

การประเมินอายุของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กโดยอาศัยการทดสอบแรงด้วยอุณหภูมิ



นายไพโรจน์ วงษ์วิบูลย์สิน

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-3695-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LIFE ASSESSMENT IN SMALL ELECTRICAL TRANSFORMER BY TEMPERATURE
ACCELERATED TESTING

Mr. Phairoj Wongwiboonsin

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-17-3695-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประเมินอายุของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กโดยอาศัย

การทดสอบแรงด้วยอุณหภูมิต

โดย

นายไพโรจน์ วงษ์วิบูลย์สิน

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา


อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ จงชัยกิจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยอนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิตศึกษา


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุขุมวิทท์ ภูมิวุฒิสาร)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ จงชัยกิจ)


..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. กมสัน เพ็ชรชัย)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ไพโรจน์ วงษ์วิบูลย์สิน : การประเมินอายุของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กโดยอาศัยการทดสอบเร่งด้วยอุณหภูมิ. (LIFE ASSESSMENT IN SMALL ELECTRICAL TRANSFORMER BY TEMPERATURE ACCELERATED TESTING) อ. ที่ปรึกษา : อ.ดร. สมบูรณ์ จงชัยกิจ 108 หน้า. ISBN 974-17-3695-9.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอทฤษฎีการทดสอบเร่ง แบบจำลอง วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล การประยุกต์ทฤษฎีการทดสอบเร่งกับหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก การวิจัยเริ่มจากขั้นตอนการออกแบบการทดลอง โดยทำการศึกษาข้อกำหนดคุณลักษณะและส่วนประกอบของหม้อแปลงทดสอบ จากนั้นจึงทำการทดสอบหลายชนิดเพื่อเลือกระดับความเค้นที่เหมาะสมและตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าสำหรับใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจความล้มเหลวหม้อแปลงทดสอบ หม้อแปลงทดสอบถูกทดสอบที่อุณหภูมิ 170 175 180 และ 190 องศาเซลเซียส จำนวนตัวอย่าง 55 ตัว โดยเก็บข้อมูลแบบตัดทอน ใช้แบบจำลองอาร์เรเนียส-ไวบูลล์ (Arrhenius-Weibull Model) และประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีความควรจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Method) แบบจำลองที่ได้สามารถนำมาใช้ประมาณอายุการใช้งานเฉลี่ยและข้อมูลเกี่ยวกับความเชื่อถือได้ ความไม่แน่นอนของการประมาณสามารถแสดงได้ด้วยช่วงความเชื่อมั่นที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ความล้มเหลวเกิดจากการลัดวงจรในขดลวดปฐมภูมิซึ่งส่งผลให้ความต้านทานของขดลวดมีค่าต่ำกว่าข้อกำหนดคุณลักษณะ อายุเฉลี่ยของหม้อแปลงทดสอบเท่ากับ 40 ปี โดยอาศัยสมมติฐานการใช้งานอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลของบริษัทผู้ผลิตที่รายงานว่าหม้อแปลงรุ่นที่ทำการทดสอบไม่เคยมีการส่งกลับในช่วงรับประกันเลย อายุเฉลี่ยของหม้อแปลงทดสอบที่มีค่าค่อนข้างยาวนานน่าจะเกิดจากการออกแบบเกิน

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....ไพโรจน์ วงษ์วิบูลย์สิน.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....สมบูรณ์ จงชัยกิจ.....
ปีการศึกษา.....2548.....

4670712321 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
 KEY WORD : ACCELERATED TESTING / SMALL ELECTRICAL TRANSFORMER /
 RELIABILITY

PHAIROJ WONGWIBOONSIN : LIFE ASSESSMENT IN SMALL ELECTRICAL
 TRANSFORMER BY TEMPERATURE ACCELERATED TESTING. THESIS ADVISOR :
 SOMBOON CHONGCHAIKIT, D.Ing., 108 pp. ISBN 974-17-3695 -9.

This thesis presents the accelerated testing theory, models, and data analysis methods. The application of accelerated testing theory to small electrical transformer is studied. In experimental design stage, the specifications and components of test transformer were studied. Various tests were introduced in order to select the appropriate stress levels and to inspect the electrical properties which would be used for deciding the failure in test transformers. The test transformers were tested at the temperature of 170°C, 175°C, 180°C, and 190°C. The number of samples was 55. The life data were censored. The Arrhenius-Weibull model was applied and the maximum likelihood method was used to estimate model parameters. The obtained model can be used to estimate mean operating life and reliability information. The uncertainty of estimation is shown by confidence interval of 95 percent confidence level.

The failure occurred in test transformers is the short-circuit in primary windings which causes the value of winding resistance to be under the specification. The mean life of test transformer is 40 years based on the assumption of continuous operation. The result is corresponding to the manufacturer report which claims that the transformers of this model have never been returned during their warranty periods. The very long mean life may be due to overdesign.

Department....Electrical Engineering.....Student's signature..... *Phairoj W.*
 Field of study....Electrical Engineering..... Advisor's signature..... *Somboon Chongchakit*
 Academic year2005.....

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ จงชัยกิจ ที่ได้ดูแลและให้คำแนะนำ งานวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้ามาโดยตลอด รวมถึงได้ปรับแนวความคิดในหลากหลายแง่มุมเพื่อนำมา ประยุกต์ใช้กับวิทยานิพนธ์ นอกจากนี้ยังได้ให้คำแนะนำและทัศนคติในการใช้ชีวิตและการ ประกอบอาชีพที่มีประโยชน์ต่อการดำเนินชีวิตในภายภาคหน้าของข้าพเจ้า

ข้าพเจ้าขอขอบคุณบริษัท ไทยตาบุชิ อิเล็กทริก จำกัด ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและ อนุเคราะห์หม้อแปลงตัวอย่างเพื่อใช้ในการงานวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณ คุณสุชาติ กันยารัตน์เจริญ ช่าง เทคนิคอาวุโสแผนกวิศวกรรม ที่ได้ช่วยเหลือและให้คำแนะนำที่มีประโยชน์เป็นอย่างมากแก่ ข้าพเจ้า และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ฝ่ายประกันคุณภาพทุกท่าน ไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ อาจารย์ ดร. คมสัน เพ็ชรรักรักษ์ และ ครู ถาวร เอื้อดี ประจำห้องปฏิบัติการ วิจัยไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกเกี่ยวกับ อุปกรณ์และสถานที่ทดสอบ ขอขอบคุณเพื่อนและน้องในห้องปฏิบัติการวิจัยวัดคুমทาง อุตสาหกรรมที่ได้ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา ของข้าพเจ้าที่ได้เลี้ยงดูและสอนสั่ง ให้ข้าพเจ้าเป็นคนดี ที่ได้ให้การสนับสนุนด้านการศึกษาตลอดมา และเป็นกำลังใจแก่ข้าพเจ้าให้ สามารถทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	1
1.3 ขอบเขตการวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 การทดสอบเร่ง (Accelerated Testing)	3
2.1 ความหมายของการทดสอบเร่ง	3
2.2 ประโยชน์ของการทดสอบเร่ง	3
2.3 ประเภทของข้อมูล	4
2.3.1 ข้อมูลสมรรถนะ (Performance Data)	4
2.3.2 ข้อมูลอายุ (Life Data)	4
2.3.2.1 ข้อมูลสมบูรณ์ (Complete Data)	4
2.3.2.2 ข้อมูลตัดทอน (Censored Data)	5
2.4 ประเภทของการทดสอบเร่ง	6
2.4.1 การทดสอบเร่งเชิงคุณภาพ (Qualitative Accelerated Testing)	6
2.4.2 การทดสอบเร่งเชิงปริมาณ (Quantitative Accelerated Testing)	7
2.5 วิธีการทดสอบเร่ง	7
2.5.1 การทดสอบเร่งโดยการเพิ่มอัตราการใช้งาน (Usage Rate Acceleration)	7
2.5.2 การทดสอบเร่งโดยการเพิ่มความเค้น (Overstress Acceleration)	7
2.6 ความเค้นและประเภทของความเค้น	8
2.6.1 ความเค้น	8
2.6.2 ประเภทของความเค้น	9

	หน้า
บทที่ 3 แบบจำลองการทดสอบเร่ง	14
3.1 แบบจำลองทางสถิติ	14
3.1.1 การแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential Distribution)	15
3.1.2 การแจกแจงแบบล็อกปกติ (Lognormal Distribution)	16
3.1.3 การแจกแจงแบบไวบูลล์ (Weibull Distribution)	18
3.2 แบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้น	20
3.2.1 ความสัมพันธ์อาร์เรเนียส (Arrhenius Relationship)	20
3.2.2 ความสัมพันธ์กำลังผกผัน (Inverse Power Relationship)	22
3.3 การใช้งานแบบจำลอง	23
3.3.1 แบบจำลองอาร์เรเนียส-ล็อกปกติ (Arrhenius-Lognormal Model)	24
3.3.2 แบบจำลองอาร์เรเนียส-ไวบูลล์ (Arrhenius-Weibull Model)	25
3.3.3 แบบจำลองอาร์เรเนียส-เอ็กซ์โพเนนเชียล (Arrhenius-Exponential Model)	26
3.3.4 แบบจำลองกำลัง-ล็อกปกติ (Power-Lognormal Model)	27
3.3.5 แบบจำลองกำลัง-ไวบูลล์ (Power-Weibull Model)	28
3.3.6 แบบจำลองกำลัง-เอ็กซ์โพเนนเชียล (Power-Exponential Model)	29
บทที่ 4 การวิเคราะห์ข้อมูลอายุ	30
4.1 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงกราฟ (Graphical Analysis)	30
4.1.1 การพล็อตการแจกแจงอายุ (Life Distribution Plotting)	31
4.1.2 การพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้น (Life-Stress Relationship Plotting)	35
4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเลข (Numerical Data Analysis)	35
4.2.1 วิธีค่าผิดพลาดกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Error Method)	35
4.2.2 วิธีความควรจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Method)	37
บทที่ 5 ข้อกำหนดคุณลักษณะและสมมติฐานการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษา	40
5.1 การเลือกรุ่นของหม้อแปลงไฟฟ้า	40
5.2 การเลือกกลุ่มตัวอย่าง	41
5.3 ข้อกำหนดคุณลักษณะของหม้อแปลงทดสอบ	42
5.4 สมมติฐานการใช้งานเดอบไมโครเวฟ	42
บทที่ 6 การทดสอบเร่งหม้อแปลงทดสอบด้วยอุณหภูมิ	44
6.1 การทดสอบก่อนการทดสอบเร่ง	44
6.1.1 การทดสอบภาระเต็ม (Full Load Test)	44

6.1.2 การทดสอบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (Temperature Rise Test)	46
6.1.3 การทดสอบแรงเชิงคุณภาพ	46
6.1.4 คุณสมบัติที่ใช้ในการตัดสินอายุของหม้อแปลง	47
6.2 อุปกรณ์และวงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบแรง	51
6.2.1 เต้าอบอุณหภูมิ	51
6.2.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้า	52
6.2.3 วงจรไฟฟ้า	54
6.3 การทดสอบแรงหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยอุณหภูมิ	62
บทที่ 7 ผลการทดสอบแรง	68
7.1 ข้อมูลอายุการทดสอบแรง	68
7.2 ลักษณะความล้มเหลวและผลการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า	69
7.3 การวิเคราะห์ข้อมูล	87
บทที่ 8 สรุปและข้อเสนอแนะ	95
รายการอ้างอิง	97
ภาคผนวก	99
ภาคผนวก ก ข้อมูลการใช้งานเต้าอบไมโครเวฟจากเว็บไซต์ต่าง ๆ	100
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ	102
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	108

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 5.1 ระยะเวลาการใช้งานเตาอบไมโครเวฟในลักษณะต่าง ๆ กับอาหารบางประเภท	43
ตารางที่ 6.1 ค่ากระแสไฟฟ้าด้านทฤษฎีจากการทดสอบภาระเต็ม	45
ตารางที่ 6.2 ค่ากระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิจากการทดสอบภาระเต็ม	45
ตารางที่ 6.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลงทดสอบเปรียบเทียบกับระหว่างหม้อแปลงปกติ (ตัวที่ 1) กับหม้อแปลงที่เกิดความล้มเหลว (ตัวที่ 2 และ 3)	50
ตารางที่ 6.4 ตัวอย่างตารางบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าด้านทฤษฎี	64
ตารางที่ 6.5 ตัวอย่างตารางบันทึกค่า DCR และจำนวนวัฏจักรการทำงาน	65
ตารางที่ 7.1 จำนวนวัฏจักรที่แต่ละระดับอุณหภูมิ	68
ตารางที่ 7.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลง 1A-1E ที่การทดสอบเร่งด้วยอุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส	75
ตารางที่ 7.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลง 2A-2E ที่การทดสอบเร่งด้วยอุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส.....	76
ตารางที่ 7.4 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลง 3A-3E ที่การทดสอบเร่งด้วยอุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส	77
ตารางที่ 7.5 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลง 1A-1E ที่การทดสอบเร่งด้วยอุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส	78
ตารางที่ 7.6 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลง 2A-2E ที่การทดสอบเร่งด้วยอุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส	79
ตารางที่ 7.7 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลง 1A-1E ที่การทดสอบเร่งด้วยอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส	80
ตารางที่ 7.8 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลง 2A-2E ที่การทดสอบเร่งด้วยอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส.....	81
ตารางที่ 7.9 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลง 3A-3E ที่การทดสอบเร่งด้วยอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส	82
ตารางที่ 7.10 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลง 1A-1E ที่การทดสอบเร่งด้วยอุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส	83
ตารางที่ 7.11 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลง 2A-2E ที่การทดสอบเร่งด้วยอุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส	84
ตารางที่ 7.12 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลง 3A-3E ที่การทดสอบเร่งด้วยอุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส	85

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 7.13 ตารางเปรียบเทียบค่า DCR ที่ได้จากการทดลองและจากการตรวจสอบที่บริษัทผู้ผลิต หม้อแปลงทดสอบ	86
ตารางที่ 7.14 ค่าประมาณและช่วงความเชื่อมั่นของพารามิเตอร์ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95	93



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 ข้อมูลสมบูรณ์	5
รูปที่ 2.2 ข้อมูลตัดทอนประเภทที่ 1	5
รูปที่ 2.3 ข้อมูลตัดทอนประเภทที่ 2	6
รูปที่ 2.4 ระดับความเค้น	8
รูปที่ 2.5 ความเค้นคงที่	10
รูปที่ 2.6 ความเค้นแบบขั้น	11
รูปที่ 2.7 ความเค้นแบบเพิ่มคงที่	11
รูปที่ 2.8 ความเค้นแบบวัฏจักร	12
รูปที่ 2.9 ความเค้นแบบสุ่ม	12
รูปที่ 3.1 ฟังก์ชันต่าง ๆ ของการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล	16
รูปที่ 3.2 ฟังก์ชันต่าง ๆ ของการแจกแจงแบบลือกปกติ	18
รูปที่ 3.3 ฟังก์ชันต่าง ๆ ของการแจกแจงแบบไวบูลล์	19
รูปที่ 3.4 กราฟความสัมพันธ์อาร์เรเนียส	21
รูปที่ 3.5 กราฟความสัมพันธ์อาร์เรเนียสเชิงเส้น	22
รูปที่ 3.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้น	23
รูปที่ 3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของอายุกับความเค้น	24
รูปที่ 4.1 กราฟการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล	32
รูปที่ 4.2 กราฟการแจกแจงแบบลือกปกติ	33
รูปที่ 4.3 กราฟการแจกแจงแบบไวบูลล์	34
รูปที่ 4.4 ลักษณะของข้อมูลสำหรับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ต่าง ๆ	37
รูปที่ 5.1 หม้อแปลงทดสอบ	41
รูปที่ 5.2 การต่อใช้งานหม้อแปลงทดสอบ	41
รูปที่ 6.1 วงจรการทดสอบภาระเต็ม	45
รูปที่ 6.2 เตาอบอุณหภูมิและแผงควบคุม	51
รูปที่ 6.3 หน้าปัดแสดงระดับอุณหภูมิของเตาอบอุณหภูมิ	52
รูปที่ 6.4 แหล่งจ่ายไฟฟ้า	53
รูปที่ 6.5 แผนภาพวงจรไฟฟ้าสำหรับการทดสอบแรง	54
รูปที่ 6.6 วงจรไฟฟ้าสำหรับการทดสอบแรง	55
รูปที่ 6.7 วงจรควบคุมทางด้านปฐมภูมิที่ต่อจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า	56
รูปที่ 6.8 ส่วนของวงจรควบคุมและวงจรป้องกันของการทดสอบแรง	56

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 6.9 การเชื่อมต่อสายไฟปกติเข้ากับสายไฟทนความร้อน	57
รูปที่ 6.10 การวางสายไฟทนความร้อนเข้าสู่เตาอบอุณหภูมิ	58
รูปที่ 6.11 การวางสายไฟทนความร้อนภายในเตาอบอุณหภูมิ	58
รูปที่ 6.12 การร้อยสายไฟทนความร้อนภายในเตาอบพร้อมหัวสายและแผ่นไม้ก้ำ (ชั้นบน)	59
รูปที่ 6.13 การร้อยสายไฟทนความร้อนภายในเตาอบพร้อมหัวสายและแผ่นไม้ก้ำ (ชั้นล่าง)	59
รูปที่ 6.14 การต่อหม้อแปลงทดสอบเข้ากับหัวสายภายในเตาอบ	60
รูปที่ 6.15 หม้อแปลงทดสอบทั้งหมดเมื่อต่อเข้ากับหัวสายภายในเตาอบ	61
รูปที่ 6.16 กล้องظارสำหรับวงจรด้านทุติยภูมิ	62
รูปที่ 6.17 ฟังงานการทดสอบแรง	67
รูปที่ 7.1 หม้อแปลงทดสอบที่ถูกทดสอบด้วยอุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส	69
รูปที่ 7.2 หม้อแปลงทดสอบที่ถูกทดสอบด้วยอุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส	69
รูปที่ 7.3 หม้อแปลงทดสอบ ที่ถูกทดสอบด้วยอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส	70
รูปที่ 7.4 ลักษณะเทปฉนวนซึ่งพันรอบแกนเหล็ก	70
รูปที่ 7.5 โครงพลาสติกและแกนเหล็ก	71
รูปที่ 7.6 ขดลวดปฐมภูมิที่พันรอบโครงพลาสติก	71
รูปที่ 7.7 การตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า	72
รูปที่ 7.8 การทดสอบการทนของไดอิเล็กทริก (Dielectric Withstand Test)	72
รูปที่ 7.9 การตรวจสอบคุณสมบัติไร้ภาระ (No Load Test)	73
รูปที่ 7.10 การตรวจสอบคุณสมบัติความต้านทานฉนวน	73
รูปที่ 7.11 การตรวจสอบคุณสมบัติแรงดันเหนี่ยวนำ	74
รูปที่ 7.12 อุปกรณ์วัดค่า DCR ซึ่งมีการชดเชยที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	74
รูปที่ 7.13 กราฟการแจกแจงแบบไวบูลล์และค่าที่อยู่นอกเขตการกระจายของข้อมูล	88
รูปที่ 7.14 กราฟการแจกแจงแบบไวบูลล์เมื่อละเลยค่าที่อยู่นอกเขตการกระจายของข้อมูล	90
รูปที่ 7.15 กราฟความสัมพันธ์อาร์เรเนียส	91
รูปที่ 7.16 กราฟการแจกแจงแบบไวบูลล์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 170 องศาเซลเซียส 175 องศาเซลเซียส 180 องศาเซลเซียส และ 190 องศาเซลเซียส	92

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

อุตสาหกรรมการผลิตในประเทศได้เจริญเติบโตมาเป็นลำดับโดยเฉพาะอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า การผลิตส่วนมากจะเป็นการผลิตตามแบบที่บริษัทต่างประเทศส่งมาให้ ปัจจุบันบริษัทต่างประเทศหลายบริษัทมีนโยบายส่งเสริมให้ทำการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ภายใน ประเทศ

การประเมินอายุเป็นสิ่งจำเป็นต่อการออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่ อายุที่ประเมินได้จะนำไปใช้เป็นข้อมูลแสดงถึงคุณภาพและนำไปกำหนดระยะเวลารับประกัน อายุของผลิตภัณฑ์สามารถประเมินได้โดยอาศัยการทดสอบเร่ง (Accelerated Testing) แม้ว่าการทดสอบเร่งจะได้มีการศึกษาและวิจัยอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ แต่การศึกษาและวิจัยภายในประเทศยังไม่แพร่หลายนัก

วิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งเสนอการศึกษาและวิจัยการทดสอบเร่งเพื่อประเมินหาอายุของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กที่ผลิตภายในประเทศ โดยหวังว่าจะเป็นความรู้พื้นฐานส่วนหนึ่งที่มีผลก่อให้เกิดการวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์ไฟฟ้าใหม่ภายในประเทศต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาทฤษฎีการทดสอบเร่ง
- 2) เพื่อประยุกต์ความรู้ทางทฤษฎีกับผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าได้
- 3) เพื่อวางแนวทางสำหรับการทดสอบเร่ง

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1) ศึกษาทฤษฎีการทดสอบเร่งและวางแนวทางเพื่อใช้ในการทดสอบเร่งกับหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก
- 2) ทดสอบเร่งกับหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กในอุตสาหกรรมผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า

1.4 ขั้นตอนการวิจัย

- 1) ศึกษาทฤษฎีการทดสอบแรงรวมถึงบทความที่เกี่ยวข้อง
- 2) ศึกษาลักษณะและสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้ในการทดสอบแรง
- 3) วางแผนการทดสอบแรง
- 4) ทดสอบแรงกับหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก
- 5) วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแรงและอธิบายผลที่ได้โดยอาศัยความรู้ทางทฤษฎี
- 6) สรุป เขียนวิทยานิพนธ์และวางแนวทางการทดสอบแรงหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เข้าใจทฤษฎีการทดสอบแรงและการวิเคราะห์ข้อมูล
- 2) สามารถออกแบบการทดสอบแรงหม้อแปลงขนาดเล็กได้
- 3) สามารถประเมินอายุการใช้งานของหม้อแปลงขนาดเล็กได้
- 4) สามารถนำทฤษฎีการทดสอบแรงมาประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

การทดสอบเร่ง

โดยทั่วไปการวิเคราะห์ข้อมูลอายุ (Life Data Analysis) จะเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ข้อมูลช่วงเวลาจนกระทั่งล้มเหลว (Time-To-Failure) ซึ่งได้มาจากเงื่อนไขการทำงานในสภาวะปกติ เพื่อใช้ในการหาคุณสมบัติเกี่ยวกับอายุของผลิตภัณฑ์ แต่การจะได้ข้อมูลตามวิธีดังกล่าวทำได้ยากเนื่องจาก ผลิตภัณฑ์ในปัจจุบันถูกออกแบบให้สามารถใช้งานได้ยาวนานมากขึ้น และระยะเวลาระหว่างการออกแบบ (Product Life Cycle) ค่อนข้างสั้น

ดังนั้นผู้ปฏิบัติงานเกี่ยวกับความเชื่อถือได้จึงพยายามหาวิธีบังคับให้ผลิตภัณฑ์เสียหายเร็วขึ้นกว่าการใช้งานในสภาวะปกติ วิธีการดังกล่าวเรียกว่า การทดสอบเร่ง (Accelerated Testing)

2.1 ความหมายของการทดสอบเร่ง [1]

การทดสอบเร่ง (Accelerated Testing) คือ การทดสอบใด ๆ เพื่อเร่งให้อายุของผลิตภัณฑ์สั้นลงหรือเร่งให้เกิดการเสื่อมสภาพการใช้งานเร็วขึ้น โดยอาศัยการทดสอบผลิตภัณฑ์ภายใต้สภาวะการทำงานที่หนักกว่าสภาวะการใช้งานปกติ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สามารถนำมาวิเคราะห์ถึงอายุหรือคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ภายใต้สภาวะการใช้งานปกติ โดยใช้แบบจำลองที่เหมาะสม

2.2 ประโยชน์ของการทดสอบเร่ง [1]

- 1) สามารถประเมินอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ในสภาวะการใช้งานจริง
- 2) สามารถแสดงข้อมูลเกี่ยวกับความเชื่อถือได้ (Reliability) ของผลิตภัณฑ์
- 3) สามารถนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบกับคุณสมบัติด้านต่าง ๆ เช่น การออกแบบที่ต่างกันของผลิตภัณฑ์ชนิดเดียวกัน เป็นต้น
- 4) ใช้ทดสอบเพื่อแสดงความล้มเหลวของผลิตภัณฑ์ ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้มีความเชื่อถือได้มากขึ้น
- 5) ผลการทดสอบสามารถแสดงความผิดพลาดที่เกิดจากการผลิต (Manufacturing Defects) หรือการออกแบบ (Design Defects)

- 6) ข้อมูลที่ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการวางแผนเกี่ยวกับนโยบายการบริการและซ่อมบำรุง เช่น นำไปกำหนดระยะเวลาการรับประกันสินค้า ระยะเวลาที่เหมาะสมในการซ่อมบำรุง เป็นต้น

2.3 ประเภทของข้อมูล [1], [2]

เมื่อจำแนกตามข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเร่ง อาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.3.1 ข้อมูลสมรรถนะ (Performance Data)

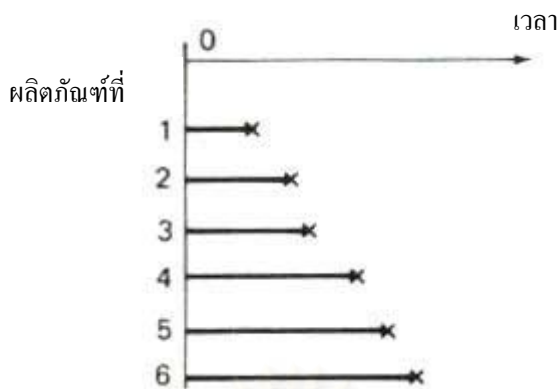
เป็นข้อมูลที่บ่งบอกถึงคุณสมบัติการใช้งานที่เสื่อมลงตามอายุการใช้งาน เช่น ความนำไฟฟ้า ความทนต่อสารเคมี ความแข็งแรงต่อแรงดึง เป็นต้น การทดสอบอาจทำได้โดยนำกลุ่มตัวอย่างไปทดสอบในสภาวะความเค้น (Stress) สูง และวัดสมรรถนะในการใช้งานด้านต่าง ๆ ที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน แล้วนำมาวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองการเสื่อมถอย (Degradation Model) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะ อายุการใช้งาน และความเค้น

2.3.2 ข้อมูลอายุ (Life Data)

เป็นข้อมูลช่วงเวลาที่ผลิตภัณฑ์ใช้ในการทดสอบเร่ง ข้อมูลอายุแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.3.2.1 ข้อมูลสมบูรณ์ (Complete Data)

เป็นข้อมูลเวลาที่ได้จากการทดสอบเร่งของกลุ่มตัวอย่างทั้งหมดตั้งแต่เริ่มต้นจนจบสิ้น ซึ่งเรียกว่าช่วงเวลานี้ว่า ช่วงเวลากระทั่งล้มเหลว (Time to Failure) รูปที่ 2.1 แสดงการเก็บข้อมูลสมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์ 6 ชิ้น ใช้เครื่องหมายกากบาทแทนจุดเวลาที่เกิดความเสียหาย



รูปที่ 2.1 ข้อมูลสมบูรณ์

2.3.2.2 ข้อมูลตัดทอน (Censored Data)

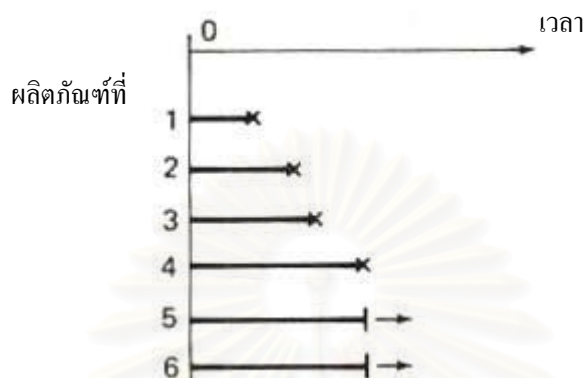
เป็นข้อมูลเวลาที่ได้จากการทดสอบเร่ง โดยกลุ่มตัวอย่างเกิดความล้มเหลวบางส่วน โดยข้อมูลตัดทอนสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ข้อมูลตัดทอนประเภทที่ 1 (Type I Censored Data) หรือเรียกว่าการตัดทอนทางเวลา (Time Censoring) นั่นคือ จะหยุดการทดสอบเมื่อถึงระยะเวลาที่กำหนด ตัวอย่างใดที่ไม่เกิดความล้มเหลว จะบันทึกเวลาที่หยุดการทดสอบนั้นไว้แทน รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างข้อมูลตัดทอนประเภทที่ 1 จำนวน 6 ชิ้น ซึ่งเกิดความล้มเหลว 4 ชิ้น และหยุดการทดสอบก่อนเกิดความล้มเหลว 2 ชิ้น



รูปที่ 2.2 ข้อมูลตัดทอนประเภทที่ 1

ข้อมูลตัดทอนประเภทที่ 2 (Type II Censored Data) หรือเรียกว่า การตัดทอนด้วยความล้มเหลว (Failure Censoring) นั่นคือ จะหยุดการทดสอบเมื่อตัวอย่างเกิดความล้มเหลวเท่าจำนวนที่

กำหนดไว้ รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างข้อมูลตัดทอนประเภทที่ 2 จำนวน 6 ชั้น ซึ่งต้องการให้เกิดความล้มเหลว 4 ชั้น เมื่อครบแล้วจะหยุดทำการทดสอบ ตัวอย่างอีก 2 ชั้นที่เหลือจะบันทึกเวลาที่หยุดทำการทดสอบ



รูปที่ 2.3 ข้อมูลตัดทอนประเภทที่ 2

ในทางปฏิบัติ ผู้ทดสอบนิยมเก็บข้อมูลอายุแบบตัดทอน เนื่องจากประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย แต่จำนวนข้อมูลจะต้องเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ด้วย มิฉะนั้นค่าประมาณของข้อมูลอายุและข้อมูลเกี่ยวกับความเชื่อถือได้จะมีความคลาดเคลื่อนสูง

2.4 ประเภทของการทดสอบเร่ง [3]

2.4.1 การทดสอบเร่งเชิงคุณภาพ (Qualitative Accelerated Testing)

เป็นการทดสอบโดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ทราบข้อมูลความล้มเหลว (Failure) ของผลิตภัณฑ์ สามารถเรียกได้หลายแบบ ได้แก่ Elephant Test, Torture Test และ Shake & Bake Test การทดสอบเร่งเชิงคุณภาพจะทดสอบด้วยความถี่ชนิดต่าง ๆ ถ้ากลุ่มตัวอย่างที่นำมาทดสอบไม่เกิดความล้มเหลวแสดงว่ากลุ่มตัวอย่างดังกล่าวสามารถผ่านการทดสอบนี้ได้ แต่ถ้าไม่ผ่านจะต้องมีการปรับปรุงการออกแบบผลิตภัณฑ์นี้เพื่อกำจัดสาเหตุที่ทำให้เกิดความล้มเหลว อย่างไรก็ตามถ้าการออกแบบการทดลองไม่เหมาะสมก็อาจทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดความล้มเหลวในแบบที่ไม่อาจเกิดได้ในสภาวะการใช้งานจริง ข้อมูลความล้มเหลวที่ได้สามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงและพัฒนา

ผลิตภัณฑ์ได้ นอกจากนี้ยังทำให้ทราบถึงชนิดและระดับความเค้นที่เหมาะสมในการทดสอบเร่งเชิงปริมาณ (Quantitative Accelerated Testing) ต่อไป

2.4.2 การทดสอบเร่งเชิงปริมาณ (Quantitative Accelerated Testing)

เป็นการทดสอบโดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ทราบข้อมูลอายุของผลิตภัณฑ์ภายใต้สภาวะการใช้งานปกติ และสามารถทราบถึงข้อมูลความเชื่อถือได้ (Reliability Function) ซึ่งเป็นการพิจารณาถึงความน่าจะเป็นที่จะเกิดความล้มเหลวของผลิตภัณฑ์ที่อายุการใช้งานต่าง ๆ อายุเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์ภายใต้สภาวะการใช้งานปกติ ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการรับประกัน การเปรียบเทียบการออกแบบที่แตกต่างกัน เป็นต้น การทดสอบเร่งเชิงปริมาณสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การทดสอบเร่งโดยการเพิ่มอัตราการใช้งาน และการทดสอบเร่งโดยเพิ่มความเค้น ทั้งนี้การเลือกวิธีการทดสอบเร่งขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานจริงของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ

2.5 วิธีการทดสอบเร่ง [1], [3]

สำหรับการทดสอบเร่ง ข้อมูลเวลาจนกระทั่งล้มเหลวเป็นสิ่งที่ผู้ทดสอบต้องการ และเนื่องจากผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะมีอายุการใช้งานยาวนานหลายปี จึงจำเป็นจะต้องใช้วิธีทดสอบซึ่งสามารถเร่งให้เกิดความล้มเหลวได้รวดเร็วขึ้น

2.5.1 การทดสอบเร่งโดยการเพิ่มอัตราการใช้งาน (Usage Rate Acceleration)

การทดสอบเร่งโดยวิธีนี้นิยมใช้ในกรณีที่ผลิตภัณฑ์ไม่ได้ถูกใช้งานอย่างต่อเนื่องภายใต้สภาวะการใช้งานปกติ การทดสอบจะทำโดยการเพิ่มอัตราการใช้งานอย่างต่อเนื่อง หรือลดระยะเวลาไม่ใช้งาน (Off Time) ของผลิตภัณฑ์ให้น้อยลง รวมทั้งการเพิ่มความเร็วยรอบในการใช้งานสำหรับผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับการหมุน การวิเคราะห์ข้อมูลอายุจากการทดสอบเร่งวิธีนี้อาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลอายุ (Life Data Analysis) โดยทั่วไป

2.5.2 การทดสอบเร่งโดยการเพิ่มความเค้น (Overstress Acceleration)

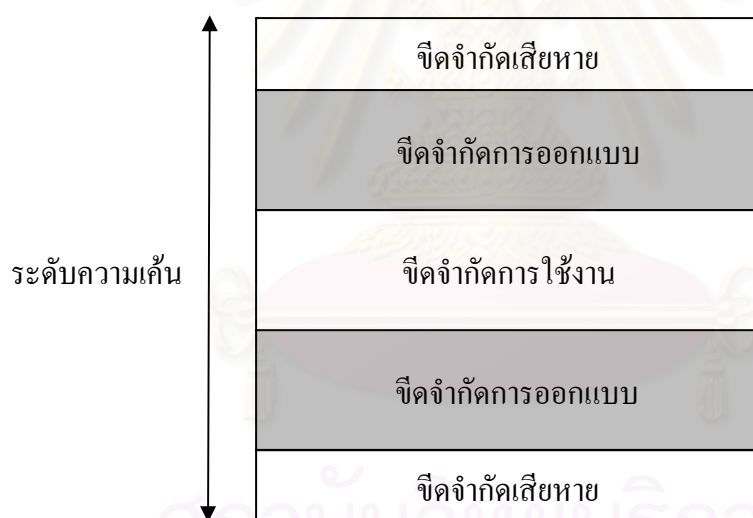
การทดสอบเร่งโดยวิธีนี้นิยมใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีอัตราการใช้งานสูงหรือมีการใช้งานอย่างต่อเนื่องในสภาวะปกติ การทดสอบทำได้โดยเพิ่มความเค้นในระดับที่เกินกว่าระดับปกติ เมื่อได้ช่วงเวลากระทั่งล้มเหลวแล้ว สามารถประมาณค่ากลับไปยังสภาวะใช้งานปกติได้ การทดสอบ

