นิช | ซิลิโคนเรซินที่เหมาะสม<br>ซิลิโคนอีลาสโตเมอร์ | |
| | | ไมกาสำเร็จรูปซึ่งมีหรือไม่มีวัสดุอื่นเสริม (built-up mica with or without supporting materials)<br>ใยแก้วแผ่นบางซ้อนเป็นชั้นๆ<br>ใยหินแผ่นบางซ้อนเป็นชั้นๆ | ซิลิโคนเรซินที่เหมาะสม | |
| | | ซิลิโคนอีลาสโตเมอร์ | ไม่มี | |
| | รอง | -- | -- | -- |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 2 วัสดุฉนวน (ต่อ)**

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
| ประเภท | บัญชี | วัสดุฉนวน | สารยึด,แทรกซึม, หรือเคลือบ(*) ที่ใช้ทำวัสดุฉนวน | สารแทรกซึม(*) ที่อาจใช้ปรับสภาพของ ส่วนที่ประกอบกันเป็นฉนวน |
| C (สูงกว่า 180°C) | หลัก | ไมกา<br>ปอร์ซเลนและเซรามิกส์อื่นๆ<br>แก้ว<br>หินเขี้ยวหนุมาน<br>หมายเหตุ –อุณหภูมิใช้งานสูงสุดอาจถูกจำกัดโดยคุณสมบัติทางฟิสิกส์ เคมี ทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิใช้งาน | ไม่มี | สารยึดชนิดอนินทรีย์ เช่น โซเดียมซิลิเกต หรือซีเมนต์ |
| | รอง | สิ่งทอใยแก้วที่ปรับสภาพแล้ว<br>ใยหินที่ปรับสภาพแล้ว<br>ไมกาสำเร็จรูป | ซิลิโคนเรซิน ที่มีเสถียรภาพความร้อนดีเยี่ยม (เสถียรภาพจำกัดสูงกว่า 225 องศาเซลเซียส) | ซิลิโคนเรซิน ที่มีเสถียรภาพความร้อนดีเยี่ยม (เสถียรภาพจำกัดสูงกว่า 225 องศาเซลเซียส) |
| | | โพลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (polytetrafluoroethylene) (เสถียรภาพจำกัดสูงกว่า 250 องศาเซลเซียส) | ไม่มี | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บรรณานุกรม


[1] IEC 34-1: 1983, *Rotating electrical machines - Part 1: Rating and performance.*

[2] IEC 34-18-21,*Part 18: Functional evaluation of insulation systems, Section 21 Test procedures for wire-wound windings-Thermal evaluation and classification*

[3] IEC 34-18-31,*Part 18: Functional evaluation of insulation systems, Section 21 Test procedures for form-wound windings-Thermal evaluation and classification of insulation systems used in machines up to and including 50 MVA and 15 kV*

[4] IEC 60-2:1973, *High-voltage test techniques - Part 2: Test procedures.*

[5] IEC 85: 1984, *Thermal evaluation and classification of electrical insulation.*

[6] IEC 216-1:1987, *Guide for the determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials – Part 1: General guidelines for ageing and evaluation of test result.*

[7] IEC 216-2:1974, *Guide for the determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials – Part 2:List of materials and available tests.*

[8] IEC 216-3:1974, *Guide for the determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials – Part 4:Instructions for calculating the thermal endurance profile.*

[9] IEC 505: 1975, *Guide for the evaluation and identification of insulation systems of electrical equipment*

[10] IEC 857-1:1988, *General requirements – Low – voltage*

[11 ]IEEE Std 1-2000, *IEEE Recommended Practice-General Principles for Temperature Limits*

[12] IEEE Std 98-1984 (Reaff 1993), *IEEE Standard for the Preparation of Test Procedures for the Thermal Evaluation of Solid Electrical Insulating Materials (ANSI)*

[13] IEEE Std 99-1984 (Reaff 1993), *IEEE Recommended Practice for the Preparation of Test Procedures for the Thermal Evaluation of Solid Electrical Insulating Materials (ANSI)*

[14] IEEE Std 275-1992, *IEEE Recommended Practice for Thermal Evaluation of Sealed Insulation Systems for AC Electric Machinery Employing Form-Wound Preinsulated Stator coils for Machines Rated 6900 V and Below*

[15] IEEE Std 1107-1996, *IEEE Recommended Practice for Thermal Evaluation of Sealed Insulation Systems for AC Electric Machinery Employing Random-Wound Stator Coils*

[16] มอก. ๔๑๖-๒๕๒๕ *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม การจัดประเภทของวัสดุฉนวนไฟฟ้า*



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้