เร่งด้วยวิธีนี้สามารถทดสอบโดยใช้ความเค้นต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น แรงดันไฟฟ้า ความดัน การสั่นสะเทือน เป็นต้น

2.6 ความเค้นและประเภทของความเค้น [1], [3]

2.6.1 ความเค้น

ความเค้น คือ ตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่ออายุของผลิตภัณฑ์ ในการเลือกระดับความเค้นควรเลือกให้สูงมากพอที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดความเสียหายในระยะเวลาอันสั้น แต่ไม่สูงเกินไปจนทำให้เกิดความเสียหายในโหมดที่ไม่อาจเกิดขึ้นจากการใช้งานจริง โดยปกติระดับความเค้นจะอยู่ในช่วงขีดจำกัดการออกแบบ (Design Limits) ซึ่งช่วงดังกล่าวจะอยู่ระหว่างช่วงขีดจำกัดการใช้งาน (Specification Limits) กับช่วงขีดจำกัดเสียหาย (Destruct Limits) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ระดับความเค้น

สำหรับผลิตภัณฑ์ใหม่ที่ไม่ทราบว่าจะเลือกใช้ระดับความเค้นเท่าใด ควรทำการทดสอบเชิงคุณภาพเสียก่อน เพื่อหาระดับความเค้นที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบเร่งเชิงปริมาณต่อไป การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) มีความสำคัญ การออกแบบการทดลองที่ถูกต้อง จะทำให้สามารถวิเคราะห์ว่าชนิดและระดับของความเค้นที่เลือกใช้ส่งผลกระทบต่ออายุของผลิตภัณฑ์หรือไม่ โดยระดับความเค้นที่สูงขึ้น เวลาที่ใช้ในการทดสอบเร่งจะสั้นลง แต่ความไม่แน่นอนของ

ค่าที่ประมาณได้จะมากขึ้นเช่นกัน นอกจากการเลือกระดับที่เหมาะสมแล้ว จะต้องสนใจวิธีการใส่ความเค้นแก่ผลิตภัณฑ์ด้วยว่าควรใส่อย่างไร และระดับที่ใส่มีความแม่นยำมากน้อยเพียงใด

2.6.2 ประเภทของความเค้น

ถ้าจำแนกตามจำนวนความเค้นที่ใช้ในการทดสอบ สามารถแยกได้ 2 ประเภท คือ

1) ความเค้นเดียว (Single Stress)

เป็นการเลือกใช้ความเค้นเพียงชนิดเดียวตลอดการทดสอบแรง นิยมใช้ในการทดสอบแรงโดยทั่วไป

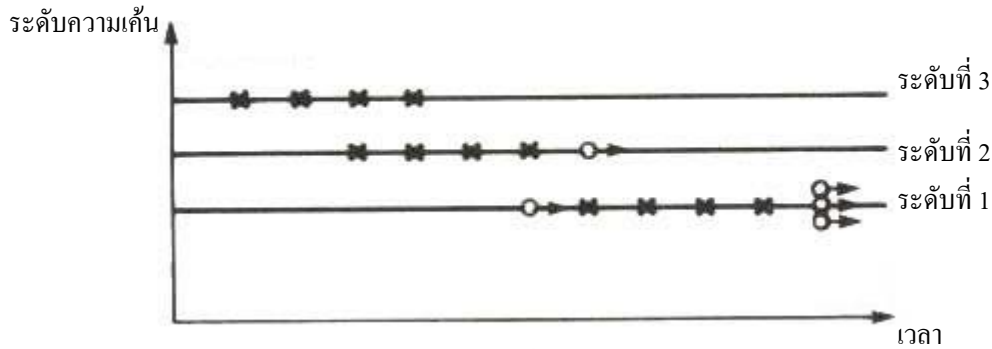
2) ความเค้นหลายชนิด (Multiple Stresses)

เป็นการใช้ความเค้นพร้อมกัน ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปในการทดสอบแรงซึ่งการทดสอบด้วยความเค้นรวมจะช่วยลดเวลาในการทดสอบ โดยความเค้นที่เลือกใช้จะต้องส่งผลต่อการเกิดความล้มเหลวในโหมดที่ต้องการเท่านั้น และแบบจำลองจะมีความซับซ้อนมากกว่ากรณีความเค้นเดียว

ถ้าจำแนกตามความสัมพันธ์กับเวลาสามารถจำแนกได้ 2 ประเภท ดังนี้

1) ความเค้นที่ไม่ขึ้นกับเวลา (Time Independent Stress)

หมายถึงระดับความเค้นที่ใช้ในการทดสอบแรงจะไม่แปรผันกับเวลา หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นระดับความเค้นคงที่ (Constant Stress) ตลอดช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ ในการทดสอบส่วนใหญ่ นิยมใช้ความเค้นคงที่เพราะสะดวกต่อการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล เพราะแบบจำลองทางสถิติที่ใช้ตั้งอยู่บนสมมติฐานการทดสอบแรงที่มีระดับความเค้นคงที่



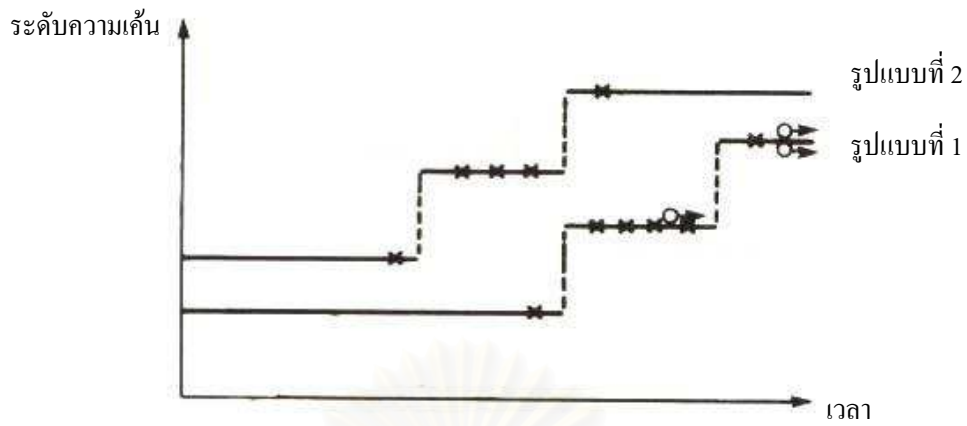
รูปที่ 2.5 ความเค้นคงที่
(X แทนเวลากระทั่งล้มเหลว และ O แทนเวลาที่ถูกตัดทอน)

2) ความเค้นที่ขึ้นกับเวลา (Time Dependent Stress)

หมายถึงระดับความเค้นที่ใช้ในการทดสอบแรงจะแปรผันตามช่วงเวลาที่ใช้ในการทดสอบด้วย การทดสอบแรงด้วยความเค้นที่ขึ้นกับเวลามีข้อดี คือ จะทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดความเสียหายเร็วขึ้น แต่การทดสอบแบบนี้ ค่าประมาณของข้อมูลต่าง ๆ จะมีความแม่นยำน้อยกว่าการทดสอบแบบใช้ระดับความเค้นคงที่ นอกจากนี้ การใช้ความเค้นที่ขึ้นกับเวลานั้นอาจไม่เกิดขึ้นจริงกับการใช้งานปกติเพราะผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ถูกใช้งานที่ระดับความเค้นคงที่ อีกทั้งแบบจำลองที่ใช้เป็นแบบจำลองความเสียหายสะสม (Cumulative Damage Model) [1] ซึ่งมีความซับซ้อนกว่าแบบจำลองความเค้นคงที่ ความเค้นที่ขึ้นกับเวลายังสามารถจำแนกได้เป็นหลายแบบได้แก่

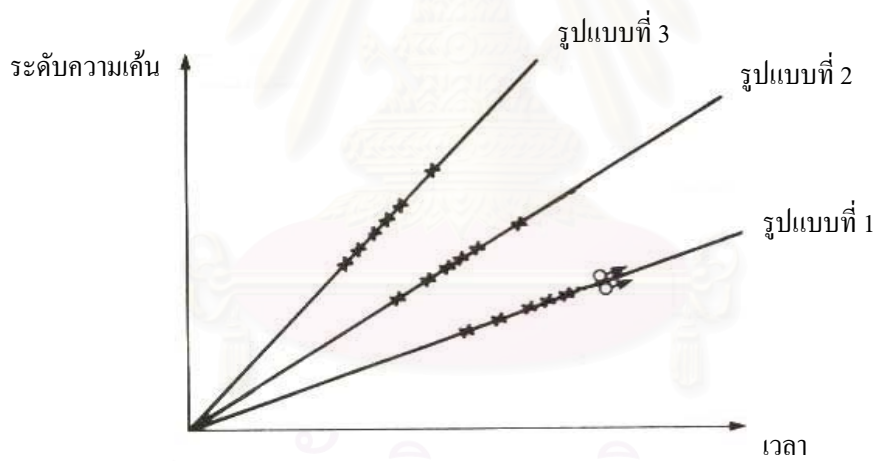
ความเค้นแบบขั้น (Step Stress) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยขั้นแรกจะทำการทดสอบที่ระดับความเค้นคงที่ในช่วงเวลาจำกัดหนึ่ง ๆ ถ้าผลิตภัณฑ์ไม่เกิดความล้มเหลว จะทำการเพิ่มระดับความเค้นให้คงที่ในช่วงเวลาหนึ่ง เรื่อยไปจนกระทั่งเกิดความล้มเหลวตามต้องการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 ความเค้นแบบขั้น

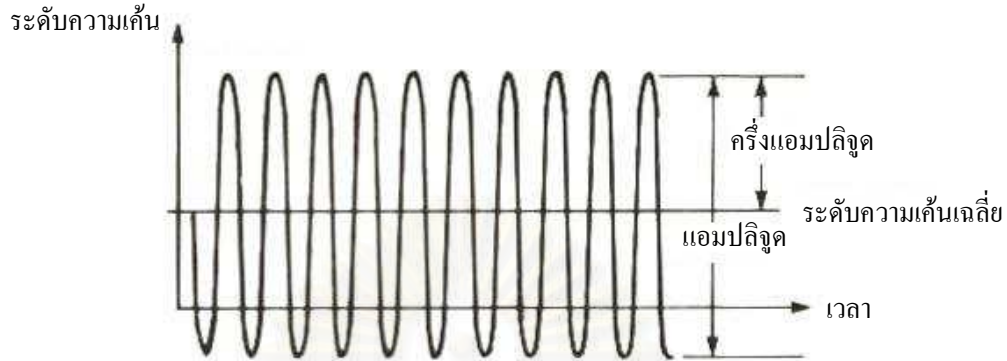
ความเค้นแบบเพิ่มคงที่ (Progressive Stress) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ช่วยลดเวลาการทดสอบ แต่มีข้อควรระวังคือ ต้องทำการควบคุมให้ความเค้นเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ



รูปที่ 2.7 ความเค้นแบบเพิ่มคงที่

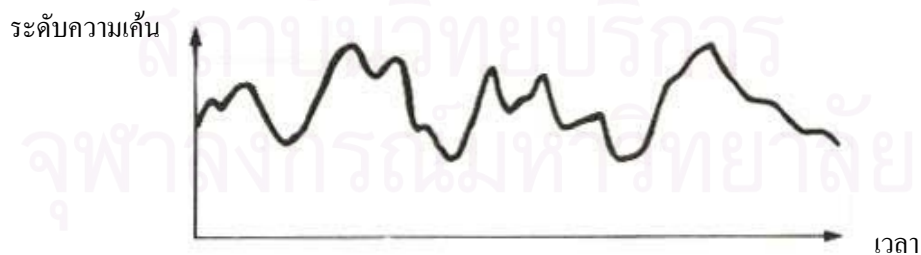
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความเค้นแบบวัฏจักร (Cyclic Stress) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 การทดสอบแรงด้วยความเค้นแบบวัฏจักร เช่น การทดสอบจนวนด้วยแรงดันไฟสลบ เป็นต้น



รูปที่ 2.8 ความเค้นแบบวัฏจักร

ความเค้นแบบสุ่ม (Random Stress) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ระดับความเค้นมีการเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม ในขณะที่การทดสอบแรงด้วยความเค้นแบบขั้นหรือแบบเพิ่มคงที่อาจนำไปใช้ในการประมาณข้อมูลในสภาวะปกติได้ และเนื่องจากการทดสอบแรงด้วยความเค้นแบบสุ่มมีความซับซ้อน การทดสอบด้วยความเค้นแบบนี้จะใช้เมื่อผลิตภัณฑ์จะต้องถูกใช้ในสภาวะปกติซึ่งมีภาระแบบสุ่มเช่นกัน แบบจำลองที่ใช้กับความเค้นแบบสุ่มจะเป็นแบบจำลองแบบสุ่ม (Random Model) เช่นกัน ซึ่งจะอาศัยคุณสมบัติบางประการของตัวแปรสุ่มเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ เช่น ค่าเฉลี่ย (Mean) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ฟังก์ชันสหสัมพันธ์ (Correlation Function) ความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง (Power Spectral Density) เป็นต้น



รูปที่ 2.9 ความเค้นแบบสุ่ม

ในบางกรณีอาจใช้ค่าเฉลี่ยเป็นตัวแทนของความเค้นแบบสุ่ม เพื่อใช้ในการทดสอบแรงด้วยความเค้นคงที่ได้ (ขึ้นอยู่กับสมมติฐานของแบบจำลองและการใช้งานในสภาวะปกติของผลิตภัณฑ์นั้น) เพื่อลดความยุ่งยากในการทดสอบและการวิเคราะห์

ในงานวิจัยปัจจุบันมุ่งเน้นการศึกษาการทดสอบแรงด้วยความเค้นซึ่งไม่ขึ้นกับเวลาและการพัฒนาแบบจำลองเพื่อให้การประมาณมีความแม่นยำมากขึ้นตัวอย่าง เช่น ในงานวิจัยของ Laghari, J.R., Cygan, P., and Khechen, W. [4], Laghari, J.R., and Khachen, W. [5] ได้ประยุกต์ใช้ความเค้นแบบขึ้นเพื่อประมาณอายุของฟิล์มโพลีโพรพิลีน (Polypropylene) โพลีไอมิด์ (Polyimide) และโพลีไวนิลไอดีฟลูออไรด์ (Polyvinylidene fluoride)

Mettas, A., and Vassiliou, P. [6] ได้ศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองความเสียหายสะสมเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแรงด้วยความเค้นที่ขึ้นกับเวลา รวมถึงการทำนายความเชื่อถือได้ (Reliability) ในกรณีที่ผลิตภัณฑ์ถูกใช้งานด้วยความเค้นที่ขึ้นกับเวลา งานวิจัยของ Tian, X., and Prince, J. L. [7] ได้ใช้ความเค้นอนุกรมเป็นวัฏจักรแบบขึ้นเพื่อทดสอบหาอายุของสารยึดติด (Adhesive) ในการบรรจุชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์

Bai, D. S., Kim, M. S., and Lee, S. H. [8], Khamis, I. H., and Higgins, J. J. [9] ได้ทำการศึกษาการทดสอบแรงด้วยความเค้นแบบขึ้นที่เหมาะสมที่สุด Bai, D. S., Cha, M. S., and Chung, S. W. [10] ได้ทำการศึกษาการทดสอบแรงด้วยความเค้นแบบเพิ่มคงที่ที่เหมาะสมที่สุด นอกจากนี้ Laghari, J. R., and Cygan, P. J. [11] ได้ทำการทดสอบแรงกับฟิล์มโพลีเมอร์ด้วยความเค้นหลายชนิด

บทที่ 3

แบบจำลองการทดสอบเร่ง

3.1 แบบจำลองทางสถิติ [1], [12]

แบบจำลองทางสถิติในที่นี้คือฟังก์ชันการแจกแจงอายุของผลิตภัณฑ์ (Life Distribution Function) ที่ใช้อธิบายลักษณะการแจกแจงอายุของผลิตภัณฑ์ สำหรับฟังก์ชันการแจกแจงที่นิยมใช้ได้แก่ การแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential Distribution) การแจกแจงแบบล็อกปกติ (Lognormal Distribution) และการแจกแจงแบบไวบูลล์ (Weibull Exponential) โดยฟังก์ชันทางสถิติที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองดังกล่าวมีดังนี้

- ฟังก์ชันความเชื่อถือได้ (Reliability Function, $R(t)$) ใช้อธิบายความน่าจะเป็นของผลิตภัณฑ์ที่ยังสามารถทำงานได้อย่างปกติเมื่อใช้งานจนกระทั่งเวลา t โดยมีนิยามดังนี้

$$R(t) \equiv 1 - F(t) \quad (3.1)$$

โดย $F(t)$ คือฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative Distribution Function) หรือ ฟังก์ชันความไม่น่าเชื่อถือ (Unreliability Function)

- ฟังก์ชันอันตราย (Hazard Function, $h(t)$) หรืออัตราความล้มเหลวขณะใดๆ (Instantaneous Failure Rate) เป็นสัดส่วนของจำนวนผลิตภัณฑ์ที่จะเกิดความล้มเหลวขณะเวลา t โดยเทียบกับจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ยังทำงานปกติขณะเวลานั้น โดยมีนิยามดังนี้

$$h(t) \equiv \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (3.2)$$

โดย $f(t)$ คือฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability Density Function) และ

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t)$$

ฟังก์ชันอันตรายแสดงถึงอัตราความล้มเหลวซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยอาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามอายุของผลิตภัณฑ์ ฟังก์ชันนี้สามารถนำไปใช้ในการบำรุงรักษา การรับประกันคุณภาพ และการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนการออกแบบอีกด้วย

- ฟังก์ชันอันตรายสะสม (Cumulative Hazard Function, $H(t)$) มีนิยามดังนี้

$$H(t) \equiv \int_{-\infty}^t h(u) du \quad (3.3)$$

3.1.1 การแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential Distribution)

การแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลใช้อธิบายลักษณะอายุของผลิตภัณฑ์ประเภทจนวนน้ำมันและของเหลว หรือวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์บางประเภท บ่อยครั้งจะมีการนำไปใช้กับผลิตภัณฑ์ประเภทอื่น ๆ ซึ่งทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลผิดพลาดได้ เนื่องจากการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลนั้นสามารถอธิบายได้เพียงช่วงต้นของการแจกแจง

ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad t \geq 0 \quad (3.4)$$

โดย λ คืออัตราความล้มเหลว (Failure Rate) ซึ่ง $\lambda = 1/m$
 m คือเวลาจนกระทั่งล้มเหลวเฉลี่ย (Mean Time-to-Failure)

ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น

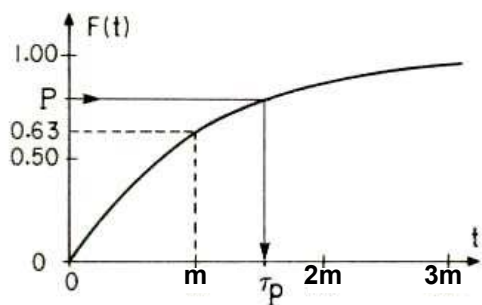
$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad t \geq 0 \quad (3.5)$$

ฟังก์ชันความเชื่อถือได้

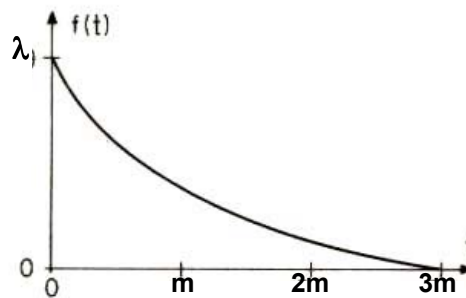
$$R(t) = e^{-\lambda t}, \quad t \geq 0 \quad (3.6)$$

ฟังก์ชันอันตราย

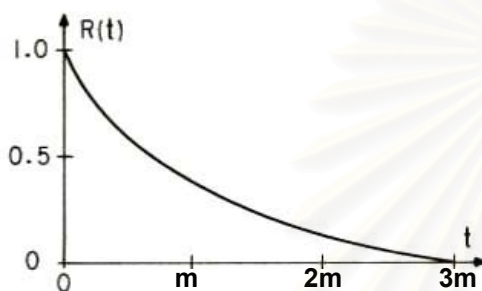
$$h(t) = \lambda \quad (3.7)$$



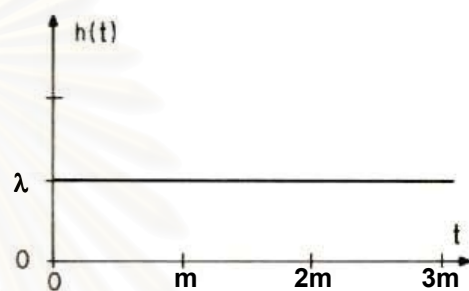
ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม



ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น



ฟังก์ชันความเชื่อถือได้



ฟังก์ชันอันตราย

รูปที่ 3.1 ฟังก์ชันต่างๆ ของการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

3.1.2 การแจกแจงแบบล็อกปกติ (Lognormal Distribution)

การแจกแจงแบบล็อกปกตินิยมใช้อธิบายการแจกแจงอายุของผลิตภัณฑ์ประเภทอุปกรณ์โซลิตสเตท เช่น สารกึ่งตัวนำ ไดโอด เป็นต้น และผลิตภัณฑ์ประเภทจนวนไฟฟ้า

ฟังก์ชันการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) มีฟังก์ชันการแจกแจงสะสมหรือสัดส่วนของจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ล้มเหลวเมื่อมีอายุการใช้งานเท่ากับ t

$$F(t) = \int_{-\infty}^t (2\pi\sigma^2)^{-1/2} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right] dt, \quad -\infty < t < \infty \tag{3.8}$$

และกำหนดฟังก์ชันมาตรฐานสำหรับการแจกแจงสะสมแบบปกติด้วยฟังก์ชัน Φ ดังนี้

$$F(t) = \Phi\left[\frac{(t-\mu)}{\sigma}\right], \quad -\infty < t < \infty \quad (3.9)$$

โดย μ เป็นอายุเฉลี่ยของประชากร และ σ เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของประชากร เนื่องจากอายุของผลิตภัณฑ์มีค่าเป็นบวกเท่านั้น ค่าของการแจกแจงสะสมที่อายุต่ำกว่าศูนย์จะต้องมีค่าน้อยมากเพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้ในการประมาณค่าได้

ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม

$$F(t) = \Phi\left[\frac{(\log(t)-\mu)}{\sigma}\right], \quad t > 0 \quad (3.10)$$

โดย μ คือ ค่าเฉลี่ยของลอการิทึม (Log Mean) อายุผลิตภัณฑ์

σ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของลอการิทึม (Log Standard Deviation) อายุผลิตภัณฑ์

ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น

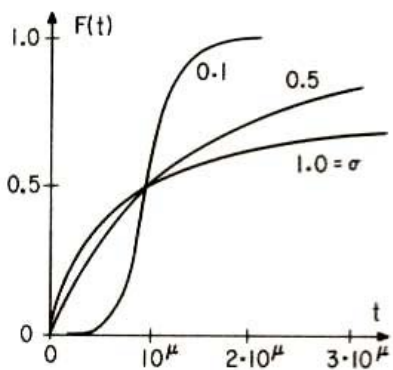
$$f(t) = \frac{0.4343}{(2\pi)^{1/2} t \sigma} \exp\left[-\left(\frac{[\log(t)-\mu]^2}{2\sigma^2}\right)\right], \quad t > 0 \quad (3.11)$$

ฟังก์ชันความเชื่อถือได้

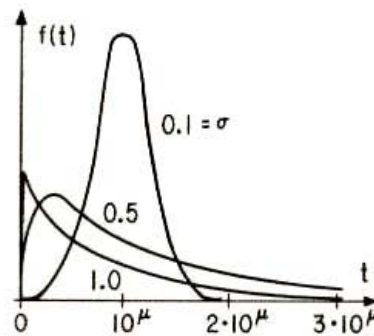
$$R(t) = 1 - \Phi\left[\frac{(\log(t)-\mu)}{\sigma}\right] = \Phi\left[-\left\{\frac{\log(t)-\mu}{\sigma}\right\}\right] \quad (3.12)$$

ฟังก์ชันอันตราย

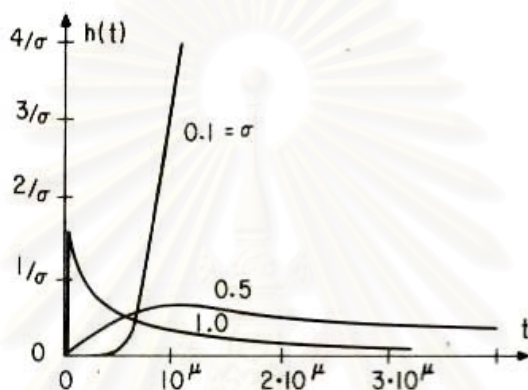
$$h(t) \equiv \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3.13)$$



ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม



ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น



ฟังก์ชันอันตราย

รูปที่ 3.2 ฟังก์ชันต่างๆ ของการแจกแจงแบบลือกปกติ

3.1.3 การแจกแจงแบบไวบูลล์ (Weibull Distribution)

การแจกแจงแบบไวบูลล์เป็นการแจกแจงที่แสดงการเพิ่มหรือลดของอัตราการล้มเหลวได้ชัดเจน และสามารถใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ เช่น ความคงทน ความยืดหยุ่น ความต้านทาน เป็นต้น การแจกแจงนี้สามารถแสดงอายุของผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ เช่น แบตเตอรี่ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เซรามิก ตัวเก็บประจุ เป็นต้น

ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}}, \quad t > 0 \tag{3.14}$$

โดย η คือ พารามิเตอร์สเกล (Scale Parameter) และ $\eta > 0$
 และ β คือ พารามิเตอร์รูปร่าง (Shape Parameter) และ $\beta > 0$

ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น

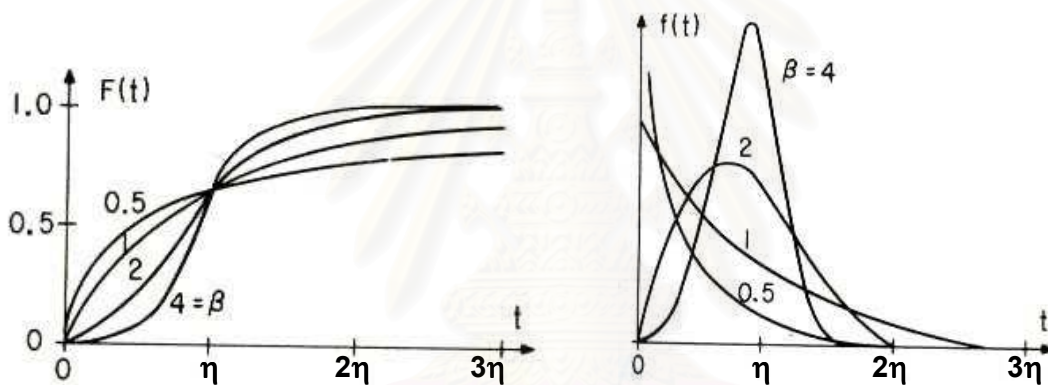
$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}, \quad t > 0 \tag{3.15}$$

ฟังก์ชันความเชื่อถือได้

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}, \quad t > 0 \tag{3.16}$$

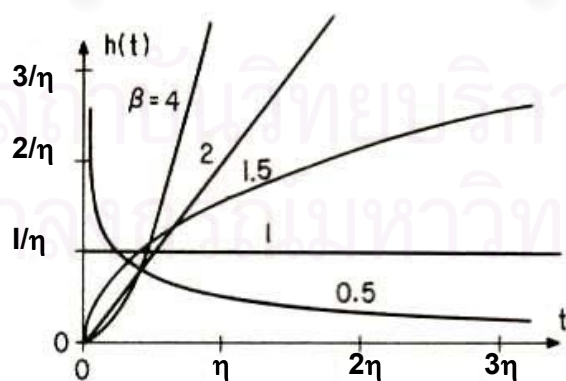
ฟังก์ชันอันตราย

$$h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}, \quad t > 0 \tag{3.17}$$



ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม

ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น



ฟังก์ชันอันตราย

รูปที่ 3.3 ฟังก์ชันต่างๆ ของการแจกแจงแบบไวบูลล์

3.2 แบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้น [1], [3]

ในเบื้องต้นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและอายุที่ใช้ในการศึกษาการทดสอบแรงที่มักถูกกล่าวถึงเสมอ มีอยู่ 2 ชนิด คือ ความสัมพันธ์อาร์เรเนียส (Arrhenius Relationship) และความสัมพันธ์กำลังผกผัน (Inverse Power Relationship) โดยความสัมพันธ์ทั้งสองจะใช้ในการถดถอยการทดสอบแรงที่ระดับความเค้นคงที่

3.2.1 ความสัมพันธ์อาร์เรเนียส (Arrhenius Relationship)

เป็นแบบจำลองที่นิยมใช้กันมากในการทดสอบแรงที่ใช้อุณหภูมิเป็นความเค้น ความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงถึงความเสื่อมของวัสดุอันเนื่องมาจากผลของอุณหภูมิ แบบจำลองนี้มีพื้นฐานมาจากกฎอาร์เรเนียส (Arrhenius Law) ซึ่งเป็นการอธิบายถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ดังนี้

$$R = Ae^{-\frac{E_a}{kT}} \quad (3.18)$$

โดยที่ R คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยา

A คือ ค่าคงที่ซึ่งแสดงสมบัติกลไกการเสื่อมของผลิตภัณฑ์

E_a คือ พลังงานกระตุ้น (Activation Energy) ของปฏิกิริยา มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอน โวลต์

k คือ ค่าคงที่โบลซ์มันน์ มีค่าเท่ากับ 8.6171×10^{-5} อิเล็กตรอน โวลต์ต่อเซลเซียส

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ มีหน่วยเป็นเคลวิน

จากความสัมพันธ์ข้างต้น จะสมมติให้ผลิตภัณฑ์ล้มเหลวเมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีถึงปริมาณวิกฤติค่าหนึ่ง นั่นคือ

$$\text{ปริมาณวิกฤติ} = \text{อัตราการเกิดปฏิกิริยา} \times \text{เวลาจนกระทั่งล้มเหลว}$$

ดังนั้น

$$\text{เวลาจนกระทั่งล้มเหลว} = \text{ปริมาณวิกฤติ} / \text{อัตราการเกิดปฏิกิริยา}$$

จะได้ว่า เวลาจนกระทั่งล้มเหลวจะแปรผกผันกับอัตราการเกิดปฏิกิริยานั่นเอง และจะได้รับความสัมพันธ์ระหว่างอายุของผลิตภัณฑ์กับความเค้น ดังสมการ (3.19)

$$L(V) = Ce^{\frac{B}{V}} \quad (3.19)$$

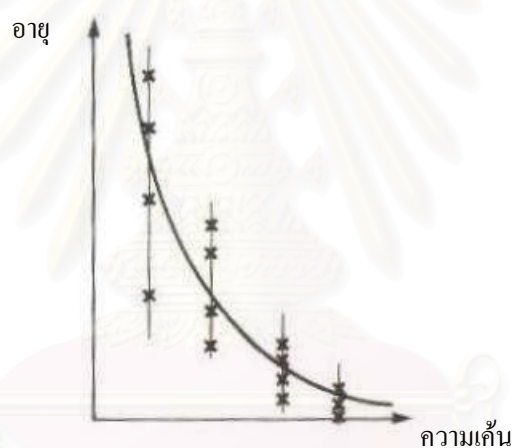
โดยที่ $L(V)$ คือ อายุของผลิตภัณฑ์ซึ่งขึ้นกับความเค้น V

V คือ ความเค้น

C คือ พารามิเตอร์ และ $C > 0$

B คือ พารามิเตอร์ และ $B > 0$

อายุของผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในแบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้นมีความหมายกว้าง โดยอาจจะหมายถึง ค่าเฉลี่ยของอายุการใช้งาน หรืออายุการใช้งานที่ความน่าเชื่อถือค่าใดค่าหนึ่ง ลักษณะกราฟแสดงความสัมพันธ์เมื่อสเกลของอายุและความเค้นเป็นเชิงเส้น แสดงดังรูปที่ 3.4

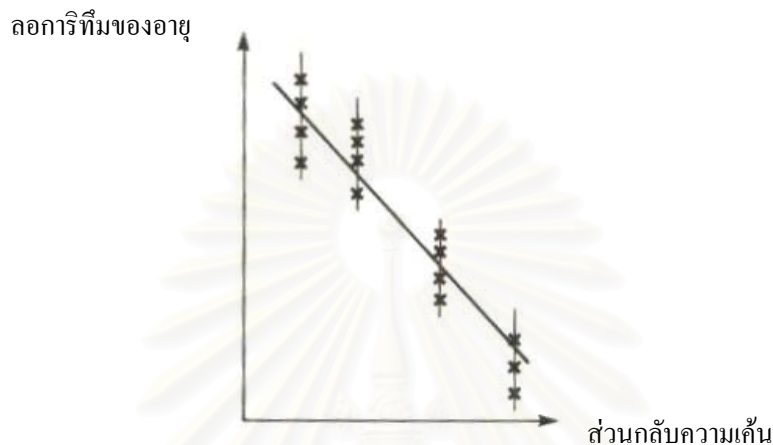


รูปที่ 3.4 กราฟความสัมพันธ์อาร์เรเนียส

จากรูปที่ 3.4 สังเกตได้ว่าที่ความเค้นต่ำ อายุจะมากกว่าที่ความเค้นสูง นอกจากนี้อายุที่ความเค้นต่ำจะมีการกระจายมากกว่าที่ความเค้นสูง เส้นโค้งในกราฟแสดงอายุซึ่งเป็นฟังก์ชันของความเค้น กราฟในลักษณะดังกล่าวไม่สะดวกต่อการหาค่าประมาณของอายุซึ่งอยู่นอกช่วงความเค้นที่ทำการทดสอบ ดังนั้นควรปรับความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปเชิงเส้น โดยการใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการ (3.19) จะได้

$$\ln(L(V)) = \ln(C) + \frac{B}{V} \quad (3.20)$$

จากสมการ (3.20) $\ln(L(V))$ มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับ $\frac{1}{V}$ โดยมี B เป็นความชันของเส้นตรงนั้น และ $\ln(C)$ เป็นจุดตัดของเส้นตรงกับแกนลอการิทึมของอายุ ตัวอย่างของกราฟแบบจำลองอาร์เรเนียส แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 กราฟความสัมพันธ์อาร์เรเนียสเชิงเส้น

3.2.2 ความสัมพันธ์กำลังผกผัน (Inverse Power Relationship)

เป็นแบบจำลองที่นิยมใช้กับการทดสอบเร่งที่ใช้แรงดันเป็นความเค้น โดยอายุของผลิตภัณฑ์ $L(V)$ กับความเค้น V มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$L(V) = \frac{1}{KV^n} \quad (3.21)$$

โดยที่ $L(V)$ คือ อายุของผลิตภัณฑ์ซึ่งขึ้นกับความเค้น V

V คือ ความเค้น

K คือ พารามิเตอร์ และ $K > 0$

n คือ พารามิเตอร์ และ $n > 0$

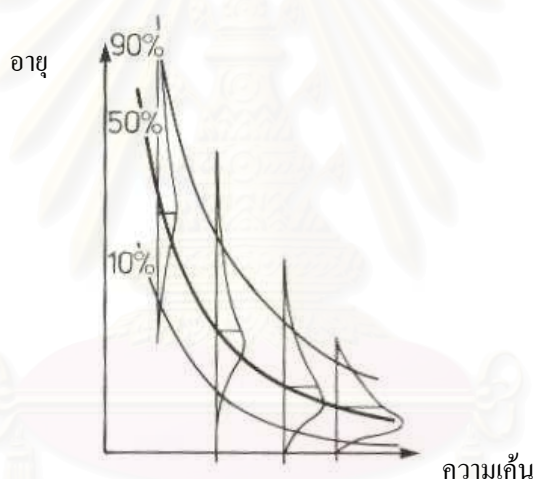
อายุของผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในแบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้นมีความหมายกว้าง โดยอาจจะหมายถึง ค่าเฉลี่ยของอายุการใช้งาน หรือจุดเวลาการใช้งานที่ความน่าเชื่อถือค่าใดค่าหนึ่ง ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถทำให้เป็นเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\ln(L) = -\ln(K) - n \ln(V) \quad (3.22)$$

จากสมการ (3.22) พบว่ากราฟระหว่างอายุกับระดับความเค้นจะเป็นเส้นตรงเมื่อพล็อตลงบนกระดาษกราฟล็อก-ล็อก (Log-Log Paper) และสามารถหาค่า K และ n ได้จากจุดตัดและความชันของเส้นตรง ตามลำดับ

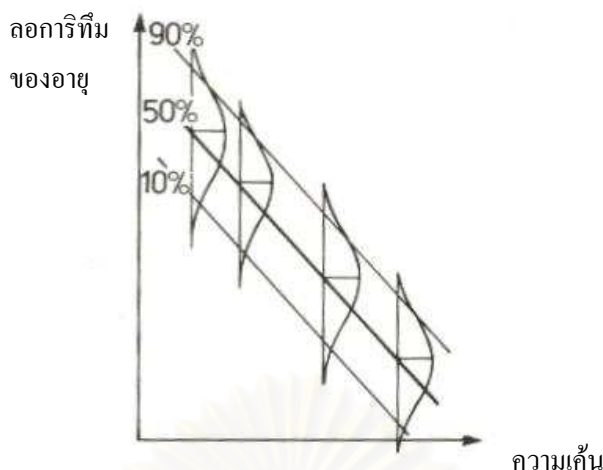
3.3 การใช้งานแบบจำลอง [1], [3]

การวิเคราะห์ข้อมูลอายุจากการทดสอบเร่งโดยวิธีเพิ่มระดับความเค้น (Overstressing) อาศัยแบบจำลองทางสถิติและแบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุและความเค้นประกอบกัน โดยลักษณะของกราฟมีลักษณะดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้น

จากรูปที่ 3.6 ที่แต่ละระดับความเค้นมีเส้นโค้งแสดงรูปแบบการแจกแจงอายุของผลิตภัณฑ์ โดยเส้นโค้งดังกล่าวจะตั้งฉากกับหน้ากระดาษ นอกจากนี้ อายุที่ความเค้นต่ำมากกว่าที่ความเค้นสูง และอายุที่ความเค้นต่ำมีการกระจายมากกว่าที่ความเค้นสูง โดยอายุในที่นี้อาจหมายถึงค่าเฉลี่ยของอายุการใช้งานหรือระยะเวลาการใช้งานที่ความเชื่อถือได้ค่าใดค่าหนึ่ง เส้นโค้งที่เชื่อมโยงอายุที่เปอร์เซ็นต์ไทล์ต่าง ๆ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุและความเค้น ซึ่งเป็นความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น ทำให้ไม่สะดวกต่อการประมาณอายุนอกช่วง ดังนั้นจึงได้มีการปรับแก้ตั้งเพื่อให้ความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น โดยใช้ลอการิทึมของอายุแทน เมื่อทำการปรับความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นจะมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของอายุกับความเค้น

เมื่อเปลี่ยนแกนตั้งเป็นลอการิทึมของอายุ กราฟความสัมพันธ์จะเป็นเชิงเส้นและอายุที่ความน่าเชื่อถือได้ค่าต่าง ๆ จะเป็นเส้นขนานกัน เมื่อกราฟเป็นเชิงเส้น จะทำให้การประมาณอายุที่อยู่ในช่วงมีความสะดวกมากยิ่งขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์อาร์เรเนียสและความสัมพันธ์กำลังผกผันจะมีลักษณะดังกล่าว

3.3.1 แบบจำลองอาร์เรเนียส-ล็อกปกติ (Arrhenius-Lognormal Model)

แบบจำลองนี้เป็นการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ของอายุของผลิตภัณฑ์ซึ่งมีการแจกแจงอายุแบบล็อกปกติเข้ากับระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบเร่ง แบบจำลองนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์และวัสดุหลายชนิด เช่น ในมาตรฐาน IEEE Standard 101 (1988) ใช้แบบจำลองอาร์เรเนียส-ล็อกปกติ สำหรับจำนวนของมอเตอร์ เป็นต้น

สมมติฐานของแบบจำลองอาร์เรเนียส-ล็อกปกติ

1. ที่อุณหภูมิสัมบูรณ์ V อายุของผลิตภัณฑ์ที่มีการแจกแจงแบบล็อกปกติ หรือลอการิทึมของอายุของผลิตภัณฑ์ที่มีการแจกแจงแบบปกติ นั่นเอง
2. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ ของลอการิทึมของอายุมีค่าคงที่ นั่นคือไม่ขึ้นอยู่กับระดับของอุณหภูมิที่ทำการเร่ง เมื่อพล็อตกราฟลงในกระดาษความน่าจะเป็น (Probability Paper) จะเป็นเส้นตรงที่มีความชันเท่ากันสำหรับทุกอุณหภูมิ
3. ลอการิทึมของอายุที่ตำแหน่งมัธยฐาน $\ln(\tau_{.50}(V))$ ที่อุณหภูมิสัมบูรณ์ V จะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับส่วนกลับของอุณหภูมิสัมบูรณ์นั้น

$$\ln(\tau_{.50}(V)) = \ln(C) + \frac{B}{V} \quad (3.23)$$

การแจกแจงแบบล็อกปกติ อายุเฉลี่ย μ มีค่าเท่ากับ $\log(\tau_{.50}(V))$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\mu(V) = \ln(C) + \frac{B}{V} \quad (3.24)$$

เมื่อนำสมการ (3.24) มาแทนที่ค่าเฉลี่ยอายุของการแจกแจงแบบล็อกปกติในสมการ (3.11) จะได้ความสัมพัทธ์อาร์เรเนียส-ล็อกปกติซึ่งแสดงในรูปของฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นได้ดังนี้

$$f(t, V) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma t}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(t) - \ln(C) - \frac{B}{V}}{\sigma} \right)^2} \quad (3.25)$$

หรือฟังก์ชันความเชื่อถือได้

$$R(t, V) = \int_t^{\infty} f(t, V) dt \quad (3.26)$$

3.3.2 แบบจำลองอาร์เรเนียส-ไวบูลล์ (Arrhenius-Weibull Model)

สมมติฐานของแบบจำลองอาร์เรเนียส-ไวบูลล์

1. ที่อุณหภูมิสัมบูรณ์ V อายุของผลิตภัณฑ์ที่มีการแจกแจงแบบไวบูลล์
2. พารามิเตอร์รูปร่าง β มีค่าคงที่ นั่นคือไม่ขึ้นอยู่กับระดับของอุณหภูมิที่ทำการเร่ง เมื่อพล็อตกราฟลงในกระดาษความน่าจะเป็น (Probability Paper) จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากันสำหรับทุกอุณหภูมิ
3. ลอการิทึมธรรมชาติ (Natural Logarithm) ของอายุลักษณะเฉพาะ (Characteristic Life) หรือพารามิเตอร์สเกล η ที่อุณหภูมิสัมบูรณ์ T จะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับส่วนกลับของอุณหภูมิสัมบูรณ์นั้น

$$\ln(\eta) = \ln(C) + \frac{B}{V} \quad (3.27)$$

แบบจำลองอาร์เรเนียส-ไวบูลล์ สามารถหาฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นได้ โดยการกำหนดให้ $\eta = L(V)$ แทนลงในฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบไวบูลล์ จะได้

$$f(t, V) = \frac{\beta}{C \cdot e^{\frac{B}{V}}} \left(\frac{t}{C \cdot e^{\frac{B}{V}}} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{C \cdot e^{\frac{B}{V}}} \right)^{\beta}} \quad (3.28)$$

ฟังก์ชันความเชื่อถือได้

$$R(t, V) = e^{-\left(\frac{t}{C \cdot e^{\frac{B}{V}}} \right)^{\beta}} \quad (3.29)$$

3.3.3 แบบจำลองอาร์เรเนียส-เอ็กซ์โพเนนเชียล (Arrhenius-Exponential Model)

การแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลมักใช้แสดงการแจกแจงอายุของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ในมาตรฐาน MIL-HDBK-217E (1986) ใช้การแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลในการประมาณช่วงเวลาระหว่างความเสียหาย (Times Between Failure) ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น แบบจำลองอาร์เรเนียส-เอ็กซ์โพเนนเชียลเป็นกรณีพิเศษของแบบจำลองอาร์เรเนียส-ไวบูลล์ เมื่อ $\beta = 1$

สมมติฐานของแบบจำลองอาร์เรเนียส-เอ็กซ์โพเนนเชียล

1. ที่อุณหภูมิสัมบูรณ์ V อายุของผลิตภัณฑ์มีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล
2. ลอการิทึมธรรมชาติ (Natural Logarithm) ของอายุเฉลี่ย m ที่อุณหภูมิสัมบูรณ์ T จะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับส่วนกลับของอุณหภูมิสัมบูรณ์นั้น

$$\ln(m) = \ln(C) + \frac{B}{V} \quad (3.30)$$

หรือเนื่องจากอัตราความล้มเหลว λ เป็นส่วนกลับของอายุเฉลี่ย m จะได้ว่า

$$\ln(\lambda) = -\ln(C) - \frac{B}{V} \quad (3.31)$$

จากฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

$$f(t) = \frac{1}{m} e^{-\frac{t}{m}} \quad (3.32)$$

แบบจำลองอาร์เรเนียส-เอ็กซ์โพเนนเชียล สามารถหาได้โดยการกำหนด $m = L(V)$ ลงในสมการ (3.19)

$$m = L(V) = C e^{\frac{B}{V}} \quad (3.33)$$

แทนค่า m ลงในสมการ (3.32) จะได้ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลาและความเค้น ดังนี้

$$f(t, V) = \frac{1}{C e^{\frac{B}{V}}} \cdot e^{-\frac{1}{C e^{\frac{B}{V}}} t} \quad (3.34)$$

ฟังก์ชันความเชื่อถือได้

$$R(t, V) = e^{-\frac{t}{C e^{\frac{B}{V}}}} \quad (3.35)$$

3.3.4 แบบจำลองกำลัง-ล็อกปกติ (Power-Lognormal Model)

อายุของบางผลิตภัณฑ์สามารถอธิบายได้โดยอาศัยการแจกแจงแบบล็อกปกติโดยค่ามัธยฐานของอายุมีความสัมพันธ์กำลังผกผันกับความเค้น แบบจำลองนี้นิยมใช้ในการอธิบายการล้าของโลหะ (Metal Fatigue) ตามในมาตรฐาน ASTM STP 744 (1979) และในมาตรฐาน ASTM STP 91-A (1963) นอกจากนี้แบบจำลองดังกล่าวสามารถใช้กับการทดสอบเร่งฉนวนด้วยแรงดันได้อีกด้วย

สมมติฐานของแบบจำลองกำลัง-ล็อกปกติ

1. ที่ระดับความเค้น V อายุของผลิตภัณฑ์มีการแจกแจงแบบล็อกปกติ
2. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ ของลอการิทึมของอายุมีค่าคงที่ นั่นคือเป็นอิสระต่อระดับความเค้น V
3. ค่ามัธยฐานของอายุ $\tau_{.50}$ เป็นฟังก์ชันกำลังผกผันกับความเค้น V

$$\tau_{.50} = \frac{1}{KV^n} \quad (3.36)$$

$$\ln(\tau_{.50}) = -\ln(K) - n \ln(V) \quad (3.37)$$

การแจกแจงแบบล็อกปกติ อายุเฉลี่ย μ มีค่าเท่ากับ $\log(\tau_{.50})$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\mu(V) = -\ln(K) - n \ln(V) \quad (3.38)$$

จะได้ความสัมพัทธ์กำลัง-ล็อกปกติซึ่งแสดงในรูปของฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นได้ดังนี้

$$f(t, V) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma t}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(t) + \ln(K) - n \ln(V)}{\sigma} \right)^2} \quad (3.39)$$

3.3.5 แบบจำลองกำลัง-ไวบูลล์ (Power-Weibull Model)

การแจกแจงแบบไวบูลล์สามารถใช้อธิบายข้อมูลอายุของผลิตภัณฑ์บางอย่างได้ โดยที่อายุลักษณะเฉพาะ มีความสัมพันธ์กำลังผกผันกับความเค้น แบบจำลองนี้ถูกใช้ในการทดสอบแรงฉนวนไฟฟ้าและสารไดอิเล็กตริกด้วยแรงดัน

สมมติฐานของแบบจำลองกำลัง-ไวบูลล์

1. ที่ระดับความเค้น V ใดๆ อายุของผลิตภัณฑ์มีการแจกแจงแบบไวบูลล์
2. พารามิเตอร์รูปร่าง β มีค่าคงที่ นั่นคือเป็นอิสระต่อระดับความเค้น V
3. Characteristic Life η จะเป็นฟังก์ชันกำลังผกผันกับความเค้น V

$$\eta(V) = \frac{1}{KV^n} \quad (3.40)$$

$$\ln(\eta(V)) = -\ln(K) - n \ln(V) \quad (3.41)$$

ดังนั้นที่ระดับความเค้น V จะได้ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นดังนี้

$$f(t, V) = \beta K V^n (K V^n t)^{\beta-1} e^{-(K V^n t)^\beta} \quad (3.42)$$

3.3.6 แบบจำลองกำลัง-เอ็กซ์โพเนนเชียล (Power-Exponential Model)

อายุของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มักใช้การแจกแจงอายุแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ดังเช่น ในมาตรฐาน MIL-HDBK-217E (1986) เป็นต้น แบบจำลองกำลัง-เอ็กซ์โพเนนเชียลเป็นกรณีพิเศษของแบบจำลองกำลัง-ไวบูลล์ เมื่อ $\beta = 1$

สมมติฐานของแบบจำลองกำลัง-เอ็กซ์โพเนนเชียล (Power-Exponential Model)

1. ที่ระดับความเค้น V ใด ๆ อายุของผลิตภัณฑ์มีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล
2. อายุเฉลี่ย m เป็นฟังก์ชันกำลังผกผันกับความเค้น V

$$m(V) = \frac{1}{K V^n} \quad (3.43)$$

อัตราความล้มเหลว $\lambda = 1/m$ จะเป็นฟังก์ชันกำลังกับความเค้น V

$$\lambda(V) = K V^n \quad (3.44)$$

จะได้แบบจำลองกำลัง-เอ็กซ์โพเนนเชียล ในรูปฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นดังนี้

$$f(t, V) = K V^n e^{-K V^n t} \quad (3.45)$$

บทที่ 4

การวิเคราะห์ข้อมูลอายุ

ข้อมูลอายุที่ได้จากการทดสอบเร่ง จะถูกนำมาเข้าคู่กับแบบจำลอง เมื่อเลือกแบบจำลองที่สามารถเข้ากับข้อมูลได้ จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองรวมถึงช่วงความเชื่อมั่นของค่าประมาณ นอกจากนี้ยังสามารถตรวจสอบความเข้ากันของข้อมูลกับแบบจำลองได้อีกด้วย

การวิเคราะห์ข้อมูลอายุด้วยวิธีเชิงกราฟเป็นวิธีที่สามารถทำได้สะดวกและง่ายต่อการประมาณค่าพารามิเตอร์ เพราะการประมาณค่าจากกราฟทำให้สามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ระดับความเค้นต่าง ๆ ได้ การประมาณค่าด้วยกราฟเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นที่ทำให้ทราบว่าแบบจำลองที่ใช้สำหรับการแจกแจงอายุนั้นเหมาะสมกับข้อมูลที่ได้มาหรือไม่ วิธีเชิงกราฟมีข้อเสียคือกราฟที่ได้ อาจไม่มีความแม่นยำเพียงพอ และผู้วิเคราะห์อาจได้ข้อมูลแตกต่างกันจากข้อมูลชุดเดียวกัน ดังนั้นการวิเคราะห์ข้อมูลส่วนใหญ่แล้วจะใช้วิธีเชิงกราฟและวิธีเชิงเลขควบคู่กัน

ข้อดีสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเลข คือ สามารถประมาณค่าต่าง ๆ จากแบบจำลองและการแจกแจง โดยสามารถระบุความแม่นยำของการประมาณนั้น ๆ ได้ โดยอาศัยช่วงความเชื่อมั่น (Confidence Interval) และการประมาณค่าจากข้อมูลชุดเดียวกันโดยผู้วิเคราะห์ที่ต่างกัน จะได้ผลเหมือนกัน แต่การวิเคราะห์เชิงเลขเพียงอย่างเดียวอาจทำให้ผู้วิเคราะห์ไม่สามารถสังเกตเห็นความผิดปกติของข้อมูลจากการทดสอบเร่งได้ นอกจากนี้การวิเคราะห์เชิงเลขต้องอาศัยคอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์เพื่อช่วยในการคำนวณอีกด้วย

4.1 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงกราฟ (Graphical Data Analysis) [1], [3], [13]

การวิเคราะห์ข้อมูลอายุด้วยวิธีเชิงกราฟนั้นมีกราฟที่เกี่ยวข้อง 2 กราฟ คือ กราฟแสดงการแจกแจงอายุของผลิตภัณฑ์ (Life Distribution Probability Plotting) ซึ่งจะแสดงการแจกแจงอายุของผลิตภัณฑ์ที่ระดับความเค้นต่าง ๆ ตามรูปแบบการแจกแจงที่เหมาะสม และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุของผลิตภัณฑ์กับความเค้น (Life-Stress Relationship)

4.1.1 การพล็อตการแจกแจงอายุ (Life Distribution Plotting)

กราฟแสดงการแจกแจงอายุจะพล็อตลงบนกระดาษกราฟที่สร้างขึ้นเป็นพิเศษ ขึ้นอยู่กับรูปแบบการแจกแจง การแจกแจงแต่ละแบบมีรูปแบบของกระดาษกราฟแตกต่างกันไป

กราฟแสดงการแจกแจงอายุจะพิจารณาจากฟังก์ชันการแจกแจงสะสมหรือฟังก์ชันความไม่น่าเชื่อถือของความเค้นแต่ละระดับ การพิจารณาฟังก์ชัน $F(t)$ จะพิจารณาในลักษณะของสมการเชิงเส้น โดยแกน Y เป็นฟังก์ชันการแจกแจงสะสม และแกน X เป็นเวลา

สำหรับข้อมูลสมบูรณ์การพิจารณาค่าแห่งพิกัดจุดในแกน Y นั้นจะต้องอาศัยการพิจารณาค่าแห่งจากการประมาณค่าแบบลำดับมัธยฐาน (Median Rank) ซึ่งเป็นการประมาณค่าความไม่น่าเชื่อถือของความล้มเหลวที่เกิดขึ้นในแต่ละลำดับ โดยสมการของลำดับมัธยฐาน เป็นดังนี้

$$F_i = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad (4.1)$$

โดยที่ F_i คือ ค่าความไม่น่าเชื่อถือของความล้มเหลวที่เกิดขึ้นลำดับที่ i
 i คือ ลำดับที่เกิดความล้มเหลว
 n คือ จำนวนตัวอย่างทั้งหมด

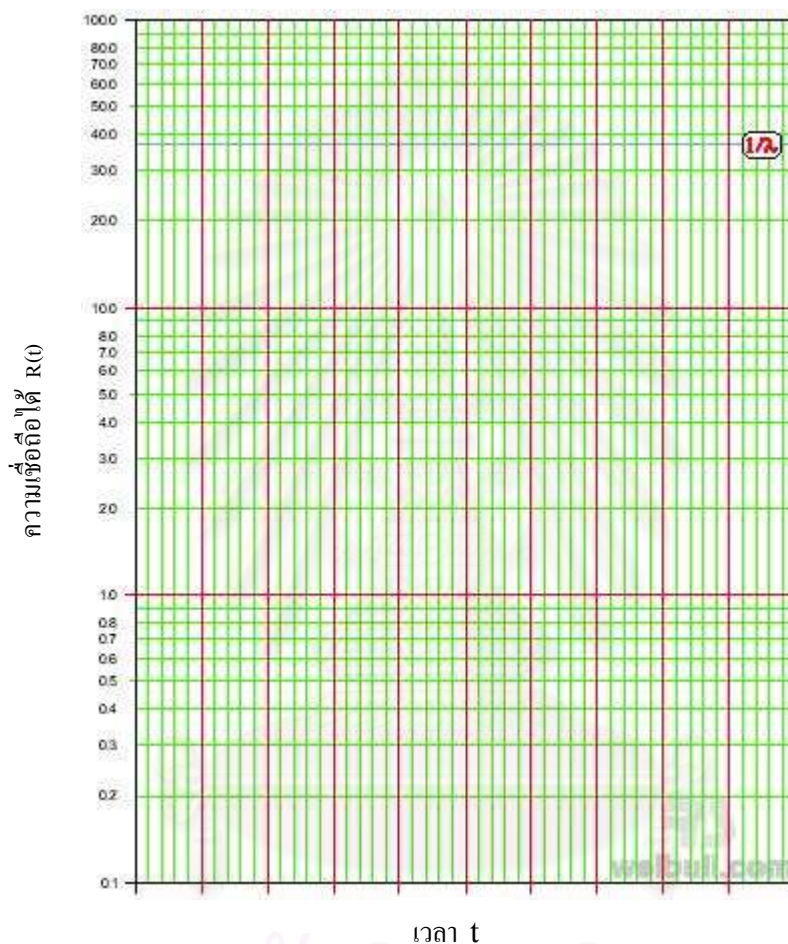
เมื่อทราบตำแหน่งพิกัด (x, y) ในแต่ละจุดแล้ว เมื่อลากเส้นตรงผ่านจุดเหล่านี้โดยให้ลากผ่านจุดส่วนใหญ่ให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ หลังจากได้เส้นกราฟแล้วจะสามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากเส้นกราฟได้ ดังที่ได้กล่าวว่าเส้นกราฟแต่ละเส้นเป็นการแจกแจงอายุของผลิตภัณฑ์ของความเค้นแต่ละระดับ ดังนั้นความชันของเส้นกราฟแต่ละเส้นจะไม่เท่ากัน ทั้งนี้อาศัยสมมติฐานที่ว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแจกแจงอายุมีค่าเท่ากันที่ทุกระดับความเค้น จะได้ว่ากราฟทุกเส้นจะมีความชันเท่ากัน และใช้ค่าความชันเฉลี่ยเพื่อพิจารณาข้อมูล

กราฟการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

จากสมการ (3.4) สามารถทำให้เป็นเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\ln(1 - F(t)) = -\frac{t}{\theta} \quad (4.2)$$

แกน Y เป็นแกนของ $\ln(1 - F(t))$ เป็นสเกลลอการิทึม และแกน X เป็นแกนของ เวลาซึ่งเป็นเชิงเส้น โดยมีความชันเท่ากับ $-\frac{1}{\theta}$ หรือ $-\lambda$ จะสังเกตได้ว่ากราฟแสดงการแจกแจงอายุแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลนั้นเป็นแบบเดี่ยวนั้นที่มีความชันเป็นลบ เนื่องจากแกน Y เป็นค่าความเชื่อถือได้ ในขณะที่การแจกแจงแบบอื่น ๆ นั้นค่าในแกน Y จะเป็นค่าความไม่น่าเชื่อถือ



รูปที่ 4.1 กราฟการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

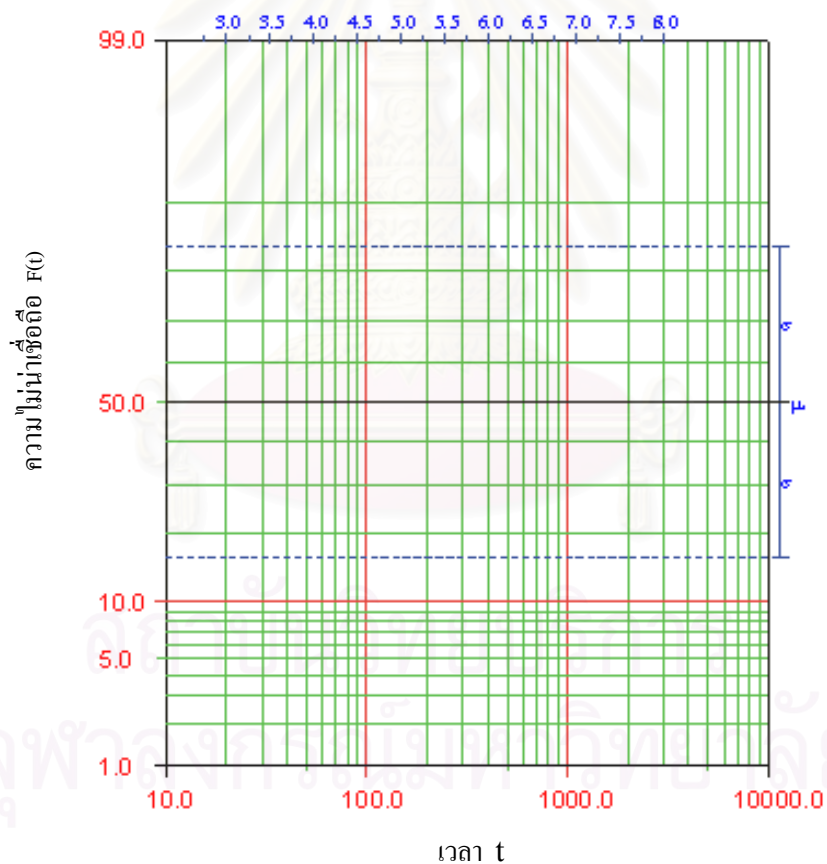
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กราฟการแจกแจงอายุแบบลือกปกติ

จากสมการที่ (3.10) ทำให้เป็นสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\Phi^{-1}[F(t)] = -\frac{\mu}{\sigma} + \frac{1}{\sigma} \cdot \ln(t) \quad (4.3)$$

สมการดังกล่าวเทียบได้กับรูปแบบของสมการเชิงเส้น $y = a + bx$ เมื่อกำหนดตัวแปร $y = \Phi^{-1}[F(t)]$ และ $x = \ln(t)$ โดยมีความชันเท่ากับ $\frac{1}{\sigma}$ และค่าจุดตัดแกน Y คือ $-\frac{\mu}{\sigma}$ และสำหรับกระดาษสำหรับพล็อตการแจกแจงแบบลือกปกติมีลักษณะดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟการแจกแจงแบบลือกปกติ

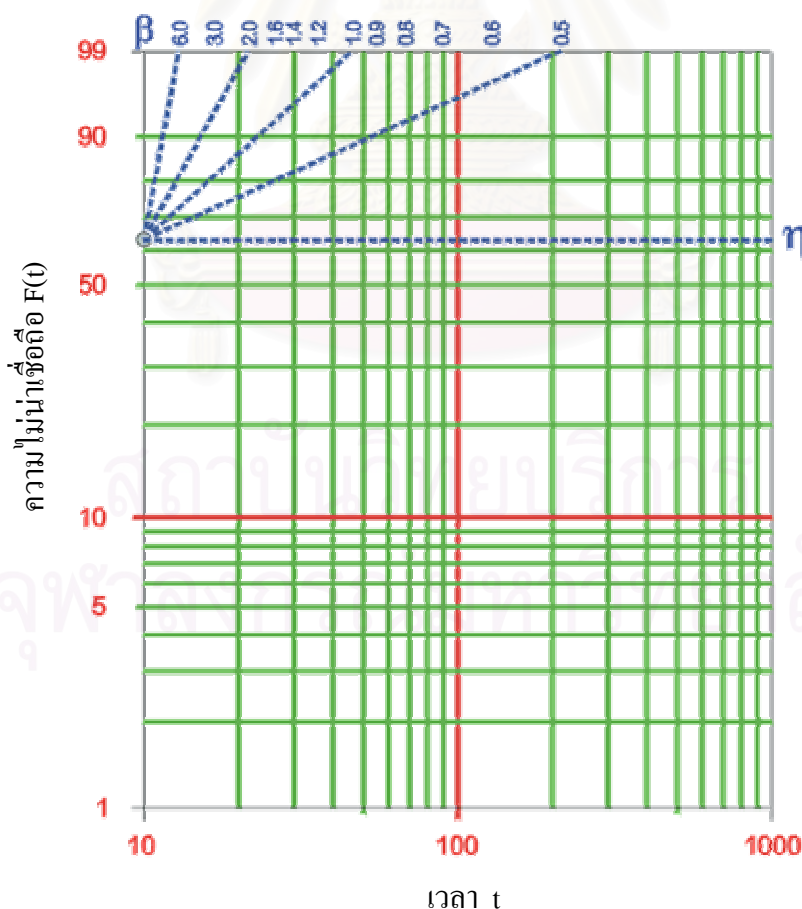
กราฟการแจกแจงแบบไวบูลล์

จากสมการที่ (3.14) ทำให้เป็นสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\ln[1 - F(t)] = -\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta \quad (4.4)$$

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - F(t)}\right)\right) = -\beta \ln(\eta) + \beta \ln(t) \quad (4.5)$$

สมการดังกล่าวเทียบได้กับรูปแบบของสมการเชิงเส้น $y = a + bx$ เมื่อกำหนดตัวแปร $y = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - F(t)}\right)\right)$ และ $x = \ln(t)$ โดยมีความชันเท่ากับ β และค่าจุดตัดแกน Y คือ $-\beta \ln(\eta)$ และสำหรับกระดาษสำหรับพล็อตการแจกแจงแบบไวบูลล์มีลักษณะดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟการแจกแจงแบบไวบูลล์

4.1.2 การพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้น (Life-Stress Relationship Plotting)

เมื่อพิจารณาพารามิเตอร์จากฟังก์ชันการแจกแจงอายุแล้ว นำอายุที่ระดับความเชื่อถือได้เดียวกันของแต่ละความเค้นมาพล็อตลงในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับความเค้น โดยกราฟที่ใช้จะแตกต่างกันไปสำหรับแต่ละความสัมพันธ์ เช่น สเกลลอการิทึม-ลอการิทึม (Log-Log Scale) ใช้สำหรับความสัมพันธ์แบบกำลังผกผัน และสเกลลอการิทึม-ส่วนกลับ (Log-Reciprocal Scale) ใช้สำหรับความสัมพันธ์แบบอาร์เรเนียส เป็นต้น ค่าของพารามิเตอร์สามารถประมาณได้จากความชันและจุดตัดของกราฟ

4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเลข (Numerical Data Analysis) [1], [3], [12], [13]

การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเลขคือวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองเพื่อใช้ประมาณข้อมูลเกี่ยวกับอายุต่อไป การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเลขที่นิยมใช้มี 2 วิธี ได้แก่ วิธีค่าผิดพลาดกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Error Method) เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลสมบรูณ์ และวิธีภาวะน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Method) เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลตัดตอน

4.2.1 วิธีค่าผิดพลาดกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Error Method)

วิธีค่าผิดพลาดกำลังสองน้อยที่สุดใช้วิธีการทางสถิติพื้นฐาน คือวิธีวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปร วิธีดังกล่าวเป็นการหาค่าพารามิเตอร์โดยอาศัยสมการเส้นตรงซึ่งสามารถเข้ากับกลุ่มของข้อมูลได้ ภายใต้เงื่อนไขว่า ผลรวมของค่าผิดพลาดกำลังสองจะมีค่าน้อยที่สุด ค่าผิดพลาดดังกล่าวคือผลต่างระหว่างค่าแท้จริงของข้อมูลกับค่าประมาณของข้อมูลที่ได้จากเส้นตรง

กำหนดชุดข้อมูล $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)$ ซึ่งทราบค่าที่แน่นอนของ x และให้สมการเชิงเส้น $y_i = \hat{a} + \hat{b}x_i$ เป็นเส้นตรงซึ่งสามารถเข้ากับชุดข้อมูลได้ดีที่สุด ด้วยหลักการกำลังสองน้อยที่สุด พารามิเตอร์ \hat{a} และ \hat{b} สามารถหาได้ดังนี้

$$\sum_{i=1}^N (\hat{a} + \hat{b}x_i - y_i)^2 = \min_{a,b} \sum_{i=1}^N (a + bx_i - y_i)^2 \quad (4.6)$$

โดย \hat{a} และ \hat{b} เป็นค่าประมาณของพารามิเตอร์ a และ b และ N เป็นจำนวนจุดข้อมูล สมการ 4.6 จะมีค่าต่ำสุดเมื่อ

$$\hat{a} = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} - \hat{b} \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} = \bar{y} - \hat{b}\bar{x} \quad (4.7)$$

$$\hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N}}{\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^N x_i\right)^2}{N}} \quad (4.8)$$

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ใช้สัญลักษณ์ ρ เป็นค่าที่ใช้แสดงว่าเส้นตรงที่ประมาณได้เข้ากับชุดของข้อมูลได้มากน้อยเพียงใด สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของประชากรนิยามดังนี้

$$\rho = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (4.9)$$

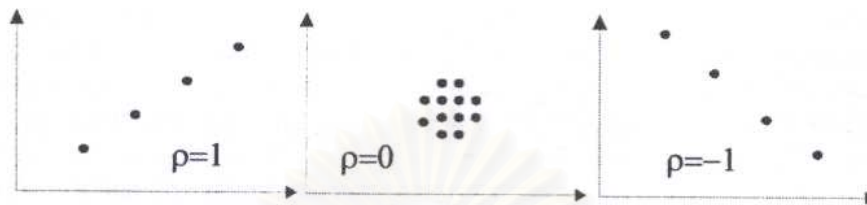
โดยที่ σ_{xy} คือ ความแปรปรวน (Covariance) ของ x และ y
 σ_x คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ x
 σ_y คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ y

ค่าประมาณของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของกลุ่มตัวอย่าง ใช้สัญลักษณ์ $\hat{\rho}$ คำนวณได้ดังนี้

$$\hat{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^N x_i\right)^2}{N} \right) \left(\sum_{i=1}^N y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^N y_i\right)^2}{N} \right)}} \quad (4.10)$$

$\hat{\rho}$ มีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 เมื่อ $\hat{\rho}$ มีค่าใกล้ ± 1 เท่าใด เส้นตรงที่ประมาณได้จะเข้ากับชุดข้อมูลได้มากเท่านั้น ถ้า $\hat{\rho} = 1$ แสดงว่าเส้นตรงนั้นเข้ากับชุดข้อมูลทั้งหมดได้และมีความชันเป็น

บวก ถ้า $\hat{\rho} = -1$ แสดงว่าเส้นตรงที่ประมาณได้เข้ากับชุดข้อมูลทั้งหมดได้และมีความชันเป็นลบ แต่เมื่อ $\hat{\rho} = 0$ แสดงว่าข้อมูลกระจัดกระจายอย่างไม่เป็นระเบียบและไม่มีความสัมพันธ์กัน ลักษณะของกลุ่มข้อมูลเมื่อสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เป็น -1 0 และ 1 แสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ลักษณะของข้อมูลสำหรับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ต่าง ๆ

ดังนั้น การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีค่าผิดพลาดกำลังสองน้อยที่สุดจำเป็นต้องทราบข้อมูลทั้งหมด นั่นคือข้อมูลอายุจะต้องเป็นข้อมูลสมบูรณ์นั่นเอง และแนวโน้มของข้อมูลมีลักษณะเป็นเชิงเส้น

4.2.2 วิธีความควรจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Method)

ตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองด้วยวิธีความควรจะเป็นสูงสุดมีคุณสมบัติของตัวประมาณค่าที่ดีหลายประการ ได้แก่ เป็นตัวประมาณค่าที่ไม่เอนเอียง (Unbiased) หมายถึงค่าประมาณจะมีค่าไม่สูงหรือต่ำเกินไป เป็นตัวประมาณค่าที่กลมกลืนกัน (Consistent) หมายถึงค่าที่ประมาณจะเข้าค่าแท้จริงมากขึ้นเมื่อจำนวนตัวอย่างมากขึ้น และเป็นตัวประมาณที่มีประสิทธิภาพ (Efficient) นั่นคือเมื่อมีจำนวนตัวอย่างมากขึ้น การประมาณค่าจะมีความเที่ยงตรงมากขึ้น ด้วยวิธีความควรจะเป็นสูงสุด จะได้ตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability) มีค่าสูงสุด โดยมีหลักการดังนี้

กำหนดให้ x เป็นตัวแปรสุ่มต่อเนื่อง (Continuous Random Variable) ที่มีฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็น $f(x; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$ โดยที่ $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$ เป็นพารามิเตอร์ของแบบจำลอง จากตัวแปรซึ่งเป็นค่าสังเกตที่เป็นอิสระต่อกันจำนวน R ตัว x_1, x_2, \dots, x_R ฟังก์ชันความควรจะเป็น (Likelihood Function)

$$L = L(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k | x_1, x_2, \dots, x_R) = \prod_{i=1}^R f(x_i; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) \quad (4.11)$$

ตัวประมาณค่าโดยวิธีความควรจะเป็นสูงสุดได้จากการแก้สมการ

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_j} = 0 \quad , \quad j=1, 2, \dots, k \quad (4.12)$$

เนื่องจากการแก้สมการ 3.12 โดยตรง ฟังก์ชันที่ได้จะมีความซับซ้อน เพื่อความสะดวกจึงได้นิยามฟังก์ชันความควรจะเป็นลอการิทึม (Logarithm Likelihood Function)

$$\Lambda = \ln L = \sum_{i=1}^R \ln f(x_i; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) \quad (4.13)$$

ซึ่งมีความสะดวกในการหาอนุพันธ์ ดังนั้นตัวประมาณค่าสามารถหาได้จากสมการ

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial \theta_j} = 0 \quad , \quad j=1, 2, \dots, k \quad (4.14)$$

ในกรณีที่มีข้อมูลตัดทอนทางขวา (Right Censored) ฟังก์ชันความควรจะเป็นแสดงได้ดังนี้

$$L = \prod_{j=1}^M [1 - F(x_j; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)] \quad (4.15)$$

โดยที่ M คือ จำนวนข้อมูลตัดทอนทางขวา

ในกรณีที่มีข้อมูลตัดทอนทางซ้าย (Left Censored) ฟังก์ชันความควรจะเป็นแสดงได้ดังนี้

$$L = \prod_{j=1}^N F(x_j; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) \quad (4.16)$$

โดยที่ N คือ จำนวนข้อมูลตัดทอนทางขวา

เมื่อมีข้อมูลอายุที่ได้จากการทดสอบเร่งหลายชนิด สามารถนำฟังก์ชันความควรจะเป็นของแต่ละชนิดมาคูณรวมกันเพื่อให้ได้ฟังก์ชันความควรจะเป็นรวมได้ และทำการหาค่าประมาณพารามิเตอร์ต่อไป ดังนั้นจะพบว่าวิธีความควรจะเป็นสูงสุดสามารถใช้ได้กับข้อมูลสมบูรณณ์ ข้อมูลตัดทอน

บางส่วน หรือในกรณีที่ไม่มีข้อมูลซึ่งเกิดความสับสนขึ้นเลยซึ่งแตกต่างจากวิธีค่าผิดพลาดกำลังสองน้อยที่สุดซึ่งใช้ได้กับข้อมูลสมบูรณ์เท่านั้น

เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลสมบูรณ์ วิธีค่าผิดพลาดกำลังสองน้อยที่สุดจะคำนวณลำดับมัธยฐานให้แก่ข้อมูลอายุแต่ละตัว ข้อมูลอายุจึงมีค่าขึ้นอยู่กับตำแหน่งของข้อมูล และข้อมูลที่ได้จากการประมาณจะติดตามข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ แต่วิธีความควรจะเป็นสูงสุดไม่ขึ้นกับตำแหน่งของข้อมูล ดังนั้นเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ประมาณจากวิธีความควรจะเป็นสูงสุด และนำมาพล็อตลงในกระดาษความน่าจะเป็น พบว่าข้อมูลจากการประมาณจะไม่ติดตามข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ ดังนั้น การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเลข 2 วิธีนี้กรณีที่ เป็นข้อมูลสมบูรณ์จะไม่สามารถบอกได้ว่าพารามิเตอร์ที่ประมาณได้จากวิธีใดดีกว่า เพราะแต่ละวิธีอาศัยหลักการที่แตกต่างกัน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

ข้อกำหนดคุณลักษณะและสมมติฐานการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษา

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างหนึ่งซึ่งมีความสำคัญมากสำหรับวงจรไฟฟ้าตั้งแต่วงจรอิเล็กทรอนิกส์ไปจนถึงระบบส่งพลังงานไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้าสูงหลายร้อยกิโลโวลต์

สิ่งหนึ่งที่น่าสนใจเกี่ยวกับหม้อแปลงคือความล้มเหลว (Failures) ความล้มเหลวซึ่งเกิดกับหม้อแปลงไฟฟ้ามีอยู่ 4 ลักษณะ คือ ความล้มเหลวในวงจรแม่เหล็ก (Failures in Magnetic Circuits) ความล้มเหลวในขดลวด (Failures in Windings) ความล้มเหลวในวงจรสารไดอิเล็กตริก (Failures in Dielectric Circuits) และความล้มเหลวทางโครงสร้าง (Structural Failures) โดยความล้มเหลวส่วนใหญ่เป็นความล้มเหลวในวงจรสารไดอิเล็กตริก สำหรับสาเหตุของความล้มเหลวมักเกิดจากความผิดพลาดจากการผลิต เช่น ออกแบบไม่ดี วัสดุชำรุด เป็นต้น และจากความผิดพลาดและความผิดปกติจากการใช้งาน เช่น การติดตั้งผิดวิธี ขาดการบำรุงรักษา สภาวะชั่วคราวที่ผิดปกติ เป็นต้น [14]

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกศึกษาการทดสอบแรงอุณหภูมิในหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดต่อไป

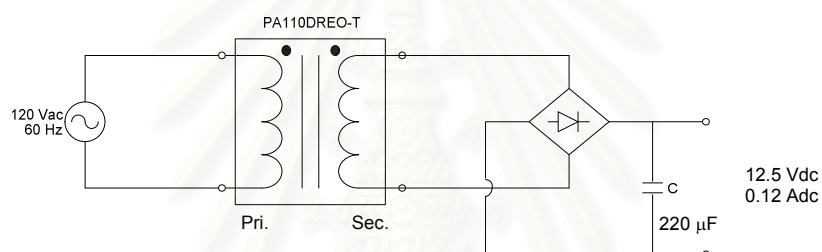
5.1 การเลือกรุ่นของหม้อแปลงไฟฟ้า

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกศึกษาหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก เนื่องจากยังไม่มีการศึกษาการทดสอบแรงในหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กที่ผลิตในประเทศไทย รวมทั้งหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กมีฟังก์ชันการทำงานที่ไม่ซับซ้อน และมีราคาถูกทำให้สามารถทดสอบกับกลุ่มตัวอย่างจำนวนมากได้ หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กที่เลือกใช้ ได้แก่หม้อแปลงไฟฟ้าโมเดล RTRNPA110DREO-T ผลิตโดยบริษัท ไทยตาบุชิ อิเล็กทริก จำกัด และต่อไปนี้จะเรียกว่าหม้อแปลงทดสอบมีลักษณะดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 หม้อแปลงทดสอบ

ลักษณะการต่อใช้งานหม้อแปลงทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 การต่อใช้งานหม้อแปลงทดสอบ

5.2 การเลือกกลุ่มตัวอย่าง

การเลือกกลุ่มตัวอย่างหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบเพื่อใช้ในการทดสอบแรงควรเลือกจากภายใน ล้อต (Lot) การผลิตเดียวกัน และถ้าเป็นไปได้ควรเลือกจากสายการผลิตเดียวกัน เพื่อลดความแตกต่างทางคุณสมบัติที่อาจเกิดขึ้นในแต่ละล้อตและในแต่ละสายการผลิต ทางบริษัท ไทยตามูชิ อิเล็กทริก จำกัด ได้คัดเลือกกลุ่มตัวอย่างให้ผู้ทดสอบรวมจำนวน 80 ตัว จาก 3 ล้อตการผลิตในเวลา 2 วัน ได้แก่ ล้อตการผลิต N9U2ZTT2 10U2ZTT2 และ N10U2ZTT2 โดยเลือกหม้อแปลงเพื่อใช้ในการทดสอบแรงที่แต่ละอุณหภูมิละกันทั้ง 3 ล้อต เพื่อให้คุณสมบัติที่แสดงออกในการทดสอบที่แต่ละอุณหภูมิมาจากทุกล้อตอย่างเท่าเทียมกัน

5.3 ข้อกำหนดคุณลักษณะของหม้อแปลงทดสอบ

ข้อมูลกำหนดคุณลักษณะ (Specification) ประกอบด้วยลักษณะทางกายภาพ การต่อวงจรใช้งาน สมรรถนะทางกล สมรรถนะทางไฟฟ้า การทนต่อสภาวะแวดล้อม การตรวจสอบคุณภาพ และข้อมูลอื่น ๆ ซึ่งเกี่ยวข้องกับหม้อแปลงไฟฟ้า

ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะคุณสมบัติเบื้องต้นของหม้อแปลงไฟฟ้า RTRNPA110DREO-T ซึ่งจำเป็นสำหรับการวางแผนการทดสอบ ดังนี้

พิกัดแรงดันกระแสสลับด้านปฐมภูมิ	120	โวลต์
พิกัดแรงดันกระแสตรงด้านทุติยภูมิ	12.5	โวลต์
พิกัดกระแสตรงด้านทุติยภูมิ	0.12	แอมแปร์
พิกัดกำลังเอาต์พุต	2.3	โวลต์-แอมแปร์
ความถี่	60	เฮิรตซ์
ช่วงอุณหภูมิทำงาน	-10 ถึง 60	องศาเซลเซียส
ชั้น (Class) ของฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้า		ชั้น A

5.4 สมมติฐานการใช้งานเตาอบไมโครเวฟ

หม้อแปลงโมเดล RTRNPA110DREO-T ทำหน้าที่แปลงแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า 120 โวลต์ ความถี่ 60 เฮิรตซ์ โดยผ่านวงจรกรองกระแสแบบเต็มคลื่น (Full Wave Rectifier) เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงป้อนตู้วงจรควบคุมการทำงานของเตาอบไมโครเวฟซึ่งไม่ใช่ในส่วนทำความร้อน โดยมีค่ากระแสไฟฟ้าตรงที่กระแสเต็มเท่ากับ 0.12 แอมแปร์ ในเบื้องต้นจึงควรตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับการใช้งานเตาอบไมโครเวฟ

เนื่องจากการทดสอบเร่งควรทดสอบผลิตภัณฑ์ให้ใกล้เคียงกับการใช้งานจริงเพื่อให้ค่าประมาณของข้อมูลอายุและข้อมูลความเชื่อถือได้มีความใกล้เคียงกับสถานะที่ใช้งานจริงมากที่สุด วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาลักษณะการใช้งานของเตาอบไมโครเวฟจากคู่มือการปรุงอาหารด้วยเตาอบไมโครเวฟของบริษัท ชาร์ป คอร์ปอเรชั่น (SHARP Corporation) และมีสมมติฐานการใช้งานหม้อแปลงโมเดลดังกล่าวเป็นการใช้งานในครัวเรือนเท่านั้น พบว่าการใช้งานแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ ได้แก่ การละลายอาหารแช่แข็ง (Defrosting) การอุ่นอาหาร (Re-heating) และการปรุงอาหาร (Cooking)

การละลายอาหารแช่แข็ง		การอุ่นอาหาร		การปรุงอาหาร	
เนื้อสัตว์	5-10 นาที	เครื่องคั้น	2-3 นาที	ผัก	4-6 นาที
ผัก	3-10 นาที	อาหารกระป๋อง	4-5 นาที	ข้าว	15 นาที
		ซूपกระป๋อง	3-5 นาที	ข้าวต้ม	40 นาที
		อาหารเย็น	8-9 นาที		

ตารางที่ 5.1 ระยะเวลาการใช้งานเตาอบไมโครเวฟในลักษณะต่างๆ กับอาหารบางประเภท

จากตารางที่ 5.1 ได้ตั้งสมมติฐานว่าลักษณะการใช้งานเตาอบไมโครเวฟในครัวเรือนควรเป็นการอุ่นอาหารมากที่สุดซึ่งการใช้งานดังกล่าวเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (Intermittent Load) ระยะเวลาโดยเฉลี่ยในการอุ่นอาหารแต่ละครั้งประมาณ 4-6 นาที นอกจากนี้ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลการใช้งานเตาอบไมโครเวฟจากเว็บไซต์ต่าง ๆ ดังแสดงในภาคผนวก ก พบว่าการใช้งานต่อวันเฉลี่ย 20-40 นาที ซึ่งคิดเฉลี่ยได้ว่ามีการใช้งานประมาณ 5 ครั้งต่อวัน

ดังนั้นในการทดสอบเร่งหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบจะจำลองการใช้งานในสภาวะปกติเป็นแบบไม่ต่อเนื่องที่ภาระเต็ม โดยให้หม้อแปลงทำงานเป็นเวลา 5 นาที และหยุดทำงานเป็นเวลา 1 นาที เป็นวัฏจักรเรื่อยไปจนกระทั่งจำนวนหม้อแปลงเกิดความล้มเหลวตามที่ต้องการ

บทที่ 6

การทดสอบเร่งหม้อแปลงทดสอบด้วยอุณหภูมิ

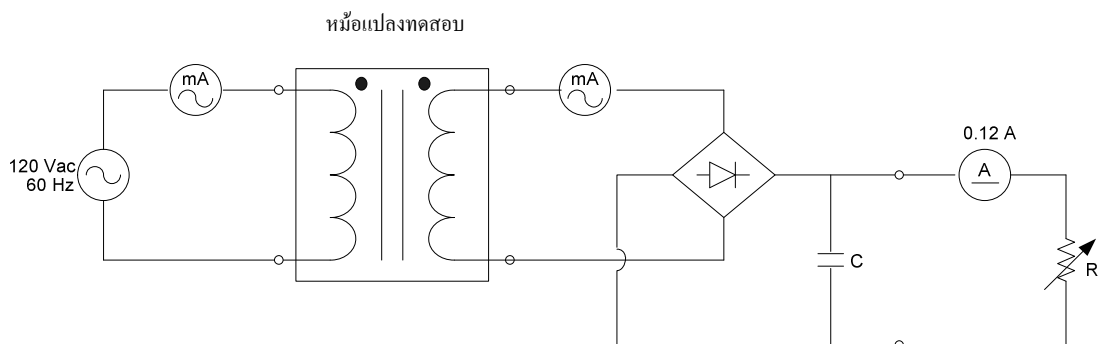
ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบต่าง ๆ ในขั้นตอนการออกแบบการทดสอบเร่ง อุปกรณ์และวงจรที่ใช้ในการทดสอบเร่ง รวมถึงการทดสอบเร่งหม้อแปลงทดสอบด้วยอุณหภูมิซึ่งประกอบด้วย วัตถุประสงค์ สมมติฐาน ลักษณะความเค้นที่ใช้ ลักษณะข้อมูลอายุ การบันทึกข้อมูลอายุและข้อมูลต่าง ๆ เพื่อใช้ในการควบคุมการทดสอบ และการวิเคราะห์ข้อมูลอายุเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันการแจกแจงอายุและแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างอายุและความเค้น

ข้อมูลอายุที่บันทึกได้จากการทดสอบเร่งหม้อแปลงทดสอบคือระยะเวลาตั้งแต่เริ่มทดสอบจนกระทั่งหม้อแปลงนั้นมีคุณสมบัติผิดจากข้อกำหนดคุณลักษณะ ในที่นี้คือค่าความต้านทานของขดลวด (DCR) ด้านปฐมภูมิมีค่าต่ำกว่าข้อกำหนดคุณลักษณะ

6.1 การทดสอบก่อนการทดสอบเร่ง

6.1.1 การทดสอบภาระเต็ม (Full Load Test)

การใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าโมเดลนี้จะต้องต่อวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นเข้าที่ขดลวดด้านทุติยภูมิเพื่อให้ได้ไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายให้แก่วงจรควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 5.2 แต่ในการทดสอบเร่งด้วยอุณหภูมิจะตัดวงจรเรียงกระแสออกเนื่องจากวงจรเรียงกระแสไม่สามารถทนความร้อนสูงได้ การทดสอบในหัวข้อนี้จะต่อใช้งานแบบภาระเต็มตามการใช้งานจริง ซึ่งมีค่ากระแสไฟฟ้ากระแสตรงด้านทุติยภูมิหลังวงจรเรียงกระแสเท่ากับ 0.12 แอมแปร์ บันทึกค่ากระแสไฟฟ้าด้านทุติยภูมิขณะภาระเต็ม ค่ากระแสไฟฟ้าที่บันทึกได้จะนำไปใช้ปรับตัวต้านทานเพื่อให้ได้ค่ากระแสไฟฟ้าด้านทุติยภูมิภาระเต็มเมื่อไม่มีวงจรเรียงกระแส และใช้ในการกำหนดขนาดของฟิวส์เพื่อใช้ในการป้องกันกระแสเกิน การทดสอบนี้ได้บันทึกค่ากระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิด้วยเพื่อใช้ในการกำหนดขนาดของฟิวส์เช่นกัน วงจรสำหรับการทดสอบภาระเต็มแสดงดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 วงจรการทดสอบภาระเต็ม

ในการทดสอบภาระเต็มได้ใช้หม้อแปลงทดสอบจำนวน 5 ตัว มีผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 6.1 และตารางที่ 6.2 ตามลำดับ

หม้อแปลงทดสอบตัวที่	ค่ากระแสไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ (มิลลิแอมแปร์)
1	168
2	170
3	169
4	170
5	170

ตารางที่ 6.1 ค่ากระแสไฟฟ้าด้านทุติยภูมิจากการทดสอบภาระเต็ม

หม้อแปลงทดสอบตัวที่	ค่ากระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ (มิลลิแอมแปร์)
1	30
2	30.5
3	30.5
4	30
5	30

ตารางที่ 6.2 ค่ากระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิจากการทดสอบภาระเต็ม

จากตารางที่ 6.1 และ 6.2 ได้ค่ากระแสไฟฟ้าด้านทุติยภูมิเฉลี่ย 170 มิลลิแอมแปร์ และค่ากระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิเฉลี่ย 30 มิลลิแอมแปร์ เลือกขนาดของฟิวส์โดยคิดเพื่อกระแสเกินร้อยละ 50 ที่ด้านทุติยภูมิเท่ากับ 300 มิลลิแอมแปร์ และที่ด้านปฐมภูมิเท่ากับ 50 มิลลิแอมแปร์ แต่เมื่อนำไปทดสอบกับวงจรไฟฟ้าปรากฏว่าเมื่อเริ่มทำงานฟิวส์ทางด้านปฐมภูมิขาดทุกตัว คาดว่าเมื่อมีการปิดวงจรทางด้านปฐมภูมิทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเกินสูงกว่า 50 มิลลิแอมแปร์ จึงเลือกใช้ขนาดของฟิวส์ที่ทนกระแสได้สูงขึ้น ในที่นี้เลือกขนาด 100 มิลลิแอมแปร์ และทดสอบอีกครั้ง พบว่าวงจรไฟฟ้าสามารถทำงานได้

6.1.2. การทดสอบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (Temperature Rise Test)

การทดสอบดังกล่าวเป็นการสังเกตอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของขดลวดและแกนเหล็กของหม้อแปลงโดยการต่อวงจรตามที่ระบุไว้ในข้อกำหนดคุณลักษณะของหม้อแปลงทดสอบแบบภาระเต็ม โดยเริ่มการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง บันทึกอุณหภูมิที่ขดลวดและแกนเหล็ก ใช้เวลาทดสอบประมาณ 30 นาทีเพื่อให้การทำงานของหม้อแปลงเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว โดยในการทดสอบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมินี้ได้ใช้หม้อแปลงจำนวน 5 ตัว เป็นตัวอย่างของกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด ผลการทดสอบแสดงในภาคผนวก ข

จากผลการทดสอบในภาคผนวก ข พบว่าเมื่อต่อใช้งานแบบภาระเต็ม ขดลวดและแกนเหล็กจะมีอุณหภูมิการใช้งานในสภาวะอยู่ตัวโดยเฉลี่ย 60 องศาเซลเซียส ดังนั้น สรุปได้ว่าอุณหภูมิขณะใช้งานของหม้อแปลงทดสอบมีค่าเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส และใช้เป็นระดับอุณหภูมิในการประมาณอายุการใช้งานและข้อมูลเกี่ยวกับความเชื่อถือได้จากข้อมูลอายุที่ได้จากการทดสอบเร่งต่อไป

6.1.3 การทดสอบเร่งเชิงคุณภาพ

ปัจจัยที่ส่งผลต่อความล้มเหลวจากการใช้งานสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กคือ อุณหภูมิ ความเค้นอื่น เช่น แรงดัน การสั่นสะเทือน เป็นต้น ไม่มีผลต่อการเสื่อมของหม้อแปลงขนาดเล็กมากนัก เนื่องจาก หม้อแปลงขนาดเล็กทำงานที่แรงดันไฟฟ้าต่ำและมีแรงดันไฟฟ้ากระแสชั่วไม่สูงมากนัก และหม้อแปลงโมเดลนี้เป็นส่วนหนึ่งของวงจรควบคุมเตาอบไมโครเวฟซึ่งโดยปกติจะถูกติดตั้งอยู่บนฐานที่มั่นคง หรือมีการสั่นสะเทือนเพียงเล็กน้อยซึ่งเกิดขึ้นเป็นครั้งคราว การทดสอบเร่งจะใช้อุณหภูมิเป็นความเค้นเดี่ยว และทดสอบที่แต่ละอุณหภูมิด้วยระดับคงที่ การทดสอบเชิงคุณภาพนี้เพื่อสังเกตลักษณะความล้มเหลวที่เกิดขึ้นจากการเร่งอุณหภูมิ และเพื่อหาระดับอุณหภูมิที่เหมาะสม

สำหรับการทดสอบแรงอีกด้วย โดยระดับอุณหภูมิจะต้องไม่สูงเกินไปจนเกิดการเปลี่ยนรูป (Deformation) ของส่วนประกอบและทำให้เกิดความล้าเหลวซึ่งไม่เกิดขึ้นจากการใช้งานปกติ และระดับอุณหภูมิจะต้องไม่ต่ำเกินไปจนต้องใช้ระยะเวลาในการทดสอบยาวนาน

เบื้องต้นพิจารณาชั้นของฉนวนของหม้อแปลงทดสอบจากข้อกำหนดคุณลักษณะซึ่งระบุชั้นของฉนวนเป็นชั้น A จากตารางที่ 6 หน้าที่ 91 ของมาตรฐาน IEC 60335-1 [15] ได้แสดงอุณหภูมิของขดลวดสูงสุดซึ่งเกิดจากการทดสอบที่แรงดันพิกัดโดยขดลวดฉนวนคลาส A จะมีอุณหภูมิสูงสุดได้ถึง 200 องศาเซลเซียส และเนื่องจากอุณหภูมิการใช้งานหม้อแปลงอยู่ที่ 60 องศาเซลเซียส ดังนั้นการทดสอบแรงหม้อแปลงทดสอบจะเร่งอุณหภูมิในระดับไม่ต่ำกว่า 150 องศาเซลเซียส โดยการทดสอบแรงเชิงคุณภาพนี้ทำที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส กับหม้อแปลงจำนวน 10 ตัว จนหม้อแปลงเกิดความล้าเหลวจำนวน 2 ตัว รวมระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ 3 เดือน เนื่องจากมีข้อจำกัดในด้านการดูแลและสถานที่ จึงไม่สามารถทำการทดสอบต่อเนื่องได้ จากระยะเวลาดังกล่าวจึงตัดสินใจทดสอบเร่งที่อุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 170 องศาเซลเซียส เพื่อย่นระยะเวลาการทดสอบให้น้อยลงโดยมีเงื่อนไขว่า ความล้าเหลวจะต้องสามารถเกิดขึ้นได้จากการใช้งานตามปกติ สำหรับหม้อแปลงที่เกิดความล้าเหลว 2 ตัวนั้นได้ส่งให้ทางบริษัทผู้ผลิตหม้อแปลงทดสอบตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

6.1.4 คุณสมบัติที่ใช้ในการตัดสินอายุของหม้อแปลง

ในการทดสอบแรงเชิงคุณภาพ เพื่อเลือกระดับอุณหภูมิที่เหมาะสม และตรวจสอบชนิดของความล้าเหลวเพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ใช้ในการตัดสินใจว่าหม้อแปลงไฟฟ้านั้นเกิดความล้าเหลวหรือไม่

ได้มีการวิจัยโดยทำการทดสอบแรงดันสูงกับอุปกรณ์แรงดันต่ำเพื่อวัดการคายประจุบางส่วน (Partial Discharge) และได้สรุปว่าการทดสอบดังกล่าวไม่เหมาะจะใช้เป็นการทดสอบคุณภาพหรือการทดสอบทั่วไปของอุปกรณ์แรงดันต่ำ แต่สามารถใช้เป็นการทดสอบอันหนึ่งในการตรวจสอบคุณภาพของฉนวนได้ [16], [17], [18], [19] ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบแรงดันสูงกับหม้อแปลงทดสอบและพบว่าขณะทดสอบมีสัญญาณรบกวนมาก ทำให้ค่าที่อ่านได้มีความไม่น่าเชื่อถือ นอกจากนี้หม้อแปลงเกิดการล้มตัวก่อนถึงระดับแรงดันทดสอบ ดังนั้นการทดสอบแรงดันสูงไม่สามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ได้

จากการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับความล้มเหลวของฉนวน ได้ชี้ว่าความล้มเหลวของหม้อแปลงไฟฟ้ามักเกิดขึ้นที่ฉนวนและมีค่าความต้านทานฉนวน (Insulation Resistance) หรือ IR ลดลงจากสภาวะปกติอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้งานวิจัยเหล่านี้ได้ทำการศึกษาในหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดใหญ่ [20] ดังนั้น จึงได้ตั้งสมมติฐานว่า ความล้มเหลวของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กจะเกิดขึ้นที่ฉนวนเช่นกัน และสามารถตรวจจับแนวโน้มของความล้มเหลวได้จากการวัดค่าความต้านทานของฉนวน

ในเบื้องต้นจึงได้ทดลองนำหม้อแปลงทดสอบจำนวน 10 ตัว จำลองการทดสอบโดยนำเข้าเตาอบอุณหภูมิที่ 170 องศาเซลเซียส และหยุดทำการทดสอบเป็นระยะ เพื่อตรวจวัดค่า IR จากการทดลองเป็นเวลา 3 เดือน พบหม้อแปลงจำนวน 2 ตัวเกิดความล้มเหลวขึ้น แต่เมื่อนำมาตรวจวัดค่า IR พบว่ายังคงมีค่าเท่ากับที่ระบุในคุณสมบัติทางไฟฟ้าเช่นเดิม จากการตรวจสอบพบว่า การวัดค่า IR เป็นการวัดความต้านทานของฉนวนที่คั่นอยู่ระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ สำหรับโมเดลนี้ขดลวดทั้งสองถูกพันอยู่บนโครงพลาสติก (Bobbin) และมีการแยกพันเป็นอิสระต่อกัน และเป็นการวัดความต้านทานของฉนวนระหว่างขดลวดกับแกนเหล็กซึ่งถูกแยกเป็นอิสระด้วยโครงพลาสติกเช่นกัน แสดงว่าสาเหตุของความล้มเหลวที่เกิดขึ้นมิได้เกิดขึ้นที่ฉนวนระหว่างขดลวด หรือระหว่างขดลวดกับแกนเหล็ก ดังนั้น การตรวจจับแนวโน้มความล้มเหลวโดยใช้ค่า IR เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจของหม้อแปลงทดสอบไม่สามารถปฏิบัติได้

ต่อมานำหม้อแปลงไฟฟ้าที่เกิดความล้มเหลวมาตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยละเอียดที่บริษัทผู้ผลิตหม้อแปลงทดสอบ พบว่าหม้อแปลงที่เกิดความล้มเหลวจะมีคุณสมบัติที่ไม่ผ่านตามที่ระบุไว้จำนวน 5 รายการ ดังต่อไปนี้

1. กระแสไฟฟ้าไร้ภาระ (No Load Current)
2. กำลังไฟฟ้าสูญเสียไร้ภาระ (No Load Loss)
3. แรงดันไฟฟ้าไร้ภาระ (No Load Voltage)
4. ความต้านทานของขดลวด (DC Resistance) หรือ DCR
5. แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induce Voltage) ที่ความถี่ 400 เฮิร์ตซ์

กระแสไฟฟ้าไร้ภาระ กำลังไฟฟ้าสูญเสียไร้ภาระ และแรงดันไฟฟ้าไร้ภาระ ทำการตรวจวัดที่แรงดัน 120 โวลต์ ความถี่ 60 เฮิร์ตซ์ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำการตรวจวัดที่แรงดัน 480 โวลต์ ความถี่ 400 เฮิร์ตซ์ สำหรับความต้านทานของขดลวดสามารถตรวจวัดได้โดยอาศัยดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่อุณหภูมิห้อง จึงเลือกตรวจวัดค่า DCR เนื่องจากตรวจวัดได้ง่าย และจากการตรวจวัดความต้านทานของขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เกิดความล้มเหลว พบว่าความต้านทานของขดลวดปฐมภูมิ

มีค่าต่ำกว่าขอบเขตล่างที่ระบุไว้ในข้อกำหนดคุณลักษณะ คือ 432 โห้หม่ ดังนั้นอายุของหม้อแปลงทดสอบคือระยะเวลาตั้งแต่เริ่มทดสอบจนกระทั่งมีค่า DCR ไม่สอดคล้องกับข้อกำหนดลักษณะหรือมีค่า DCR ต่ำกว่า 432 โห้หม่ นั่นเอง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Customer	SHARP CORPORATION CO.,LTD. (MICROWAVE OVEN)			Inspection Record and Certificate of Compliance			Model Designation	RTRNPA110DREO-T Control No. 115300244	Date 08-July-2003	Temp °C	Humidity %																		
Lot Size	Lot No.	Sampling Quantity	5 Pcs.	Judgement	PASSED / FAILED		Approved by	Checked by	Tested by																				
Inspection Item	No Load Current	No Load Loss	No Load Voltage S1	Test of polarity 1-3 Connect (2-4)	DC Resistance at 20 °C		Induce Voltage 400 Hz		Noise																				
Level Spec	Input 120 Vac 60 Hz			135.0 Vac ± 8.0 V	P (1-2) 540.0 Ω ± 20 %	S (3-4) 13.0 Ω ± 15 %	480 Vac 15 Sec		None																				
No.	Maximum	Maximum	Max 15.45 Min 14.55	Max 143.0 Min 127.0	Max 648.0 Min 432.0	Max 14.95 Min 11.05																							
1	23.6	0.92	15.02	135.5	541.3	13.05	OK / NG		OK / NG																				
2	14.3	18.7	14.50	133.0	325.9	13.18	OK / NG		OK / NG																				
3	11.4	14.6	14.97	134.8	315.9	12.99	OK / NG		OK / NG																				
4							OK / NG		OK / NG																				
5							OK / NG		OK / NG																				
Inspection Item	Dielectric Withstand Test			Insulation Resistance			Dimension	Pin Length	Appearance																				
Level Spec	P-S 2500 Vrms 1 Min	P-E 1240 Vrms 1 Min	S-E 500 Vrms 1 Min	P-S 500 Vdc	P-E 500 Vdc	S-E 500 Vdc	33.0 mm. Max	4.00 mm. ± 1.0 mm.																					
No.	Cut off 3 mA	Cut off 3 mA	Cut off 3 mA	100 MΩ Minimum	100 MΩ Minimum	100 MΩ Minimum		Max 5.00 Min 3.00																					
1	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG				OK / NG																			
2	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG				OK / NG																			
3	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG				OK / NG																			
4	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG				OK / NG																			
5	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG				OK / NG																			
<p>100% Factor Dielectric Strength Test at the Completion of Manufacture each Transformer shall be subjected to the following Dielectric strength test at <u>3</u> mA cut off setting All transformer of above lot size tested and the accepted transformer were supplied to the customer</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Test Voltage Applied Between</th> <th>Test Voltage</th> <th>Time</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Primary and Secondary Windings</td> <td>1500 V (rms)</td> <td>1 Sec</td> </tr> <tr> <td>Primary Winding(s) and core</td> <td>1500 V (rms)</td> <td>1 Sec</td> </tr> <tr> <td>Primary Windings</td> <td>- V (rms)</td> <td>- Sec</td> </tr> <tr> <td>Secondary Windings</td> <td>- V (rms)</td> <td>- Sec</td> </tr> <tr> <td>Secondary Winding(s) and core</td> <td>600 V (rms)</td> <td>1 Sec</td> </tr> </tbody> </table>										Test Voltage Applied Between	Test Voltage	Time	Primary and Secondary Windings	1500 V (rms)	1 Sec	Primary Winding(s) and core	1500 V (rms)	1 Sec	Primary Windings	- V (rms)	- Sec	Secondary Windings	- V (rms)	- Sec	Secondary Winding(s) and core	600 V (rms)	1 Sec	<p>Test Equipment</p> <p>Manufacturer : IKD Corp. Model : 2011 Output Voltage : AC 0-5 KV Output Capacity : AC 500 VA</p> <p>Effective Date : 18-Dec-02 Format No. FM-QA02-S203 Rev.02</p>	
Test Voltage Applied Between	Test Voltage	Time																											
Primary and Secondary Windings	1500 V (rms)	1 Sec																											
Primary Winding(s) and core	1500 V (rms)	1 Sec																											
Primary Windings	- V (rms)	- Sec																											
Secondary Windings	- V (rms)	- Sec																											
Secondary Winding(s) and core	600 V (rms)	1 Sec																											

ผู้ตรวจ สำหรับ Sampling. Natthamut.

ตารางที่ 6.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลงทดสอบเปรียบเทียบกับระหว่างหม้อแปลงปกติ (ตัวที่ 1) กับหม้อแปลงที่เกิดความล้มเหลว (ตัวที่ 2 และ 3)

6.2 อุปกรณ์และวงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบแรง

6.2.1 เตาอบอุณหภูมิ

ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิแวดล้อมขณะทดสอบแรงให้เป็นไปตามระดับที่ต้องการ เตาอบอุณหภูมิต้องสามารถรักษาระดับอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำ ในที่นี้ยอมรับความผิดพลาดได้ ± 5 องศาเซลเซียสของค่าอุณหภูมิที่กำหนด โดยการทดสอบแรงนี้เตาอบจะต้องสามารถเร่งอุณหภูมิได้สูงถึง 200 องศาเซลเซียส ซึ่งคืออุณหภูมิสูงสุดที่สามารถทนได้ของฉนวนชั้น A ผู้วิจัยได้ใช้เตาอบอุณหภูมิในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังแสดงในรูปที่ 6.2 เพื่อใช้ในการทดสอบแรงนี้



รูปที่ 6.2 เตาอบอุณหภูมิและแผงควบคุม



รูปที่ 6.3 หน้าปัดแสดงระดับอุณหภูมิของเตาอบอุณหภูมิ

6.2.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้า

สำหรับหม้อแปลงทดสอบ แรงดันอินพุตถูกป้อนเข้าทางด้านปฐมภูมิที่ระดับแรงดัน 120 โวลต์ ความถี่ 60 เฮิร์ตซ์ แต่เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าทั่วไปที่มีอยู่สามารถจ่ายแรงดันที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ถ้านำหม้อแปลงโมเดลนี้มาใช้ที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ จะส่งผลให้แกนเหล็กเกิดการอิ่มตัว และไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ วิธีแก้ปัญหาดังกล่าว คือควรลดระดับแรงดันที่ป้อนแก่ขดลวดด้านปฐมภูมิ เพื่อรักษาฟลักซ์แม่เหล็กในแกนเหล็กให้มีค่าเท่ากับเมื่อทำงานที่ระดับแรงดัน 120 โวลต์ ความถี่ 60 เฮิร์ตซ์ เมื่อไม่คิดความต้านทานของขดลวดและฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหล จะได้รากกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square; rms) ของแรงดันไฟฟ้า

$$E = 4.44fN\phi_{\max} \quad (6.1)$$

โดยที่ E คือ แรงดันของแหล่งจ่ายไฟ
 f คือ ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ
 N คือ จำนวนรอบของขดลวด
 ϕ_{\max} คือ ค่าสูงสุดของฟลักซ์แม่เหล็ก

ในที่นี้หม้อแปลงไฟฟ้ามีจำนวนรอบของขดลวดคงที่ และต้องการให้ฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดมีค่าคงที่ จะได้ว่าแรงดันไฟฟ้าแปรผันโดยตรงกับความถี่ ดังนั้น

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{f_1}{f_2} \quad (6.2)$$

ให้ความถี่ที่ใช้งานจริงของหม้อแปลง f_2 เท่ากับ 60 เฮิร์ตซ์ และแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งานจริงของหม้อแปลง E_2 เท่ากับ 120 โวลต์ ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบแรง f_1 เท่ากับ 50 เฮิร์ตซ์ จะได้แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบแรง E_1

$$E_1 = \frac{f_1}{f_2} \times E_2 = \frac{50}{60} \times 120 = 100 \text{ โวลต์} \quad (6.3)$$

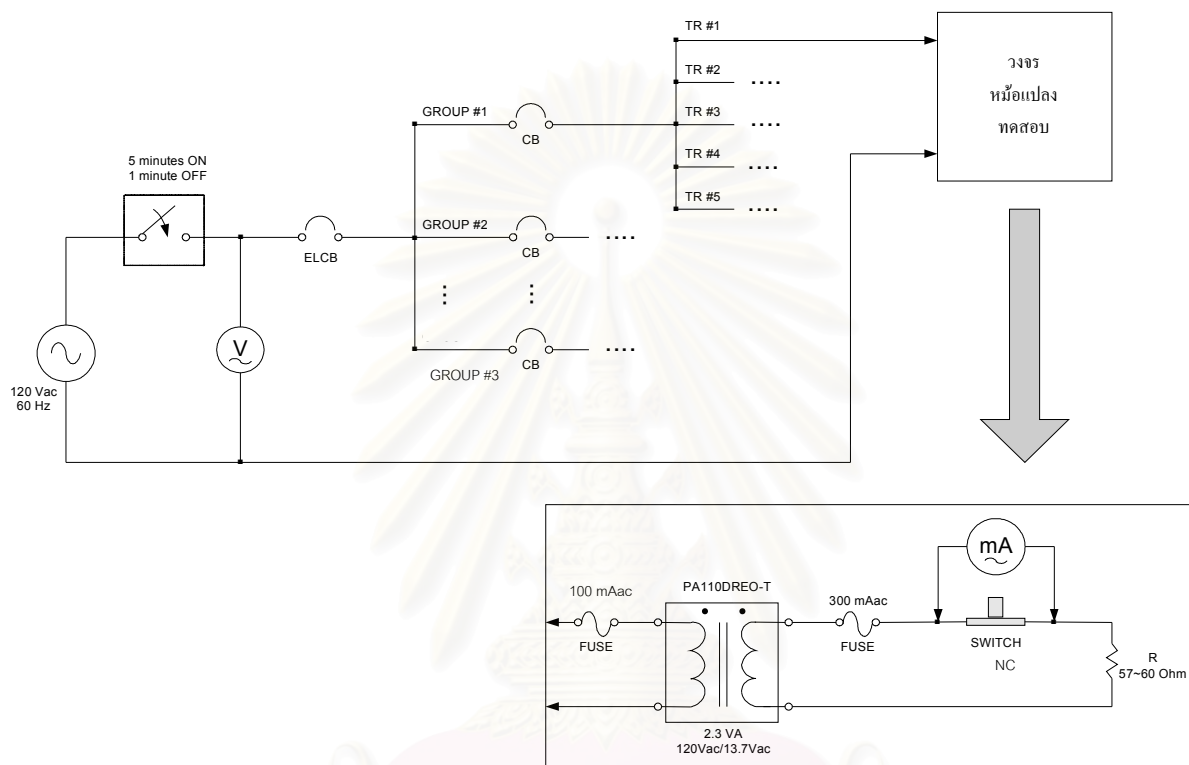
ดังนั้นการทดสอบแรงหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบซึ่งไม่สามารถหาแหล่งจ่ายไฟฟ้าความถี่ 60 เฮิร์ตซ์ได้ จะเลือกใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าความถี่ 50 เฮิร์ตซ์แทนโดยปรับลดแรงดันจาก 120 โวลต์เหลือ 100 โวลต์เพื่อให้ฟลักซ์แม่เหล็กในแกนเหล็กมีค่าคงเดิม



รูปที่ 6.4 แหล่งจ่ายไฟฟ้า

6.2.3 วงจรไฟฟ้า

ลักษณะวงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบเร่งแสดงดังรูป 6.5 โดยให้หม้อแปลงทำงานที่
ภาระเต็ม



รูปที่ 6.5 แผนภาพวงจรไฟฟ้าสำหรับการทดสอบเร่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

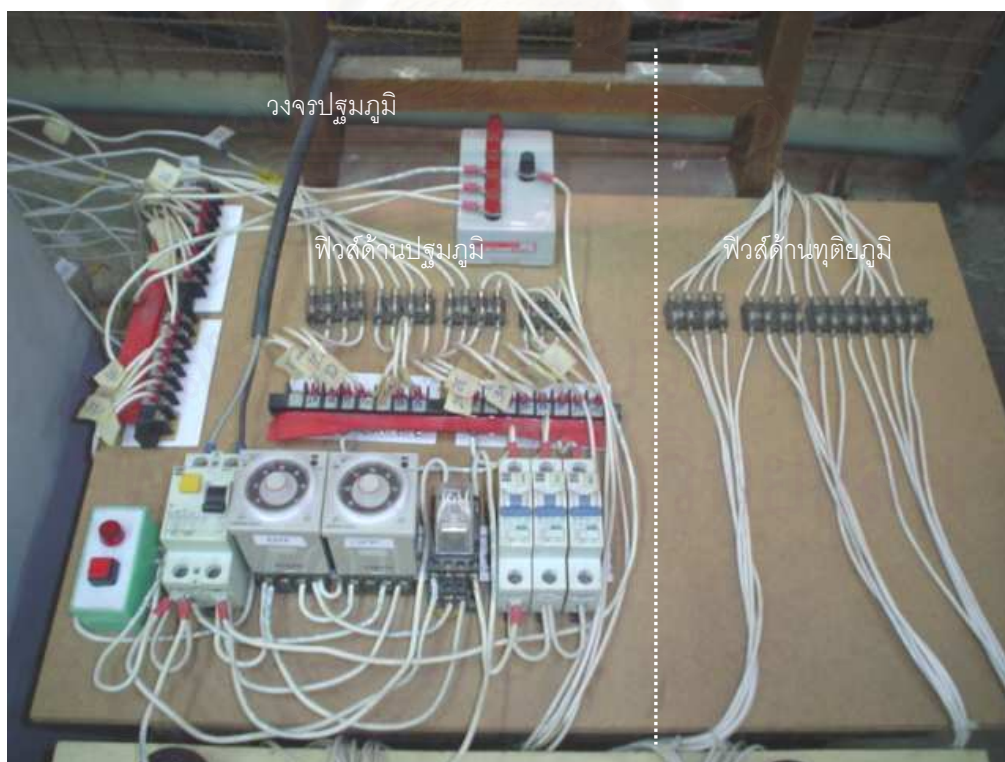


รูปที่ 6.6 วงจรไฟฟ้าสำหรับการทดสอบแรง

ทางด้านขดลวดปฐมภูมิต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าโดยผ่านเบรกเกอร์ หลังเบรกเกอร์มีการต่อหลอดไฟเพื่อแสดงสถานการณ์ทำงาน ซึ่งต่อกับวงจรไทมเมอร์เพื่อจับเวลาให้ปิดวงจรเป็นเวลา 5 นาที และเปิดวงจรเป็นเวลา 1 นาที โดยมีรีเลย์ควบคุมการตัดต่อ จากนั้นแล้วต่อผ่านไปยังเบรกเกอร์ย่อยจำนวน 3 ตัวตามจำนวนชุดของหม้อแปลงไฟฟ้า ได้แก่ เบรกเกอร์หมายเลข 1, 2 และ 3 เบรกเกอร์แต่ละตัวประกอบด้วยวงจรของหม้อแปลงจำนวน 5 ตัว ได้แก่ หม้อแปลง A, B, C, D และ E โดยมีฟิวส์ขนาด 0.1 แอมแปร์ต่อทางด้านปฐมภูมิและฟิวส์ขนาด 0.3 แอมแปร์ต่อทางด้านทุติยภูมิ เพื่อป้องกันกระแสเกินภายในวงจร

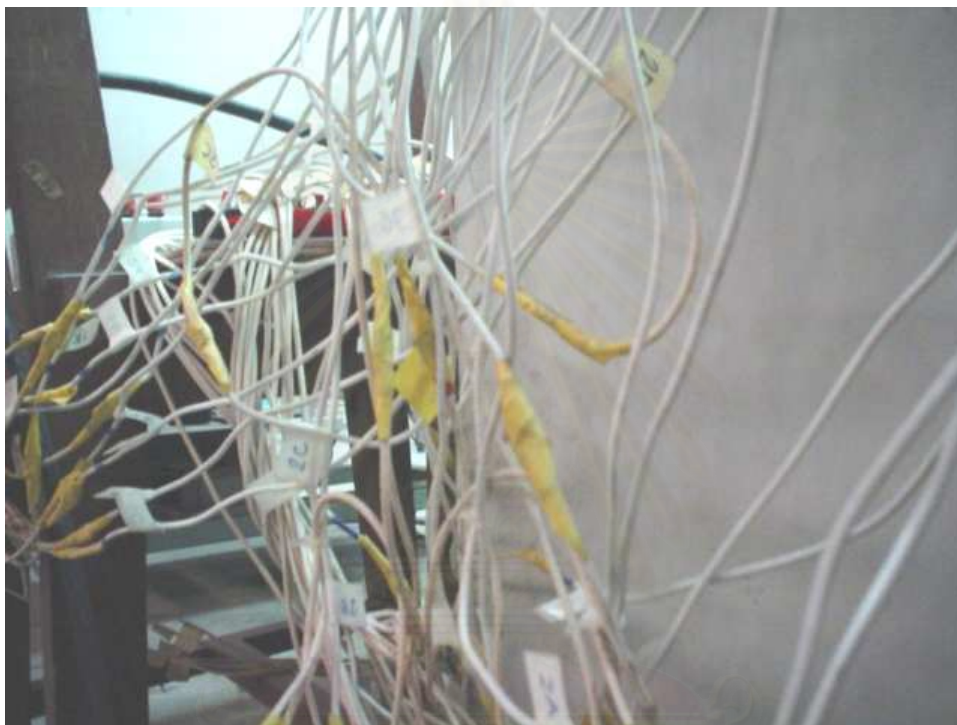


รูปที่ 6.7 วงจรควบคุมทางด้านปฐมภูมิที่ต่อจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า



รูปที่ 6.8 ส่วนของวงจรควบคุมและวงจรป้องกันของการทดสอบเร่ง

เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าต้องทำงานภายในเตาอบที่อุณหภูมิสูง สายไฟในส่วนที่ต่อเชื่อมเข้าไปยังหม้อแปลงทั้งทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิไม่สามารถใช้สายไฟปกติได้ จึงมีการเชื่อมต่อกันภายนอกระหว่างสายไฟปกติกับสายไฟทนความร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ตารางมิลลิเมตรข้างหลังเตาอบอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 6.9 วางสายไฟทนความร้อนพาดบนเตาอบเข้าไปภายในดังแสดงในรูปที่ 6.10 และ 6.11 และมีการวางสายภายในเตาอบดังแสดงในรูปที่ 6.12 และ 6.13

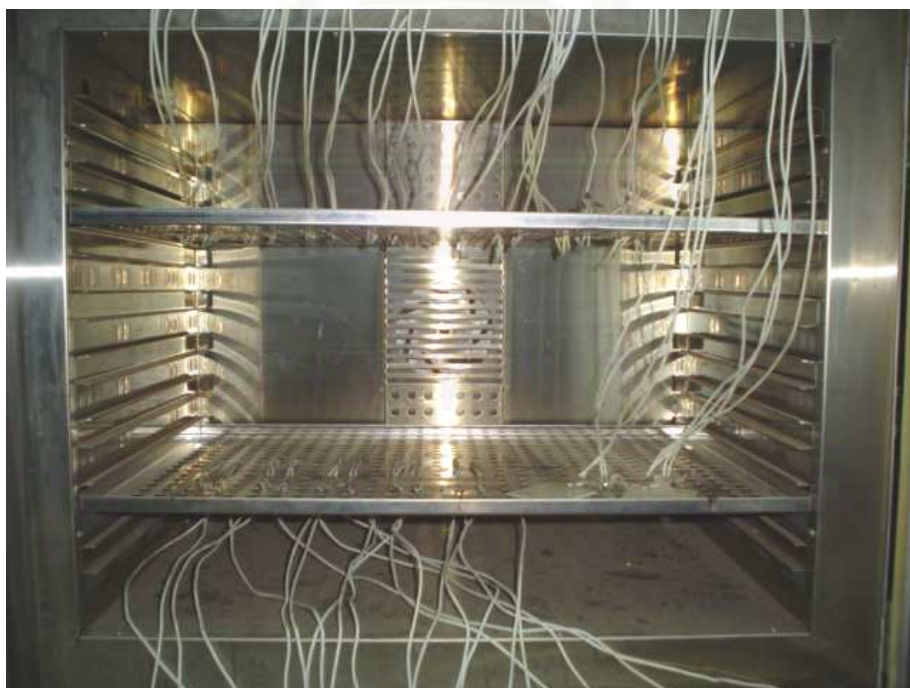


รูปที่ 6.9 การเชื่อมต่อสายไฟปกติเข้ากับสายไฟทนความร้อน

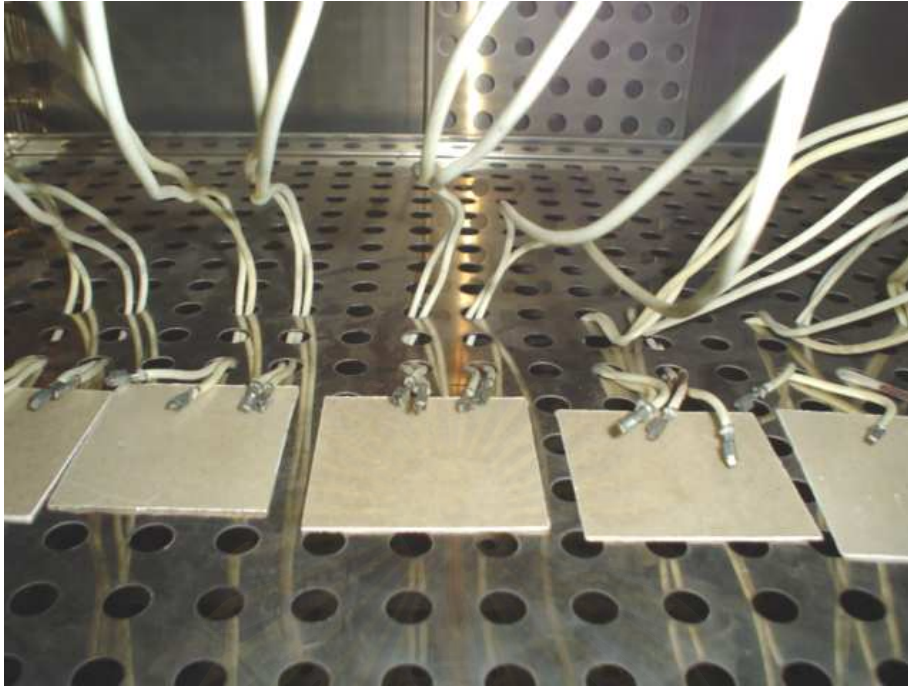
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



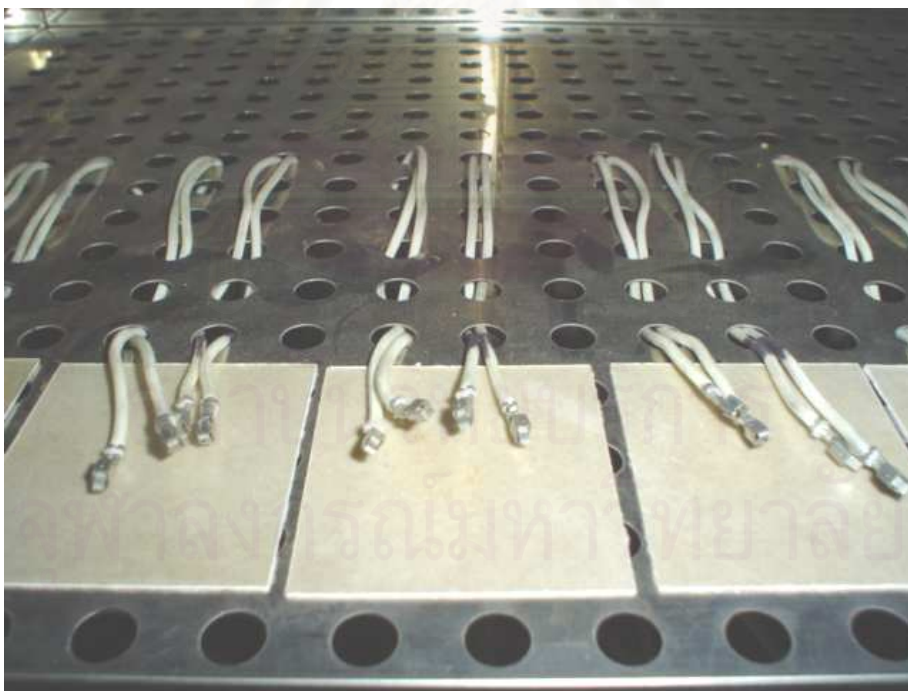
รูปที่ 6.10 การวางสายไฟทความร้อนเข้าสู่เตาอบอุณหภูมิ



รูปที่ 6.11 การวางสายไฟทความร้อนภายในเตาอบอุณหภูมิ

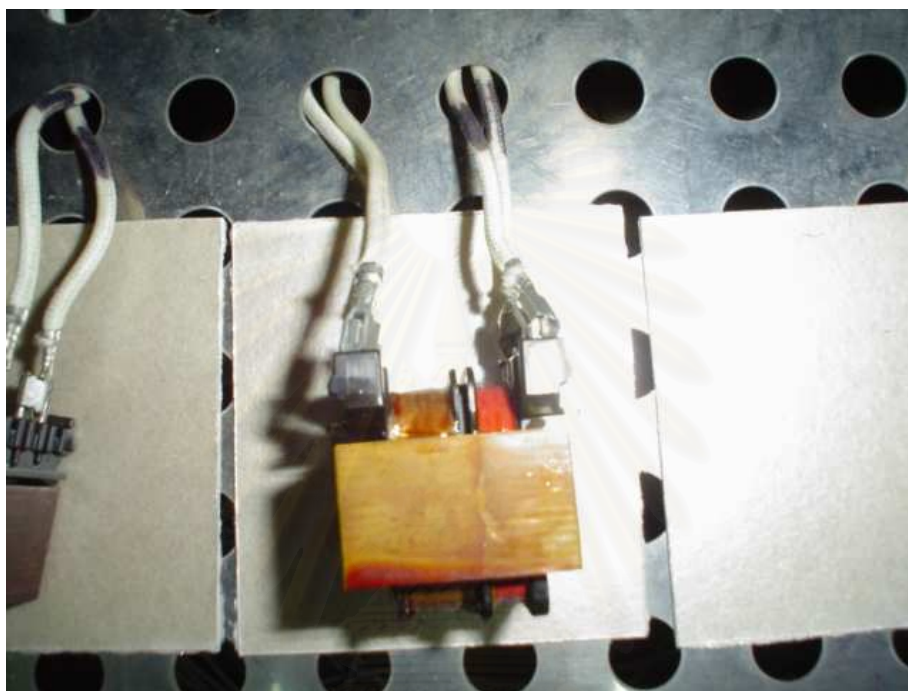


รูปที่ 6.12 การร้อยสายไฟทนความร้อนภายในเตาอบพร้อมหัวสายและแผ่นไม้อัด (ชั้นบน)



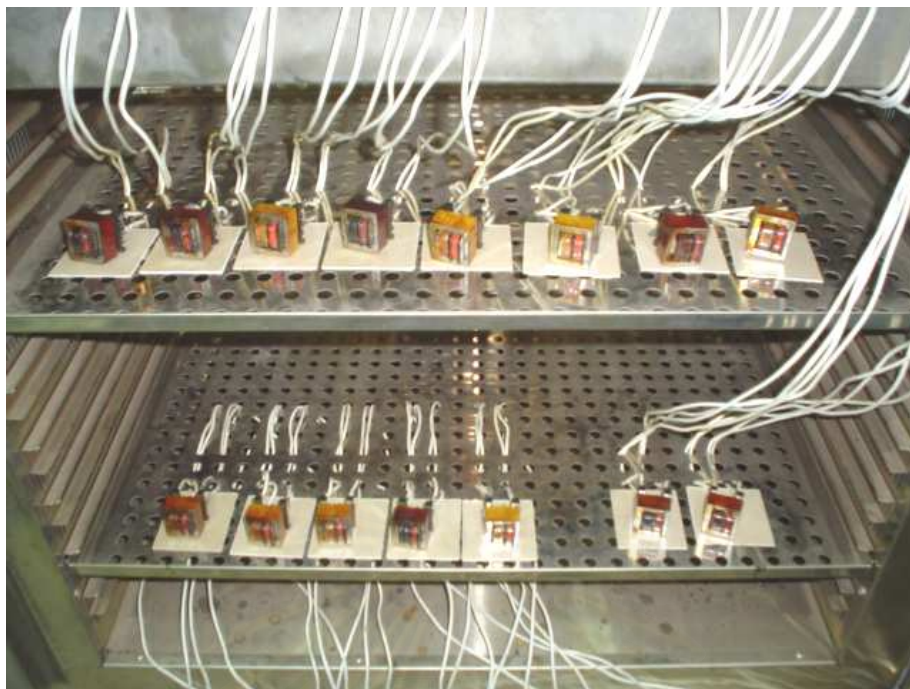
รูปที่ 6.13 การร้อยสายไฟทนความร้อนภายในเตาอบพร้อมหัวสายและแผ่นไม้อัด (ชั้นล่าง)

ปลายของสายไฟทนความร้อนภายในเตาอบมีหัวสายจับขาของหม้อแปลงเพื่อต่อเข้ากับวงจรโดยรองหม้อแปลงด้วยแผ่นไมก้า (Mica) เพื่อเป็นฉนวนป้องกันไฟรั่วลงบนตะแกรงเหล็ก การต่อหม้อแปลงเข้ากับหัวสายแสดงในรูปที่ 6.14 ในการทดสอบที่แต่ละอุณหภูมิสามารถบรรจุหม้อแปลงได้ทั้งหมด 15 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 6.15



รูปที่ 6.14 การต่อหม้อแปลงทดสอบเข้ากับหัวสายภายในเตาอบ

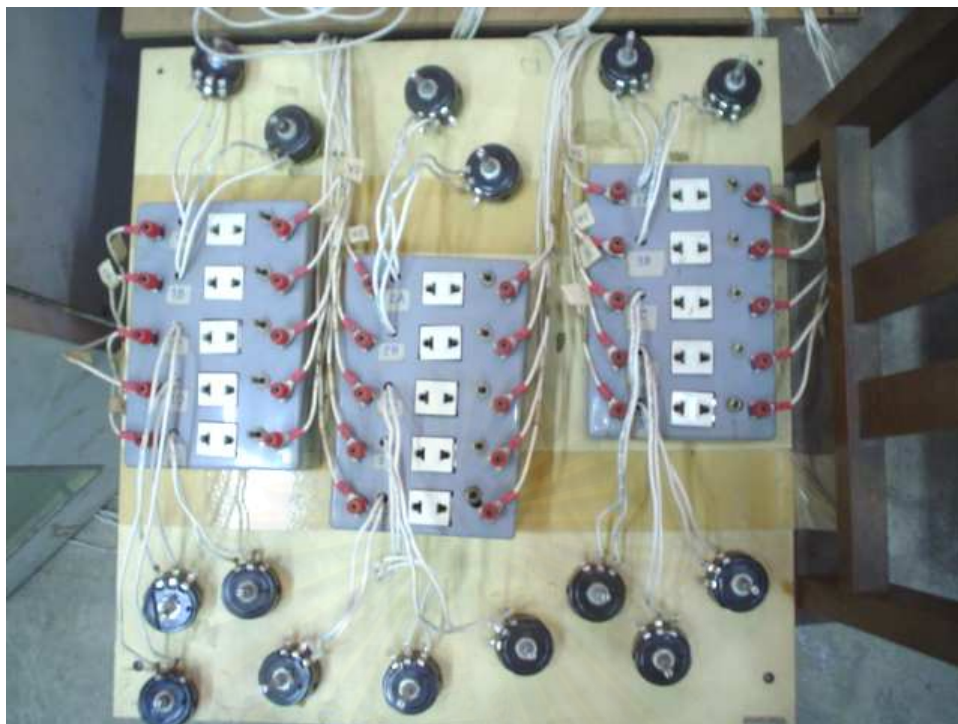
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.15 หม้อแปลงทดสอบทั้งหมดเมื่อต่อเข้ากับหัวสายภายในเตาอบ

ทางด้านวงจรทุติยภูมิต่อตัวต้านทานปรับค่าได้ไม่เกิน 500 โอห์ม กำลัง 3 วัตต์ เพื่อใช้เป็นโหลดสำหรับวงจร โดยเมื่อเริ่มต้นทดสอบจะปรับค่าความต้านทานเพื่อให้ได้ค่ากระแสไฟฟ้าด้านทุติยภูมิเท่ากับขณะทำงานที่สภาวะภาระเต็ม นั่นคือ 170 มิลลิแอมแปร์ สำหรับวงจรไฟฟ้าด้านทุติยภูมิถูกบรรจุลงในกล่องภาระ (Load Box) ซึ่งประกอบด้วยตัวต้านทานปรับค่าได้โดยอาศัยการหมุนก้านสวิตช์โยกตัดต่อวงจรเพื่อใช้ในการวัดกระแสไฟฟ้า และช่องสำหรับอนุกรมมัลติมิเตอร์เข้ากับวงจรเพื่อวัดกระแสไฟฟ้า โดยกล่องภาระมีทั้งหมด 3 กล่อง แต่ละกล่องประกอบด้วย 5 วงจร ดังแสดงในรูปที่ 6.16

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.16 กล่องภาระสำหรับวงจรด้านทุติยภูมิ

6.3 การทดสอบแรงหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยอุณหภูมิจ

วัตถุประสงค์ เพื่อหาอายุการใช้งานเฉลี่ยและข้อมูลเกี่ยวกับความเชื่อถือได้ของหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบในสภาวะการใช้งานจริงที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

สมมติฐานของการทดสอบแรงคือ หม้อแปลงมีการใช้งานแบบไม่ต่อเนื่องและจำลองการใช้งานแบบไม่ต่อเนื่องโดยให้ทำงาน 5 นาที หยุด 1 นาที ต่อเนื่องกันไปจนกระทั่งหม้อแปลงเกิดความล้มเหลว และความล้มเหลวที่เกิดขึ้นคือการลัดวงจรภายในขดลวดปฐมภูมิซึ่งทำให้ DCR ของขดลวดปฐมภูมิต่ำกว่าค่าที่ระบุในข้อกำหนดคุณลักษณะ

การทดสอบแรงเลือกอุณหภูมิเป็นความเค้นเดียวและดำเนินการทดสอบด้วยความเค้นคงที่ที่อุณหภูมิ 4 ระดับ ได้แก่ 170 องศาเซลเซียส 175 องศาเซลเซียส 180 องศาเซลเซียส และ 190 องศาเซลเซียส และเก็บข้อมูลอายุแบบข้อมูลตัดตอน โดยต้องการให้มีจำนวนหม้อแปลงเกิดความล้มเหลวอย่างน้อยร้อยละ 60 ของจำนวนหม้อแปลงที่ทดสอบแต่ละอุณหภูมิ นั่นคือหม้อแปลงเกิดความล้มเหลวอย่างน้อย 9 ตัว จาก 15 ตัว

การบันทึกผลจะมีการบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าด้านทุติยภูมิด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์ทุกวันเพื่อควบคุมให้การทำงานของหม้อแปลงเป็นแบบภาระเต็ม ในกรณีที่วัดหม้อแปลงตัวใดแล้วพบว่าไม่มีกระแสไหลผ่าน มีความเป็นไปได้ที่หม้อแปลงนั้นจะเกิดความล้มเหลวขึ้น หรือเกิดความผิดพลาดกับการเชื่อมต่อของสายไฟภายในวงจร หรือการเชื่อมต่อหัวสายเข้ากับขาหม้อแปลงจับกันไม่สนิท การทดสอบแรงนี้ไม่ได้ปล่อยให้หม้อแปลงทำงานโดยต่อเนื่องตลอดเวลา จะมีการหยุดพักการทดสอบเพื่อนำหม้อแปลงออกมาตรวจสอบคุณสมบัติบันทึกค่า DCR และบันทึกจำนวนวัฏจักรการทำงานของหม้อแปลงที่ทำได้ในแต่ละรอบ สำหรับการทดสอบแรงที่อุณหภูมิสูงจะมีช่วงเวลาระหว่างการหยุดพักสั้นกว่าการทดสอบแรงที่อุณหภูมิต่ำ เพราะความเสื่อมเกิดขึ้นเร็วกว่า นอกจากนี้อาจมีการหยุดพักการทดสอบเมื่อตรวจพบหม้อแปลงที่เกิดความล้มเหลวเพื่อวัดค่า DCR ของหม้อแปลงนั้น ๆ สำหรับหม้อแปลงที่เกิดความล้มเหลวและมีค่า DCR ต่ำกว่าข้อกำหนดคุณลักษณะ จะบันทึกจำนวนวัฏจักรการทำงานเท่ากับผลรวมของจำนวนวัฏจักรการทำงานก่อนพบความล้มเหลวกับครึ่งหนึ่งของจำนวนวัฏจักรการทำงานในรอบที่พบความล้มเหลว เช่น หม้อแปลงสามารถทำงานได้ตามปกติ 1,000 วัฏจักรก่อนรอบที่พบความล้มเหลว ต่อมาตรวจพบความล้มเหลวในรอบปัจจุบันซึ่งดำเนินการทดสอบไปทั้งสิ้น 100 วัฏจักร ดังนั้นวัฏจักรที่หม้อแปลงนี้สามารถทำงานได้เท่ากับ $1,000+50 = 1,050$ วัฏจักร

เมื่อสิ้นสุดการทดสอบ หม้อแปลงที่ถูกทดสอบทั้งหมดจะถูกนำไปตรวจวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริษัทผู้ผลิตหม้อแปลงทดสอบเพื่อยืนยันความล้มเหลวและตรวจสอบสมมติฐานที่ตั้งไว้ ตารางที่ 6.4 และ 6.5 แสดงตัวอย่างของตารางบันทึกผล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Daily Inspection

Date 17 May 2004 Time _____

Chamber Temp

Primary Voltage

170°C

100 V

Secondary Current : 170.00 mA (153.00~187.00)														
1A	1B	1C	1D	1E	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	3D	3E

Date 18 May 2004 Time _____

Chamber Temp

Primary Voltage

170°C

100 V

Secondary Current : 170.00 mA (153.00~187.00)														
1A	1B	1C	1D	1E	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	3D	3E

Date 19 May 2004 Time _____

Chamber Temp

Primary Voltage

170°C

100 V

Secondary Current : 170.00 mA (153.00~187.00)														
1A	1B	1C	1D	1E	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	3D	3E

ตารางที่ 6.4 ตัวอย่างตารางบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ

DCR Data Sheet

Stop Date

Stop Time

Test @ 170°C

Primary DCR : 540.0 Ohm (432.0~648.0)														
1A	1B	1C	1D	1E	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	3D	3E
Secondary DCR : 13.00 Ohm (11.05~14.95)														
1A	1B	1C	1D	1E	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	3D	3E

Total Cycles + =

Start Date

Start Time

DCR Data Sheet

Stop Date

Stop Time

Test @ 170°C

Primary DCR : 540.0 Ohm (432.0~648.0)														
1A	1B	1C	1D	1E	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	3D	3E
Secondary DCR : 13.00 Ohm (11.05~14.95)														
1A	1B	1C	1D	1E	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	3D	3E

Total Cycles + =

Start Date

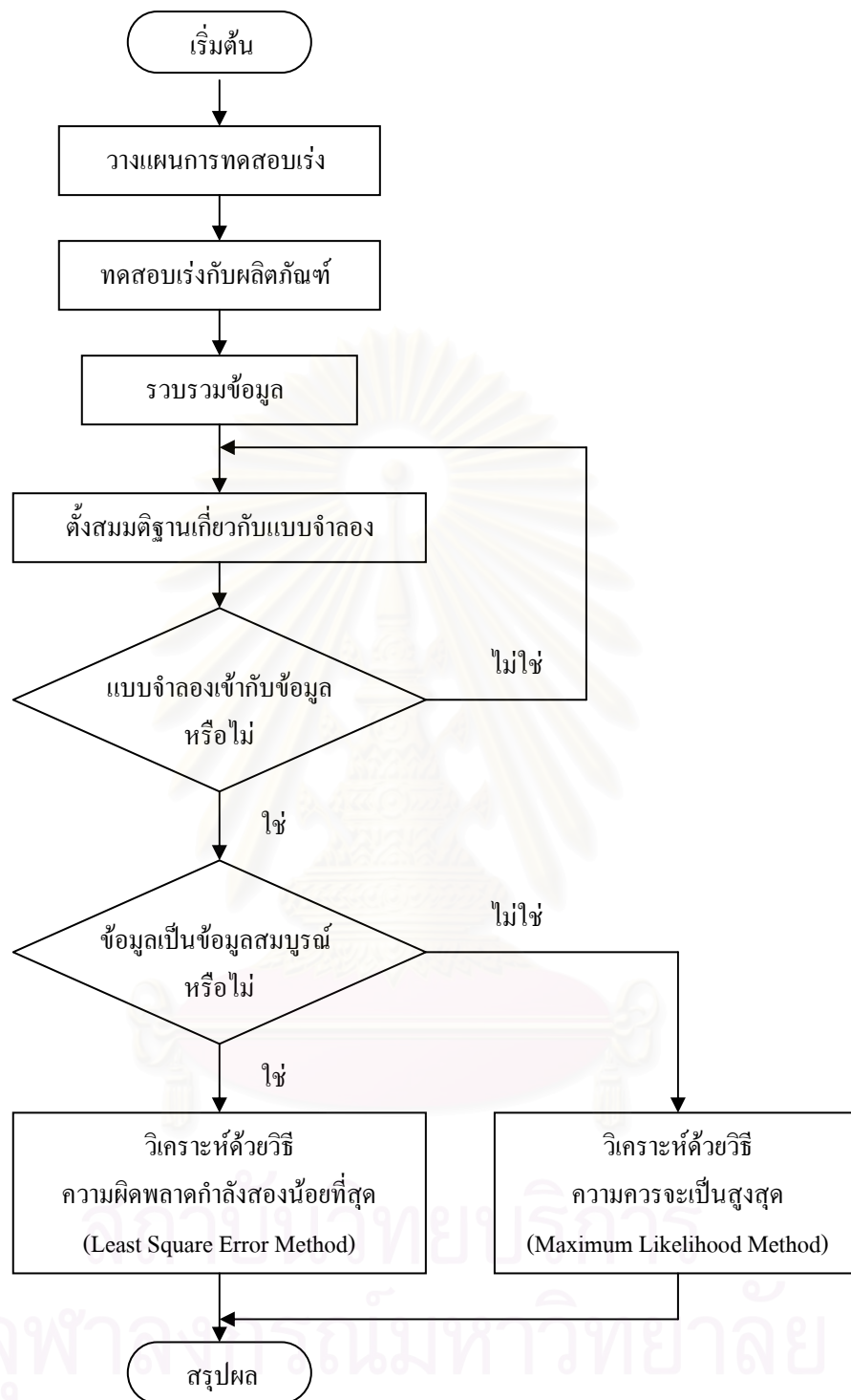
Start Time

ตารางที่ 6.5 ตัวอย่างตารางบันทึกค่า DCR และจำนวนวัฏจักรการทำงาน

เมื่อได้รับการยืนยันความล้มเหลวและตรวจสอบสมมติฐานแล้ว ข้อมูลอายุที่ได้คือวัฏจักรการทำงานของหม้อแปลงซึ่งเป็นข้อมูลแบบตัดทอนจะถูกนำมาวิเคราะห์ โดยนำมาเข้ากับฟังก์ชันการแจกแจงอายุที่เหมาะสมและประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีความควรจะเป็นสูงสุด และนำข้อมูลอายุที่ได้จากฟังก์ชันการแจกแจงมาเข้ากับแบบจำลองอาร์เรเนียสพร้อมประมาณค่า พารามิเตอร์ของแบบจำลอง เมื่อได้ฟังก์ชันการแจกแจงอายุและแบบจำลองอาร์เรเนียสแล้วจะทำการประมาณค่าอายุการใช้งานเฉลี่ยและข้อมูลความเชื่อถือได้ของหม้อแปลงต่อไป สรุปขั้นตอนของการทดสอบเร่งดังกล่าวแสดงในรูปที่ 6.17



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.17 ผังงานการทดสอบเร่ง

บทที่ 7

ผลการทดสอบเร่ง

7.1 ข้อมูลอายุการทดสอบเร่ง

จากแผนการทดสอบเร่งด้วยอุณหภูมิที่ระดับ 170 องศาเซลเซียส 175 องศาเซลเซียส 180 องศาเซลเซียส และ 190 องศาเซลเซียส ได้ข้อมูลอายุ ดังแสดงในตารางที่ 7.1

170°C	175°C	180°C	190°C
95	8	67	38
153	88	67	38
191	144	103	38
215	182	145	38
319	237	145	102
346	284	145	102
407	305	145	102
468	356	216	194
468+	356+	216	194
468+	356+	286	194
468+		286	194
468+		286	194
468+		286+	194
525+		286+	194
525+		286+	194+

ตารางที่ 7.1 จำนวนวัฏจักรที่แต่ละระดับอุณหภูมิ

จากตารางที่ 7.1 ตัวเลขที่แต่ละระดับอุณหภูมิแสดงจำนวนวัฏจักรที่หม้อแปลงสามารถทำงานได้จนกระทั่งเกิดความล้มเหลวโดยเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก สำหรับหม้อแปลงที่หยุดการทดสอบก่อนเกิดความล้มเหลวจะบันทึกจำนวนวัฏจักรทั้งหมดที่สามารถทำงานได้แล้วตามด้วยเครื่องหมาย +

เพื่อแสดงการตัดทอนข้อมูล ลักษณะความล้มเหลวและผลการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าจะถูกกล่าวถึงต่อไปในหัวข้อ 7.2

7.2 ลักษณะความล้มเหลวและผลการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า

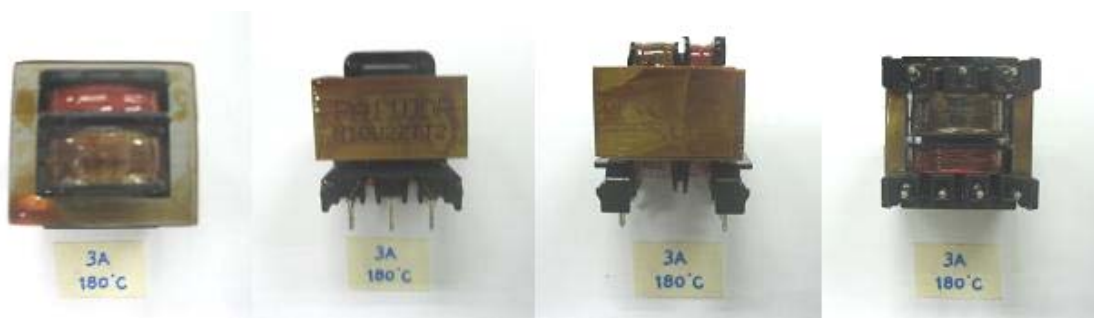
หม้อแปลงทดสอบจากการทดสอบแรงด้วยอุณหภูมิจะมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 7.1-7.3



รูปที่ 7.1 หม้อแปลงทดสอบที่ถูกทดสอบด้วยอุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส

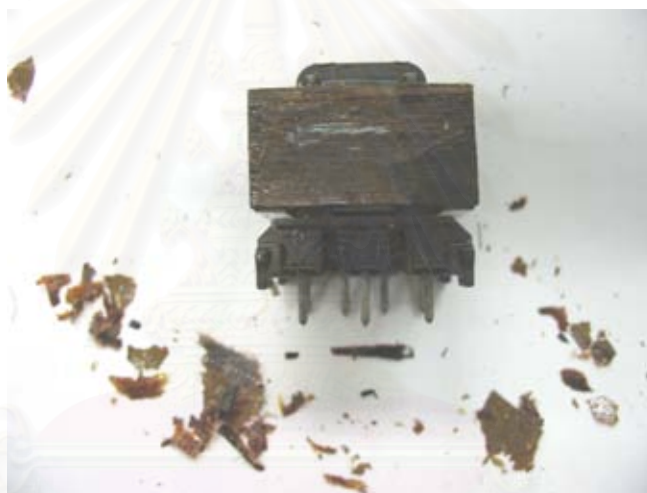


รูปที่ 7.2 หม้อแปลงทดสอบที่ถูกทดสอบด้วยอุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส



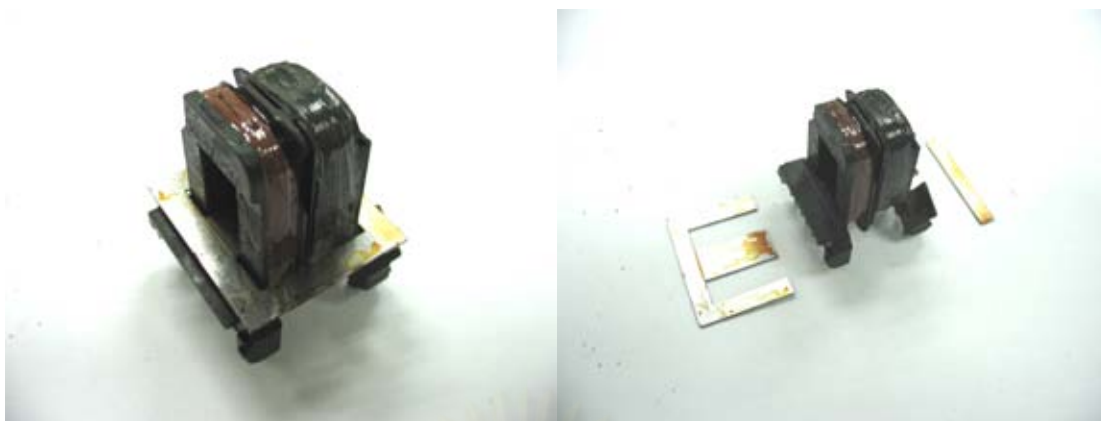
รูปที่ 7.3 หม้อแปลงทดสอบที่ถูกทดสอบด้วยอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

เทปฉนวนมีลักษณะแห้ง ร้อนเป็นสะเก็ด โค้งพลาสติกเปราะ แตกง่าย รูปที่ 7.4-7.6 แสดงลักษณะของหม้อแปลงและส่วนประกอบภายใน

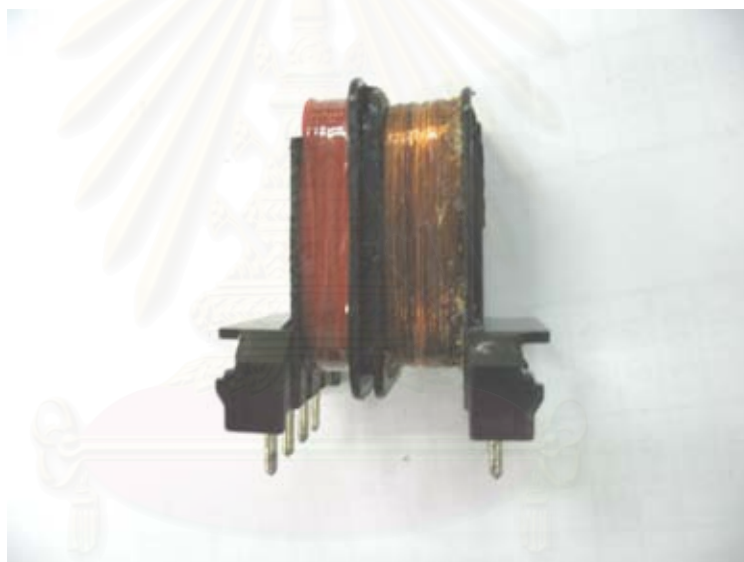


รูปที่ 7.4 ลักษณะเทปฉนวนซึ่งพันรอบแกนเหล็ก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7.5 โครงพลาสติกและแกนเหล็ก

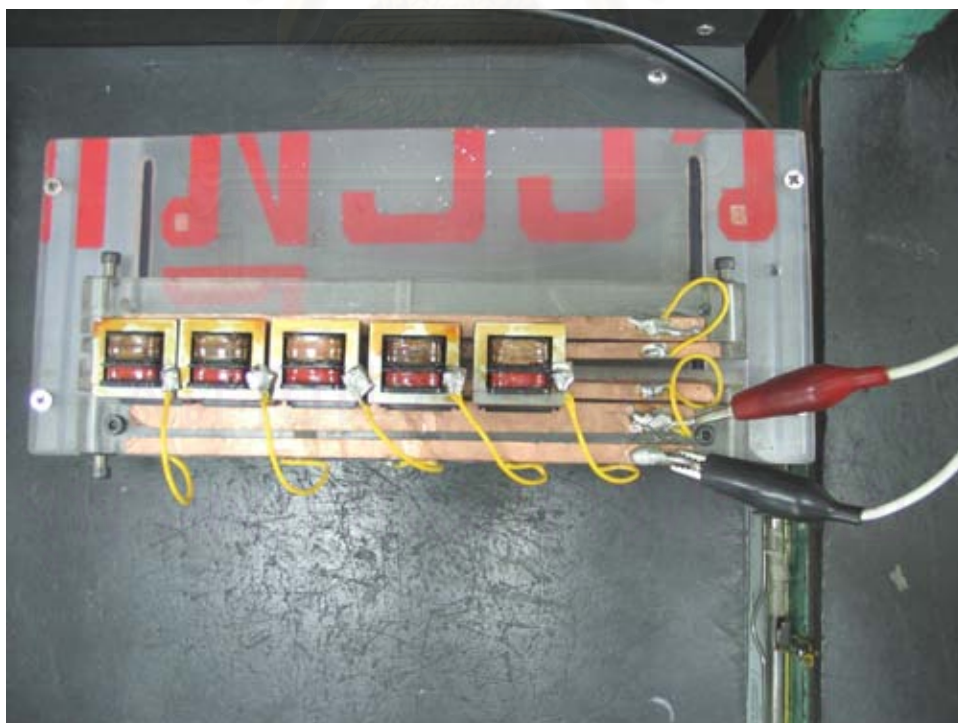


รูปที่ 7.6 ขดลวดปฐมภูมิที่พันรอบโครงพลาสติก

หม้อแปลงทั้งหมดจำนวน 55 ตัว ถูกส่งเพื่อตรวจคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริษัทผู้ผลิตหม้อแปลง
ทดสอบ ผลการตรวจสอบแสดงดังตารางที่ 7.2-7.12



รูปที่ 7.7 การตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า



รูปที่ 7.8 การทดสอบการทนของไดอิเล็กทริก (Dielectric Withstand Test)



รูปที่ 7.9 การตรวจสอบคุณสมบัติไร้ภาระ (No Load Test)



รูปที่ 7.10 การตรวจสอบคุณสมบัติความต้านทานฉนวน



รูปที่ 7.11 การตรวจสอบคุณสมบัติแรงดันเหนี่ยวนำ



รูปที่ 7.12 อุปกรณ์วัดค่า DCR ซึ่งมีการชดเชยที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

Customer	SHARP CORPORATION CO.,LTD. (MICROWAVE OVEN)			Inspection Record and Certificate of Compliance			Model	RTRNPA110DREO-T	Date	
				Sampling Quantity	5 Pcs.	Judgement.	Designation	Control No. 115300244	Temp °C	Humidity %
Lot Size		Lot No.					PASSED / FAILED	Approved by	Checked by	Tested by
Inspection Item	No Load Current	No Load Loss	No Load Voltage S1		Test of polarity 1-3 Connect (2-4)		DC Resistance at 20 °C		Induce Voltage 400 Hz	Noise
	Input 120 Vac 60 Hz						P (1-2)	S (3-4)		
Level Spec	55 mA	1.70 W	15.0 Vac ± 3 %		135.0 Vac ± 8.0 V		540.0 Ω ± 20 %	13.0 Ω ± 15 %	480 Vac 15 Sec	None
No.	Maximum	Maximum	Max 15.45 Min 14.55		Max 143.0 Min 127.0		Max 648.0 Min 432.0	Max 14.95 Min 11.05		
1A	25.8	1.90	9.25				536.1	12.69	OK / (NG)	OK / NG
2B	29.6	2.20	9.19				547.3	12.69	OK / (NG)	OK / NG
3C	125.0	8.90	9.31				470.8	12.76	OK / (NG)	OK / NG
4D	91.0	6.63	9.16				421.9	12.76	OK / (NG)	OK / NG
5E	75.0	4.75	9.23				477.9	12.74	OK / (NG)	OK / NG
Inspection Item	Dielectric Withstand Test			Insulation Resistance			Dimension	Pin Length		Appearance
	P-S	P-E	S-E							
Level Spec	2500 Vrms 1 Min	1240 Vrms 1 Min	500 Vrms 1 Min		P-S 500 Vdc	P-E 500 Vdc	S-E 500 Vdc	33.0 mm. Max	4.00 mm. ± 1.0 mm.	
No.	Cut off 3 mA	Cut off 3 mA	Cut off 3 mA		100 MΩ Minimum	100 MΩ Minimum	100 MΩ Minimum		Max 5.00 Min 3.00	
1	OK / NG	OK / NG	OK / NG		OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG
2	OK / NG	OK / NG	OK / NG		OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG
3	OK / NG	OK / NG	OK / NG		OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG
4	OK / NG	OK / NG	OK / NG		OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG
5	OK / NG	OK / NG	OK / NG		OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG

100% Factor Dielectric Strength Test at the Completion of Manufacture each Transformer shall be subjected to the following Dielectric strength test at 3 mA cut off setting
All transformer of above lot size tested and the accepted transformer were supplied to the customer

Test Voltage Applied Between	Test Voltage	Time
Primary and Secondary Windings	1500 V (rms)	1 Sec
Primary Winding(s) and core	1500 V (rms)	1 Sec
Primary Windings	- V (rms)	- Sec
Secondary Windings	- V (rms)	- Sec
Secondary Winding(s) and core	600 V (rms)	1 Sec

Test Equipment

Manufacturer : IKD Corp.
 Model : 2011
 Output Voltage : AC 0 - 5 KV
 Output Capacity : AC 500 VA

Effective Date : 18-Dec-02
 Format No. FM-QA02-S203 Rev.02

ตารางที่ 7.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลง 1A-1E ที่การทดสอบแรงด้วยอุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส

Customer	SHARP CORPORATION CO.,LTD. (MICROWAVE OVEN)			Inspection Record and Certificate of Compliance			Model Designation	RTRNPA110DREO-T Control No. 115300244	Date																				
Lot Size	Lot No.	Lot No.	Lot No.	Sampling Quantity	5 Pcs.	Judgement	PASSED / FAILED	Approved by	Checked by	Temp	°C Humidity %																		
Inspection Item	No Load Current	No Load Loss	No Load Voltage S1		Test of polarity 1-3 Connect (2-4)		DC Resistance at 20 °C		Induce Voltage 400 Hz	Noise																			
	Input 120 Vac 60 Hz						P (1-2)	S (3-4)	480 Vac	15 Sec																			
Level Spec	55 mA	1.70 W	15.0 Vac ± 3 %		135.0 Vac ± 8.0 V		540.0 Ω ± 20 %	13.0 Ω ± 15 %	480 Vac	None																			
No.	Maximum	Maximum	Max 15.45 Min 14.55		Max 143.0 Min 127.0		Max 648.0 Min 432.0	Max 14.95 Min 11.05																					
F 12A	67.8	4.96	9.16				475.5	12.69	OK / NG	OK / NG																			
S 22B	26.5	(2.2)	14.82				539.9	12.73	OK / NG	OK / NG																			
F 32C	111.2	6.50	7.32				441.5	12.71	OK / NG	OK / NG																			
F 42D	(44.1)	2.28	6.25				477.4	12.68	OK / NG	OK / NG																			
S 52E	23.9	(1.82)	(8.2)				547.9	12.72	OK / NG	OK / NG																			
Inspection Item	Dielectric Withstand Test			Insulation Resistance			Dimension	Pin Length	Appearance																				
	P-S	P-E	S-E	P-S	P-E	S-E	33.0 mm.	4.00 mm.																					
Level Spec	2500 Vrms 1 Min	1240 Vrms 1 Min	500 Vrms 1 Min	500 Vdc	500 Vdc	500 Vdc	Max	± 1.0 mm.																					
No.	Cut off 3 mA	Cut off 3 mA	Cut off 3 mA	100 MΩ Minimum	100 MΩ Minimum	100 MΩ Minimum		Max 5.00 Min 3.00																					
1	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG																				
2	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG																				
3	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG																				
4	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG																				
5	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG																				
<p>100% Factor Dielectric Strength Test at the Completion of Manufacture each Transformer shall be subjected to the following Dielectric strength test at <u>3</u> mA cut off setting All transformer of above lot size tested and the accepted transformer were supplied to the customer</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Test Voltage Applied Between</th> <th>Test Voltage</th> <th>Time</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Primary and Secondary Windings</td> <td>1500 V (rms)</td> <td>1 Sec</td> </tr> <tr> <td>Primary Winding(s) and core</td> <td>1500 V (rms)</td> <td>1 Sec</td> </tr> <tr> <td>Primary Windings</td> <td>- V (rms)</td> <td>- Sec</td> </tr> <tr> <td>Secondary Windings</td> <td>- V (rms)</td> <td>- Sec</td> </tr> <tr> <td>Secondary Winding(s) and core</td> <td>600 V (rms)</td> <td>1 Sec</td> </tr> </tbody> </table>								Test Voltage Applied Between	Test Voltage	Time	Primary and Secondary Windings	1500 V (rms)	1 Sec	Primary Winding(s) and core	1500 V (rms)	1 Sec	Primary Windings	- V (rms)	- Sec	Secondary Windings	- V (rms)	- Sec	Secondary Winding(s) and core	600 V (rms)	1 Sec	<p>Test Equipment</p> <p>Manufacturer : IKD Corp. Model : 2011 Output Voltage : AC 0-5 KV Output Capacity : AC 500 VA</p> <p>Effective Date : 18-Dec-02 Format No. FM-QA02-S203 Rev.02</p>			
Test Voltage Applied Between	Test Voltage	Time																											
Primary and Secondary Windings	1500 V (rms)	1 Sec																											
Primary Winding(s) and core	1500 V (rms)	1 Sec																											
Primary Windings	- V (rms)	- Sec																											
Secondary Windings	- V (rms)	- Sec																											
Secondary Winding(s) and core	600 V (rms)	1 Sec																											

ตารางที่ 7.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลง 2A-2E ที่การทดสอบแรงด้วยอุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส

Customer	SHARP CORPORATION CO.,LTD. (MICROWAVE OVEN)			Inspection Record and Certificate of Compliance			Model	RTRNPA110DREO-T	Date																				
				Sampling Quantity	5 Pcs.	Judgement	Designation	Control No. 115300244	Temp	°C Humidity	%																		
Lot Size	Lot No.			Test of polarity 1-3 Connect (2-4)	PASSED / FAILED	Approved by		Induce Voltage 400 Hz	Checked by	Tested by	Noise																		
Inspection Item	No Load Current	No Load Loss	No Load Voltage S1			P (1-2)	S (3-4)																						
Level Spec	Input 120 Vac 60 Hz			135.0 Vac ± 8.0 V	540.0 Ω ± 20 %	13.0 Ω ± 15 %	480 Vac 15 Sec	None																					
	No.	Maximum	Maximum						Max 15.45 Min 14.55	Max 143.0 Min 127.0	Max 648.0 Min 432.0	Max 14.95 Min 11.05																	
X 3A	21.3	0.92	15.02		535.0	12.73			OK / NG		OK / NG																		
2 3B	21.7	0.98	15.10		532.8	12.70			OK / NG		OK / NG																		
2 3C	21.4	0.92	15.11		528.0	12.68			OK / NG		OK / NG																		
4 3D	57.7	3.48	7.45		409.3	12.70			OK / NG		OK / NG																		
5 3E	37.9	2.30	7.41		496.3	12.74			OK / NG		OK / NG																		
Inspection Item	Dielectric Withstand Test			Insulation Resistance			Dimension	Pin Length	Appearance																				
	P-S	P-E	S-E	P-S	P-E	S-E	33.0 mm. Max	4.00 mm. ± 1.0 mm.																					
Level Spec	2500 Vrms 1 Min	1240 Vrms 1 Min	500 Vrms 1 Min	500 Vdc	500 Vdc	500 Vdc																							
No.	Cut off 3 mA	Cut off 3 mA	Cut off 3 mA	100 MΩ Minimum	100 MΩ Minimum	100 MΩ Minimum		Max 5.00 Min 3.00																					
1	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG																				
2	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG																				
3	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG																				
4	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG																				
5	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG																				
<p>100% Factor Dielectric Strength Test at the Completion of Manufacture each Transformer shall be subjected to the following Dielectric strength test at 3 mA cut off setting All transformer of above lot size tested and the accepted transformer were supplied to the customer</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Test Voltage Applied Between</th> <th>Test Voltage</th> <th>Time</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Primary and Secondary Windings</td> <td>1500 V (rms)</td> <td>1 Sec</td> </tr> <tr> <td>Primary Winding(s) and core</td> <td>1500 V (rms)</td> <td>1 Sec</td> </tr> <tr> <td>Primary Windings</td> <td>- V (rms)</td> <td>- Sec</td> </tr> <tr> <td>Secondary Windings</td> <td>- V (rms)</td> <td>- Sec</td> </tr> <tr> <td>Secondary Winding(s) and core</td> <td>600 V (rms)</td> <td>1 Sec</td> </tr> </tbody> </table>								Test Voltage Applied Between	Test Voltage	Time	Primary and Secondary Windings	1500 V (rms)	1 Sec	Primary Winding(s) and core	1500 V (rms)	1 Sec	Primary Windings	- V (rms)	- Sec	Secondary Windings	- V (rms)	- Sec	Secondary Winding(s) and core	600 V (rms)	1 Sec	<p>Test Equipment</p> <p>Manufacturer : IKD Corp. Model : 2011 Output Voltage : AC 0 ~ 5 KV Output Capacity : AC 500 VA</p> <p>Effective Date : 18-Dec-02 Format No. FM-QA02-S203 Rev.02</p>			
Test Voltage Applied Between	Test Voltage	Time																											
Primary and Secondary Windings	1500 V (rms)	1 Sec																											
Primary Winding(s) and core	1500 V (rms)	1 Sec																											
Primary Windings	- V (rms)	- Sec																											
Secondary Windings	- V (rms)	- Sec																											
Secondary Winding(s) and core	600 V (rms)	1 Sec																											

ตารางที่ 7.4 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลง 3A-3E ที่การทดสอบแรงด้วยอุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส

Customer	SHARP CORPORATION CO.,LTD. (MICROWAVE OVEN)			Inspection Record and Certificate of Compliance			Model	RTRNPA110DREO-T	Date		
				Sampling Quantity	5 Pcs.	Judgement	Designation	Control No. 115300244	Temp	°C Humidity	%
Lot Size	Lot No.						PASSED / FAILED		Approved by	Checked by	Tested by
Inspection Item	No Load Current	No Load Loss	No Load Voltage S1	Test of polarity 1-3 Connect (2-4)	DC Resistance at 20 °C		Induce Voltage 400 Hz	Noise			
	Input 120 Vac 60 Hz								P (1-2)	S (3-4)	
Level Spec	55 mA	1.70 W	15.0 Vac ± 3 %	135.0 Vac ± 8.0 V	540.0 Ω ± 20 %	13.0 Ω ± 15 %	480 Vac 15 Sec	None			
No.	Maximum	Maximum	Max 15.45 Min 14.55	Max 143.0 Min 127.0	Max 648.0 Min 432.0	Max 14.95 Min 11.05					
1A	23.0	482	14.31		496.2	12.77			OK / NG	OK / NG	
2B	47.5	2.84	6.87		524.9	12.69			OK / NG	OK / NG	
3C	55.8	2.25	1.60		533.0	12.70			OK / NG	OK / NG	
4D	22.6	0.93	15.09		532.7	12.68			OK / NG	OK / NG	
5E	28.9	2.84	10.26		509.3	12.70			OK / NG	OK / NG	
Inspection Item	Dielectric Withstand Test			Insulation Resistance			Dimension	Pin Length	Appearance		
	P-S	P-E	S-E	P-S	P-E	S-E	33.0 mm. Max	4.00 mm. ± 1.0 mm.			
Level Spec	2500 Vrms 1 Min	1240 Vrms 1 Min	500 Vrms 1 Min	500 Vdc	500 Vdc	500 Vdc					
No.	Cut off 3 mA	Cut off 3 mA	Cut off 3 mA	100 MΩ Minimum	100 MΩ Minimum	100 MΩ Minimum		Max 5.00 Min 3.00			
1	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG		
2	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG		
3	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG		
4	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG		
5	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG		

100% Factor Dielectric Strength Test at the Completion of Manufacture each Transformer shall be subjected to the following Dielectric strength test at 3 mA cut off setting
All transformer of above lot size tested and the accepted transformer were supplied to the customer

Test Voltage Applied Between	Test Voltage	Time
Primary and Secondary Windings	1500 V (rms)	1 Sec
Primary Winding(s) and core	1500 V (rms)	1 Sec
Primary Windings	- V (rms)	- Sec
Secondary Windings	- V (rms)	- Sec
Secondary Winding(s) and core	600 V (rms)	1 Sec

Test Equipment

Manufacturer : IKD Corp.
Model : 2011
Output Voltage : AC 0 ~ 5 KV
Output Capacity : AC 500 VA

Effective Date : 18-Dec-02
Format No. FM-QA02-S203 Rev.02

ตารางที่ 7.5 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลง 1A-1E ที่การทดสอบแรงด้วยอุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส

Customer	SHARP CORPORATION CO.,LTD. (MICROWAVE OVEN)			Inspection Record and Certificate of Compliance			Model	RTRNPA110DREO-T	Date		
				Sampling Quantity	5 Pcs.	Judgement	Designation	Control No. 115300244	Temp	°C Humidity	%
Lot Size		Lot No.					PASSED / FAILED		Approved by	Checked by	Tested by
Inspection Item	No Load Current	No Load Loss	No Load Voltage S1	Test of polarity 1-3 Connect (2-4)			DC Resistance at 20 °C			Induce Voltage 400 Hz	Noise
	Input 120 Vac 60 Hz						P (1-2)	S (3-4)			
Level Spec	55 mA	1.70 W	15.0 Vac ± 3 %	135.0 Vac ± 8.0 V			540.0 Ω ± 20 %	13.0 Ω ± 15 %		480 Vac 15 Sec	None
No.	Maximum	Maximum	Max 15.45 Min 14.55	Max 143.0 Min 127.0			Max 648.0 Min 432.0	Max 14.95 Min 11.05			
F 2A	40.5	2.25	6.82				473.7	12.74		OK / NG	OK / NG
F 2B	60.5	3.91	6.79				506.9	12.72		OK / NG	OK / NG
F 2C	29.6	1.71	6.92				521.9	12.70		OK / NG	OK / NG
S 4 2D	21.5	0.89	15.10				529.7	12.67		OK / NG	OK / NG
F 2E	91.0	5.60	8.18				467.3	12.69		OK / NG	OK / NG
Inspection Item	Dielectric Withstand Test			Insulation Resistance			Dimension	Pin Length	Appearance		
	P-S	P-E	S-E	P-S	P-E	S-E	33.0 mm. Max	4.00 mm. ± 1.0 mm.			
Level Spec	2500 Vrms 1 Min	1240 Vrms 1 Min	500 Vrms 1 Min	500 Vdc	500 Vdc	500 Vdc					
No.	Cut off 3 mA	Cut off 3 mA	Cut off 3 mA	100 MΩ Minimum	100 MΩ Minimum	100 MΩ Minimum		Max 5.00 Min 3.00			
1	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG		
2	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG		
3	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG		
4	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG		
5	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG		

100% Factor Dielectric Strength Test at the Completion of Manufacture each Transformer shall be subjected to the following Dielectric strength test at 3 mA cut off setting
All transformer of above lot size tested and the accepted transformer were supplied to the customer

Test Voltage Applied Between	Test Voltage	Time
Primary and Secondary Windings	1500 V (rms)	1 Sec
Primary Winding(s) and core	1500 V (rms)	1 Sec
Primary Windings	- V (rms)	- Sec
Secondary Windings	- V (rms)	- Sec
Secondary Winding(s) and core	600 V (rms)	1 Sec

Test Equipment

Manufacturer : IKD Corp.
 Model : 2011
 Output Voltage : AC 0 - 5 KV
 Output Capacity : AC 500 VA

Effective Date : 18-Dec-02
 Format No. FM-QA02-S203 Rev.02

ตารางที่ 7.6 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลง 2A-2E ที่การทดสอบเร่งด้วยอุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส

Customer	SHARP CORPORATION CO.,LTD. (MICROWAVE OVEN)			Inspection Record and Certificate of Compliance			Model	RTRNPA110DREO-T	Date		
							Designation	Control No. 115300244	Temp	°C Humidity %	
Lot Size		Lot No.		Sampling Quantity		Judgement	PASSED / FAILED		Approved by	Checked by	Tested by
Inspection Item	No Load Current	No Load Loss	No Load Voltage S1		Test of polarity 1-3 Connect (2-4)		DC Resistance at 20 °C			Induce Voltage 400 Hz	Noise
	Input 120 Vac 60 Hz						P (1-2)	S (3-4)		480 Vac	15 Sec
Level Spec	55 mA	1.70 W	15.0 Vac ± 3 %		135.0 Vac ± 8.0 V		540.0 Ω ± 20 %	13.0 Ω ± 15 %		480 Vac	None
No.	Maximum	Maximum	Max 15.45 Min 14.55		Max 143.0 Min 127.0		Max 648.0 Min 432.0	Max 14.95 Min 11.05			
F 1A	83.5	1.92	7.12				484.8	12.74		OK / NG	OK / NG
F 2B	30.6	2.29	9.29				511.8	12.71		OK / NG	OK / NG
F 3C	121.0	7.69	9.44				488.3	12.71		OK / NG	OK / NG
F 4D	89.5	6.64	9.35				484.4	12.72		OK / NG	OK / NG
F 5E	95.9	6.99	9.44				494.9	12.68		OK / NG	OK / NG
Inspection Item	Dielectric Withstand Test			Insulation Resistance			Dimension	Pin Length		Appearance	
	P-S	P-E	S-E		P-S	P-E	S-E	33.0 mm. Max	4.00 mm. ± 1.0 mm.		
Level Spec	2500 Vrms 1 Min	1240 Vrms 1 Min	500 Vrms 1 Min		500 Vdc	500 Vdc	500 Vdc				
No.	Cut off 3 mA	Cut off 3 mA	Cut off 3 mA		100 MΩ Minimum	100 MΩ Minimum	100 MΩ Minimum		Max 5.00 Min 3.00		
1	OK / NG	OK / NG	OK / NG		OK / NG	OK / NG	OK / NG				OK / NG
2	OK / NG	OK / NG	OK / NG		OK / NG	OK / NG	OK / NG				OK / NG
3	OK / NG	OK / NG	OK / NG		OK / NG	OK / NG	OK / NG				OK / NG
4	OK / NG	OK / NG	OK / NG		OK / NG	OK / NG	OK / NG				OK / NG
5	OK / NG	OK / NG	OK / NG		OK / NG	OK / NG	OK / NG				OK / NG

100% Factor Dielectric Strength Test at the Completion of Manufacture each Transformer shall be subjected to the following Dielectric strength test at 3 mA cut off setting
All transformer of above lot size tested and the accepted transformer were supplied to the customer

Test Voltage Applied Between	Test Voltage	Time
Primary and Secondary Windings	1500 V (rms)	1 Sec
Primary Winding(s) and core	1500 V (rms)	1 Sec
Primary Windings	- V (rms)	- Sec
Secondary Windings	- V (rms)	- Sec
Secondary Winding(s) and core	600 V (rms)	1 Sec

Test Equipment

Manufacturer : IKD Corp.
Model : 2011
Output Voltage : AC 0 - 5 KV
Output Capacity : AC 500 VA

Effective Date : 18-Dec-02
Format No. FM-QA02-S203 Rev.02

ตารางที่ 7.7 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลง 1A-1E ที่การทดสอบแรงด้วยอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

Customer	SHARP CORPORATION CO.,LTD. (MICROWAVE OVEN)			Inspection Record and Certificate of Compliance			Model Designation	RTRNPA110DREO-T Control No. 115300244	Date																				
Lot Size	Lot No.	Lot No.	Lot No.	Sampling Quantity	5 Pcs.	Judgement	PASSED / FAILED		Approved by	Temp °C Humidity %																			
Inspection Item	No Load Current	No Load Loss	No Load Voltage S1		Test of polarity 1-3 Connect (2-4)		DC Resistance at 20 °C			Induce Voltage 400 Hz																			
	Input 120 Vac 60 Hz						P (1-2)	S (3-4)		Noise																			
Level Spec	55 mA	1.70 W	15.0 Vac ± 3 %		135.0 Vac ± 8.0 V		540.0 Ω ± 20 %	13.0 Ω ± 15 %		480 Vac 15 Sec	None																		
No.	Maximum	Maximum	Max 15.45 Min 14.55		Max 143.0 Min 127.0		Max 648.0 Min 432.0	Max 14.95 Min 11.05																					
F 1 2A	60.0	4.44	9.92				513	12.72		OK / NG	OK / NG																		
F 2 2B	55.7	4.15	9.87				536.554	12.74		OK / NG	OK / NG																		
F 3 2C	21.8	1.31	9.94				527	12.75		OK / NG	OK / NG																		
F 4 2D	21.1	1.88	14.74				500.1	12.67		OK / NG	OK / NG																		
F 5 2E	29.4	4.21	8.49				577.7	12.72		OK / NG	OK / NG																		
Inspection Item	Dielectric Withstand Test			Insulation Resistance			Dimension	Pin Length	Appearance																				
Level Spec	P-S 2500 Vrms 1 Min	P-E 1240 Vrms 1 Min	S-E 500 Vrms 1 Min		P-S 500 Vdc	P-E 500 Vdc	S-E 500 Vdc	33.0 mm. Max	4.00 mm. ± 1.0 mm.																				
No.	Cut off 3 mA	Cut off 3 mA	Cut off 3 mA		100 MΩ Minimum	100 MΩ Minimum	100 MΩ Minimum		Max 5.00 Min 3.00																				
1	OK / NG	OK / NG	OK / NG		OK / NG	OK / NG	OK / NG				OK / NG																		
2	OK / NG	OK / NG	OK / NG		OK / NG	OK / NG	OK / NG				OK / NG																		
3	OK / NG	OK / NG	OK / NG		OK / NG	OK / NG	OK / NG				OK / NG																		
4	OK / NG	OK / NG	OK / NG		OK / NG	OK / NG	OK / NG				OK / NG																		
5	OK / NG	OK / NG	OK / NG		OK / NG	OK / NG	OK / NG				OK / NG																		
<p>100% Factor Dielectric Strength Test at the Completion of Manufacture each Transformer shall be subjected to the following Dielectric strength test at <u>3</u> mA cut off setting All transformer of above lot size tested and the accepted transformer were supplied to the customer</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Test Voltage Applied Between</th> <th>Test Voltage</th> <th>Time</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Primary and Secondary Windings</td> <td>1500 V (rms)</td> <td>1 Sec</td> </tr> <tr> <td>Primary Winding(s) and core</td> <td>1500 V (rms)</td> <td>1 Sec</td> </tr> <tr> <td>Primary Windings</td> <td>- V (rms)</td> <td>- Sec</td> </tr> <tr> <td>Secondary Windings</td> <td>- V (rms)</td> <td>- Sec</td> </tr> <tr> <td>Secondary Winding(s) and core</td> <td>600 V (rms)</td> <td>1 Sec</td> </tr> </tbody> </table>										Test Voltage Applied Between	Test Voltage	Time	Primary and Secondary Windings	1500 V (rms)	1 Sec	Primary Winding(s) and core	1500 V (rms)	1 Sec	Primary Windings	- V (rms)	- Sec	Secondary Windings	- V (rms)	- Sec	Secondary Winding(s) and core	600 V (rms)	1 Sec	<p>Test Equipment</p> <p>Manufacturer : IKD Corp. Model : 2011 Output Voltage : AC 0 - 5 KV Output Capacity : AC 500 VA</p> <p>Effective Date : 18-Dec-02 Format No. FM-QA02-S203 Rev.02</p>	
Test Voltage Applied Between	Test Voltage	Time																											
Primary and Secondary Windings	1500 V (rms)	1 Sec																											
Primary Winding(s) and core	1500 V (rms)	1 Sec																											
Primary Windings	- V (rms)	- Sec																											
Secondary Windings	- V (rms)	- Sec																											
Secondary Winding(s) and core	600 V (rms)	1 Sec																											

ตารางที่ 7.8 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลง 2A-2E ที่การทดสอบเร่งด้วยอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

Customer	SHARP CORPORATION CO.,LTD. (MICROWAVE OVEN)			Inspection Record and Certificate of Compliance			Model	RTRNPA110DREO-T	Date	
	Lot Size	Lot No.		Sampling Quantity	5 Pcs.	Judgement	Designation	Control No. 115300244	Temp °C	Humidity %
Inspection Item	No Load Current	No Load Loss	No Load Voltage S1		Test of polarity 1-3 Connect (2-4)		DC Resistance at 20 °C		Induce Voltage 400 Hz	Noise
	Input 120 Vac 60 Hz						P (1-2)	S (3-4)	480 Vac 15 Sec	None
Level Spec	55 mA	1.70 W	15.0 Vac ± 3 %		135.0 Vac ± 8.0 V		540.0 Ω ± 20 %	13.0 Ω ± 15 %		
No.	Maximum	Maximum	Max 15.45 Min 14.55		Max 143.0 Min 127.0		Max 648.0 Min 432.0	Max 14.95 Min 11.05		
F 1 3A	29.5	2.25	10.47				502	12.74	OK / NG	OK / NG
S 2 3B	24.2	1.52	15.15				528.2	12.80	OK / NG	OK / NG
F 3 3C	24.1	2.10	11.14				498.5	12.71	OK / NG	OK / NG
S 4 3D	21.5	0.89	15.11				539.7	12.74	OK / NG	OK / NG
S 5 3E	20.1	0.85	15.14				527.5	12.72	OK / NG	OK / NG
Inspection Item	Dielectric Withstand Test			Insulation Resistance			Dimension	Pin Length	Appearance	
	P-S	P-E	S-E		P-S	P-E	S-E	33.0 mm. Max	4.00 mm. ± 1.0 mm.	
Level Spec	2500 Vrms 1 Min	1240 Vrms 1 Min	500 Vrms 1 Min		500 Vdc	500 Vdc	500 Vdc			
No.	Cut off 3 mA	Cut off 3 mA	Cut off 3 mA		100 MΩ Minimum	100 MΩ Minimum	100 MΩ Minimum		Max 5.00 Min 3.00	
1	OK / NG	OK / NG	OK / NG		OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG
2	OK / NG	OK / NG	OK / NG		OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG
3	OK / NG	OK / NG	OK / NG		OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG
4	OK / NG	OK / NG	OK / NG		OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG
5	OK / NG	OK / NG	OK / NG		OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG
100% Factor Dielectric Strength Test at the Completion of Manufacture each Transformer shall be subjected to the following Dielectric strength test at 3 mA cut off setting All transformer of above lot size tested and the accepted transformer were supplied to the customer								Test Equipment		
Test Voltage Applied Between				Test Voltage	Time					
Primary and Secondary Windings				1500 V (rms)	1 Sec					
Primary Winding(s) and core				1500 V (rms)	1 Sec					
Primary Windings				- V (rms)	- Sec					
Secondary Windings				- V (rms)	- Sec					
Secondary Winding(s) and core				600 V (rms)	1 Sec					
Effective Date : 18-Dec-02								Format No. FM-QA02-S203 Rev.02		

ตารางที่ 7.9 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลง 3A-3E ที่การทดสอบเร่งด้วยอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

Customer	SHARP CORPORATION CO.,LTD. (MICROWAVE OVEN)			Inspection Record and Certificate of Compliance			Model	RTRNPA110DREO-T	Date																				
	Lot Size	Lot No.		Sampling Quantity	5 Pcs.	Judgement	Designation	Control No. 115300244	Temp	°C Humidity	%																		
Inspection Item	No Load Current	No Load Loss	No Load Voltage S1		Test of polarity 1-3 Connect (2-4)		PASSED / FAILED		Approved by	Checked by	Tested by																		
Level Spec	Input 120 Vac 60 Hz				135.0 Vac ± 8.0 V		DC Resistance at 20 °C			Induce Voltage 400 Hz 480 Vac 15 Sec	Noise																		
	No.	Maximum	Maximum	Max 15.45 Min 14.55		Max 143.0 Min 127.0	Max 648.0 Min 432.0	Max 14.95 Min 11.05																					
F 1A	102	8.28	10.1				439	10.47		OK / NG	OK / NG																		
F 2B	702	2.55	4.52				345	12.80		OK / NG	OK / NG																		
F 3C	314	3.18	5.43				429	12.71		OK / NG	OK / NG																		
F 4D	400	1.72	6.36				444	10.44		OK / NG	OK / NG																		
F 5E	29	3.42	5.33				481	12.71		OK / NG	OK / NG																		
Inspection Item	Dielectric Withstand Test			Insulation Resistance			Dimension	Pin Length	Appearance																				
	P-S	P-E	S-E	P-S	P-E	S-E	33.0 mm. Max	4.00 mm. ± 1.0 mm.																					
Level Spec	2500 Vrms 1 Min	1240 Vrms 1 Min	500 Vrms 1 Min	500 Vdc	500 Vdc	500 Vdc																							
No.	Cut off 3 mA	Cut off 3 mA	Cut off 3 mA	100 MΩ Minimum	100 MΩ Minimum	100 MΩ Minimum		Max 5.00 Min 3.00																					
1	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG																				
2	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG																				
3	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG																				
4	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG																				
5	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG			OK / NG																				
<p>100% Factor Dielectric Strength Test at the Completion of Manufacture each Transformer shall be subjected to the following Dielectric strength test at <u>3</u> mA cut off setting All transformer of above lot size tested and the accepted transformer were supplied to the customer</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Test Voltage Applied Between</th> <th>Test Voltage</th> <th>Time</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Primary and Secondary Windings</td> <td>1500 V (rms)</td> <td>1 Sec</td> </tr> <tr> <td>Primary Winding(s) and core</td> <td>1500 V (rms)</td> <td>1 Sec</td> </tr> <tr> <td>Primary Windings</td> <td>- V (rms)</td> <td>- Sec</td> </tr> <tr> <td>Secondary Windings</td> <td>- V (rms)</td> <td>- Sec</td> </tr> <tr> <td>Secondary Winding(s) and core</td> <td>600 V (rms)</td> <td>1 Sec</td> </tr> </tbody> </table>								Test Voltage Applied Between	Test Voltage	Time	Primary and Secondary Windings	1500 V (rms)	1 Sec	Primary Winding(s) and core	1500 V (rms)	1 Sec	Primary Windings	- V (rms)	- Sec	Secondary Windings	- V (rms)	- Sec	Secondary Winding(s) and core	600 V (rms)	1 Sec	<p>Test Equipment</p> <p>Manufacturer : IKD Corp. Model : 2011 Output Voltage : AC 0-5 KV Output Capacity : AC 500 VA</p> <p>Effective Date : 18-Dec-02 Format No. FM-QA02-S203 Rev.02</p>			
Test Voltage Applied Between	Test Voltage	Time																											
Primary and Secondary Windings	1500 V (rms)	1 Sec																											
Primary Winding(s) and core	1500 V (rms)	1 Sec																											
Primary Windings	- V (rms)	- Sec																											
Secondary Windings	- V (rms)	- Sec																											
Secondary Winding(s) and core	600 V (rms)	1 Sec																											

ตารางที่ 7.10 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลง 1A-1E ที่การทดสอบแรงด้วยอุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส

Customer	SHARP CORPORATION CO.,LTD. (MICROWAVE OVEN)			Inspection Record and Certificate of Compliance			Model	RTRNPA110DREO-T	Date		
							Designation	Control No. 115300244	Temp	°C Humidity %	
Lot Size		Lot No.		Sampling Quantity		Judgement	PASSED / FAILED		Approved by	Checked by	Tested by
Inspection Item	No Load Current	No Load Loss	No Load Voltage S1		Test of polarity 1-3 Connect (2-4)		DC Resistance at 20 °C			Induce Voltage 400 Hz	Noise
	Input 120 Vac 60 Hz						P (1-2)	S (3-4)		480 Vac 15 Sec	
Level Spec	55 mA	1.70 W	15.0 Vac ± 3 %		135.0 Vac ± 8.0 V		540.0 Ω ± 20 %	13.0 Ω ± 15 %			None
No.	Maximum	Maximum	Max 15.45 Min 14.55		Max 143.0 Min 127.0		Max 648.0 Min 432.0	Max 14.95 Min 11.05			
2A	56.27	5.09	16.13				430	13.02		OK / NG	OK / NG
2B								13.93		OK / NG	OK / NG
2C	60.7	9.41	14.89				495	13.72		OK / NG	OK / NG
2D			15.4				525	13.73		OK / NG	OK / NG
2E	70.6	6.92	12.0				513	12.73		OK / NG	OK / NG
Inspection Item	Dielectric Withstand Test			Insulation Resistance			Dimension	I'in Length		Appearance	
Level Spec	2500 Vrms 1 Min	1240 Vrms 1 Min	500 Vrms 1 Min	P-S 500 Vdc	P-E 500 Vdc	S-E 500 Vdc	33.0 mm. Max	4.00 mm. ± 1.0 mm.			
No.	Cut off 3 mA	Cut off 3 mA	Cut off 3 mA	100 MΩ Minimum	100 MΩ Minimum	100 MΩ Minimum		Max 5.00 Min 3.00			
1	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG				OK / NG	
2	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG				OK / NG	
3	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG				OK / NG	
4	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG				OK / NG	
5	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG	OK / NG				OK / NG	

100% Factor Dielectric Strength Test at the Completion of Manufacture each Transformer shall be subjected to the following Dielectric strength test at 3 mA cut off setting
All transformer of above lot size tested and the accepted transformer were supplied to the customer

Test Voltage Applied Between	Test Voltage	Time
Primary and Secondary Windings	1500 V (rms)	1 Sec
Primary Winding(s) and core	1500 V (rms)	1 Sec
Primary Windings	- V (rms)	- Sec
Secondary Windings	- V (rms)	- Sec
Secondary Winding(s) and core	600 V (rms)	1 Sec

Test Equipment

Manufacturer : IKD Corp.
Model : 2011
Output Voltage : AC 0 - 5 KV
Output Capacity : AC 500 VA

Effective Date : 18-Dec-02
Format No. FM-QA02-S203 Rev.02

ตารางที่ 7.11 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลง 2A-2E ที่การทดสอบแรงด้วยอุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส

Customer	SHARP CORPORATION CO.,LTD. (MICROWAVE OVEN)			Inspection Record and Certificate of Compliance			Model	RTRNPA110DREO-T	Date		
				Sampling Quantity	5 Pcs.	Judgement	Designation	Control No. 115300244	Temp	°C Humidity	%
Lot Size		Lot No.					PASSED / FAILED		Approved by	Checked by	Tested by
Inspection Item	No Load Current	No Load Loss	No Load Voltage S1		Test of polarity 1-3 Connect (2-4)		DC Resistance at 20 °C			Induce Voltage 400 Hz	Noise
Level Spec	Input 120 Vac 60 Hz						P (1-2)	S (3-4)		480 Vac	None
	55 mA	1.70 W	15.0 Vac ± 3 %		135.0 Vac ± 8.0 V		540.0 Ω ± 20 %	13.0 Ω ± 15 %		15 Sec	
No.	Maximum	Maximum	Max 15.45 Min 14.55		Max 143.0 Min 127.0		Max 648.0 Min 432.0	Max 14.95 Min 11.05			
1 3A	30.9	1.72	14.80				531	13.76		OK / NG	OK / NG
2 3B	21.4	0.88	15.10				529	12.80		OK / NG	OK / NG
3 3C	31.2	1.83	14.19				505	12.77		OK / NG	OK / NG
4 3D	40.5	2.81	8.51				516	12.70		OK / NG	OK / NG
5 3E	76.0	6.22	8.71				494	12.74		OK / NG	OK / NG
Inspection Item	Dielectric Withstand Test			Insulation Resistance			Dimension	Pin Length	Appearance		
	P-S	P-E	S-E								
Level Spec	2500 Vrms 1 Min	1240 Vrms 1 Min	500 Vrms 1 Min		P-S 500 Vdc	P-E 500 Vdc	S-E 500 Vdc	33.0 mm. Max	4.00 mm. ± 1.0 mm.		
	Cut off 3 mA	Cut off 3 mA	Cut off 3 mA		100 MΩ Minimum	100 MΩ Minimum	100 MΩ Minimum		Max 5.00 Min 3.00		
No.											
1	OK / NG	OK / NG	OK / NG		OK / NG	OK / NG	OK / NG				OK / NG
2	OK / NG	OK / NG	OK / NG		OK / NG	OK / NG	OK / NG				OK / NG
3	OK / NG	OK / NG	OK / NG		OK / NG	OK / NG	OK / NG				OK / NG
4	OK / NG	OK / NG	OK / NG		OK / NG	OK / NG	OK / NG				OK / NG
5	OK / NG	OK / NG	OK / NG		OK / NG	OK / NG	OK / NG				OK / NG
100% Factor Dielectric Strength Test at the Completion of Manufacture each Transformer shall be subjected to the following Dielectric strength test at 3 mA cut off setting All transformer of above lot size tested and the accepted transformer were supplied to the customer									Test Equipment Manufacturer : IKD Corp. Model : 2011 Output Voltage : AC 0 - 5 KV Output Capacity : AC 500 VA Effective Date : 18-Dec-02 Format No. FM-QA02-S203 Rev.02		
Test Voltage Applied Between				Test Voltage	Time						
Primary and Secondary Windings				1500 V (rms)	1 Sec						
Primary Winding(s) and core				1500 V (rms)	1 Sec						
Primary Windings				- V (rms)	- Sec						
Secondary Windings				- V (rms)	- Sec						
Secondary Winding(s) and core				600 V (rms)	1 Sec						

ตารางที่ 7.12 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลง 3A-3E ที่การทดสอบแรงด้วยอุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส

DC Resistance at 20°C					
Spec Item	Survive or Fail	P (1-2) 540.0 ± 20% Min 432.0 / Max 648.0		S (3-4) 13.0 ± 15% Min 11.05 / Max 14.95	
		Experiment	QA	Experiment	QA
		170°C			
1A	S	508.5	536.1	13.20	12.69
1B	S	501.7	541.3	13.19	12.69
1C	F	315.5	470.8	13.55	12.76
1D	F	393.3	421.9	13.24	12.76
1E	F	383.3	471.1	13.36	12.74
2A	F	328.7	475.5	13.33	12.69
2B	S	541.1	539.9	13.24	12.73
2C	F	300.6	441.5	13.28	12.71
2D	F	414.5	417.4	13.29	12.68
2E	S	491.9	541.9	13.27	12.72
3A	S	549.0	535.0	13.20	12.73
3B	S	547.3	532.8	13.21	12.70
3C	S	542.7	528.0	13.17	12.68
3D	F	406.5	409.3	13.22	12.70
3E	F	433.5	496.3	13.29	12.74
175°C					
1A	F	472.7	496.2	13.19	12.71
1B	F	470.8	524.9	13.13	12.69
1C	F	398.2	533.0	13.15	12.71
1D	S	546.0	532.7	13.20	12.68
1E	F	480.2	509.3	13.36	12.70
2A	F	452.0	473.7	13.24	12.74
2B	F	461.3	506.7	13.23	12.72
2C	F	500.8	521.7	13.22	12.70
2D	S	543.0	529.7	13.18	12.67
2E	F	440.7	467.3	13.20	12.69
180°C					
1A	F	391.5	484.8	13.17	12.74
1B	F	416.6	511.8	13.18	12.71
1C	F	351.5	488.3	13.18	12.71
1D	F	390.5	484.4	13.18	12.72
1E	F	431.3	494.9	13.16	12.68
2A	F	425.1	513.0	13.16	12.72
2B	F	476.8	536.0	13.18	12.74
2C	F	447.9	527.0	13.20	12.75
2D	F	487.5	500.1	13.17	12.67
2E	F	447.5	517.1	13.16	12.72
3A	F	429.0	502.0	13.18	12.74
3B	S	529.4	528.2	13.24	12.80
3C	F	416.6	498.5	13.16	12.71
3D	S	553.0	539.7	13.20	12.74
3E	S	540.4	527.5	13.20	12.72
190°C					
1A	F	284.4	439	13.17	12.47
1B	F	190.1	345	13.20	12.80
1C	F	397.7	429	13.13	12.71
1D	F	308.8	444	13.12	12.44
1E	F	345.1	481	13.14	12.71
2A	F	417.6	430	13.11	13.02
2B	F	192.9	-	13.09	12.95
2C	F	434.5	495	13.11	12.72
2D	F	401.8	525	13.19	12.73
2E	F	441.6	513	13.15	12.73
3A	F	398.3	531	13.09	12.74
3B	S	537.6	529	13.18	12.80
3C	F	455.8	505	13.16	12.77
3D	F	401.0	516	13.09	12.70
3E	F	352.8	484	13.20	12.74

ตารางที่ 7.13 ตารางเปรียบเทียบค่า DCR ที่ได้จากการทดลองและจากการตรวจสอบที่บริษัท
ผู้ผลิตหม้อแปลงทดสอบ

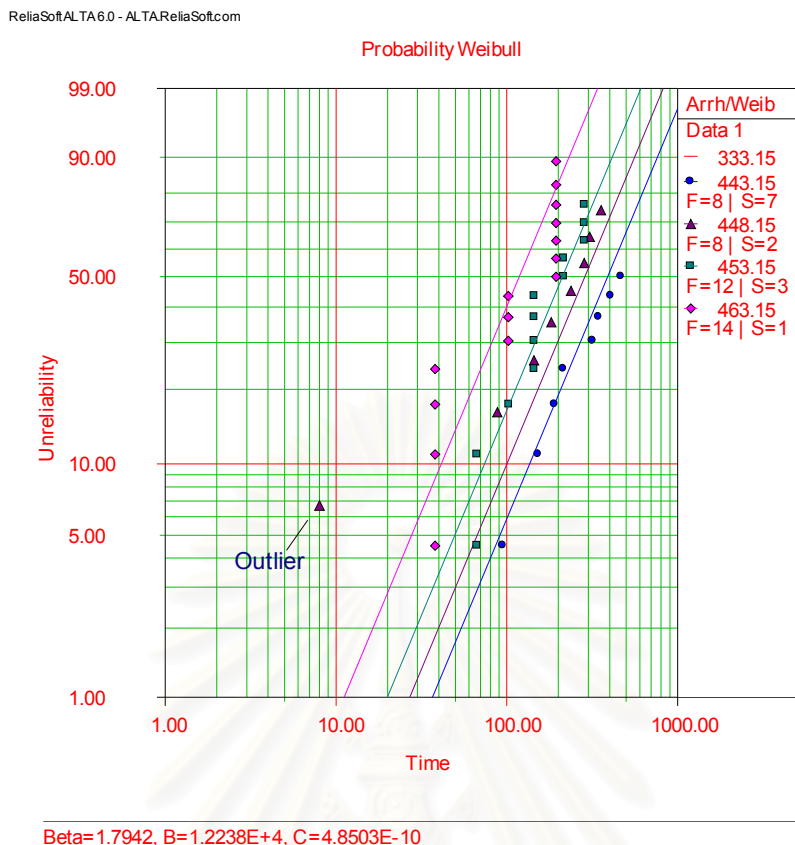
จากการทดสอบเร่งด้วยอุณหภูมิ หม้อแปลงที่เกิดความล้มเหลว เมื่อตรวจวัดด้วยดิฟเฟอเรนเชียลดิเตอร์จะพบว่าค่า DCR ของขดลวดด้านปฐมภูมิต่ำกว่าในข้อกำหนดคุณลักษณะทั้งหมด และเมื่อนำมาตรวจสอบที่บริษัท ไทยตามูชิ อิเล็กทริก พบว่าหม้อแปลงที่เกิดความล้มเหลวบางตัวยังมีค่า DCR อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ จำกัด ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบในตารางที่ 7.13 ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องจากการกินตัวของฉนวน แต่ทั้งนี้ค่า DCR ดังกล่าวก็มีค่าแตกต่างจากค่ากำหนดอย่างมีนัยสำคัญ ค่า DCR ที่ต่ำลงนี้เกิดจากการเสื่อมของฉนวนที่เคลือบเส้นลวดปฐมภูมิ จึงทำให้เกิดการลัดวงจรของขดลวดปฐมภูมิ ในการทดสอบเร่งเมื่อเกิดการลัดวงจรด้านปฐมภูมิขึ้น กระแสปฐมภูมิจะมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้กระแสทางด้านทุติยภูมิสูงขึ้นจนกระทั่งถึงขีดจำกัดของฟิวส์ป้องกันกระแสเกิน ฟิวส์ของทั้งสองด้านจึงขาดเมื่อทำการตรวจวัดกระแสด้านทุติยภูมิ จึงทำให้ทราบได้ว่าเกิดความล้มเหลวขึ้นแล้ว

7.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลอายุที่ได้จากการทดสอบเร่งด้วยอุณหภูมิจะถูกนำมาเข้าคู่กับแบบจำลองอาร์เรเนิส-ไวบูลล์ แบบจำลองอาร์เรเนิส-ล็อกปกติ และแบบจำลองอาร์เรเนิส-เอ็กซ์โปเนนเชียล ซึ่งมีรูปแบบสมการแสดงไว้ในหัวข้อ 3.3 โดยจะเลือกแบบจำลองซึ่งให้ค่าฟังก์ชันความควรจะเป็นสูงสุด และประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองดังกล่าว วิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ALTA 6.0 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

พิจารณาลักษณะการกระจายตัวของข้อมูล พบว่าข้อมูลอายุอันดับแรกที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส มีค่าน้อยกว่าปกติ จึงนำมาพล็อตลงบนกราฟของแบบจำลองไวบูลล์เพื่อตรวจสอบว่าข้อมูลค่าดังกล่าวเป็นค่าที่อยู่นอกเขตการกระจายของข้อมูล (Outlier) หรือไม่ กราฟแสดงในรูปที่ 7.7

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7.13 กราฟการแจกแจงแบบไวบูลล์และค่าที่อยู่นอกเขตการกระจายของข้อมูล

จากรูปที่ 7.13 พบว่าข้อมูลอายุอันดับแรกของอุณหภูมิ 175°C เป็นค่าที่อยู่นอกเขตการกระจายของข้อมูล ดังนั้นในการวิเคราะห์ข้อมูลต่อไปจะทำการละเลยข้อมูลตัวนี้เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของการประมาณ เมื่อใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ALTA 6.0 วิเคราะห์ข้อมูล ได้ค่าฟังก์ชันความควรจะเป็นและพารามิเตอร์ของแบบจำลองดังนี้

แบบจำลองอาร์เรเนียส-ไวบูลล์

$$\text{Beta} = 2.00647665208256$$

$$B = 12099.4352253497$$

$$C = 6.6708387283726E-10$$

$$\text{Likelihood Function} = -259.892507309205$$

แบบจำลองอาร์เรเน็ส-เอ็กซ์โพเนนเชียล

$$B = 15112.8039179198$$

$$C = 9.05664786572134E-13$$

$$\text{Likelihood Function} = -269.982494552517$$

แบบจำลองอาร์เรเน็ส-ล็อกปกติ

$$\text{Std} = 0.684389313823108$$

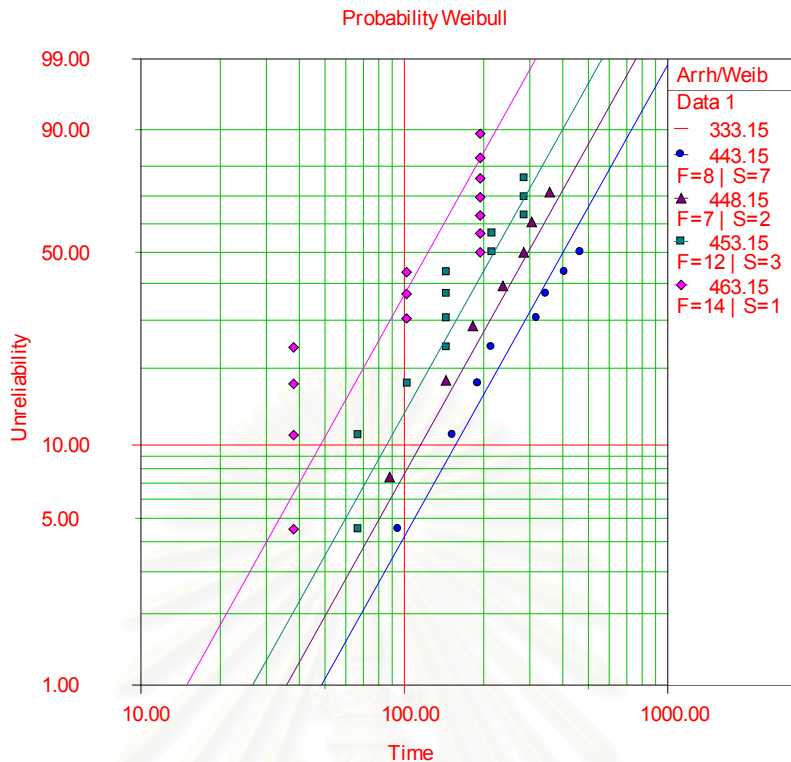
$$B = 13206.7766518659$$

$$C = 4.4933288727223E-11$$

$$\text{Likelihood Function} = -260.962896170624$$

จากการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันความควรจะเป็นพบว่า แบบจำลองอาร์เรเน็ส-ไวบูลล์มีค่าฟังก์ชันดังกล่าวสูงสุด ดังนั้นในการวิเคราะห์ข้อมูลจะใช้แบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองแสดงสมบัติทางอายุและความเชื่อถือได้ของหม้อแปลงทดสอบ โดยได้กล่าวในบทที่ 6 ว่าอายุคือจำนวนวัฏจักรที่หม้อแปลงทดสอบสามารถทำงานได้ตามปกติจนกระทั่งเกิดความล้มเหลวซึ่งมีค่า DCR ต่ำกว่าข้อกำหนดคุณลักษณะ นำข้อมูลอายุที่ละเลขค่าที่อยู่นอกเขตการกระจายมาพล็อตลงบนกราฟการแจกแจงแบบไวบูลล์ ดังแสดงในรูปที่ 7.14

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



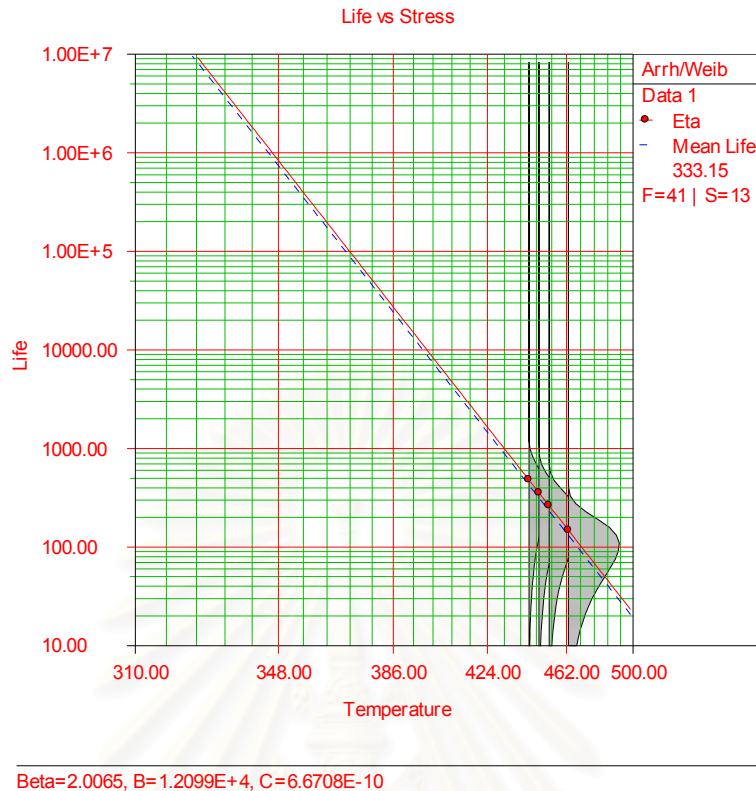
Beta=2.0065, B=1.2099E+4, C=6.6708E-10

รูปที่ 7.14 กราฟการแจกแจงแบบไวบูลล์เมื่อละเลยค่าที่อยู่นอกเขตการกระจายของข้อมูล

จากกราฟการแจกแจงแบบไวบูลล์ในรูปที่ 7.14 อ่านค่าข้อมูลอายุอายุลักษณะเฉพาะหรือพารามิเตอร์สเกล η ซึ่งคืออายุที่ความไม่น่าเชื่อถือเท่ากับร้อยละ 63.2 ของแต่ละระดับอนุกรมวิธาน รวม 4 ค่า แล้วนำไปพล็อตลงในกราฟความสัมพันธ์อาร์เรเนียสได้ดังรูปที่ 7.15

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

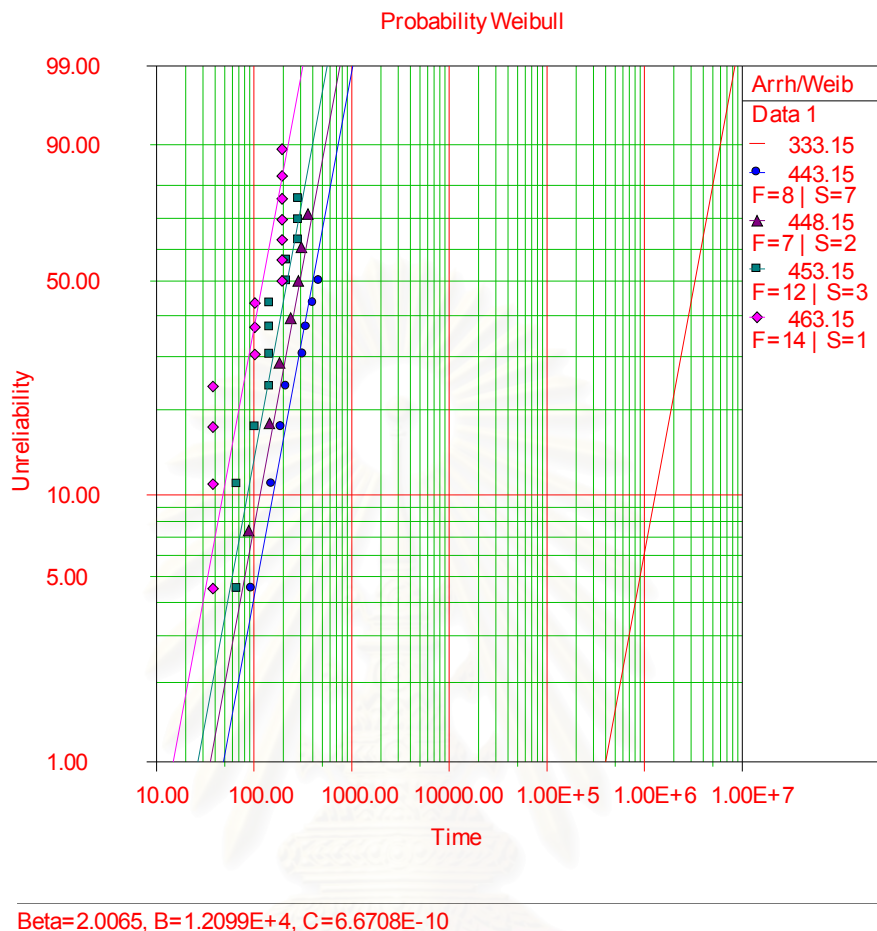
ReliaSoft ALTA6.0 - ALTAREliaSoft.com



รูปที่ 7.15 กราฟความสัมพันธ์อาร์เรเนียส

จากรูปที่ 7.15 จะได้เส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง η และอุณหภูมิในหน่วยเคลวิน ทำการประมาณนอกช่วงไปที่อุณหภูมิการใช้งานในสภาวะปกติ 60 องศาเซลเซียส หรือ 333.15 เคลวิน จะได้ค่า η แล้วนำไปพล็อตลงกราฟการแจกแจงอายุแบบไวบูลล์อีกครั้งหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 7.16

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7.16 กราฟการแจกแจงแบบไวบูลล์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 170 องศาเซลเซียส 175 องศาเซลเซียส 180 องศาเซลเซียส และ 190 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 7.16 สามารถหาอายุเฉลี่ยและอายุที่ความเชื่อถือได้ต่าง ๆ ที่สภาวะการใช้งานปกติได้ในที่นี้ อายุเฉลี่ย (Mean Life) หรือเวลาเฉลี่ยก่อนความล้มเหลว (Mean Time To Failure) [3] คิดได้ดังนี้

$$MTTF = Ce^{\frac{B}{V}} \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \tag{7.1}$$

โดยที่ $\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$ คือ ฟังก์ชันแกมมา (Gamma Function)

จากสมการ (7.1) จำนวนอายุเฉลี่ยได้เท่ากับ 3.5037×10^6 วัฏจักร นอกจากนี้ช่วงความเชื่อมั่นของอายุและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เป็นดังนี้

	ค่าประมาณ	ช่วงความเชื่อมั่นที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
β	2.0065	$1.5351 < \beta < 2.6227$
B	1.2099×10^4	$8.1335 \times 10^3 < B < 1.6065 \times 10^4$
C	6.6708×10^{-10}	$1.0628 \times 10^{-13} < C < 4.1872 \times 10^{-6}$
จำนวนวัฏจักรเฉลี่ย	3.5037×10^6	$1.4892 \times 10^5 < MTTF < 8.2433 \times 10^7$
จำนวนวัฏจักรที่ความเชื่อถือได้ร้อยละ 50	3.2937×10^6	$1.4046 \times 10^5 < L(333.15) < 7.7236 \times 10^7$
จำนวนวัฏจักรที่ความเชื่อถือได้ร้อยละ 99	3.9932×10^5	$1.8104 \times 10^4 < L(333.15) < 8.8077 \times 10^6$

ตารางที่ 7.14 ค่าประมาณและช่วงความเชื่อมั่นของพารามิเตอร์ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากตารางที่ 7.14 พบว่าที่สภาวะการใช้งานปกติหม้อแปลงสามารถทำงานได้ 3.5037×10^6 วัฏจักร และจากสมมติฐานการใช้งานซึ่งตั้งไว้ว่าเตาอบไมโครเวฟมีการใช้งานเฉลี่ย 5 ครั้งต่อวัน ดังนั้น อายุการใช้งานเฉลี่ยในสภาวะปกติโดยสมมติฐานการใช้งานเตาอบไมโครเวฟคิดได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{การใช้งาน 5 ครั้ง คิดเป็นระยะเวลา} & \quad 1 \quad \text{วัน} \\ \text{การใช้งาน } 3.5037 \times 10^6 \text{ ครั้ง คิดเป็นระยะเวลา} & \quad \frac{3.5037 \times 10^6}{5} = 7 \times 10^5 \text{ วัน} \end{aligned}$$

หรือมีอายุการใช้งานเท่ากับ 1917.8 ปี ที่ผลออกมาเช่นนี้เนื่องจากคำนวณถูกออกแบบให้รองรับการใช้งานอย่างต่อเนื่อง เมื่อคิดอายุการใช้งานโดยสมมติฐานการใช้งานที่ไม่ต่อเนื่อง จึงได้อายุการใช้งานยาวนานผิดปกติ ถ้าตั้งสมมติฐานการใช้งานให้สอดคล้องกับการใช้งานจริงที่ถูกต้องออกมาคือหม้อแปลงมีการทำงานเป็นวัฏจักรต่อเนื่องกันโดยไม่มีหยุดพัก ซึ่งวัฏจักรหนึ่งใช้เวลา 6 นาที ดังนั้นใน 1 วันจะสามารถทำงานได้ 240 ครั้ง

$$\begin{aligned} \text{การใช้งาน 240 ครั้ง คิดเป็นระยะเวลา} & \quad 1 \quad \text{วัน} \\ \text{การใช้งาน } 3.5037 \times 10^6 \text{ ครั้ง คิดเป็นระยะเวลา} & \quad \frac{3.5037 \times 10^6}{240} = 1.4600 \times 10^4 \text{ วัน} \end{aligned}$$

หรือมีอายุการใช้งานเท่ากับ 40 ปี นั่นเอง ซึ่งเป็นระยะเวลาที่ยาวนาน ทั้งนี้เพราะฉนวนของหม้อแปลงซึ่งระบุว่าเป็นชั้น A มีขีดจำกัดการใช้งานที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แต่หม้อแปลงทดสอบมีการใช้งานที่ 60 องศาเซลเซียส จึงได้อายุการใช้งานยาวนานขึ้นนั่นเอง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 8

สรุปและข้อเสนอแนะ

การทดสอบแรง คือ การทดสอบใด ๆ เพื่อเร่งให้อายุของผลิตภัณฑ์สั้นลงหรือเร่งให้เกิดความเสื่อมสภาพการใช้งานเร็วขึ้น โดยอาศัยการทดสอบผลิตภัณฑ์ภายใต้สภาวะการทำงานที่หนักกว่าสภาวะการใช้งานปกติ การประเมินอายุด้วยการทดสอบแรงเป็นวิธีหนึ่งในการประเมินความเชื่อถือได้ (Reliability) อีกทั้งเป็นวิธีทดสอบที่ทำให้ทราบถึงข้อบกพร่องต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาการทดสอบแรงหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก เนื่องจากมีฟังก์ชันการทำงานที่ไม่ซับซ้อนและมีราคาต่อหน่วยถูก ทำให้สามารถทดสอบกับกลุ่มตัวอย่างจำนวนมากได้ ความล้มเหลวในหม้อแปลงเกิดจากการเสื่อมของฉนวน โดยมีอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญ ดังนั้นจึงได้เลือกอุณหภูมิเป็นความเค้น ต่อมาได้ทำการศึกษาข้อกำหนดคุณลักษณะและส่วนประกอบของหม้อแปลงทดสอบ หม้อแปลงทดสอบเป็นส่วนประกอบหนึ่งในวงจรควบคุมการทำงานของเตาอบไมโครเวฟจึงน่าจะถูกใช้งานเหมือนกับเตาอบไมโครเวฟ จากการรวบรวมข้อมูลได้ตั้งสมมติฐานการทำงานของเตาอบไมโครเวฟว่ามีการใช้งานแบบไม่ต่อเนื่อง โดยทำงานเฉลี่ยครั้งละ 5 นาที และให้หยุดพัก 1 นาที เพื่อจำลองการใช้งานแบบไม่ต่อเนื่อง และมีความถี่ในการใช้งาน 5 ครั้งต่อวัน

ในขั้นตอนการวางแผนการทดสอบแรงได้ทำการทดสอบภาระเต็ม (Full Load Test) เพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิงในการทดสอบแรงและกำหนดขนาดของฟิวส์ ได้ทำการทดสอบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (Temperature Rise Test) พบว่าเมื่อต่อใช้งานแบบภาระเต็มที่สภาวะอยู่ตัว อุณหภูมิของหม้อแปลงทดสอบมีค่าประมาณ 60 องศาเซลเซียส ใช้อุณหภูมิค่านี้เป็นอุณหภูมิการใช้งานสำหรับประมาณค่าอายุเฉลี่ย จากนั้นทำการทดสอบแรงเชิงคุณภาพเพื่อเลือกระดับอุณหภูมิทดสอบที่เหมาะสม ได้เลือกทดสอบหม้อแปลงทดสอบที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส จนกระทั่งหม้อแปลงเกิดความล้มเหลว ได้ส่งหม้อแปลงดังกล่าวไปตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริษัทผู้ผลิตเพื่อหาเกณฑ์ในการตัดสินอายุของหม้อแปลงทดสอบ เบื้องต้นได้ทำการศึกษาวัดการคายประจุบางส่วน (Partial Discharge) และการวัดค่าความต้านทานฉนวน (Insulation Resistance) หรือ IR พบว่าการวัดการคายประจุบางส่วนและการวัดค่า IR ไม่สามารถใช้เป็นเกณฑ์ตัดสินอายุของหม้อแปลงทดสอบได้ จากการตรวจคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริษัทผู้ผลิต หม้อแปลงที่เกิดความล้มเหลวจะมีค่าความต้านทานของขดลวด (DC Resistance) หรือ DCR ด้านปฐมภูมิต่ำกว่าในข้อกำหนดคุณลักษณะจึงได้เลือกค่า DCR เป็นเกณฑ์ในการตัดสินอายุ

ตามข้อกำหนดคุณลักษณะ ค่าแรงดันพิกัดของหม้อแปลงทดสอบมีค่า 120 โวลต์ ความถี่ 60 เฮิร์ตซ์ที่ด้านปฐมภูมิ แต่ในการทดสอบไม่สามารถหาแหล่งจ่ายไฟความถี่ 60 เฮิร์ตซ์ได้ จึงใช้

แหล่งจ่ายไฟความถี่ 50 เฮิร์ตซ์แทน เพื่อป้องกันแกนเหล็กของหม้อแปลงอิ่มตัวอันเนื่องมาจากความถี่ของแหล่งจ่ายไฟลดลง การทดสอบเร่งจะจ่ายไฟแก่ด้านปฐมภูมิด้วยแรงดันลดลงเหลือ 100 โวลต์ การทดสอบจะให้หม้อแปลงทดสอบทำงาน 5 นาที และหยุด 1 นาที เป็นวัฏจักรเรื่อยไป จนกระทั่งกระแสทางด้านทุติยภูมิมีค่าเกินกว่า 300 มิลลิแอมแปร์ จะถือว่าหม้อแปลงทดสอบเกิดความล้มเหลว

การทดสอบเร่งได้ทำการทดสอบหม้อแปลงทดสอบด้วยอุณหภูมิคงที่ 4 ระดับ ได้แก่ 170 175 180 และ 190 องศาเซลเซียส จำนวน 15 ตัว 10 ตัว 15 ตัว และ 15 ตัวตามลำดับ เก็บข้อมูลแบบตัดทอน ข้อมูลอายุที่ได้ถูกนำมาเข้าสู่กับแบบจำลองอาร์เรเนียส-ไวบูลล์ (Arrhenius-Weibull Model) ประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองด้วยวิธีความควรจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Method) พบว่าอายุการใช้งานยาวนานผิดปกติน่าจะเกิดจากฉนวนที่เป็นส่วนประกอบของหม้อแปลงทดสอบถูกออกแบบให้สามารถใช้งานอย่างต่อเนื่องได้ เมื่อนำมาใช้งานไม่ต่อเนื่องค่าประมาณที่ได้จึงมีความยาวนานผิดปกติ ดังนั้นจึงได้หาอายุการใช้งานเฉลี่ยโดยสมมติฐานการใช้งานอย่างต่อเนื่องพบว่าอายุการใช้งานเฉลี่ยเป็น 40 ปี โดยปกติฉนวนชั้น A มีขีดจำกัดการออกแบบให้สามารถใช้งานได้ถึง 100 องศาเซลเซียส แต่ในการใช้งานจริงหม้อแปลงทดสอบทำงานที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อายุการใช้งานที่ยาวนานน่าจะเกิดจากการที่หม้อแปลงโมเดลเดียวกันกับหม้อแปลงทดสอบมีการออกแบบเกิน (Overdesign) ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานของบริษัทผู้ผลิตซึ่งรายงานว่าไม่เคยมีการส่งกลับหม้อแปลงโมเดลดังกล่าวในช่วงเวลารับประกันเลย

จากผลสรุปพบว่าการทดสอบเร่งในหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อประเมินอายุนั้นไม่มีความจำเป็นแต่อย่างใด เพราะหม้อแปลงขนาดเล็กมักถูกออกแบบเกินจากสภาวะการใช้งานจริงอยู่แล้ว ดังนั้นงานวิจัยต่อไปควรทำการทดสอบเร่งกับหม้อแปลงหรือมอเตอร์ขนาดใหญ่ซึ่งส่วนมากเป็นการมุ่งเน้นการทดสอบเร่งฉนวนซึ่งเป็นส่วนประกอบของหม้อแปลงหรือมอเตอร์นั้น ทั้งฉนวนของแข็งและฉนวนน้ำมันด้วยความเค้นที่ส่งผลต่ออายุการใช้งาน ได้แก่ อุณหภูมิและแรงดัน นอกจากนี้หลักการของการทดสอบเร่งในวิทยานิพนธ์นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ได้ โดยทำการศึกษาข้อกำหนดคุณลักษณะ ส่วนประกอบ และสภาวะการใช้งานจริงของผลิตภัณฑ์ ทำการออกแบบการทดลองเพื่อหาความเค้นซึ่งส่งผลต่อการเสื่อมของผลิตภัณฑ์อันเนื่องมาจากการใช้งานและเลือกทดสอบโดยใช้ความเค้นเดียวหรือความเค้นหลายชนิดด้วยความเค้นคงที่หรือความเค้นแบบขึ้นเลือกแบบจำลองและวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์โดยเลือกใช้วิธีวิเคราะห์ที่เหมาะสมกับข้อมูล แบบจำลองที่ได้สามารถนำมาประมาณอายุเฉลี่ยหรืออายุการใช้งานที่ความเชื่อถือได้ระดับต่าง ๆ เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ การรับประกันคุณภาพ และการซ่อมบำรุงต่อไป

รายการอ้างอิง

1. Nelson, Wayne. Accelerated Testing : Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis. New York: Wiley. 1990.
2. Elsayed, Elsayed A. Reliability Engineering. Addison Wesley Longman, Inc. 1996.
3. Reliasoft's ALTA Version 6 : Accelerated Life Testing Reference. Reliasoft Publishing. (n.d.)
4. Laghari, J. R., Cygan, P., and Khechen, W. A Short Method of Estimating Lifetime of Polypropylene Film using Step-Stress Tests. IEEE Transaction on Electrical Insulation, 25, 6 (December 1990): 1180-1182.
5. Khachen, W., and Laghari, J. R. Estimating Lifetime of PP, PI and PVDF under Artificial Void Conditions Using Step-Stress Tests. IEEE Transaction on Electrical Insulation, 27, 5 (October 1992): 1022-1025.
6. Mettas, A., and Vassiliou, P. Modeling and Analysis of Time-Dependent Stress Accelerated Life Data. Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium. (2002): 343-348.
7. Tian, X., and Prince, J. L. Electronic Packaging Adhesive Fatigue Life Production Using Thermal Cycling Step-Stress Testing. Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium. (2002): 628-635.
8. Bai, D. S., Kim, M. S., and Lee, S. H. Optimum Simple Step-Stress Accelerated Life Tests with Censoring. IEEE Transaction on Reliability, 38, 5 (December 1989): 528-532.
9. Khamis, I. H., and Higgins, J. J. Optimum 3-Step Step-Stress Tests. IEEE Transaction on Reliability, 45, 3 (June 1996): 341-345.
10. Bai, D. S., Cha, M. S., and Chung S. W. Optimum Simple Ramp-Tests for the Weibull Distribution and Type-I Censoring. IEEE Transaction on Reliability, 41, 3 (September 1992): 407-413.
11. Laghari, J. R., and Cygan, P. J. Accelerated Life Studies of Polymer Film under Electrical and Thermal Multistress. Conference Record of the 1992 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 66-69, Baltimore, MD USA, June 7-10, 1992.
12. Nelson, Wayne. Applied Life Data Analysis. New York: Wiley. 1982.
13. Reliasoft's Weibull++ Version 6 : Life Data Analysis Reference. Reliasoft Publishing. (n.d.)

14. Stigant, S. A., and Franklin A. C. The J&P Transformer Book : A Practical Technology of The Power Transformer. Newnes-Butterworths. 1973.
15. International Electrotechnical Commission. IEC 60335-1 (1991-04) Safety of Household and Similar Electrical Appliances – Part 1 : General Requirements. 3rd ed., 1991.
16. Koch, H., Pfeiffer, W., and Reinhard H. Partial Discharge Measurements for Testing of Low-Voltage Equipment. Conference Record of the 1988 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 229-232, Boston, MA USA, June 5-8, 1988.
17. Pfeiffer, W. Partial Discharge Testing of Components for Low Voltage Equipment. IEEE Transaction on Electrical Insulation. 26, 2 (April 1991): 247-257.
18. Koch, H., Pfeiffer, W., and Reinhard, H. Performance Testing of Coated Printed Circuit Board by Means of Partial Discharge Measurement. Proceedings of the 19th Electrical Electronics Insulation Conference, pp. 274-278, Chicago, September 25-28, 1989.
19. Hund, R., and Pfeiffer, W. Insulations of Low Voltage at High Frequency. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 514-519, October 17-20, 1993.
20. Munteanu, A., and Manea, T. Insulating Resistance as Degradation Criterion for Power Transformers Insulation. Optimization of Electrical and Electronic Equipments, pp. 45-48, Brasov, 1998.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




ภาคผนวก ก

ข้อมูลการใช้งานเตาอบไมโครเวฟจากเว็บไซต์ต่าง ๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลำดับ	ความถี่การใช้งาน	ที่มา	เว็บไซต์
1	5-30 ชม./เดือน	Otter Tail Power Company	http://www.otpco.com/SaveEnergyMoney/applianceEnergyUsage.asp
2	2 ชม./สัปดาห์	Flint Hills Rural Electric Cooperative Ass'n., Inc.	http://www.flinthillsrec.com/Eusage.htm
3	10 ชม./สัปดาห์	Maritime Electric A Fortis Company	http://www.maritimeelectric.com/account.html
4	90 นาที/สัปดาห์	-	http://www.aps.com/aps_services/residential/waystosave/ResWaytoSave_24.html
5	5-30 ชม./สัปดาห์	Milton Hydro	http://www.miltonhydro.com/appluschart.html
6	7-42 ชม./สัปดาห์	Aurora Hydro	http://www.aurorahydro.on.ca/usage_chart.htm
7	20 นาที/วัน	Southern Maryland Electric Cooperative	http://www.smeco.com/energy/app.html
8	30 นาที/วัน	Connexus Energy	http://www.connexusenergy.com/energyaudit.htm
9	15-30 ชม./สัปดาห์	Guelph Hydro Electric Systems Inc.	http://www.guelphhydro.com/GuelphHydroWebApplianceEnergyUsageChart.html
10	1 ชม./วัน	Sangre De Cristo Electric Association Inc.	http://www.sdcea.com/prod_serv/usageguide.cfm
11	12 นาที/วัน	Central Maine Power Company	http://www.cmpco.com/services/pubs/energyguide/#usage
12	20 นาที/วัน	Seattle City Light	http://www.cityofseattle.net/light/accounts/stretchyourdollar/ac5_app3.htm
13	30-60 นาที/วัน	Burlington Hydro Inc.	http://www.burlingtonhydro.com/usecalc.asp

(เว็บไซต์ทั้งหมดถูกตรวจสอบการเข้าถึงได้เมื่อวันที่ 9 มีนาคม 2549)



ภาคผนวก ข
ผลการทดสอบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TEMPERATURE RISE TESTING SHEET

MODEL : RTRNPA110DREO-T

LOT NO. : N9U2ZTT2 No. 1

DATE : 19-Nov-02

NOTE :

120 V 60 Hz

TEMPERATURE RISE

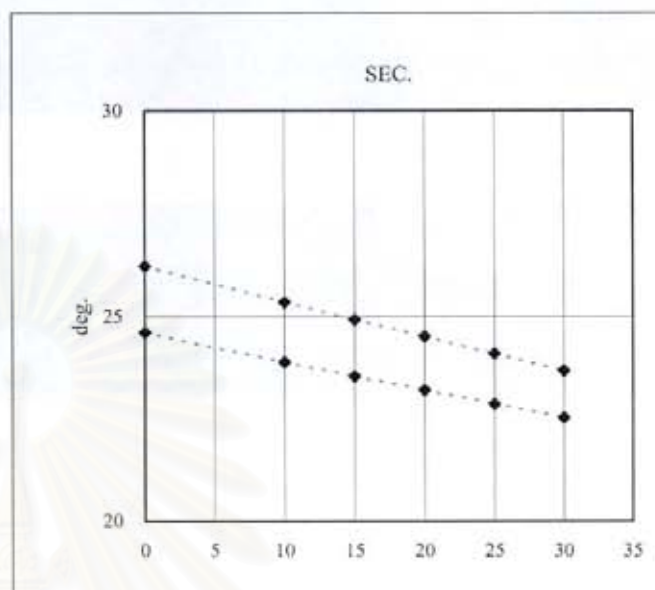
COIL 26.2 (deg)

COIL 24.6 (deg)

CORE 26.7 (deg)

Pri. COEFFICIENT: 234.5

Sec. COEFFICIENT: 234.5



	COIL	Pri NO1	Pri NO2
	INI. TEMP. (C)	25.4	25.4
	AFT. TEMP. (C)	27.0	27.0
	INI. RESIS. (ohm)	555.2	12.95
1	COIL RESIS. (ohm)	613.0	14.22
	TIME (sec)	10	10
	COIL TEMP. (deg)	25.5	23.9
2	COIL RESIS. (ohm)	611.6	14.20
	TIME (sec)	15	15
	COIL TEMP. (deg)	24.8	23.5
3	COIL RESIS. (ohm)	610.9	14.19
	TIME (sec)	20	20
	COIL TEMP. (deg)	24.5	23.3
4	COIL RESIS. (ohm)	610.1	14.17
	TIME (sec)	25	25
	COIL TEMP. (deg)	24.1	22.9
5	COIL RESIS. (ohm)	609.3	14.15
	TIME (sec)	30	30
	COIL TEMP. (deg)	23.7	22.5
	TEMP. RISE (deg)	26.2	24.6

Core TEMP. (°C)
53.7

Tested by NatthavitApproved by Smith

TEMPERATURE RISE TESTING SHEET

MODEL : RTRNPA110DREO-T

LOT NO. : N9U2ZTT2 No. 2

DATE : 25-Nov-02

NOTE :

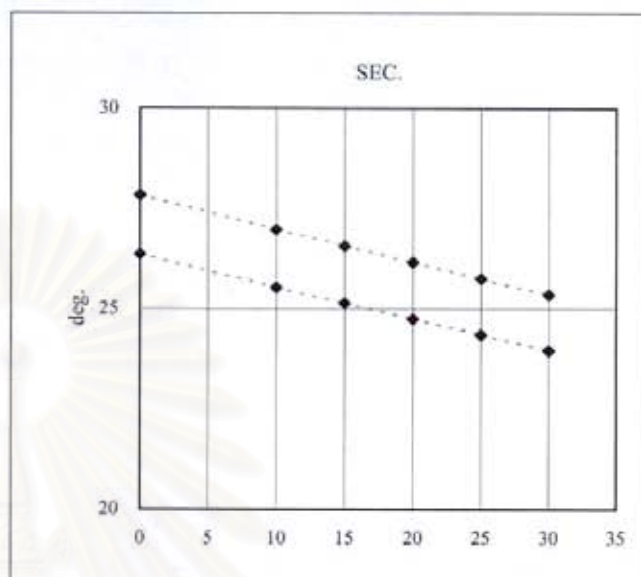
120 V 60 Hz

TEMPERATURE RISE

COIL 27.8 (deg)

COIL 26.4 (deg)

CORE 30.2 (deg)



Pri. COEFFICIENT 234.5

Sec. COEFFICIENT 234.5

	COIL	Pri NO1	Pri NO2
	INI. TEMP. (C)	25.4	25.4
	AFT. TEMP. (C)	25.7	25.7
	INI. RESIS. (ohm)	542	13.18
1	COIL RESIS. (ohm)	599.0	14.49
	TIME (sec)	10	10
	COIL TEMP. (deg)	27.0	25.5
2	COIL RESIS. (ohm)	598	14.47
	TIME (sec)	15	15
	COIL TEMP. (deg)	26.6	25.1
3	COIL RESIS. (ohm)	597.1	14.45
	TIME (sec)	20	20
	COIL TEMP. (deg)	26.1	24.7
4	COIL RESIS. (ohm)	596.3	14.43
	TIME (sec)	25	25
	COIL TEMP. (deg)	25.7	24.3
5	COIL RESIS. (ohm)	595.6	14.41
	TIME (sec)	30	30
	COIL TEMP. (deg)	25.4	24.0
	TEMP. RISE (deg)	27.8	26.4

Core TEMP. (°C)
55.9

Tested by NattthawntApproved by Smith

TEMPERATURE RISE TESTING SHEET

MODEL : RTRNPA110DREO-T

LOT NO. : N9U2ZTT2 No. 3

DATE : 21-Nov-02

NOTE :

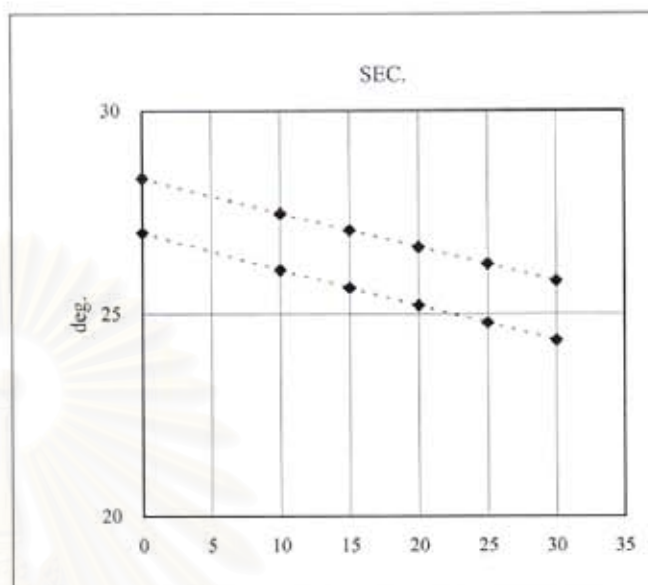
120 V 60 Hz

TEMPERATURE RISE

COIL 28.3 (deg)

COIL 27.0 (deg)

CORE 29.9 (deg)



Pri. COEFFICIENT 234.5
 Sec. COEFFICIENT 234.5

	COIL	Pri NO1	Pri NO2
	INI. TEMP. (C)	25.4	25.4
	AFT. TEMP. (C)	26.1	26.1
	INI. RESIS. (ohm)	549	13.16
1	COIL RESIS. (ohm)	608.6	14.52
	TIME (sec)	10	10
	COIL TEMP. (deg)	27.5	26.2
2	COIL RESIS. (ohm)	607.6	14.49
	TIME (sec)	15	15
	COIL TEMP. (deg)	27.0	25.6
3	COIL RESIS. (ohm)	606.6	14.47
	TIME (sec)	20	20
	COIL TEMP. (deg)	26.6	25.2
4	COIL RESIS. (ohm)	605.9	14.45
	TIME (sec)	25	25
	COIL TEMP. (deg)	26.2	24.8
5	COIL RESIS. (ohm)	605.1	14.43
	TIME (sec)	30	30
	COIL TEMP. (deg)	25.9	24.4
	TEMP. RISE (deg)	28.3	27.0

Core TEMP. (°C)
56

Tested by NattawatApproved by Sudh

TEMPERATURE RISE TESTING SHEET

MODEL : RTRNPA110DREO-T

LOT NO. : N9U2ZTT2 No. 4

DATE : 22-Nov-02

NOTE :

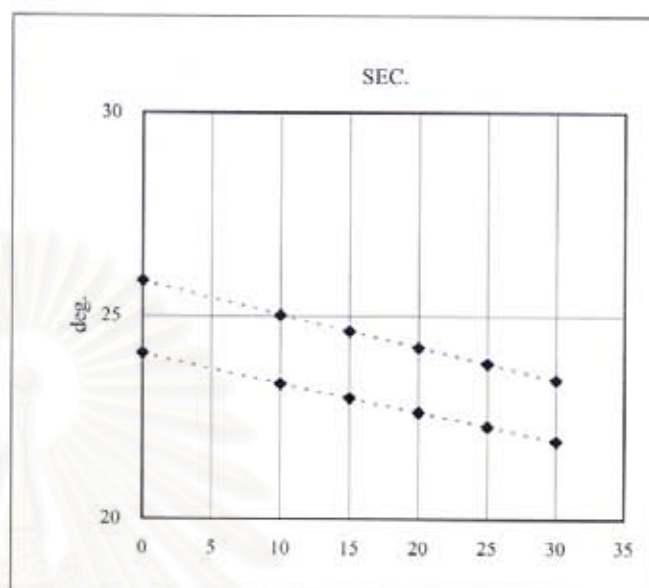
120 V 60 Hz

TEMPERATURE RISE

COIL 25.9 (deg)

COIL 24.1 (deg)

CORE 29.7 (deg)



Pri. COEFFICIENT: 234.5

Sec. COEFFICIENT: 234.5

COIL		Pri NO1	Pri NO2
	INI. TEMP. (C)	24.0	24.0
	AFT. TEMP. (C)	26.5	26.5
	INI. RESIS. (ohm)	569.9	13.19
1	COIL RESIS. (ohm)	630.6	14.51
	TIME (sec)	10	10
	COIL TEMP. (deg)	25.0	23.4
2	COIL RESIS. (ohm)	629.7	14.49
	TIME (sec)	15	15
	COIL TEMP. (deg)	24.6	23.0
3	COIL RESIS. (ohm)	628.8	14.47
	TIME (sec)	20	20
	COIL TEMP. (deg)	24.2	22.6
4	COIL RESIS. (ohm)	627.9	14.45
	TIME (sec)	25	25
	COIL TEMP. (deg)	23.8	22.2
5	COIL RESIS. (ohm)	627.1	14.44
	TIME (sec)	30	30
	COIL TEMP. (deg)	23.4	22.0
TEMP. RISE (deg)		25.9	24.1

Core TEMP. (°C)
56.2

Tested by NattawutApproved by Suth

TEMPERATURE RISE TESTING SHEET

MODEL : RTRNPA110DREO-T

LOT NO. : N9U2ZTT2 No. 5

DATE : 22-Nov-02

NOTE :

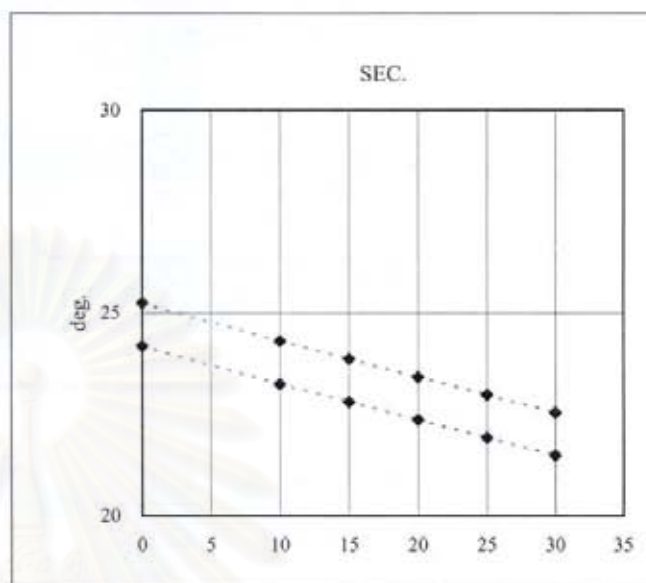
120 V 60 Hz

TEMPERATURE RISE

COIL 25.2 (deg)

COIL 24.2 (deg)

CORE 28.2 (deg)



Pri. COEFFICIENT: 234.5

Sec. COEFFICIENT: 234.5

	COIL	Pri NO1	Pri NO2
	INI. TEMP. (C)	26.8	26.8
	AFT. TEMP. (C)	25.8	25.8
	INI. RESIS. (ohm)	562.9	13.11
1	COIL RESIS. (ohm)	613.2	14.23
	TIME (sec)	10	10
	COIL TEMP. (deg)	24.3	23.3
2	COIL RESIS. (ohm)	612.1	14.20
	TIME (sec)	15	15
	COIL TEMP. (deg)	23.8	22.7
3	COIL RESIS. (ohm)	611.1	14.18
	TIME (sec)	20	20
	COIL TEMP. (deg)	23.4	22.3
4	COIL RESIS. (ohm)	610.2	14.16
	TIME (sec)	25	25
	COIL TEMP. (deg)	23.0	21.9
5	COIL RESIS. (ohm)	609.4	14.14
	TIME (sec)	30	30
	COIL TEMP. (deg)	22.6	21.5
	TEMP. RISE (deg)	25.2	24.2

Core TEMP. (°C)
54.0

Tested by NattawatApproved by Smith

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายไพโรจน์ วงษ์วิบูลย์สิน เกิดวันที่ 9 เมษายน พ.ศ. 2521 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปี พ.ศ. 2542 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ห้องปฏิบัติการวิจัยวัดคุมทางอุตสาหกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปี พ.ศ. 2542 ได้รับทุนโครงการเสริมสร้างความเชื่อมโยงระหว่างภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและภาคเอกชน ทางด้านวิจัยและพัฒนาเมื่อปี พ.ศ. 2545 และได้รับทุนศึกษ้งานวิจัยในภาคการศึกษาปลาย ปีการศึกษา 2547 ถึง ภาคการศึกษาปลาย ปีการศึกษา 2548 ทำหน้าที่ผู้ช่วยสอนในรายวิชาการระบบควบคุม ป้อนกลับและปฏิบัติการระบบควบคุมป้อนกลับ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย