

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การหาค่าอิมพีแดนซ์ของระบบฉนวนของมอเตอร์  
Impedance Evaluation of Motor Insulator System

โดย

นาย อธิษฐ์                      สิงห์พันธุ์  
นาย อภิรัฐ                      จตุรวิธวงศ์  
นาย เอกสิทธิ์                  เอี่ยมเรือง

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 72729  
วัน,เดือน,ปี..... 22 ส.ย. 2550

b. 4424/2001  
i.....

ปฏิญานีพจน์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2549

การหาค่าอิมพีแดนซ์ของระบบฉนวนของมอเตอร์  
Impedance Evaluation of Motor Insulator System



โดย

นาย อธิษฐ์

สิงห์พันธุ์

นาย อภิรัฐ

จตุรวิธวงศ์

นาย เอกสิทธิ์

เอี่ยมเรือง

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. พิชิต ล้ายอง

อ. เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2549

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การหาค่าอิมพีแดนซ์ของระบบฉนวนของมอเตอร์

ผู้จัดทำ

- 
1. นาย อธิษฐ์ สิงห์พันธุ์
  2. นาย อภิรัฐ จตุรวิวงค์
  3. นาย เอกสิทธิ์ เอี่ยมเรือง

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( รองศาสตราจารย์ พีชิต ล้ายอง )

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( อาจารย์ เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การหาค่าอิมพีแดนซ์ของระบบฉนวนของมอเตอร์

นาย อธิษฐ์                      สิงห์พันธุ์  
 นาย อภิรัฐ                      จตุรวิธวงศ์  
 นาย เอกสิทธิ์                    เอี่ยมเรือง  
 รองศาสตราจารย์ พิชิต ล้ายอง    อาจารย์ที่ปรึกษา  
 อาจารย์ เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์    อาจารย์ที่ปรึกษา  
 ปีการศึกษา 2549

### บทคัดย่อ

เครื่องจักรกลไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีปัญหาเกิดขึ้นอย่างมากมายซึ่งจะทำให้ระบบในโรงงานอุตสาหกรรมหยุดชะงักลงส่งผลต่อการทำงานทั้งระบบ สาเหตุของปัญหาของเครื่องจักรไฟฟ้านั้นมีหลายสาเหตุด้วยกัน อาทิ การสั้นสะเทือน ผลของคลื่นรบกวน หรือ การเสื่อมสภาพของฉนวน เป็นต้น ในปัจจุบันมีการทดสอบการเสื่อมสภาพของฉนวนโดยการเร่งอายุของระบบฉนวน ซึ่งการทดสอบจะสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงค่าของกระแสเพียงอย่างเดียว และใช้เวลาในการทดสอบนาน ดังนั้นในโครงการนี้จึงได้นำเสนอการทดสอบด้วยวิธีการเร่งอายุและตรวจสอบด้วย วงจรอิเล็กทรอนิกส์ จะทำให้ลดเวลาในการทดสอบลงและสังเกตค่าการเสื่อมสภาพของระบบ ฉนวนและเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ต่างๆในระบบฉนวน

## Impedance Evaluation of Motor Insulator System

A-tit Singhapan

Apiruth Chaturawittawong

Eakasit Eiamraung

### ABSTRACT

Electricity machinery in the industrial factory which is using today have many problems that will make the systems of the industrial factory stop working and effect to all of system too. Cause of the problem of electrical machines have many causes such as trembler, waves disturbing or the deterioration of the electric insulator , etc.

Today, we have deterioration test of the electric insulator by aging of electric insulator system that can observe from value change of the current only and this method take a long time to test. Thus in this project will be present the test of aging and checking with electronics circuit, it will decrease the time of the test and observe deterioration value of electric insulator system and the changing of all impedance in electric insulator system.

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	III
สารบัญตาราง	IIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 วงจรสมมูลของฉนวนตามมาตรฐาน IEEE 43-2000	4
2.1.1 ค่าของกระแสที่ได้จากวงจรสมมูลฉนวนนั้นจะประกอบด้วย	4
2.1.2 Insulation resistance general theory	5
2.2 ลักษณะสมบัติที่สำคัญของฉนวน	7
2.2.1 ความต้านทานของฉนวน	7
2.2.2 เพอร์มิตติวิตี (permittivity)	8
2.2.3 แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก	11
2.2.4 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก	12
บทที่ 3 กระบวนการทดสอบเพื่อหาค่าความคงทนทางความร้อน ของระบบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุน	13
3.1 บทนำ	13
3.2 ระดับชั้นทางความร้อนระบบฉนวน	13
3.3 กระบวนการทดสอบความคงทนทางความร้อน	14
3.3.1 รูปแบบกระบวนการทดสอบระบบฉนวน เครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุน	14
3.3.2 วัสดุทดสอบ	14
3.3.3 โครงสร้างกระบวนการทดสอบ	15
3.3.4 รอบย่อยการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อน	16
3.3.5 รอบย่อยของการวินิจฉัย	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4	กระบวนการทดสอบการเร่งอายุ	
	ทางความร้อนระบบฉนวนโดยการใช้แบบจำลองร่องสลีต.....	19
4.1	บทนำ .....	19
4.2	ขอบเขตของการทดสอบ.....	19
4.3	วัตถุประสงค์.....	19
4.3.1	โครงสร้างของวัตถุประสงค์.....	19
4.3.2	รายละเอียดของโครงสร้างแบบจำลองร่องสลีต.....	20
4.3.3	ส่วนประกอบของแบบจำลองร่องสลีต.....	21
4.3.4	การประกอบแบบจำลองร่องสลีต.....	21
4.3.5	จำนวนชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ.....	23
4.3.6	การตรวจสอบคุณภาพก่อนการทดสอบ.....	24
4.3.7	การทดสอบเพื่อการวินิจฉัยเบื้องต้น.....	24
4.4	รอบย่อยการทดสอบเพื่อการวินิจฉัย.....	24
4.4.1	การทดสอบทางกล.....	24
4.4.2	การทดสอบทางความชื้น.....	24
4.4.3	การทดสอบทางแรงดันไฟฟ้า.....	25
บทที่ 5	การทดลองและผลการทดลอง.....	26
5.1	บทนำ.....	26
5.2	การออกแบบการทดลอง.....	26
5.3	ผลการทดลอง.....	28
บทที่ 6	สรุปและวิจารณ์การทดลอง.....	69
	เอกสารอ้างอิง.....	71
	ภาคผนวก.....	72
	กิตติกรรมประกาศ.....	111

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรสมมูลของฉนวนตามมาตรฐาน IEEE 43-2000 .....	4
2.2 คุณลักษณะของกระแสตรงที่ถูกวัดได้ .....	6
2.3 ค่าเก็บประจุระหว่างแผ่นระนาบที่มีค่าเปอร์มิตติวิตี เป็นสูญญากาศ $\epsilon_0$ และ $\epsilon$ .....	8
2.4 วงจรสมมูลของไดโอดีเล็คทริก .....	9
2.5 มุมเฟสกระแสในตัวเก็บประจุ .....	11
5.1 Amplifier Class A เชื่อมต่อโดย หม้อแปลง .....	26
5.2 Amplifier Class A เชื่อมต่อโดย หม้อแปลง .....	27
5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับจำนวนครั้งการเร่งอายุที่ความถี่ 50 Hz Coil to Coil .....	28
5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับจำนวนครั้งการเร่งอายุที่ความถี่ 500 Hz Coil to Coil .....	29
5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับจำนวนครั้งการเร่งอายุที่ความถี่ 1 kHz Coil to Coil .....	29
5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับจำนวนครั้งการเร่งอายุที่ความถี่ 10 kHz Coil to Coil .....	30
5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับจำนวนครั้งการเร่งอายุที่ความถี่ 50 Hz Coil to Coil .....	30
5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับจำนวนครั้งการเร่งอายุที่ความถี่ 500 Hz Coil to Coil .....	31
5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับจำนวนครั้งการเร่งอายุที่ความถี่ 1kHz Coil to Coil .....	31
5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับจำนวนครั้งการเร่งอายุที่ความถี่ 10kHz Coil to Coil .....	32
5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน R กับจำนวนครั้ง การเร่งอายุที่ความถี่ 50 Hz Coil to Coil .....	32
5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน R กับจำนวนครั้ง การเร่งอายุที่ความถี่ 500 Hz Coil to Coil .....	33
5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน R กับจำนวนครั้ง การเร่งอายุที่ความถี่ 1kHz Coil to Coil .....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน R กับจำนวนครั้ง การเร่งอายุที่ความถี่ 10kHz Coil to Coil.....	34
5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน Xc กับจำนวนครั้ง การเร่งอายุที่ความถี่ 50 Hz Coil to Coil.....	34
5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน Xc กับจำนวนครั้ง การเร่งอายุที่ความถี่ 500 Hz Coil to Coil.....	35
5.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน Xc กับจำนวนครั้ง การเร่งอายุที่ความถี่ 1kHz Coil to Coil.....	35
5.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน Xc กับจำนวนครั้ง การเร่งอายุที่ความถี่ 10kHz Coil to Coil.....	36
5.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับจำนวนครั้งการเร่งอายุที่ความถี่ 50 Hz Coil to Ground.....	36
5.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับจำนวนครั้งการเร่งอายุที่ความถี่ 500 Hz Coil to Ground.....	37
5.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับจำนวนครั้งการเร่งอายุที่ความถี่ 1 kHz Coil to Ground.....	37
5.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับจำนวนครั้งการเร่งอายุที่ความถี่ 10 kHz Coil to Ground.....	38
5.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับจำนวนครั้งการเร่งอายุที่ความถี่ 50 Hz Coil to Ground.....	38
5.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับจำนวนครั้งการเร่งอายุที่ความถี่ 500 Hz Coil to Ground.....	39
5.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับจำนวนครั้งการเร่งอายุที่ความถี่ 1kHz Coil to Ground.....	39
5.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับจำนวนครั้งการเร่งอายุที่ความถี่ 10kHz Coil to Ground.....	40
5.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน R กับจำนวนครั้ง การเร่งอายุที่ความถี่ 50 Hz Coil to Ground.....	40
5.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน R กับจำนวนครั้ง การเร่งอายุที่ความถี่ 500 Hz Coil to Ground.....	41
5.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน R กับจำนวนครั้ง การเร่งอายุที่ความถี่ 1kHz Coil to Ground.....	41
5.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน R กับจำนวนครั้ง การเร่งอายุที่ความถี่ 10kHz Coil to Ground.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.31	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน $X_c$ กับจำนวนครั้ง การเร่งอายุที่ความถี่ 50 Hz Coil to Ground.....	42
5.32	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน $X_c$ กับจำนวนครั้ง การเร่งอายุที่ความถี่ 500 Hz Coil to Ground.....	43
5.33	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน $X_c$ กับจำนวนครั้ง การเร่งอายุที่ความถี่ 1kHz Coil to Ground.....	43
5.34	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน $X_c$ กับจำนวนครั้ง การเร่งอายุที่ความถี่ 10kHz Coil to Ground.....	44
5.35	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับจำนวนครั้งการเร่งอายุที่ความถี่ 50 Hz Turn – Turn ( Up ).....	44
5.36	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับจำนวนครั้งการเร่งอายุที่ความถี่ 500 Hz Turn – Turn ( Up ).....	45
5.37	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับจำนวนครั้งการเร่งอายุที่ความถี่ 1 kHz Turn – Turn ( Up ).....	45
5.38	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับจำนวนครั้งการเร่งอายุที่ความถี่ 10 kHz Turn – Turn ( Up ).....	46
5.39	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับจำนวนครั้งการเร่งอายุที่ความถี่ 50 Hz Turn – Turn ( Up ).....	46
5.40	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับจำนวนครั้งการเร่งอายุที่ความถี่ 500 Hz Turn – Turn ( Up ).....	47
5.41	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับจำนวนครั้งการเร่งอายุที่ความถี่ 1kHz Turn – Turn ( Up ).....	47
5.42	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับจำนวนครั้งการเร่งอายุที่ความถี่ 10kHz Turn – Turn ( Up ).....	48
5.43	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน R กับจำนวนครั้ง การเร่งอายุที่ความถี่ 50 Hz Turn – Turn ( Up ).....	48
5.44	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน R กับจำนวนครั้ง การเร่งอายุที่ความถี่ 500 Hz Turn – Turn ( Up ).....	49
5.45	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน R กับจำนวนครั้ง การเร่งอายุที่ความถี่ 1kHz Turn – Turn ( Up ).....	49
5.46	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน R กับจำนวนครั้ง การเร่งอายุที่ความถี่ 10kHz Turn – Turn ( Up ).....	50
5.47	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน $X_c$ กับจำนวนครั้ง การเร่งอายุที่ความถี่ 50 Hz Turn – Turn ( Up ).....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.48	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน $X_c$ กับจำนวนครั้ง การเร่งอายุที่ความถี่ 500 Hz Turn – Turn ( Up ).....	51
5.49	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน $X_c$ กับจำนวนครั้ง การเร่งอายุที่ความถี่ 1kHz Turn – Turn ( Up ).....	51
5.50	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน $X_c$ กับจำนวนครั้ง การเร่งอายุที่ความถี่ 10kHz Turn – Turn ( Up ).....	52
5.51	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับจำนวนครั้งการเร่งอายุที่ความถี่ 50 Hz Turn – Turn ( Down ) .....	52
5.52	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับจำนวนครั้งการเร่งอายุที่ความถี่ 500 Hz Turn – Turn ( Down ).....	53
5.53	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับจำนวนครั้งการเร่งอายุที่ความถี่ 1 kHz Turn – Turn ( Down ).....	53
5.54	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับจำนวนครั้งการเร่งอายุที่ความถี่ 10 kHz Turn – Turn ( Down ).....	54
5.55	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับจำนวนครั้งการเร่งอายุที่ความถี่ 50 Hz Turn – Turn ( Down ).....	54
5.56	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับจำนวนครั้งการเร่งอายุที่ความถี่ 500 Hz Turn – Turn ( Down ).....	55
5.57	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับจำนวนครั้งการเร่งอายุที่ความถี่ 1kHz Turn – Turn ( Down ).....	55
5.58	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับจำนวนครั้งการเร่งอายุที่ความถี่ 10kHz Turn – Turn ( Down ).....	56
5.59	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน R กับจำนวนครั้ง การเร่งอายุที่ความถี่ 50 Hz Turn – Turn ( Down ).....	56
5.60	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน R กับจำนวนครั้ง การเร่งอายุที่ความถี่ 500 Hz Turn – Turn ( Down ).....	57
5.61	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน R กับจำนวนครั้ง การเร่งอายุที่ความถี่ 1kHz Turn – Turn ( Down ).....	57
5.62	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน R กับจำนวนครั้ง การเร่งอายุที่ความถี่ 10kHz Turn – Turn ( Down ).....	58
5.63	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน $X_c$ กับจำนวนครั้ง การเร่งอายุที่ความถี่ 50 Hz Turn – Turn ( Down ).....	58
5.64	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน $X_c$ กับจำนวนครั้ง การเร่งอายุที่ความถี่ 500 Hz Turn – Turn ( Down ).....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.65 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน $X_c$ กับจำนวนครั้ง การเร่งอายุที่ความถี่ 1kHz Turn – Turn ( Down ) .....	59
5.66 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน $X_c$ กับจำนวนครั้ง การเร่งอายุที่ความถี่ 10kHz Turn – Turn ( Down ) .....	60
5.67 ค่าแรงดันและกระแสก่อนการทดลอง Turn to Turn บนก่อนการทดลองที่ความถี่ 50 Hz.....	60
5.68 ค่าแรงดันและกระแสก่อนการทดลอง Turn to Turn บนก่อนการทดลองที่ความถี่ 500 Hz .....	61
5.69 ค่าแรงดันและกระแสก่อนการทดลอง Turn to Turn บนก่อนการทดลองที่ความถี่ 1k Hz.....	61
5.70 ค่าแรงดันและกระแสก่อนการทดลอง Turn to Turn บนก่อนการทดลองที่ความถี่ 10k Hz.....	62
5.71 ค่าแรงดันและกระแสก่อนการทดลอง Turn to Turn ล่างก่อนการทดลองที่ความถี่ 50 Hz.....	62
5.72 ค่าแรงดันและกระแสก่อนการทดลอง Turn to Turn ล่างก่อนการทดลองที่ความถี่ 500 Hz.....	63
5.73 ค่าแรงดันและกระแสก่อนการทดลอง Turn to Turn ล่างก่อนการทดลองที่ความถี่ 1k Hz.....	63
5.74 ค่าแรงดันและกระแสก่อนการทดลอง Turn to Turn ล่างก่อนการทดลองที่ความถี่ 10k Hz.....	64
5.75 ค่าแรงดันและกระแสก่อนการทดลอง coil to coil ก่อนการทดลองที่ความถี่ 50 Hz.....	64
5.76 ค่าแรงดันและกระแสก่อนการทดลอง coil to coil ก่อนการทดลองที่ความถี่ 500 Hz .....	65
5.77 ค่าแรงดันและกระแสก่อนการทดลอง coil to coil ก่อนการทดลองที่ความถี่ 10k Hz.....	65
5.78 ค่าแรงดันและกระแสก่อนการทดลอง coil to ground ก่อนการทดลองที่ความถี่ 50 Hz.....	66
5.79 ค่าแรงดันและกระแสก่อนการทดลอง coil to ground ก่อนการทดลองที่ความถี่ 500 Hz .....	66
5.80 ค่าแรงดันและกระแสก่อนการทดลอง coil to ground ก่อนการทดลองที่ความถี่ 10k Hz.....	67
5.81 ค่าแรงดันและกระแสหลังจากฉนวนเสื่อมสภาพ .....	67
5.82 วงจรสมมูลฉนวนอย่างง่ายคือ .....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ระดับชั้นทางความร้อระบบจนวน.....	13
3.2 อุณหภูมิแนะนำ.....	16



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1.1 ความสำคัญของปัญหา

เครื่องจักรกลไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน มีปัญหาเกิดขึ้นอย่างมากมายซึ่งจะทำให้ระบบในโรงงานอุตสาหกรรมหยุดชะงักส่งผลกระทบต่อการทำงานทั้งระบบ สาเหตุของปัญหาของเครื่องจักรไฟฟ้านั้นมีหลายสาเหตุด้วยกัน อาทิ การสั้นสะเทือน ผลของคลื่นรบกวน หรือ การเสื่อมสภาพของฉนวน เป็นต้น

ปัญหาการเสื่อมสภาพของฉนวนมีสาเหตุได้หลายประการด้วยกัน เช่น ผลจากความเค้นทางความร้อน ผลจากความเค้นทางแรงดันไฟฟ้า ผลจากความเค้นทางกล หรือ แมกнетิก ผลจากสภาวะแวดล้อม ซึ่งในเครื่องจักรกลไฟฟ้าขนาดเล็ก จะมีสาเหตุหลักมาจากความเค้นทางความร้อน และผลจากสภาวะแวดล้อมเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งหากมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการใช้งานเพียงเล็กน้อยอาจทำให้อายุการใช้งานของฉนวนลดลงเป็นอย่างมาก

ในขณะที่ประเทศไทยการทดสอบระดับชั้นทางความร้อนของฉนวนนั้น โรงงานอุตสาหกรรมที่ผลิตเครื่องจักรกลไฟฟ้าหรือโรงงานที่นำเครื่องจักรกลเหล่านั้นไปใช้ส่วนใหญ่เชื่อถือตามป้ายชื่อ(Nameplate) ซึ่งหากระบบฉนวนนั้นไม่ได้ตามมาตรฐานที่กำหนด และโรงงานอุตสาหกรรมนั้นนำระบบฉนวนไปใช้ที่อุณหภูมิปกติตามป้ายชื่อและจะทำให้ระบบฉนวนการเสื่อมสภาพก่อนที่ควร และการทดสอบระดับชั้นทางความร้อนของฉนวนอีกแบบหนึ่งคือการทดสอบโดยการเร่งอายุทางความร้อน ซึ่งการทดสอบนี้ต้องใช้เวลาในการทดสอบนาน

อีกปัญหาหนึ่งของเครื่องจักรกลไฟฟ้าทำงานอยู่ในสภาวะทั่วไป จะไม่ทราบว่าฉนวนของเครื่องจักรไฟฟ้าเสื่อมสภาพหรือหมดอายุเมื่อใด หากโรงงานอุตสาหกรรมเหล่านั้นสามารถทำนายอายุระบบฉนวนเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิต่างๆ ได้แล้วจะทำให้สามารถคาดการณ์การเสื่อมสภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้าได้และสามารถมีการเตรียมนำเครื่องจักรกลไฟฟ้าสำรองมาทดแทนอันจะทำให้ไม่ส่งผลเสียต่อภาวการณ์ทำงานของระบบนั้นๆ

#### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จากปัญหาการทดสอบการเสื่อมสภาพของฉนวนโดยการเร่งอายุทางความร้อน นั้น การทดสอบทำได้โดยดูการเปลี่ยนแปลงค่าของกระแสและค่าความต้านทาน ซึ่งต้องใช้เวลาในการทดสอบเป็นเวลานาน ดังนั้นโครงการฉบับนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่โครงการจะศึกษาการเสื่อมสภาพของฉนวนโดยการเร่งอายุและตรวจสอบด้วยวงจรรีเลย์เทอร์มินัล เพื่อลดเวลาในการทดสอบลง และศึกษาการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์อื่นในระบบฉนวนนั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

จากสมมติฐานที่ว่าระบบฉนวนนั้นมีวงจรสมมูล ซึ่งสมมติฐานดังกล่าวทำให้การคิดการเสื่อมสภาพของระบบฉนวนนั้นจะทำให้การทดสอบระบบฉนวนไม่ได้ดูจากค่าของความต้านทานเพียงอย่างเดียว แต่จะศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่างๆในระบบฉนวน เช่น ค่าความต้านทาน แรงดัน ค่าของตัวเก็บประจุ เป็นต้น

### 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

โครงการฉบับนี้ทำการศึกษาการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนและตรวจสอบด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยศึกษาพฤติกรรมจากวงจรสมมูลของฉนวน การเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นกระแสและแรงดัน โดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์สร้างสัญญาณแรงดันและสัญญาณความถี่ต่างเพื่อใช้ทดสอบกับการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อน เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของวงจรสมมูลของระบบฉนวน เพื่อนำมาวิเคราะห์ถึงอายุการใช้งานและระยะการเสื่อมสภาพของระบบฉนวน

### 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

การดำเนินการศึกษาวิจัยโดยมีการกำหนดขั้นตอนรายละเอียดต่างๆเป็นลำดับดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 เป็นการกล่าวถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการเร่งอายุของระบบฉนวน ซึ่งมีปัจจัยทางความร้อน ปัจจัยทางกล ปัจจัยทางสภาพแวดล้อม ซึ่งจะกล่าวถึงผลกระทบจากการเกิดปัจจัยเพียงอย่างเดียว และการเกิดผลกระทบในหลายๆปัจจัยกับระบบฉนวนพร้อมๆกัน

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของระบบฉนวน ซึ่งประกอบด้วยทฤษฎีวงจรสมมูลของฉนวนตามมาตรฐาน IEEE 43-2000 และทฤษฎี และลักษณะสมบัติที่สำคัญของฉนวน

ขั้นตอนที่ 3 เป็นการกล่าวถึงการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวนตามมาตรฐาน IEC 34-18-1[3] ซึ่งจะกล่าวถึงขั้นตอนการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อน ตั้งแต่การเตรียมการทดสอบชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ การทดสอบเพื่อการวินิจฉัย และการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ขั้นตอนที่ 4 เป็นการกล่าวถึงการเร่งอายุทางความร้อนของระบบฉนวนโดยการใช้แบบจำลองร่องสลัดตามมาตรฐาน IEC 34-18-21 ซึ่งจะกล่าวถึงขั้นตอนการทดสอบทั้งหมด คือ การเตรียมระบบฉนวนที่ใช้ทำการทดสอบ การออกแบบแบบจำลองร่องสลัด ขั้นตอนการเร่งอายุทางความร้อน การทดสอบการปรับสภาพก่อนการวินิจฉัย โดยการทดสอบทางกล การทดสอบทางความชื้น และการทำการทดสอบเพื่อวินิจฉัยโดยการทดสอบทางแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 5 เป็นการนำเสนอการทดลองและผลการทดลอง โดยการทดลองจะทำการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนและตรวจสอบด้วยวงจรีเล็กทรอนิกส์ของระบบ จนวน โดยการสร้างวงจรีเล็กทรอนิกส์ที่สามารถจ่ายแรงดันและความถี่ค่าต่างๆได้

ขั้นตอนที่ 6 เป็นการกล่าวถึงการสรุปผลงานวิจัยที่ได้จากโครงการนี้โดยการทำการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนและตรวจสอบด้วยวงจรีเล็กทรอนิกส์ของระบบ จนวน โดยการใช้แบบจำลองร่องสลีต พร้อมทั้งข้อเสนอแนะและวิจารณ์ผลการทดลองเพื่อการวิจัยต่อไปในอนาคต

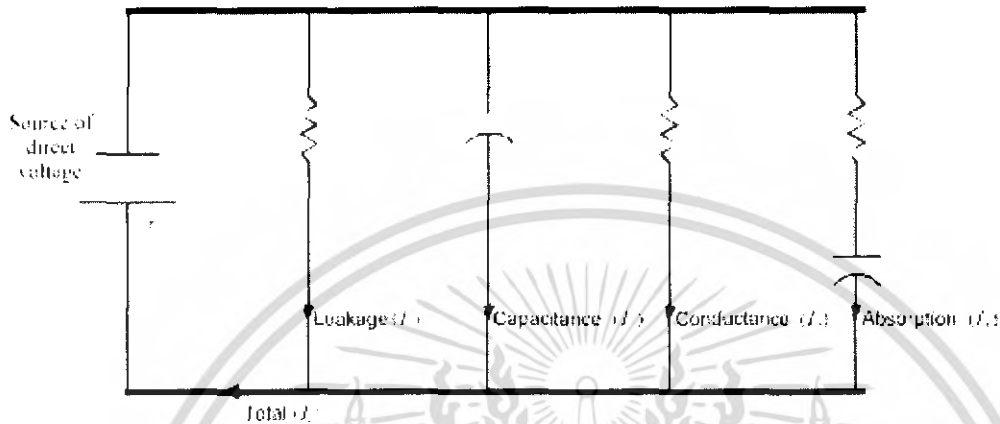


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 วงจรสมมูลของฉนวนตามมาตรฐาน IEEE 43-2000

วงจรสมมูลของฉนวนตามมาตรฐาน IEEE 43-20000 จะมีลักษณะดังนี้



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของฉนวนตามมาตรฐาน IEEE 43-2000

#### 2.1.1 ค่าของกระแสที่ได้จากวงจรสมมูลฉนวนนั้นจะประกอบด้วย

- absorption (polarization) current ( $I_A$ ) กระแสดูดซับ (ความแตกต่าง) ผลของกระแสจากความเปลี่ยนแปลง (polarizing) โมเลกุลและการล่องลอยอิเล็กตรอน ซึ่งการเสื่อมลงจะขึ้นกับเวลาของการป้อนแรงดัน ณ อัตราการลดลงจากค่าที่สูงไปจนถึงจุดใกล้ศูนย์ และขึ้นอยู่กับชนิดและวัสดุที่เชื่อมในระบบฉนวน

- conduction current (กระแสตัวนำ)  $I_C$  กระแสซึ่งคงที่ในเวลาจะผ่านตลอด ฉนวนปริมาณมากจากราวดีไปยังตัวนำแรงดันสูงขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้เชื่อมในระบบฉนวน

- electroendosmosis effect ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นถูกสังเกตส่วนใหญ่จะเดินใน winding เก่า , เมื่อมีความชื้นปรากฏ , การแตกต่างของค่า  $I_R$  อาจถูกหามา เมื่อขั้วของหัวทดสอบถูกกลับทิศ , สำหรับ wind เปียก  $I_R$  สำหรับการกลับขั้ว , เมื่อหัว ground ต่อกับขดและขั้วลบแรงดันต่อกลับ ground จะมีค่า  $I_R$  สูงกว่าปกติ

-  $I_{R(t)}$  ความสามารถของฉนวนทางไฟฟ้าของขดลวดเพื่อดำเนินทานกระแสตรง ผลของการป้อนแรงดันตรงของขั้วลบกับกระแสระหว่างฉนวนเครื่องจักรกลไฟฟ้า ณ  $40^\circ\text{C}$  เมื่อเกิดขึ้น ณ เวลา  $t$  จากการเริ่มต้นของการป้อนแรงดัน แรงดันที่ป้อนปกติ 1 นาที และ 10 นาที อย่างไรก็ตามค่าอื่นก็สามารถใช้ได้ ค่า 1-10 จะเป็นนาที แต่ค่าของ 15 หรือมากกว่าจะถือเป็นวินาที

- geometric capacitive current ( $I_C$ ) กระแสประจุ ค่ากระแสตรงข้ามของค่าเทียบเคียงยอดสูง และช่วงเวลาสั้นๆ จะเสื่อมลงในลักษณะ exponential เมื่อเวลาที่ป้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันเปลี่ยนแปลง และขึ้นอยู่กับความต้านทานภายนอกของเครื่องมือวัด และค่า geometric capacitive current

- (P.I.<sub>lat1</sub>) ค่าการเปลี่ยนแปลงของIRในเวลา ผลหารของIRที่เวลา(t<sub>2</sub>)หารกับIR(t<sub>1</sub>) ถ้าไม่เจาะจงจะสมมติเป็นที่ 10 และ 1 นาทีตามลำดับ PI10/1 min 1-10 เป็นนาที ถ้า 15 หรือมากกว่าเป็นวินาที เช่น PI60/15 IRt60s/IRt15

- surface leakage current condition (I<sub>L</sub>) ค่ากระแสรั่วไหลที่ผิว ค่ากระแสคงที่กับเวลา จะเกิดขึ้นบ่อยที่ผิว ณ จุดend turn ของstator winding หรือระหว่างตัวนำปิดผนึกกับ body rotor ในwindingของrotorที่ถูกฉนวนรอบ ค่ายอดของขึ้นกับ อุณหภูมิ และจำนวนของวัสดุตัวนำ เช่น ความชื้นหรือสิ่งที่ทำให้สกปรกบนผิวของฉนวน

### 2.1.2 Insulation resistance general theory

IR ของmachineเป็นfunctionของชนิดและเงื่อนไขของinsulation IRจะ varyที่พอเหมาะของความหนาฉนวนและส่วนกลับกับพื้นผิวตัวนำ

#### 2.1.2.1 ส่วนประกอบของDC current ที่ถูกวัด

โดยนิยามIRคือผลหารของvoltageที่ถูกข้ามฉนวนหารโดยกระแสลัพท์ ณ เวลาที่ป้อน ผลของกระแสรวม I<sub>c</sub> เกิดจาก 4 กระแสรวมกัน กระแสรั่วผิว I<sub>o</sub> กระแสประจุเชิงเรขาคณิต I<sub>c</sub> กระแสความนำ I<sub>g</sub> กระแสดูดซับ I<sub>A</sub>

วงจรสมมูลของกระแสต่างๆในการทดสอบIR ดังรูปที่ 1

I<sub>c</sub> จะไม่มีผลกับการวัด เพราะจะหายไปครั้งแรกที่ 1 นาที

I<sub>A</sub> หรือpolarization current เปลี่ยนแปลงในอัตราที่ลดลง กระแสกับเวลาจะสัมพันธ์สมการที่ 1 ถ้าplot ในlog-log graph ได้เส้นตรง

$$I_A = Kt^{-n} \quad (2.1)$$

K คือ .....ของส่วนระบบฉนวนและแรงดันที่ป้อน

t คือ เวลาในการป้อนแรงดันตรง

n คือ .....ของส่วนระบบฉนวน

I<sub>A</sub> มี 2 ส่วนประกอบ ส่วนแรกอ้างถึงpolarizationวัสดุฉนวนตัวเพราะโมเลกุลของสารอินทรีย์ เช่น epoxy polyester asphalt โน้มเอียงให้เข้ากับสิ่งแวดล้อมในสถานะสนามไฟฟ้าตรง เพราะโมเลกุลเหล่านี้ต้องมีความดึงเครียดกับแรงดึงดูดของแต่ละโมเลกุล มันจะมีผลอย่างสม่ำเสมอไม่ที่นาที่ภายหลังของสนามไฟฟ้าสำหรับโมเลกุลเพื่อปรับสภาพอีกครั้ง (reoriented) และตั้งนั้นสำหรับพลังงานโพลาริเซชันกระแสที่ถูกจ่ายจะลดลงเกือบ 0 ส่วนที่ 2 ของ I<sub>A</sub> คือ ส่วนที่ล่องลอยที่ละลายของอิเล็กตรอนและไอออนผ่านตลอดวัสดุสารอินทรีย์ นั้น อิเล็กตรอนและไอออนเหล่านี้ลอยจนกระทั่งมันกลายเป็นtrappedที่ผิวไมก้า ในระบบฉนวนของmachine IRระหว่าง 30 วินาทีถึงไม่กี่นาที่ที่จะถูกตัดสินใจอย่างแรกด้วย I<sub>A</sub>

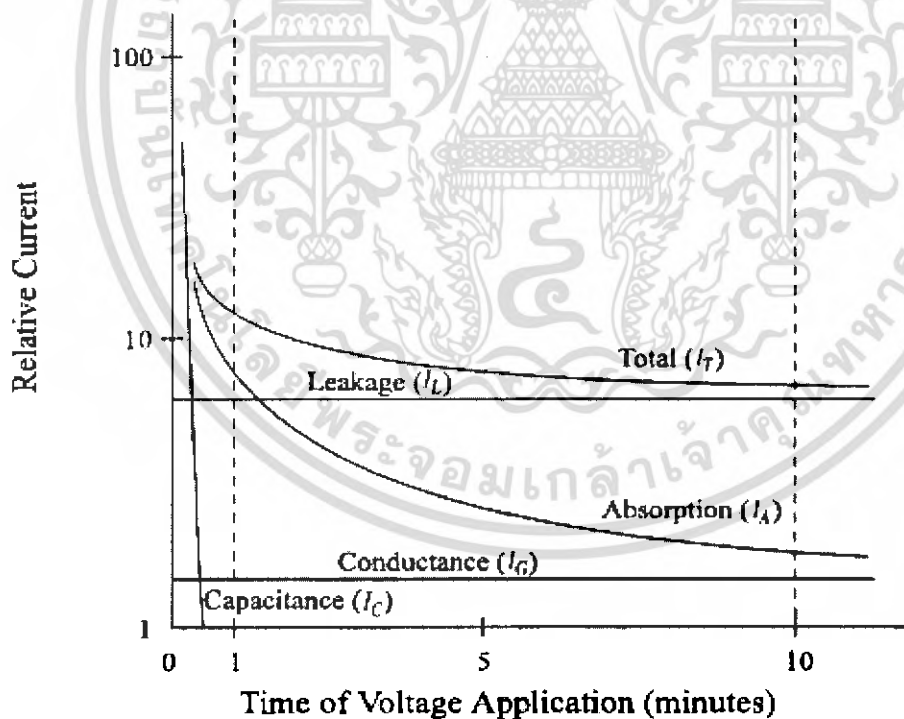
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะ  $I_A$  เป็นลักษณะของวัสดุฉนวน และอุณหภูมิของwinding  $I_A$  จะไม่ดีและเร็วในผู้ผลิตระบบฉนวน ตั้งแต่ 1970 (จะเป็นpolyester thermosettingหรือepoxy bonded) ค่าของ  $n$  จากสมการ(1)จะแตกต่างจาก thermoplasticที่ต่ำกว่า(asphaltหรือshellac bonded) มันไม่สำคัญที่ว่าวัสดุฉนวนสมัยใหม่จะดีกว่าเพราะ  $I_A$  ต่ำกว่า และIRสูง เช่น polyethyleneไม่มี  $I_A$  เพราะขอบเขตของความร้อนมันจึงมีความเหมาะสมจะใช้ในmachineหมุน

$I_G$  ในการเชื่อมที่ดี polyester และepoxy-mica ระบบฉนวนจำเป็นที่เป็น 0 ถ้าไม่แล้วฉนวนจะถูกอ้อมตัวโดยความชื้น ระบบฉนวนยุคเก่า เช่น asphalt-mica หรือshellac mica..... จะมีความเป็นธรรมชาติและการนำกระแสสูง เนื่องด้วยความนำของเทปนิ่งตามหลังไมกา (thatback the mica)

$I_L$  เป็นค่าคงที่ในเวลา ถ้า  $I_L$  สูง เช่น IRต่ำเกิดเพราะความชื้นหรือสิ่งสกปรกที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรกลไฟฟ้า

2.1.2.2 คุณลักษณะของกระแสตรงที่ถูกวัดได้(Characteristic of the measured direct current)การเปรียบเทียบการเปลี่ยนIRหรือกระแสรวมในระหว่างการทดสอบแรงดันสูงอาจมีประโยชน์ในการประเมินความสะอาดและความแห้งของwinding ถ้าwindingสกปรกหรือเปียก  $I_L$ จะคงที่ตามเวลาโดยประมาณเพราะ  $I_L$   $I_G$  จะมากกว่า  $I_A$  มากๆ ถ้าwindingสะอาดและแห้ง  $I_L$ จะลดลงตามเวลาเพราะ  $I_L$ จะขึ้นอยู่กับ  $I_A$  (เช่น การpolarization)ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 คุณลักษณะของกระแสตรงที่ถูกวัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ลักษณะสมบัติที่สำคัญของฉนวน

ลักษณะสำคัญที่เป็นตัวชี้บอกถึงคุณสมบัติและคุณภาพของไดอิเล็กตริกมี 4 ประการ คือ

1. ความต้านทาน
2. เพอร์มิตติวิตีหรือค่าคงตัวไดอิเล็กตริก
3. แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก
4. ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก

### 2.2.1 ความต้านทานของฉนวน

ไดอิเล็กตริกหรือฉนวนไฟฟ้าที่สมบูรณ์แล้วจะต้องไม่นำกระแสเลยทั้งสิ้น ถ้าหากได้รับแรงดันกระแสตรง นั่นคือจะไม่มีสภาพนำไฟฟ้าอยู่เลย หรือกล่าวอีกในหนึ่งก็คือ สารฉนวนนั้นมีค่าความต้านทานสูงเป็นอนันต์ แต่ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในทางปฏิบัตินั้น มักจะนำกระแสแต่มีค่าน้อยมากเมื่อป้อนแรงดันกระแสตรง นั่นแสดงว่าสารฉนวนไฟฟ้ามีความต้านทานไม่สูงเป็นอนันต์ หากแต่มีค่าสูงที่วัดได้ ค่าความต้านทานยิ่งสูงก็แสดงว่าฉนวนนี้มีคุณภาพการฉนวนที่ดี

เมื่อนำฉนวนไปคั่นระหว่างอิเล็กโทรดที่ป้อนแรงดันกระแสตรงเป็นเวลานานพอ จะมีกระแสไหลผ่านฉนวนนั้นแต่น้อย เรียกว่ากระแสรั่ว หรือกระแสค้ำง กระแสรั่วที่ไหลผ่านฉนวนที่แบ่งออกเป็นสองทาง คือ ทางหนึ่งไหลผ่านเนื้อฉนวนใน เนื่องจากฉนวนมีสภาพนำไฟฟ้าอยู่บ้างดังกล่าวแล้ว ส่วนอีกทางหนึ่งไหลผ่านตามผิวฉนวน เนื่องจากผิวฉนวนมีสภาพนำ เนื่องจากสิ่งเปราะเปื้อนและความชื้นที่ผิว ด้วยเหตุนี้เองการวัดความต้านทานของฉนวนจึงแยกเป็นความต้านทานเชิงปริมาตร (volume resistance) และความต้านทานเชิงผิว (surface resistance)

ค่าความต้านทานของไดอิเล็กตริกอาจคำนวณหรือวัดได้เช่นเดียวกับความต้านทานของตัวนำ ถ้าทราบความต้านทานจำเพาะ  $\rho$  ความยาว  $l$  พื้นที่หน้าตัด  $A$  ของไดอิเล็กตริก เช่นในกรณีแผ่นไดอิเล็กตริกกระหว่างแผ่นระนาบคาแปซิเตอร์ ความต้านทานของฉนวนจะหาได้จาก

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.2)$$

ส่วนในกรณีของไดอิเล็กตริกของคาแปซิเตอร์แบบทรงกระบอกซ้อน ความต้านทานของฉนวนหาได้จาก

$$R = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\rho dx}{2\pi l x} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $x$  คือ รัศมีใดๆ วัดจากแกนและ  $dx$  ความหนาส่วนย่อยของฉนวน  
 $r_1$  และ  $r_2$  คือ รัศมีของตัวนำในและตัวนำนอกตามลำดับ  
 $l$  คือ ความยาว

### 2.2.2 เปรอ์มิตติวิตี (permittivity)

เปรอ์มิตติวิตีนี้บางทีก็เรียกว่า ค่าคงตัวของไดอิเล็กตริก (dielectric constant)  $\epsilon$  เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญประการหนึ่ง ไม่มีมิติและเป็นตัวชี้บอกลักษณะของไดอิเล็กตริกหรือสารฉนวนไฟฟ้าเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดความสามารถของการสร้างคาแพซิเต้นซ์ หรือกล่าวง่าย ๆ  $\epsilon$  ก็คือค่าตัวเลขที่บอกให้ทราบว่าคาแพซิเต้นซ์จะเพิ่มขึ้นกี่เท่าของคาแพซิเตอร์สูญญากาศเมื่อใส่ไดอิเล็กตริกมีเปรอ์มิตติวิตี  $\epsilon$  เข้าไปแทนที่ นั่นคือ

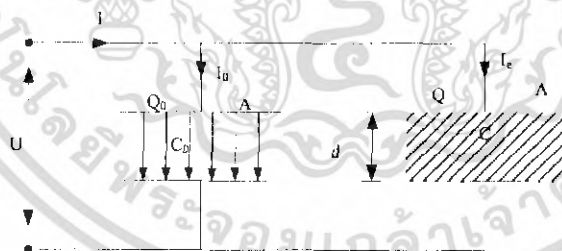
$$C = \epsilon C_0 \quad (2.4)$$

ปกติเปรอ์มิตติวิตี  $\epsilon$  จะแสดงเป็นความสัมพันธ์  $\epsilon_r$  เทียบกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสูญญากาศหรือความว่างเปล่า  $\epsilon_0$

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (2.5)$$

โดยที่

$$\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$



รูปที่ 2.3 ค่าเก็บประจุระหว่างแผ่นระนาบที่มีค่าเปรอ์มิตติวิตีเป็นสูญญากาศ

$\epsilon_0$  และ  $\epsilon$

และจากความสัมพันธ์ของคาแพซิเต้นซ์  $C = \frac{Q}{U}$  จะได้ค่าคาแพซิเต้นซ์ข

องสูญญากาศ

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าใส่ไดโอดีเลกตริกที่มีสารอื่น (ฉนวนเหลว ฉนวนแข็ง ฉนวนก๊าซ) เข้าไปแทนที่สูญญากาศระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด จะพบว่าถึงแม้ว่าแรงดันที่ป้อนมีค่าคงที่ก็ตาม แต่กระแสในวงจร จะมากขึ้น ซึ่งแสดงว่าค่าคาปาซิแตนซ์เพิ่มสูงขึ้น ความหนาแน่นของประจุบนอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น และอาจเนื่องจากจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนไหลผ่านไดเลคตริกมากขึ้น

แต่คาปาซิเตอร์สูญญากาศที่มีคาปาซิแตนซ์  $c_0$  กระแสที่ไหลผ่านจะเป็น

$$i(t) = c \frac{du(t)}{dt} \quad \text{หรือ} \quad \bar{i} = j\omega c_0 \bar{U} \quad (2.7)$$

เครื่องหมาย  $j$  แสดงให้เห็นเด่นชัดว่ากระแสนำหน้าแรงดันเป็นมุม 90 องศา ส่วนคาปาซิเตอร์ที่มีสารไดโอดีเลกตริก ค่าคาปาซิแตนซ์  $c$  จะไม่เท่ากับ  $c_0$  และยิ่งกว่านั้นจะสังเกตเห็นว่าในทางปฏิบัติเฟสเซอร์ระหว่างแรงดันกับกระแสมีมุมน้อยกว่า 90 องศา เพราะมีพลังงานสูญเสียเปล่าในลักษณะความต้านทาน นั่นแสดงว่าคาปาซิแตนซ์เป็นคอมเพล็กซ์ คือ มีค่าจริงและค่าจินตภาพ ซึ่งรวมอยู่ในรูปของเปอร์มิตติวิตี คือ

$$\bar{c} = \epsilon_r c_0 \quad (2.8)$$

โดยที่

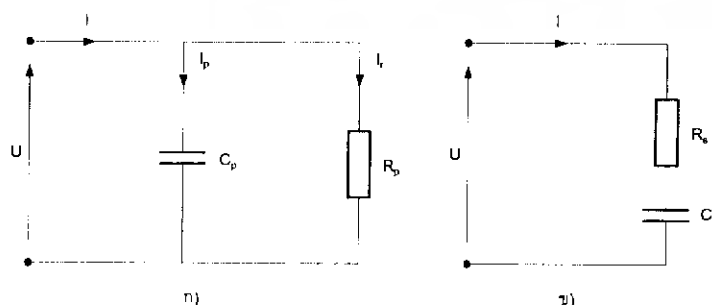
$$\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$$

ฉะนั้นกระแสที่ไหลผ่านคาปาซิเตอร์

$$\begin{aligned} \bar{I} &= j\omega \bar{c} \bar{U} \\ &= j\omega(\epsilon' - j\epsilon'')c_0 \bar{U} \\ &= j\omega\epsilon'c_0 \bar{U} + \omega\epsilon''c_0 \bar{U} \end{aligned} \quad (2.9)$$

เทอมแรกขวามือของสมการ  $\bar{I}$  ก็คือ กระแสคาปาซิแตนซ์  $I_c$  และเทอมหลังคือ กระแสพลังงานสูญเสียเปล่า  $I_r$  คือ  $\bar{I} = I_c + I_r$

ไดโอดีเลกตริกมีพลังงานสูญเสียเปล่า และสามารถเก็บประจุไว้ในคาปาซิเตอร์ จึงอาจเขียนแทนด้วยวงจรสมมูล คือ ดังรูป ก) เป็นวงจรขนาน รูป ข) เป็นวงจรอันดับ



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของไดโอดีเลกตริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรม้วน

$$c_p = \varepsilon' c_0$$

$$R_p = 1/(\omega \varepsilon'' c_0)$$

$$tg \delta = \frac{1}{\omega R_p c_p} = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (2.10)$$

วงจรม้วนดับ

$$c_s = \frac{|\varepsilon_r|^2}{\varepsilon'} c_0 = \varepsilon' \{1 + (tg \delta)^2\} c_0$$

$$R_s = \frac{\varepsilon''}{\omega |\varepsilon_r|^2 c_0}$$

$$tg \delta = \omega R_s c_s = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (2.11)$$

มุม  $\delta$  นี้เรียกว่ามุมพลังงานสูญเสียเปล่า (loss angle)

จากสมการ  $c_p$  และ  $c_s$  จะเห็นได้ว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนเดนเซอร์ที่มีสารไดอิเล็กตริกขึ้นอยู่กับวงจรม้วน โดยในกรณีที่พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกมีค่าต่ำ คือ  $\varepsilon'' \ll \varepsilon'$  หรือ  $tg \delta \ll 1$  ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกทั้งสองจะเท่ากัน คือ  $c_p = c_s$  และจะได้

$$\overline{\varepsilon_r} \rightarrow \varepsilon_r = \varepsilon' \quad (2.12)$$

นั่นก็คือ  $\varepsilon'$  จะเป็นค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (relative dielectric const.)  $\varepsilon_r$  ที่ใช้กัน ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์  $\varepsilon_r$  นี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยทั่วไปฉนวนที่มีใช้ทั่วไปในถ้าอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น  $\varepsilon_r$  จะเพิ่มสูงขึ้น

### 2.2.3 แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก

พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกอาจแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ พลังงานสูญเสียเปล่าเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าของไดอิเล็กตริกที่ความต้านทานไม่ถึงค่านันต์ และอีกส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนึ่งเป็นพลังงานสูญเสียเปล่าเนื่องจากโพลาริเซชันของไดอิเล็กตริก จัดเป็นพลังงานสูญเสียเปล่าทางไฟฟ้า

ถ้าป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์กับคาบไซเตอร์ที่สมบรูณ์ กระแสไหลผ่านคาบไซเตอร์จะมีเฟสหน้าหน้าแรงดันเป็นมุม 90 องศา

$$\begin{aligned} \text{ถ้าให้} \quad U &= U_m \sin \omega t \\ I &= \omega C U_m \cos \omega t \\ I &= \omega C U \end{aligned}$$

เมื่อ  $U$  เป็น ค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันที่ป้อน  
ในทางปฏิบัติกระแสที่ไหลในคาบไซเตอร์จะนำหน้าแรงดันน้อยกว่า 90 องศา ดังรูปที่ 2.10  $\phi$  เป็นมุมเฟสของคาบไซเตอร์ ดังนั้นเพาเวอร์แฟกเตอร์ =  $\cos \phi$  หรืออีกอย่างหนึ่งคือ  $\sin \delta$   
ฉะนั้นกำลังสูญเสียเปล่าในคาบไซเตอร์ไม่สมบรูณ์ คือ

$$\begin{aligned} &UI \cos \phi \text{ หรือ } UI \sin \delta \\ \text{เมื่อ } \delta \text{ มีค่าน้อยๆ } UI \sin \delta &= UI \tan \delta \\ \text{โดยที่} \quad \delta &= 90^\circ - \phi \\ \delta &= \text{มุมพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก} \\ \text{tg } \delta &= \text{แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก} \end{aligned}$$



### รูปที่ 2.5 มุมเฟสกระแสในตัวเก็บประจุ

$$\text{tg } \delta = \frac{I_r}{I_c} = \frac{U/R_p}{\omega C_p U} = \frac{1}{\omega C_p R_p} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉะนั้นพลังงานสูญเสีย

$$P_d = \frac{U^2}{R} = U^2 \omega C_p \tan \delta$$

หรือ

$$P_d' = E^2 \omega \epsilon \tan \delta \quad (2.14)$$

เมื่อ  $P_d'$  เป็น พลังงานสูญเสียต่อปริมาตร  
 $E$  เป็น ความเครียดสนามไฟฟ้า  
 ถ้า  $C$  เป็น ค่าเก็บประจุไฟฟ้า (ฟารัด)  
 $U$  เป็น ค่าแรงดันที่ป้อน (โวลต์)  
 จะได้  $P_d$  เป็น ค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก (วัตต์)

#### 2.2.4 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก

ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน (Dielectric strength) ซึ่งเป็นตัวชี้บอกให้ทราบว่าไดอิเล็กตริกสามารถทนต่อแรงดันได้มากหรือน้อยเพียงใด กำหนดด้วยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่จะทำให้ไดอิเล็กตริกเบรกดาวน หาได้โดยป้อนแรงดันเพิ่มขึ้นจนเกิดเบรกดาวน ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่มีโครงสร้างทางเคมีและทางฟิสิกส์ต่างกัน สารประเภทที่มีโครงสร้างเป็นผลึกจะเกิดเบรกดาวนตามแนวที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมน้อยที่สุด ซึ่งจะสามารถสังเกตเห็นว่าร่องรอยของการเกิดเบรกดาวนในฉนวนจะไม่เป็นเส้นตรง โดยปกติไดอิเล็กตริกแข็งจะทนต่อแรงดันเบรกดาวนได้สูงกว่าไดอิเล็กตริกเหลว การเบรกดาวนในฉนวนเหลวสภาพการฉนวนจะกลับสู่สภาพปกติได้หลังจากเบรกดาวนผ่านไปแล้ว แต่ในฉนวนแข็งเกิดเบรกดาวนแล้วสภาพการฉนวนจะเสียไป ใช้งานเพื่อการฉนวนอีกไม่ได้ อย่างไรก็ตามฉนวนเหลวหรือฉนวนแข็งก็อาจมีค่าแรงดันเบรกดาวนต่ำถ้าหากมีสิ่งเจือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## กระบวนการทดสอบเพื่อหาค่าความคงทนทางความร้อนของระบบ ฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุน

### 3.1 บทนำ

ทุกปัจจัยการเร่งอายุ เช่น ปัจจัยทางความร้อน ทางไฟฟ้า ทางกล และสภาพแวดล้อม มีผลกับค่าอายุระบบฉนวนในทุกชนิดเครื่องจักรกลไฟฟ้า ซึ่งในแต่ละปัจจัยจะส่งผลกับแต่ละชนิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าไม่เหมือนกันโดยทั่วไปแล้วฉนวนในเครื่องจักรกลไฟฟ้าขนาดเล็กได้รับผลจากปัจจัยทางความร้อนและทางสภาพแวดล้อมมากกว่า ส่วนปัจจัยทางไฟฟ้าจะปัจจัยทางกลจะส่งผลน้อยกว่า ในบทนี้จะนำเสนอกระบวนการทดสอบเพื่อหาค่าความคงทนทางความร้อนระบบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนตามมาตรฐาน IEC-34-18-1

### 3.2 ระดับชั้นทางความร้อนระบบฉนวน

ในการศึกษากระบวนการทดสอบเพื่อหาค่าความคงทนทางความร้อนระบบฉนวนนั้นจะต้องทราบระดับชั้นทางความร้อนระบบฉนวนเสียก่อน ซึ่งระดับชั้นทางความร้อนที่ใช้เป็นสากลแสดงได้ดังตาราง 2.1 โดยระบบฉนวนในแต่ละชนิดนั้นจะมีระดับชั้นทางความร้อนที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัสดุฉนวนที่ประกอบอยู่ ซึ่งในแต่ละระดับชั้นความร้อนนั้นจะมีการทดสอบตามกระบวนการทดสอบความคงทนทางความร้อนที่แตกต่างกัน

#### ตารางที่ 3.1 ระดับชั้นทางความร้อนระบบฉนวน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 กระบวนการทดสอบความคงทนทางความร้อน

วัตถุประสงค์ของการทดสอบความคงทนทางความร้อนระบบฉนวนนั้นเพื่อเป็นการจัดเตรียมข้อมูลสำหรับใช้จัดระดับชั้นทางความร้อนระบบฉนวนของระบบฉนวนใหม่ก่อนที่จะมีการนำระบบฉนวนนั้นไปใช้ ซึ่งกระบวนการทดสอบนี้เป็นการกล่าวถึงกระบวนการทดสอบโดยรวมของระบบฉนวนลักษณะต่างๆของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุน ซึ่งกระบวนการทดสอบสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนนี้จะมีความซับซ้อนอันเนื่องมาจากระบบฉนวนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนนั้นมีความซับซ้อนนั่นเอง

#### 3.3.1 รูปแบบกระบวนการทดสอบระบบฉนวนเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุน

เนื่องจากระบบฉนวนในเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนนั้นมีความซับซ้อนและมีอยู่หลายรูปแบบ ฉะนั้นในการทดสอบจึงมีรูปแบบการทดสอบใน 2 รูปแบบ คือ

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

- รูปแบบกระบวนการทดสอบสำหรับการพันแบบฟอร์มวาวด์ (form wound winding) ซึ่งเป็นการทดสอบสำหรับการพันขดลวดที่มีการทำเป็นรูปแบบสำเร็จก่อนที่มีการพันลงบนสเตเตอร์ หรือโรเตอร์

#### 3.3.2 วัสดุทดสอบ

##### 2.3.2.1 โครงสร้างของวัสดุทดสอบ

วัสดุฉนวนและส่วนประกอบต่างๆ ของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบควรมีการตรวจสอบสภาพของวัสดุและส่วนประกอบนั้นๆ ก่อนที่จะนำมาทดสอบ ซึ่งส่วนประกอบต่างๆ ที่นำมาทดสอบนั้นควรมีลักษณะที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด เช่น ความหนาของฉนวน หรือ ระยะครีเพจ (creepage distance) เป็นต้น

##### 3.3.2.2 จำนวนชิ้นงาน

จำนวนชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบควรมีมากพอสำหรับการหาค่าทางสถิติ สำหรับใช้ในการหาค่าเฉลี่ยจากการเกิดการเสียหายในแต่ละอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบได้ เพื่อให้กระบวนการทดสอบมีความน่าเชื่อถือมากที่สุด

##### 3.3.2.3 คุณภาพของชิ้นงานและการทดสอบเบื้องต้น

วัสดุฉนวนที่นำมาใช้ในการทดสอบนั้นควรมีการตรวจสอบเบื้องต้นในแต่ละชิ้นส่วนก่อนที่จะนำมาประกอบเป็นชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ ภายหลังจากการประกอบเรียบร้อยแล้วแต่ละชิ้นงานก็ควรมีการทดสอบเบื้องต้นก่อนที่จะนำมาใช้ในการทดสอบความคงทนทางความร้อน เช่น การวัดค่าความต้านทานฉนวน การวัดค่าคาปาซิเตอร์ การวัดค่าแรงดันเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน กระแสไฟฟ้ารั่วไหล การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้าสูง เป็นต้น

### 3.3.3 โครงสร้างกระบวนการทดสอบ

#### 3.3.3.1 หลักการโดยทั่วไป

การหาค่าการเสื่อมลงของระบบฉนวนเนื่องมาจากการถูกเร่งอายุทางความร้อนอาจมีค่าไม่เหมือนกันขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องจักรกลทางไฟฟ้า หรือส่วนของขดลวดที่สนใจ เช่น จุดสุดท้ายของการพัน (end winding) หรือส่วนของสลิตที่ถูกฝังอยู่

ในหลาย ๆ กรณีประสบการณ์จะเป็นสิ่งบ่งชี้ที่ดีที่สุดสำหรับการวินิจฉัยหาค่าการเสื่อมถอยทางอุณหภูมิ และ โดยส่วนใหญ่แล้วการเปราะบางของระบบฉนวนนั้นถูกหาได้ อย่างเห็นได้ชัดจากการถูกความเค้นทางกล ซึ่งนั้นจะทำให้เกิดรอยแตกขึ้นในระบบฉนวน อันทำให้การให้ความชื้นมีผลทำให้การวินิจฉัยโดยแรงดันไฟฟ้ามีผลในที่สุด

ในกรณีอื่น ๆ ความเค้นทางกล การให้ความชื้นและการทดสอบโดยการป้อนแรงดันไฟฟ้า อาจไม่ใช่วิธีที่ดีที่สุดสำหรับการวินิจฉัย ซึ่งอาจหาวิธีที่เหมาะสมในการวินิจฉัยเช่น การทดสอบทางไดอิเล็กตริก การวัดค่าการดิสชาร์จบางส่วน เป็นต้น เพื่อใช้ในการสอบคุณภาพของฉนวนเมื่อได้รับการเร่งอายุทางความร้อน

#### 3.3.3.2 อุณหภูมิการเร่งอายุและระยะเวลาของรอบย่อยการทดสอบ

ในการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนนั้นถูกแนะนำให้ทำการทดสอบกับชิ้นงานอย่างน้อย 3 อุณหภูมิทดสอบ ซึ่งระดับชั้นทางความร้อนระบบฉนวนที่ใช้เป็นมาตรฐานแสดงได้ดังตาราง 3.1 โดยที่อุณหภูมิการเร่งอายุที่แนะนำและคาบเวลาของรอบย่อยการทดสอบในแต่ละรอบการเร่งอายุสำหรับระบบฉนวนแสดงได้ดังตาราง 3.2 ซึ่งระยะเวลาที่เหมาะสมสามารถปรับเปลี่ยนได้ และแต่ละรอบของการทดสอบที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่งนั้นควรมีรอบย่อยการทดสอบอย่างน้อย 10 รอบย่อยการทดสอบ เป็นที่ทราบกันดีว่าในระยะเวลา ระหว่างมีการผลิตของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุน อาจมีความจำเป็นที่จะต้องมีการเปลี่ยนวัสดุหรือกระบวนการในการผลิตสำหรับเหตุผลทางเทคโนโลยีหรือจากเหตุผลทางการตลาด ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าหากมีการเปลี่ยนแปลงวัสดุแล้วค่าความคงทนของฉนวนจะเปลี่ยนไป ซึ่งในการทดลองนั้นควรกระทำที่อุณหภูมิการทดสอบที่เหมือนกัน ซึ่งหากผลการทดสอบที่ได้มีลักษณะที่คล้ายกัน แล้วก็สามารถยอมรับได้สำหรับการเปลี่ยนแปลงนั้น

ตารางที่ 3.2 อุณหภูมิแนะนำ

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

### 3.3.3.3 ความหมายของการให้ความร้อน

แม้ว่าจะมีข้อเสียที่เด่นชัดอยู่ก็ตาม แต่จากประสบการณ์ที่ผ่านมาการให้ความร้อนโดยตู้อบความร้อนนั้นเป็นวิธีที่มีความสะดวกสบายที่สุด และยังเป็นวิธีที่ประหยัดด้วย สำหรับการหาค่าการเร่งอายุทางความร้อน ซึ่งการให้ความร้อนโดยการใช้ตู้อบความร้อนกับชิ้นงานที่นำมาทดสอบนั้นในความเป็นจริงแล้วบางส่วนของชิ้นงานอาจได้รับความร้อนไม่เท่ากันซึ่งอาจจะมีค่าบางจุดที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจุดใดจุดหนึ่ง (hotspot temperature) ฉะนั้นในการทดสอบภายในตู้อบให้ใกล้เคียงกับค่าความเป็นจริงมากที่สุด ควรมีการถ่ายเทที่เหมาะสม กล่าวคือที่อุณหภูมิที่ทำการทดสอบที่ต่ำกว่าอุณหภูมิ 180°C ควรมีการควบคุมให้อุณหภูมิภายในตู้อบมีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 2 K หากทำการทดสอบที่อุณหภูมิตั้งแต่ 180 – 300 °C ควรมีการควบคุมให้อุณหภูมิภายในตู้อบมีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 3 K

อย่างไรก็ตามการให้ความร้อนโดยตู้อบอาจไม่สามารถทำได้ การทดสอบโดยการให้ความร้อนโดยตรงอาจเป็นการจำลองการทดสอบที่ใกล้เคียงและเหมาะสมกว่า เช่น การให้ความร้อนโดยตรงโดยวิธีการให้กระแสไฟฟ้า การทดสอบมอเตอร์โดยการเริ่มต้นและการหมุนย้อนกลับโดยการทดสอบเป็นคาบเวลา เป็นต้น

### 3.3.4 รอบย่อยการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อน

การทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนโดยการนำชิ้นงานทดสอบทำการทดสอบในตู้อบที่มีการระบายความร้อนอย่างเพียงพอ หรือมีระบบการพาความร้อนซึ่งจะเป็นการรักษารูปแบบของการให้อุณหภูมิแก่วัตถุทดสอบ ควรมีการนำวัตถุทดสอบที่เย็นเข้าสู่ตู้อบที่มีความร้อนทันที เพื่อให้วัตถุนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงผลของการช็อกทางความร้อนในแต่ละรอบการทดสอบในทำนองเดียวกันวัตถุทดสอบควรนำออกจากตู้อบมาสู่อุณหภูมิห้องโดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนูญที่เห็นไปไซประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทันที เพื่อให้มีการเกิดรูปแบบของการซื้อทางความร้อนของการได้รับความเย็นภายหลังจากการได้รับความร้อนแล้วนั่นเอง

### 3.3.5 รอบย่อยของการวินิจฉัย

ภายหลังจากที่มีการทดสอบการเร่งอายุในแต่ละรอบย่อยการทดสอบ ชิ้นงานที่ทำการทดสอบแต่ละชิ้นงานควรมีการทดสอบเพื่อการวินิจฉัย โดยลำดับดังนี้ คือการให้ความชื้นทางกล การให้ความชื้น การทดสอบทางแรงดัน และการทดสอบอื่นๆ ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม ซึ่งการทดสอบเพื่อวินิจฉัยในแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.3.5.1 การทดสอบทางกล

การให้ความชื้นทางกลเป็นการทดสอบที่ถูกแนะนำให้มีการทดสอบ เพื่อให้การทดสอบมีความใกล้เคียงกับการใช้งานจริงของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนมากที่สุด วิธีการทดสอบที่เหมาะสมและเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวาง คือการนำชิ้นงานไปทำการทดสอบกับโต๊ะสั่น และให้ทำการทดสอบประมาณ 1 ชั่วโมงที่ความถี่การเคลื่อนที่ 50- 60 Hz หรือวิธีอื่น เช่น การให้การกระแทกหรือการงอซ้ำๆ กันอาจมีการใช้กันตามความเหมาะสม

การเริ่มหมุนหรือการกลับทางหมุนที่เป็นคาบเวลา อาจเป็นเทคนิคที่ถูกใช้สำหรับการให้ความชื้นทางกลแก่ขดลวดในเครื่องจักรกลไฟฟ้าจริง อย่างไรก็ตามการให้ความชื้นทางกลในลักษณะนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ทำการทดสอบ

#### 3.3.5.2 การทดสอบทางความชื้น

ความชื้นในหลายๆกรณีเป็นสาเหตุหลักที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของระบบฉนวน ซึ่งอาจเกิดความเสียหายในหลายๆกรณีเมื่อได้รับความชื้นทางไฟฟ้า การดูดซึมซับความชื้นของฉนวนแข็งเป็นสาเหตุให้เกิดการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก และการลดค่าความต้านทานฉนวนด้วย ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความคงทนทางไฟฟ้า ความชื้นบนฉนวนนั้นเป็นการเพิ่มความสามารถในการตรวจสอบโดยการทดสอบทางแรงดันไฟฟ้า เช่น รอยแตกหรือโพรงอากาศในฉนวน แต่ในระหว่างการทดสอบทางความชื้นนี้ไม่ควรมีการทดสอบทางแรงดันไฟฟ้าให้กับชิ้นงานที่กำลังทำการทดสอบอยู่

การทดสอบในช่วงเวลา 2 วันเป็นการทดสอบที่สามารถเกิดความชื้นที่ผิวของฉนวนได้ซึ่งเป็นสภาวะที่สามารถพบกันได้โดยทั่วไปในการใช้งานจริงของเครื่องจักรกลทางไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้ค่าความต้านทานของฉนวนถึงจุดที่เหมาะสม

#### 3.3.5.3 การทดสอบทางแรงดันไฟฟ้า

ในการตรวจสอบสภาวะของชิ้นงานและการตัดสินใจจุดสิ้นสุดของอายุฉนวน การให้แรงดันไฟฟ้าเป็นส่วนหนึ่งของรอบย่อยของการวินิจฉัย ขนาดและรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าที่ทำการทดสอบจะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ที่ใช้ทดสอบและขนาดของการใช้งานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าและความถี่ที่ใช้ การทดสอบแรงดันไฟฟ้าอาจมีการทดสอบระหว่างขดลวดกับเฟรม การทดสอบระหว่างขดลวดกับขดลวด การทดสอบระหว่างรอบต่อรอบของขดลวด และการทดสอบระหว่างเส้นลวดกับเส้นลวด แล้วแต่ความเหมาะสม ถ้ามีการทดสอบความชื้น การเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง 72729 อย่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบทางแรงดันไฟฟ้าจะทำการทดสอบเมื่อชิ้นงานยังคงเปียกอยู่ภายหลังจากได้รับการทดสอบทางความชื้นแล้ว

การทดสอบแรงดันไฟฟ้านี้ไม่ได้มีส่วนทำให้ค่าอายุของระบบฉนวนนั้นลดลงแต่อย่างใด แต่ควรมีการระมัดระวังเกิดการทรานเซียน (transient) หรือการเกิดเซิร์จ (surge) อันจะส่งผลให้ค่าของอายุระบบฉนวนนั้นลดลงเนื่องจากผลทางแรงดันไฟฟ้า การเกิดการเสียหายในส่วนอุปกรณ์ต่างๆ ของระบบฉนวนนั้นเป็นการบ่งชี้ถึงจุดสิ้นสุดอายุฉนวน ซึ่งจุดบ่งชี้อาจสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ทำการวัด หรือการเกิดความร้อนหรือควันขึ้นในระบบฉนวน แต่หากเกิดการรวบไฟตามฉนวนนั้นอาจไม่ถือเป็นการเกิดการเสียหายของระบบฉนวนจนทำให้ระบบฉนวนนั้นถึงจุดสิ้นสุดของอายุ

#### 3.3.5.4 การทดสอบการวินิจฉัยอื่นๆ

ในสภาวะการณ์ทำงานที่แตกต่างกันของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ทำให้การทดสอบเพื่อการวินิจฉัยอื่นๆ อาจมีการทดสอบซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเหมาะสม เช่น การทดสอบความต้านทานฉนวน การทดสอบล่อแทนเจน (loss tangent) การทดสอบการดิสชาร์จบางส่วน อาจเป็นการทดสอบเพื่อให้เห็นการเสื่อมสภาพของฉนวนก่อนที่จะเกิดการเสียหายขึ้นในระบบฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### กระบวนการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวน โดยการใช้แบบจำลองร่องสลีด

#### 4.1 บทนำ

การทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนั้นมีอยู่หลายแบบด้วยกัน ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอการทดสอบโดยการใช้แบบจำลองร่องสลีดตามมาตรฐาน IEC 34-18-21 เป็นชิ้นงานสำหรับทดสอบ ซึ่งเป็นการทดสอบสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีการพันแบบไวร์ววด์ สำหรับการทดสอบโดยวิธีนี้มีความสะดวกกว่าการนำเครื่องจักรกลไฟฟ้าทั้งตัวไปทดสอบ และสามารถหาค่าอายุและตัดสินระดับชั้นทางความร้อนระบบฉนวนได้เช่นกัน

#### 4.2 ขอบเขตของการทดสอบ

การทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนระบบฉนวนโดยการใช้แบบจำลองร่องสลีดตามมาตรฐาน IEC 34-18-21 เป็นวัตถุประสงค์ทดสอบนั้นจะทำการทดสอบโดยอ้างอิงมาตรฐาน IEC 34-18-1 ซึ่งในการทดสอบจะประกอบหลายรอบการทดสอบ ซึ่งแต่ละรอบการทดสอบจะประกอบด้วย

- รอบย่อยการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อน
- รอบย่อยการทดสอบเพื่อการวินิจฉัย ซึ่งประกอบด้วย การทดสอบทางกล การทดสอบทางความชื้น และการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้า

#### 4.3 วัตถุประสงค์

##### 4.3.1 โครงสร้างของวัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการทดสอบนี้ จะใช้โครงสร้างแบบจำลองร่องสลีดที่ได้ทำการออกแบบ และรูปแบบระบบฉนวนที่ถูกทดสอบ ซึ่งแบบจำลองร่องสลีดที่ทำขึ้นรูปมานั้นควรมีความใกล้เคียงกับระบบฉนวนที่ถูกทดสอบ ซึ่งแบบจำลองร่องสลีดที่ทำขึ้นรูปมานั้นควรมีความใกล้เคียงกับระบบฉนวนจริงที่มีการประกอบเสร็จแล้ว ซึ่งเป็นการจำลองระบบฉนวนที่มีการพันแบบไวร์ววด์ ซึ่งมีรายละเอียดของแบบจำลองร่องสลีดดังนี้

##### 3.3.1.1 วัสดุที่นำมาใช้

- ส่วนประกอบที่เป็นโลหะ ( นอกเหนือจากส่วนที่นำไฟฟ้า ) โลหะสแตนเลส
- อินซูลเตอร์หรือเทอมินอล เซรามิค หรือวัสดุอื่นๆที่ทนต่ออุณหภูมิสูงๆได้

##### 3.3.1.2 ขนาดของวัสดุตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

ขนาดของวัสดุตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบควรประมาณขนาดที่ใช้ตามการใช้งานในเครื่องจักรกล ระยะครีพเอจ (creepage distance) ความหนาของวัสดุที่ใช้เป็นฉนวน และที่ว่างอากาศควรเหมือนหรือใกล้เคียงกับการใช้งานในเครื่องจักรกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.1.3 โครงสร้าง

ขดลวดสองขดถูกใส่เข้าไปในคู่สลิตที่เหมือนกันซึ่งเป็นส่วนประกอบที่จำเป็นของแบบจำลองร่องสลิต ร่องสลิตถูกสร้างจากแผ่นสแตนเลสในรูปแบบโดยประมาณและถูกยึดอยู่บนฐานของแบบจำลองร่องสลิต เทอมีนอลทั้ง 4 ชั้นจะถูกยึดอยู่บนฐานของแบบจำลองร่องสลิต แสดงแบบจำลองร่องสลิตที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์

ขดลวดทั้งสองขดนั้นได้จากการพันด้วยลวดตัวนำสองเส้นขนานกัน จำนวนรอบควรจะประมาณให้พอดีกับร่องสลิต โดยให้เหมือนกับการใช้งานในเครื่องจักรกล และขดลวดทั้งสองขดถูกต่อเข้ากับเทอร์มินอลเพื่อให้ง่ายในการทดสอบแรงดันระหว่างขดลวดกับกราวด์ ระหว่างขดลวดกับขดลวด และระหว่างรอบต่อขดลวด

แบบจำลองร่องสลิตไม่สามารถจำลองผลกระทบจากกระบวนการผลิตจริง เช่น เทคนิคในการพันขดลวด เนื่องจากผลกระทบจากกระบวนการผลิตนั้นมีค่าน้อยมาก แบบจำลองร่องสลิตอาจจะประกอบด้วยมือเพราะง่ายและสะดวก

### 4.3.2 รายละเอียดของโครงสร้างแบบจำลองร่องสลิต

ในห้องทดสอบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบของแบบจำลองร่องสลิตที่กำหนดไว้ว่าจะทำขึ้นเพื่อปรับปรุงหรือเพื่อให้สะดวกมากยิ่งขึ้นที่จะสร้างเป็นวัตถุทดสอบอย่างไรก็ตามถ้าประสบการณ์ที่ผ่านมาในการหาค่าระดับชั้นความร้อนจนไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ หากการออกแบบแบบจำลองร่องสลิตไม่มีความใกล้เคียงกับความเป็นจริง ฉะนั้นโครงสร้างของแบบจำลองร่องสลิตที่ได้แสดงรายละเอียดนี้ควรปฏิบัติตามอย่างพิถีพิถัน ประสบการณ์ได้แสดงให้เห็นว่าเพียงการพิถีพิถันในการออกแบบและการเตรียมแบบจำลองร่องสลิตจะมีผลต่อวัสดุสามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้

แบบจำลองร่องสลิตที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์แล้วก็จะประกอบด้วยฐานโลหะรองรับที่มีความแข็งแรงสำหรับยึดเทอมีนอลที่ทำจากโพซีเลนหรือวัสดุอื่นๆ ที่เหมาะสม และยึดร่องสลิตทั้งสองที่ประกอบขึ้นมาจากแผ่นโลหะภายในและภายนอก ฐานรองรับมีไว้สำหรับแขวนแบบจำลองร่องสลิตขณะที่ทำการทดสอบการสั่นสะเทือน ร่องสลิตที่นำมาใช้ได้สะดวกจะทำมาจากแผ่นโลหะสแตนเลส ร่องสลิตที่ประกอบขึ้นภายในจะบรรจุขดลวดสองขด โดยมีฉนวนคั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรม (slot insulation) ฉนวนคั่นระหว่างขดลวดทั้งสอง (phase insulation) และย้ำให้ติดอยู่กับที่ด้วยลิ้ม (slot wedges) ส่วนประกอบเหล่านี้เป็นส่วนที่เหมือนกันกับที่ใช้ในมอเตอร์ขดลวดแต่ละขดนั้นได้จากการพันขดลวดตัวนำสองเส้นขนานกัน ดังนั้นการทดสอบแรงดันระหว่างขดลวดตัวนำกับขดลวดตัวนำสามารถทำการทดสอบได้ การพันขดลวดของเครื่องจักรกลนั้นสามารถพันลงในแบบที่ต้องการได้เมื่อมีความเหมาะสมแล้ว โครงสร้างและกระบวนการในการสร้างอาจจะถูกปรับปรุงจำลองให้ตรงกับความต้องการในการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.3 ส่วนประกอบของแบบจำลองร่องสลีต

- ลวดตัวนำ หุ้มด้วยแผ่นฟิล์มหนา
- ฉนวนกันระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรม (slot insulation) แผ่นฉนวนหนา 0.25 มิลลิเมตรตัดออกมาเพื่อทำเป็นม้วน โดยมีความกว้างทั้ง 4 ด้าน 70 มิลลิเมตรและพับขอบ 2 ด้านเข้ามาด้านละ 3.2 มิลลิเมตร สุตท้ายด้านทั้งสองจะเหลือความยาวด้านละ 64 มิลลิเมตร และมีส่วนที่ยื่นออกมาจากขอบสลีต 4.8 มิลลิเมตร
- ฉนวนกันระหว่างขดลวดทั้งสอง (phase insulation) แผ่นฉนวนบาง 0.25 มิลลิเมตรประกอบด้วยส่วนที่เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความยาว 75 มิลลิเมตร กว้าง 64 มิลลิเมตร และมีช่องว่างตรงกลางซึ่งมีความกว้าง 38 มิลลิเมตร เมื่อวัดจากจุดกึ่งกลางทำให้เหลือขอบกว้าง 13 มิลลิเมตร สำหรับส่วนที่เป็นส่วนโค้งที่ต่อกับด้านกว้างของสี่เหลี่ยมผืนผ้าทั้งสองด้านตัดส่วนโค้ง โดยใช้ด้านกว้างทั้งสองด้านของสี่เหลี่ยมผืนผ้า 64 มิลลิเมตรเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของขอบนอก และตัดส่วนโค้งที่เป็นขอบในซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 มิลลิเมตร คือวัดจากจุดกึ่งกลางของสี่เหลี่ยมผืนผ้า
- ลิ่ม (slot wedge) ลิ่มสำหรับยึดขดลวดให้อยู่กับที่ ตัดออกมาจากชิ้นที่มีลักษณะเป็นรูปตัว U โดยควรตัดให้มีความกว้าง 9.5 มิลลิเมตร และยาว 76 มิลลิเมตร ส่วนปลายด้านหนึ่งของลิ่มควรทำให้กลมเล็กน้อยเพื่อให้มั่นใจได้ว่าสามารถใส่เข้าไปในสลีตได้ง่าย
- ปลอกปลายสาย (sleeving) ปลอกปลายสายที่เป็นฉนวนมีขนาดและความยาวพอดีที่จะหุ้มปลายสายของขดลวดที่ยื่นออกมาจากจุดกึ่งกลางของสลีตเพื่อแบ่งขดลวดทั้งสองขดต่อเข้ากับเทอมินอล
- เชือก (tie cord) มีความยาวพอดีที่จะใช้มัดขดลวดกับปลายสายของขดลวดเข้าด้วยกัน
- เทปพันขดลวด เทปที่มีระดับทางไฟฟ้ากว้าง 13 มิลลิเมตร
- วารินิชหรือเรซินที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าวัสดุทั้งหมดที่กล่าวไปข้างต้นเป็นส่วนประกอบของระบบฉนวนทางไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ

### 4.3.4 การประกอบแบบจำลองร่องสลีต

- การพันขดลวด ขดลวดแต่ละขดควรมีการพันที่แน่น โดยมีรูปร่างคล้ายรูปไข่ ด้านที่ขนานกันมีความยาว 64 มิลลิเมตร และห่างกัน 44 มิลลิเมตร ส่วนโค้งของรูปไข่เป็นครึ่งวงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 44 มิลลิเมตร ขดลวดแต่ละขดประกอบด้วยลวดตัวนำ 2 เส้นด้วยมือจำนวน 20 รอบ (40 แท่งตัวนำ) เมื่อใส่ขดลวดทั้งสองลงในร่องสลีต นั้นก็หมายความว่าในแต่ละร่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สลีตจะมีลวดตัวนำ 80 แ่ง และได้ส่วนปลายสายของขดลวดแต่ละขด ออกมา 4 เส้น และปลายสายด้านใดด้านหนึ่งของขดลวดตัวนำเส้นเดียวกัน จะถูกตัดออกโดยเหลือความยาวเส้นละ 5 มิลลิเมตรออกมาจากขดลวดใกล้ กับตรงกลางด้านหนึ่งของครึ่งวงกลม ส่วนที่เหลือ 5 มิลลิเมตรนี้จะถูกพันให้อยู่กับที่ด้วยเทปพันขดลวดซึ่งเป็นปลายสายที่ไม่ได้นำไปต่อกับเทอมินอล โดยพันห่างกันอย่างน้อยที่สุด 5 มิลลิเมตร และส่วนของปลายสาย 2 เส้นที่ เหลือออกมาจากขดลวดจะมีการใส่ปลอกปลายสายปลายสายและปลอกปลาย สายจะถูกมัดเข้าด้วยกันด้วยเชือก

- การทำความสะอาดและประกอบชิ้นส่วนที่เป็นโลหะ ก่อนที่จะทำการประกอบ ชิ้นส่วนที่เป็นโลหะของแบบจำลองร่องสลีตแต่ละชิ้นจะถูกจุ่มลงในตัวทำ ละลายที่ประกอบด้วยโทลูอีนและแอลกอฮอล์สังเคราะห์ในอัตราส่วนที่เท่ากัน เป็นเวลาอย่างน้อยที่สุด 30 นาที เมื่อนำแต่ละชิ้นส่วนออกจากตัวทำละลาย และล้างออกด้วยตัวทำละลายบริสุทธิ์แล้วเช็ดให้แห้งด้วยผ้าสำลี ส่วนประกอบ ที่เป็นโลหะของแบบจำลองร่องสลีตควรประกอบด้วยความระมัดระวังเพื่อให้ มั่นใจว่าตรงส่วนที่เป็นร่องสลีตมีระยะห่างที่เท่ากันและด้านทั้งสองขนานกัน เพื่อความง่ายในการประกอบให้ตัดชิ้นไม้ที่มีขนาดเท่ากับความกว้างของร่อง สลีต และเพื่อให้สลีตอยู่ตรงกลางควรใส่ชิ้นไม้ในร่องสลีตก่อนที่จะทำการ อัดหนีตให้แน่น
- การใส่ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรม ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวด ทั้งสองกับเฟรมจะถูกตัดออกมาแล้วม้วนให้พอดีกับร่องสลีต และให้มี ส่วนของฉนวนยื่นออกมาจากขอบร่องสลีตด้านละ 5 มิลลิเมตร ฉนวนที่คั่น ระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรมจะถูกใส่เข้าไปในร่องสลีตอย่างระมัดระวัง เพื่อให้ส่วนของฉนวนที่ยื่นออกมาจากขอบร่องสลีตแต่ละด้านเท่ากัน
- การใส่ขดลวด ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรมจะถูกม้วนออกมา เหนือส่วนที่มีลักษณะคล้ายพื้นปลาตรงด้านบนของร่องสลีตเพื่อให้มั่นใจว่า ขดลวดจะไม่ถลอกเมื่อใส่ลงไป ในร่องสลีต ใส่ขดลวดขดล่างลงในร่องสลีต ให้ปลายสายที่ไม่ต่อกับเทอมินอลอยู่ด้านบนส่วนที่ใช้ต่อกับเทอมินอลอยู่ ด้านบน หลังจากใส่ขดลวดขดล่างแล้ว ใส่ฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสอง และระมัดระวังในการใส่เพื่อให้มั่นใจว่าฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองปิดทับ ขดลวดขดล่างทั้งหมด ถ้าฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองมีขนาดใหญ่มาก ขอบของฉนวนจะถูกพับขึ้นไปทางด้านบนของร่องสลีต ฉนวนที่คั่นระหว่าง ขดลวดทั้งสองจะต้องมีขนาดและวางในตำแหน่งที่แน่ใจว่าปิดทับขดลวด ด้านล่างทั้งหมด ปลายของขดลวดขดล่างจะต้องวางในแนวราบเพื่อหลีกเลี่ยง การทำให้ขอบของฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองเสียหาย การใส่ขดลวดขด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บนก็ทำในลักษณะเดียวกันกับการใส่ขดลวดขดล่างแต่ปลายที่ไม่ได้ต่อกับเทอมินอลอยู่ด้านบน และส่วนที่ใช้ต่อกับเทอมินอลด้านล่าง จัดขอบของขดลวดขดบนให้อยู่ในตำแหน่งเดียวกับขดลวดขดล่างเพื่อให้แน่ใจว่าลวดตัวนำของขดลวดขดบนไม่เลื่อนออกมาจนกว่าจะถึงที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสอง

- การต่อปลายสายกับเทอมินอล ปลายสายจะต้องวัดขนาดให้พอดีที่จะต่อเข้ากับเทอมินอลปกส่วนปลายของปลายสายออก 13 มิลลิเมตร แล้วทำการบัดกรีก่อนที่จะต่อกับเทอมินอลปลายสายของขดลวดขดล่างต่อ เข้ากับเทอมินอลที่อยู่ด้านใน ส่วนปลายสายของขดลวดขดบนต่อเข้ากับเทอมินอลที่อยู่ด้านนอก ถ้าขดลวดที่ใส่เข้าไปในฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรมเกิดเคลื่อนให้ใส่ลิ่มเข้าไปโดยให้อยู่บนฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดทั้งสองกับเฟรม
- การทดสอบทางไฟฟ้า วัดความต้านทานของขดลวดถ้าต้องการ และแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการวัดความต้านทานได้แนะนำไว้ หากพบว่าขดลวดผ่านการทดสอบ ก็ทำการชุบวาร์นิชหรือเรซินที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนทางไฟฟ้า
- การชุบวาร์นิชหรือเรซิน น้ำยาวาร์นิชหรือเรซินควรมีการนำมาใช้ในลักษณะเดียวกันกับที่ใช้ในเครื่องจักรกลทั่วไป
- การติดตั้งแบบจำลองร่องสลีต แบบจำลองร่องสลีตควรบรรจุอยู่ในภาชนะซึ่งภาชนะนั้นจะต้องมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรองรับน้ำหนัก แบบจำลองร่องสลีตจำนวน 10 ชั้นหรือ 20 ชั้น ในกรณีที่ทดสอบพร้อมกัน โดยที่ภาชนะนั้นต้องมีระยะห่างระหว่างแบบจำลองร่องสลีตที่เพียงพอต่อการไหลเวียนของอากาศ และขนาดของภาชนะนั้นควรที่จะสามารถนำเข้าไปดูบดสอบความชื้นละไอสั่นได้

#### 4.3.5 จำนวนชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ

จำนวนแบบจำลองร่องสลีตอย่างน้อย 10 ชิ้นควรถูกทำการทดสอบที่แต่ละอุณหภูมิทดสอบ สำหรับแต่ละระบบฉนวนที่ทำการทดสอบ

#### 4.3.6 การตรวจสอบคุณภาพก่อนการทดสอบ

ก่อนที่จะทำการทดสอบรอบย่อยของการเร่งอายุทางความร้อน ควรมีการทดสอบเพื่อทำการตรวจคุณภาพของชิ้นงานที่นำมาทดสอบ โดยสามารถตรวจสอบได้ดังนี้

- การตรวจสอบด้วยสายจาง
- การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 34-1[5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ขนาด 400 v ระหว่างตัวนำกับตัวนำซึ่งควรมีค่าของกระแสไม่เกิน 50mA

#### 4.3.7 การทดสอบเพื่อการวินิจฉัยเบื้องต้น

ภายหลังจากการทดสอบเพื่อทำการตรวจคุณภาพของชิ้นงานที่นำมาทดสอบ การทดสอบเพื่อการวินิจฉัยควรมีการทดสอบเพื่อสังเกตว่ามีความผิดปกติกับระบบฉนวนที่นำมาทดสอบหรือไม่

### 4.4 รบย่อยการทดสอบเพื่อการวินิจฉัย

#### 4.4.1 การทดสอบทางกล

ในแต่ละรอบย่อยการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อน ภายหลังจากทำให้เย็นภายใต้อุณหภูมิห้องแล้ว แต่ละแบบจำลองร่องสลิตควรมีการทดสอบด้วยการให้ความเค้นทางกลบนโต๊ะสั่นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งแบบจำลองร่องสลิตนั้นควรมีการติดตั้งเพื่อให้เกิดแรงทางกลทำให้มีการเคลื่อนที่ในมุมที่ทำให้เกิดการสั่นบริเวณจุดสิ้นสุดของการพันขดลวด ซึ่งในการทดสอบให้มีการสั่นนั้นจะไม่มีกรทดสอบทางด้านแรงดันเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ซึ่งค่ายอดของการสั่นนั้นจะให้มีค่า 0.2 มม. ที่ความถี่ 60 Hz หรือ 0.3 มม. ที่ความถี่ 50 Hz ถ้าความเค้นที่ทำการทดสอบไม่ได้ตามที่กำหนดนั้นให้มีรายงานในผลการทดสอบ

#### 4.4.2 การทดสอบทางความชื้น

การทดสอบทางแรงดันไฟฟ้าควรมีการทำการทดสอบอย่างน้อย 48 ชั่วโมง ซึ่งควรมีการทำให้ชิ้นงานมีความเปียกชื้น และไม่มีการทดสอบทางแรงดันไฟฟ้าในระหว่างทดสอบทางความชื้นนี้ ซึ่งรายละเอียดของตู้อบความชื้นที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้

##### 4.4.2.1 ตู้อบความชื้น

สภาพบรรยากาศภายในตู้อบความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 % จะมีไอน้ำมาเกาะบริเวณผนังของตู้อบความชื้น ถาดที่รองรับน้ำจะมีเครื่องทำความร้อนจุ่มอยู่เพื่อให้ความร้อนแก่น้ำให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 5 ถึง 10 องศาเซลเซียสจากอุณหภูมิห้อง ฝาครอบของตู้อบความชื้นควรมีการฉนวนและไม่ควรมีความลาดเอียงเพื่อป้องกันการหยดของหยดน้ำลงบนวัตถุทดสอบ ภาชนะของตู้อบความชื้นควรสร้างด้วยวัสดุที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อน ควรหลีกเลี่ยงจุดต่อที่ไม่ใช่โลหะ ฝาเปิดควรสร้างให้มีขอบยื่นออกมาเพื่อที่จะให้ความชื้นที่อยู่รอบๆฝาเปิดถ่ายเทเข้าสู่ในตู้อบ

##### 4.4.2.2 ตู้อบความชื้นสำหรับวัตถุทดสอบที่เย็นตัวลง (ที่อุณหภูมิห้อง)

ฐานของวัตถุทดสอบควรติดตั้งโดยให้วัตถุทดสอบเย็นกว่าอากาศที่อยู่รอบๆเพื่อให้แน่ใจว่าระบบฉนวนมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดที่ทำให้เกิดไอน้ำของอากาศ โดยถูกทำให้เย็นโดยตัวทำความเย็น (น้ำ) ตัวนำความเย็นเป็นตัวควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งซึ่งได้กำหนดไว้โดยให้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของวัตถุทดสอบกับอุณหภูมิของอากาศที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ภายในตู้อบ ทำให้มีไอน้ำเกาะที่วัตถุทดสอบ ความแตกต่างนี้ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิห้องที่เปลี่ยนแปลง เมื่อภาตรองรับน้ำและตัวทำความเย็นเป็นตัวควบคุมอุณหภูมิและมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของวัตถุทดสอบกับอุณหภูมิของอากาศที่อยู่ภายในตู้อบนี้ถูกจำกัดด้วยปริมาตรของตู้อบความชื้น

การควบคุมอุณหภูมิต้องระวังเหตุการณ์การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิห้องจนถึงระดับเดียวกันกับอุณหภูมิน้ำ ซึ่งความร้อนที่สูญเสียให้แก่ภาชนะที่ให้ความเย็นแก่วัตถุทดสอบสามารถทดแทนได้โดยการให้ความร้อนแก่น้ำ ซึ่งก็จะทำให้เกิดความสมดุลของอุณหภูมิทั่วทั้งตู้อบความชื้นตามที่กำหนด ถ้าอุณหภูมิห้องลดระดับลงจนต่ำกว่าภาชนะที่ให้ความเย็นแก่วัตถุทดสอบสามารถควบคุมอุณหภูมิได้โดยการให้ความร้อนแก่น้ำโดยเครื่องทำความร้อน เพื่อให้มีความชัดเจนยิ่งขึ้นในการมีไอน้ำเกิดขึ้น ซึ่งก็คือการทำงานร่วมกันของการให้ความร้อนและความเย็นแก่ระบบเพื่อให้เกิดความสมดุล ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งต่อการควบคุมอุณหภูมิของตู้อบความชื้นภายในตู้อบ ซึ่งค่าของอุณหภูมิ ณ ส่วนต่างๆของตู้อบความชื้น

#### 4.4.3 การทดสอบทางแรงดันไฟฟ้า

ในการตรวจสอบสภาพชิ้นงานที่ทำการทดสอบและตัดสินใจการมาถึงของจุดสิ้นสุดอายุของระบบฉนวนที่ทำการทดสอบ จะทำโดยการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่กำลังภายหลังรับการทดสอบทางความชื้นแล้ว ซึ่งระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบขึ้นอยู่กับชนิดของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบนั้นใช้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้าพิกัดใช้งานเท่าไร

การทดสอบทางแรงดันไฟฟ้านั้นการทดสอบระหว่างเฟรม และการทดสอบระหว่างขดลวดกับขดลวด นั้นจะใช้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขอบเขตการใช้งานจริงของระบบฉนวนที่นำมาทดสอบ ส่วนการทดสอบด้วยระดับแรงดันไฟฟ้าอื่นนั้นขึ้นอยู่กับประสบการณ์ในการทดสอบและควรมีรายงานในผลการทดสอบ

การป้อนแรงดันไฟฟ้านั้นควรป้อนเป็นเวลานาน 10 นาที สำหรับแต่ละชิ้นงานซึ่งควรเริ่มต้นการทดสอบในระหว่างรอบต่อรอบของขดลวดหลังจากนั้นทำการทดสอบระหว่างขดลวดกับขดลวด และสุดท้ายทำการทดสอบระหว่างขดลวดกับกราวด์

## บทที่ 5

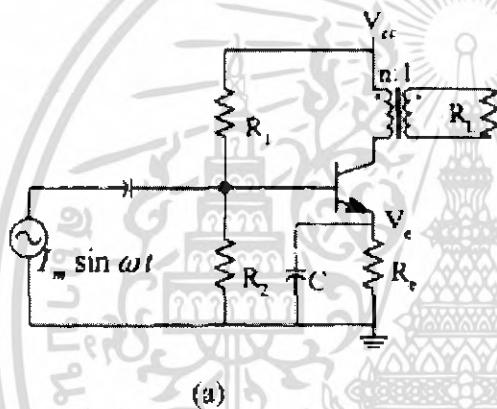
### การทดลองและผลการทดลอง

#### 5.1 บทนำ

ในบทนี้จะนำเสนอทำการศึกษากการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนและตรวจสอบด้วยวงจรถอิลีกทรอนิกส์ โดยศึกษาพฤติกรรมจากวงจรสมมูลของฉนวน การเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นกระแสและแรงดัน โดยใช้วงจรถอิลีกทรอนิกส์สร้างสัญญาณแรงดันและสัญญาณความถี่ต่างเพื่อใช้ทดสอบกับการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อน เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของวงจรสมมูลของระบบฉนวน

#### 5.2 การออกแบบการทดลอง

##### 5.2.1 การออกแบบวงจรสร้างสัญญาณแรงดันและความถี่



รูปที่ 5.1 Amplifier Class A เชื่อมต่อโดย หม้อแปลง

จากวงจรขยายในรูปที่ 5.1 คำนวณหากระแสไบอัสซึ่งจะได้ตามสมการ

$$V_{bb} = \frac{V_{CC} R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R_{BB} = R_1 // R_2$$

$$I_{CQ} = \frac{\beta(V_{BB} - 0.6)}{R_{BB} + (\beta + 1)R_E} \quad (5.1)$$

เมื่อทราบค่า  $I_{CQ}$  จะสามารถหาค่าของ  $r_{be}$  ได้เป็น

$$r_{be} = \frac{v_T \beta}{I_{CQ}} \quad (5.2)$$

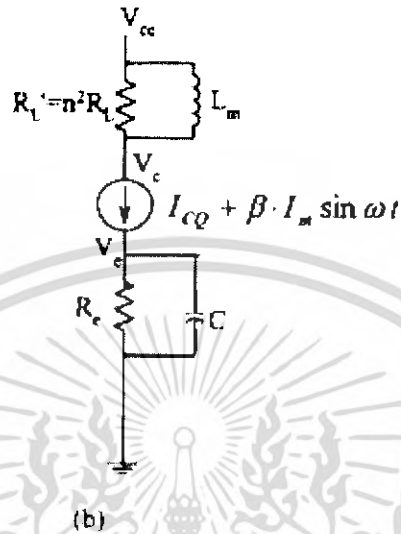
ดังนั้นอัตราขยายของวงจรจะเป็น

$$A_V = \frac{-\beta(Z_L)}{r_{bb} + r_{be} + (\beta + 1)R_E} \quad (5.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วงที่ความถี่ใช้งาน  $C$  ทุกตัวถือว่ามีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำจนไม่มีผลต่อวงจร ถูกพิจารณาเป็นลัดวงจร ดังนั้นอัตราขยายของวงจรจะเป็น

$$A_v = \frac{-\beta(Z_L)}{r_{hh} + r_{hc}}$$



รูปที่ 5.2 วงจรเสมือน Amplifier Class A เชื่อมต่อโดย หม้อแปลง

## 5.2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

### - แบบจำลองร่องสลีต

ในการทำโครงสร้างแบบจำลองร่องสลีตเพื่อใช้ในการทดสอบนั้น จะใช้สแตนเลสแผ่น ขนาดความหนา 1.5 มม. เพื่อใช้ในการทำส่วนประกอบต่างๆของแบบจำลองร่องสลีตตามมาตรฐาน IEC 34-18-21 ซึ่งส่วนประกอบต่างๆประกอบด้วยฐานร่องสลีต สลีดด้านใน สลีดด้านนอก และ บล็อกซัพพอร์ต

### - ระบบฉนวน

ระบบฉนวนส่วนต่างๆที่นำมาทดสอบนั้นประกอบด้วย ลวดทองแดงอาบน้ำยาเบอร์ SWG 18 กระดาษฉนวนโนเม็กซ์ (Nomex) ความหนา 0.3 มม. ท่อร้อยสายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม. ด้ายสำหรับพันลวด วาร์นิชเบอร์ F-1600 ซึ่งส่วนประกอบต่างๆ

### - ตู้อบความร้อน

ในการให้ความร้อนแก่วัตถุทดสอบจะกระทำโดยใช้ตู้อบความร้อน ซึ่งอาศัยขดลวดให้ความร้อนและมีพัดลมในการทำให้อากาศภายในเกิดการหมุนเวียนเพื่อให้อุณหภูมิภายในตู้อบความร้อนในแต่ละตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงมากที่สุด

### - โตะสั่น

โตะสั่นที่ใช้ในการทดสอบ ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนขนาด 0.3 มม. ที่ความถี่ 50Hz โดยอาศัยการขับเคลื่อนผ่านลูกเบี้ยว ซึ่งลูกเบี้ยวจะส่งกำลังผ่านสายพานไปยังเพลลาและจะขับเคลื่อนสปริงให้เกิดการสั่นสะเทือนอีกต่อหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### - ตู้อบความร้อน

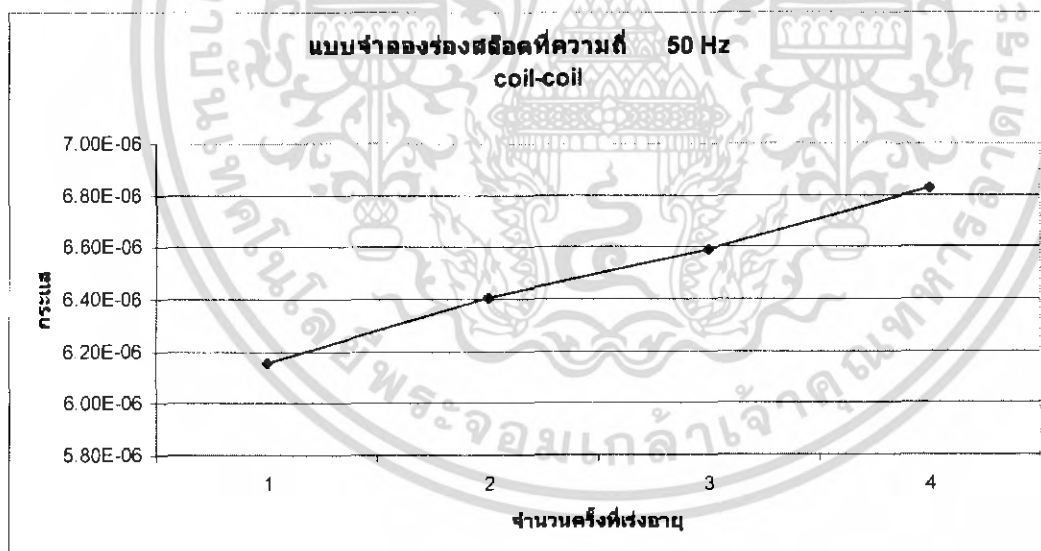
การทำงานของตู้อบความร้อนที่ใช้ในการทดลองนั้นจะมีขดลวดให้ความร้อนแก่น้ำทำให้เกิดไอน้ำและความชื้นภายในตู้อบความร้อน และมีตัวควบคุมอุณหภูมิทำการรักษาอุณหภูมิให้อยู่ที่ 30 °C

### - อุปกรณ์ทดสอบทางไฟฟ้า

ในการทดลองแรงดันไฟฟ้าจะทำการทดสอบ ระหว่างรอบต่อรอบของขดลวด ซึ่งจะใช้ขนาดแรงดันไฟฟ้า 120 V ส่วนการทดสอบระหว่างขดลวดกับขดลวดและการทดสอบระหว่างขดลวดกับเฟรมนั้นจะใช้แรงดันไฟฟ้า 380 V และป้อนแรงดันทดสอบที่ความถี่ 50 ,1k , 10k , 40k เข้าทดสอบระบบจนจบ

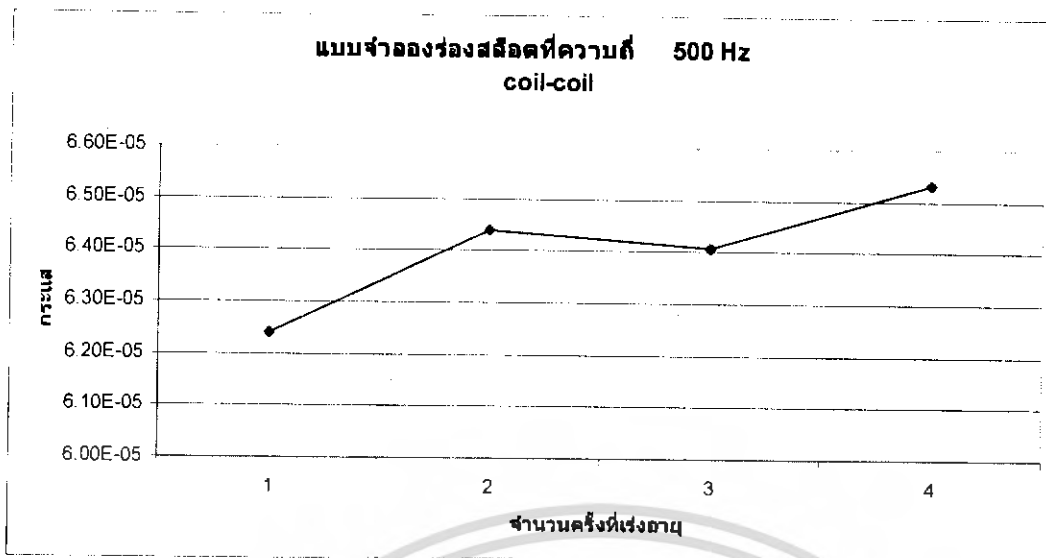
## 5.3 ผลการทดลอง

ผลการทดสอบของแบบจำลองร่องสลีดที่ 1 มีค่าดังนี้

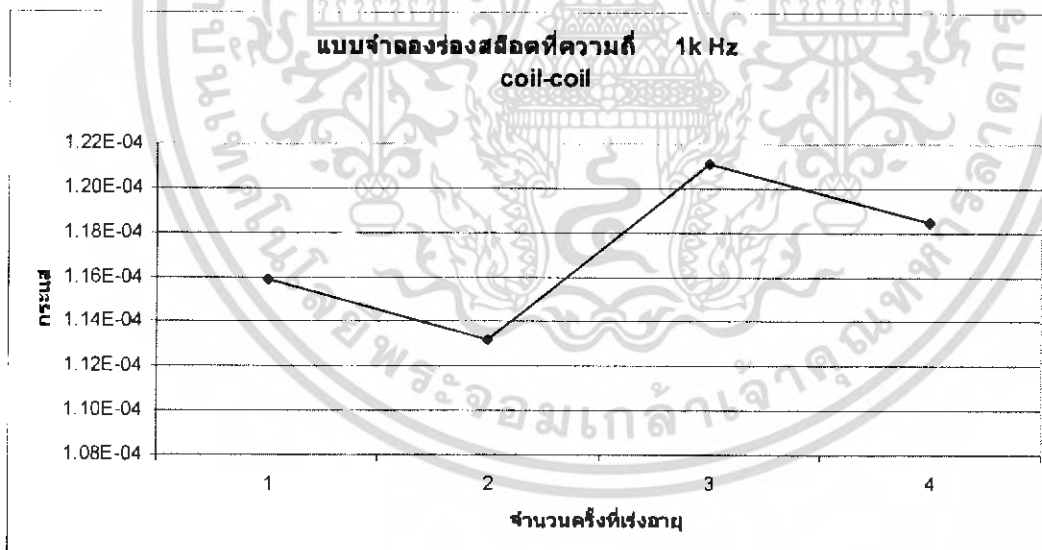


รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับจำนวนครั้งการแรงอาญที่ความถี่ 50 Hz Coil to Coil

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

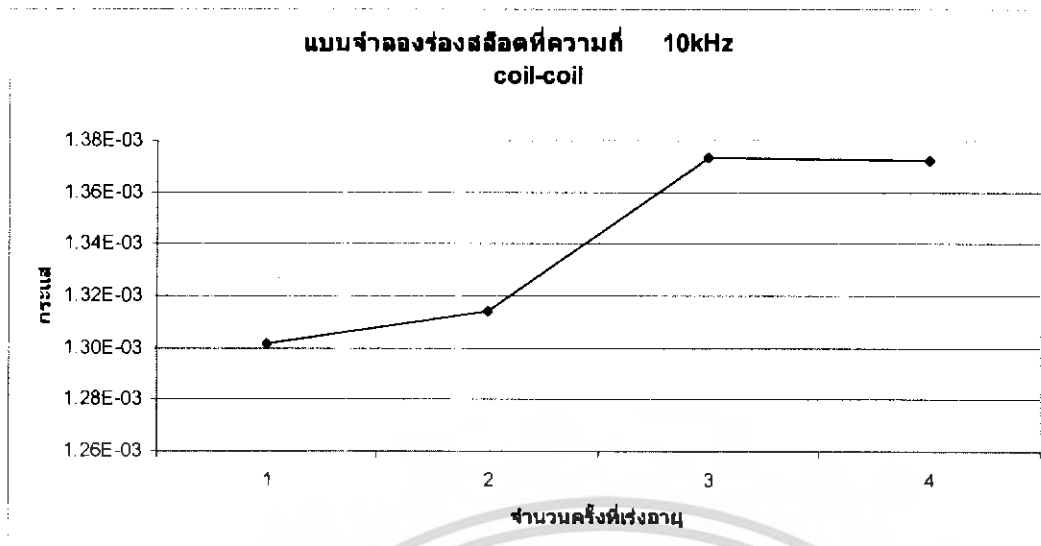


รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับจำนวนครั้งที่การเร่งอายุที่ความถี่ 500 Hz  
Coil to Coil

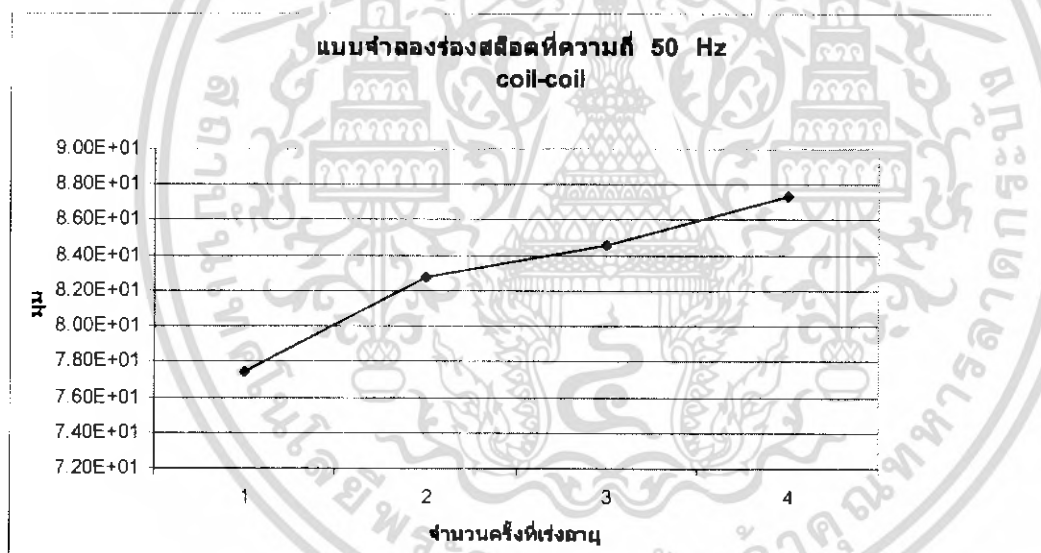


รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับจำนวนครั้งที่การเร่งอายุที่ความถี่ 1 KHz  
Coil to Coil

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

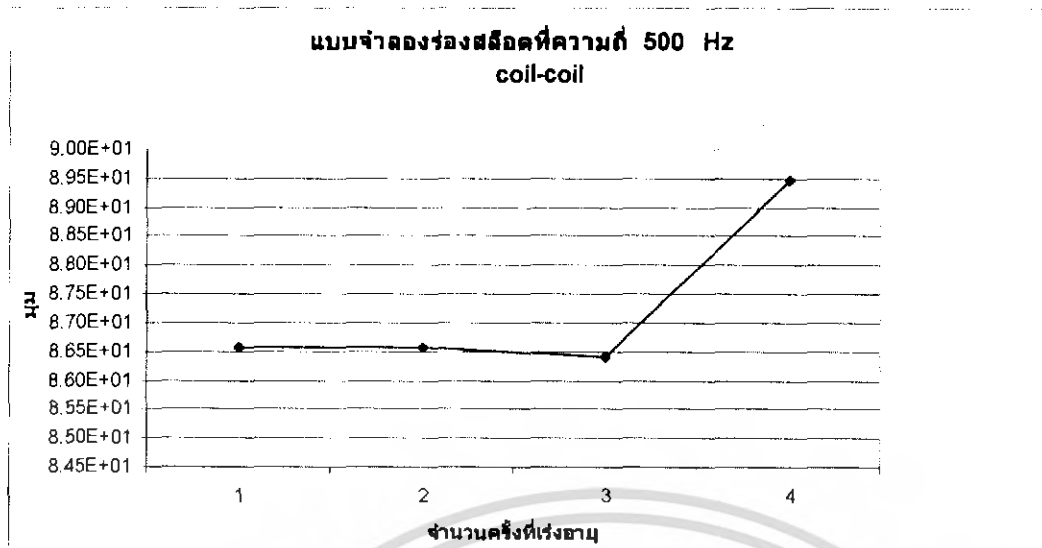


รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับจำนวนครั้งที่แรงอาณที่ความถี่ 10 KHz  
Coil to Coil

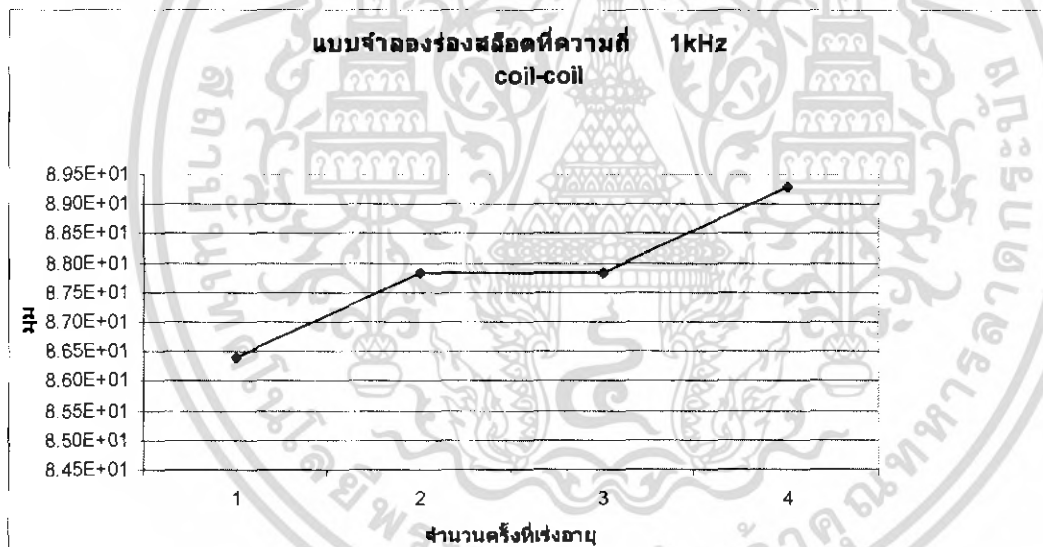


รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมมกับจำนวนครั้งที่แรงอาณที่ความถี่ 50 Hz  
Coil to Coil

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

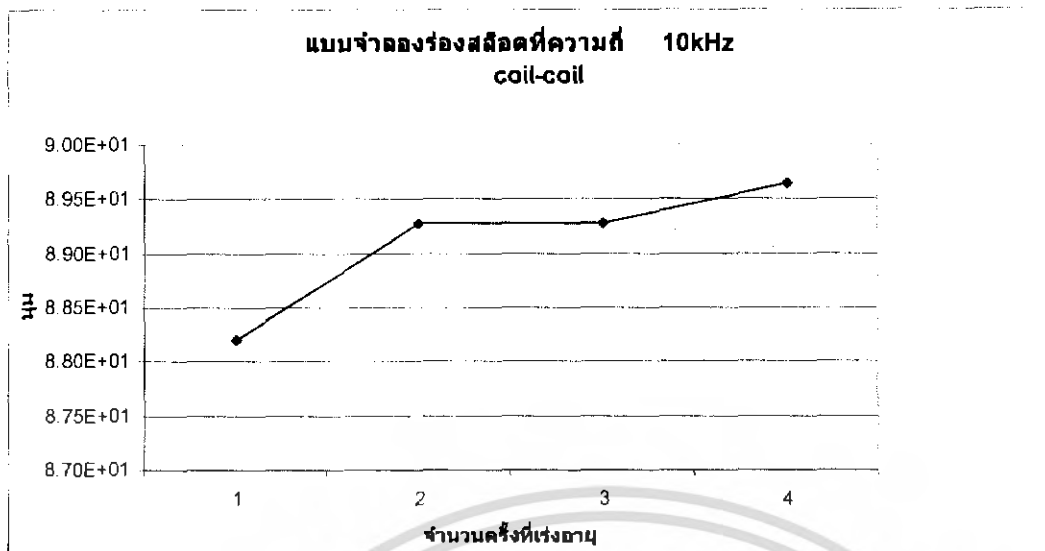


รูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับจำนวนครั้งการเรียงอายุที่ความถี่ 500 Hz  
Coil to Coil

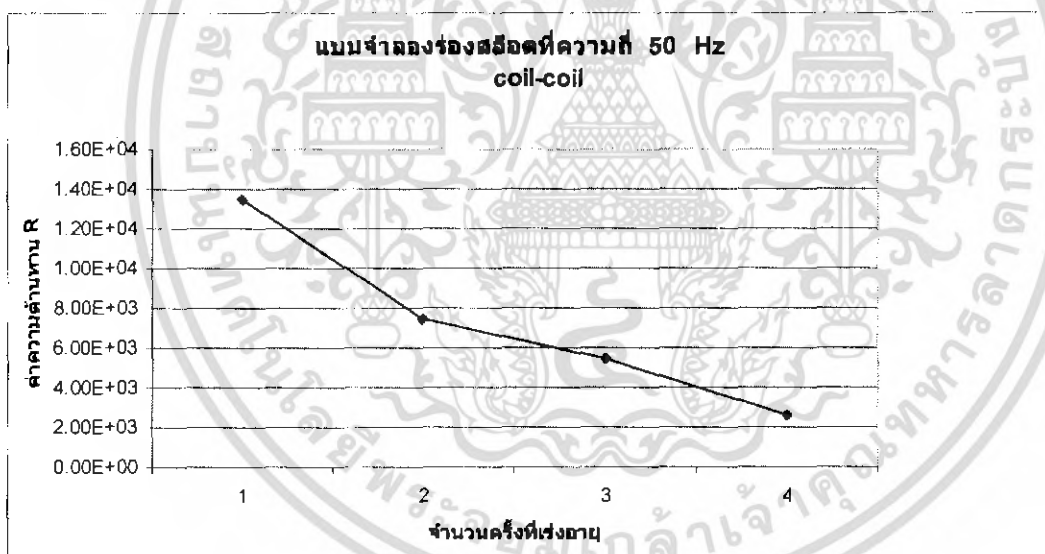


รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับจำนวนครั้งการเรียงอายุที่ความถี่ 1 KHz  
Coil to Coil

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

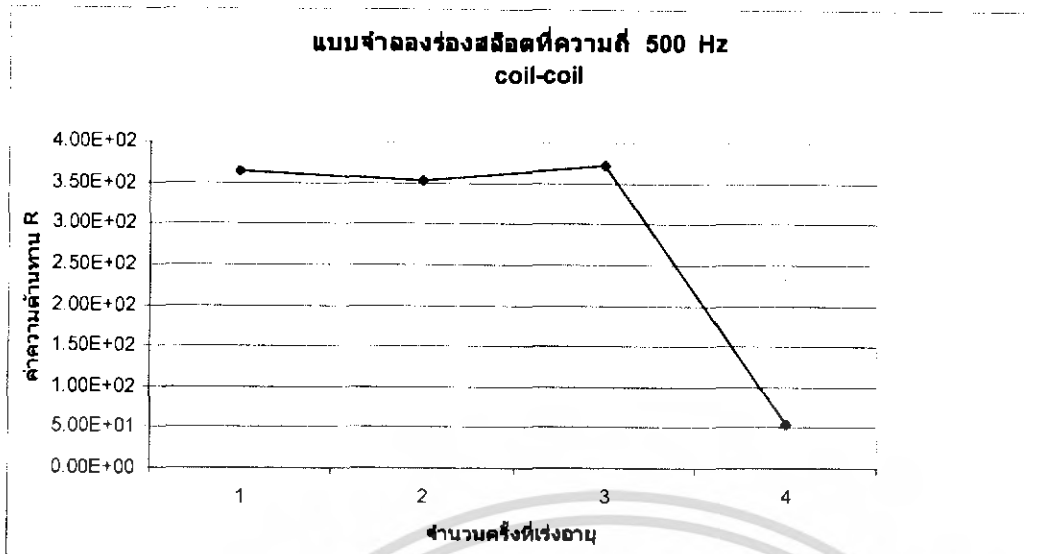


รูปที่ 5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับจำนวนครั้งการเรียงอายุที่ความถี่ 10 KHz  
Coil to Coil

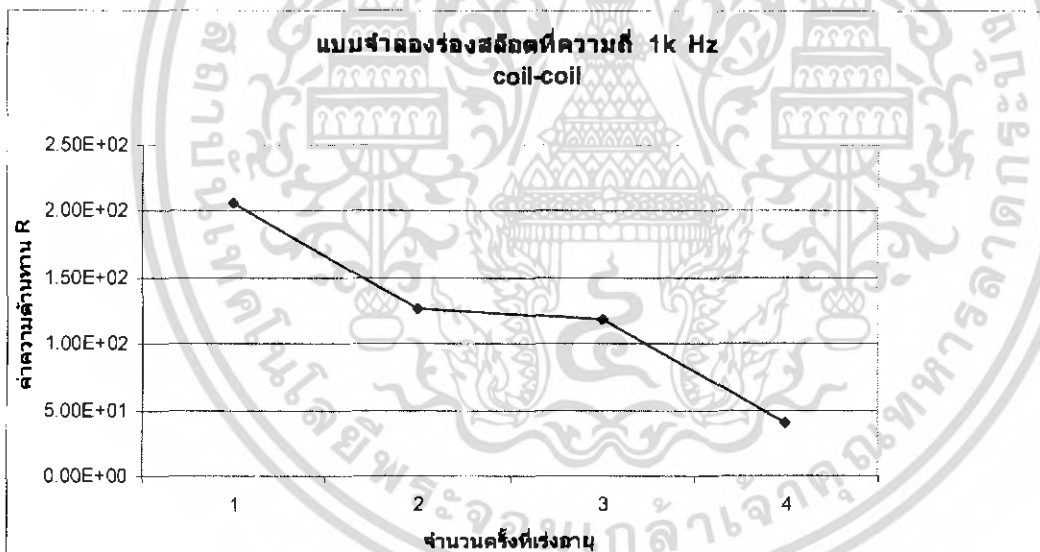


รูปที่ 5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน R กับจำนวนครั้งการเรียงอายุที่  
ความถี่ 50 Hz Coil to Coil

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

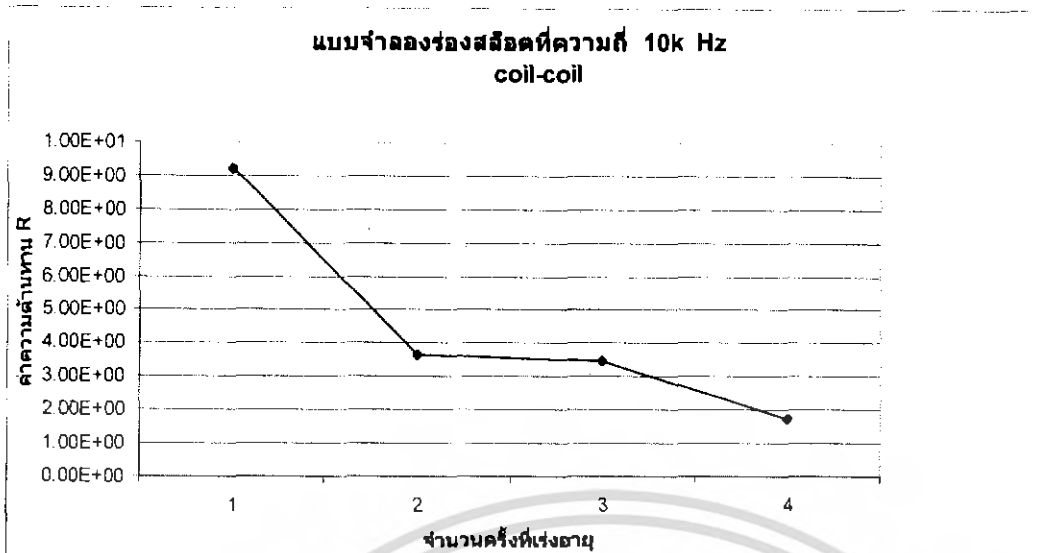


รูปที่ 5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน R กับจำนวนครั้งที่แรงอายุที่ความถี่ 500 Hz Coil to Coil

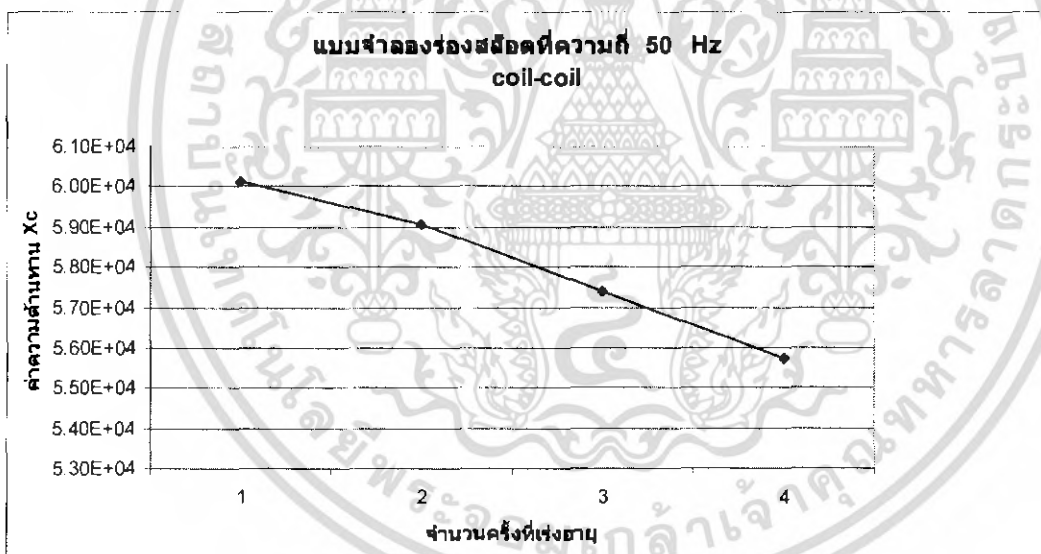


รูปที่ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน R กับจำนวนครั้งที่แรงอายุที่ความถี่ 1 KHz Coil to Coil

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

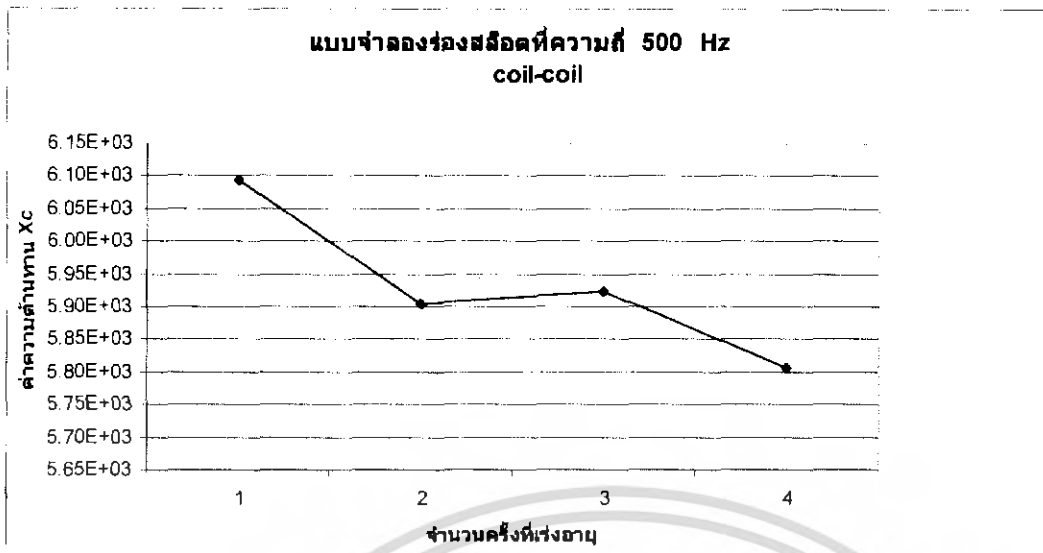


รูปที่ 5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน R กับจำนวนครั้งที่เรียงสายที่ความถี่ 10 KHz Coil to Coil

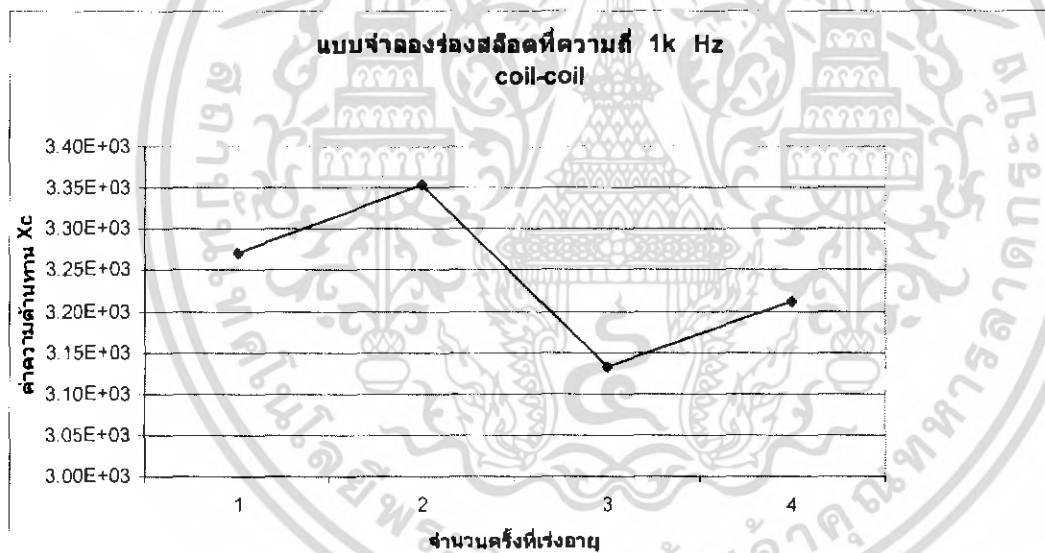


รูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน Xc กับจำนวนครั้งที่เรียงสายที่ความถี่ 50 Hz Coil to Coil

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

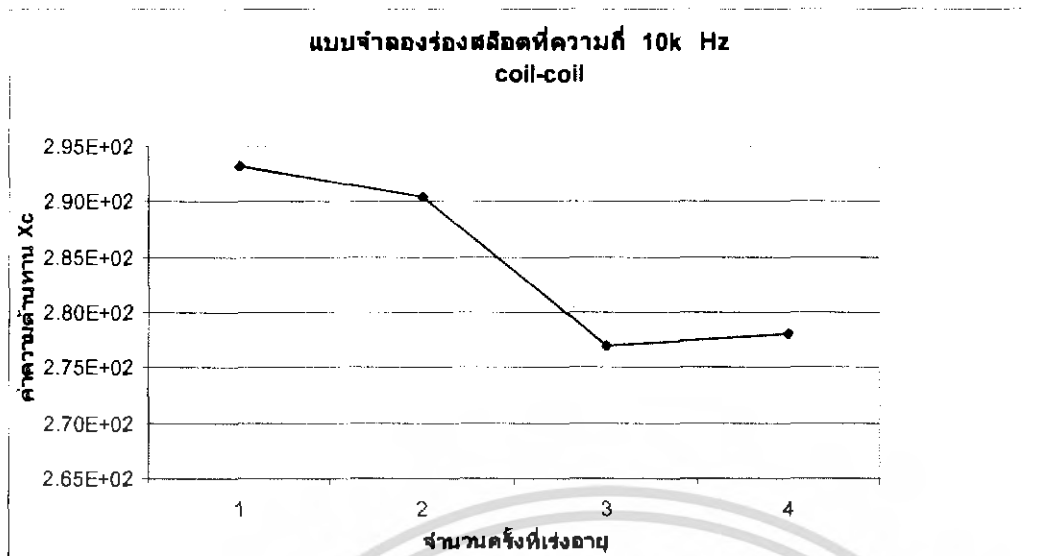


รูปที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน  $X_c$  กับจำนวนครั้งที่แรงอายุที่ความถี่ 500 Hz Coil to Coil

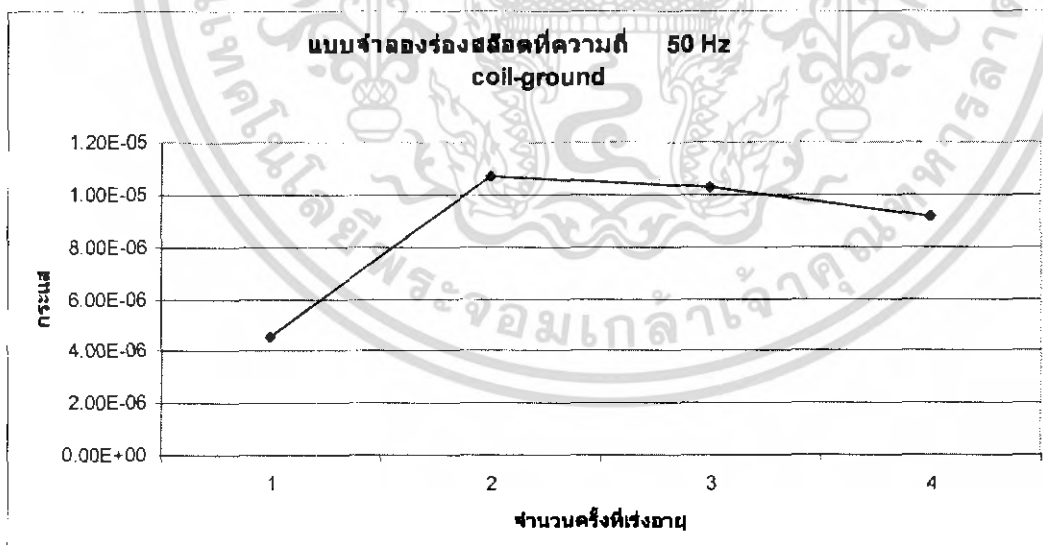


รูปที่ 5.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน  $X_c$  กับจำนวนครั้งที่แรงอายุที่ความถี่ 1 KHz Coil to Coil

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

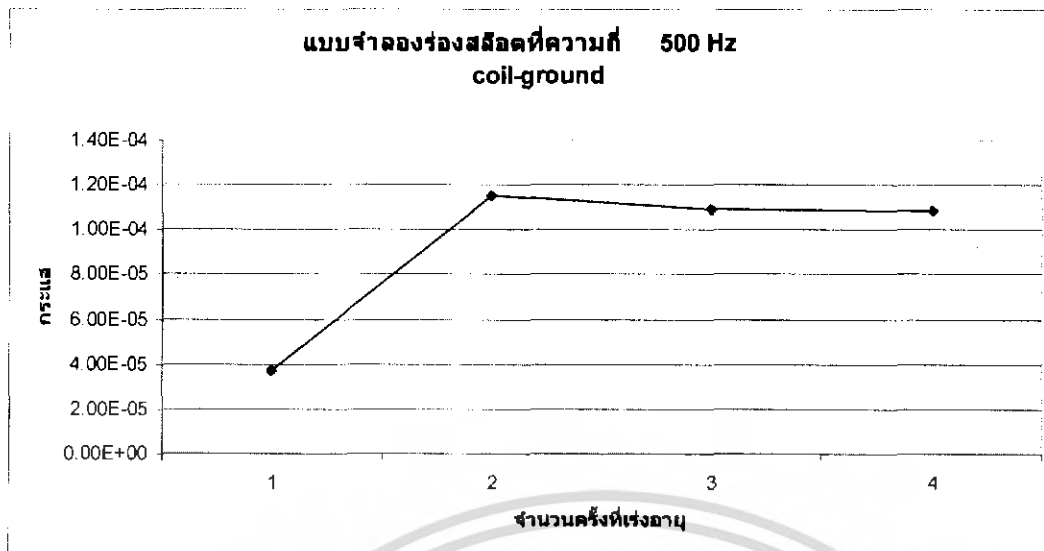


รูปที่ 5.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน  $X_c$  กับจำนวนครั้งที่เรียงอายุที่ความถี่ 10 KHz Coil to Coil

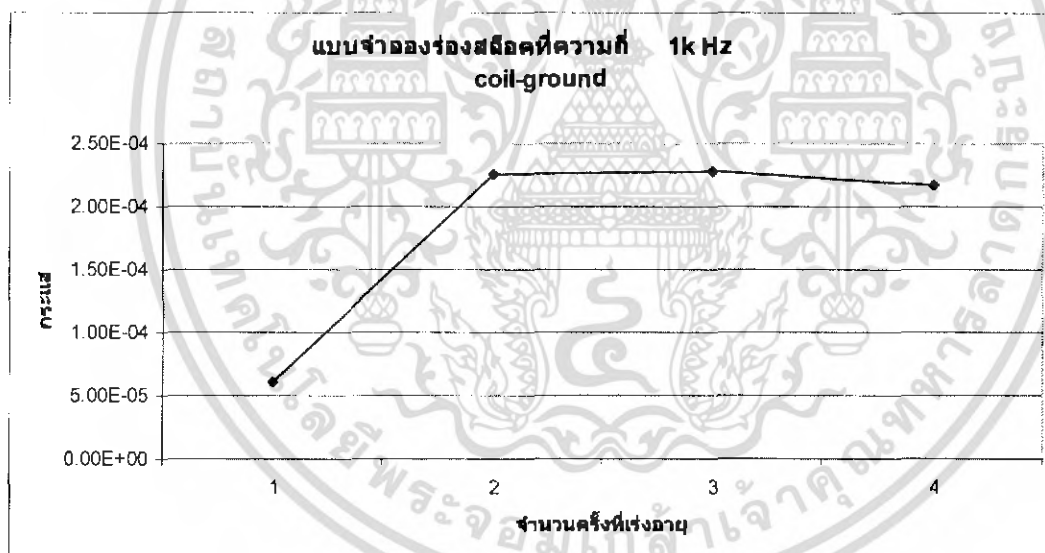


รูปที่ 5.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเสถกับจำนวนครั้งที่เรียงอายุที่ความถี่ 50 Hz Coil to Ground

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

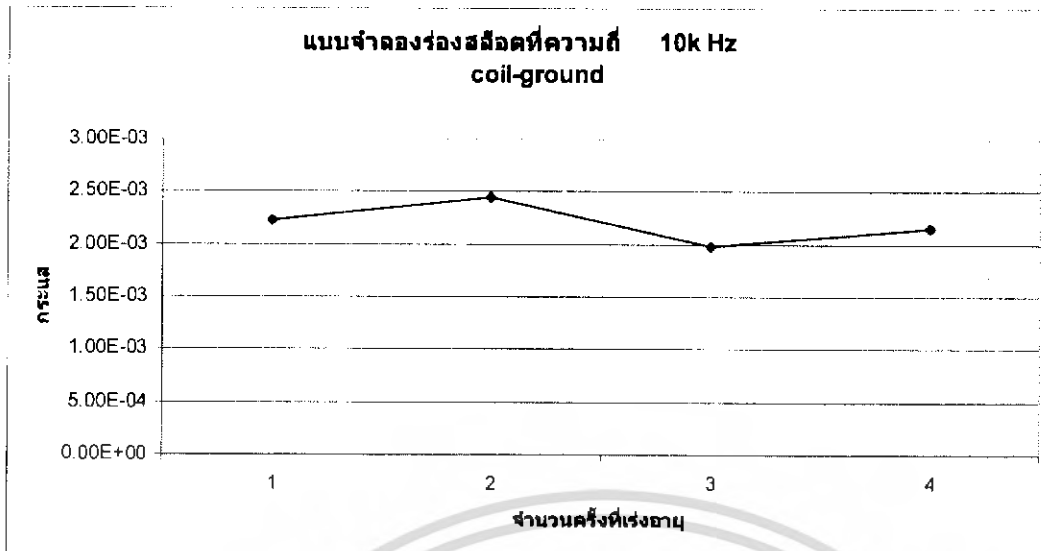


รูปที่ 5.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับจำนวนครั้งที่แรงอายุที่ความถี่ 500 Hz Coil to Ground

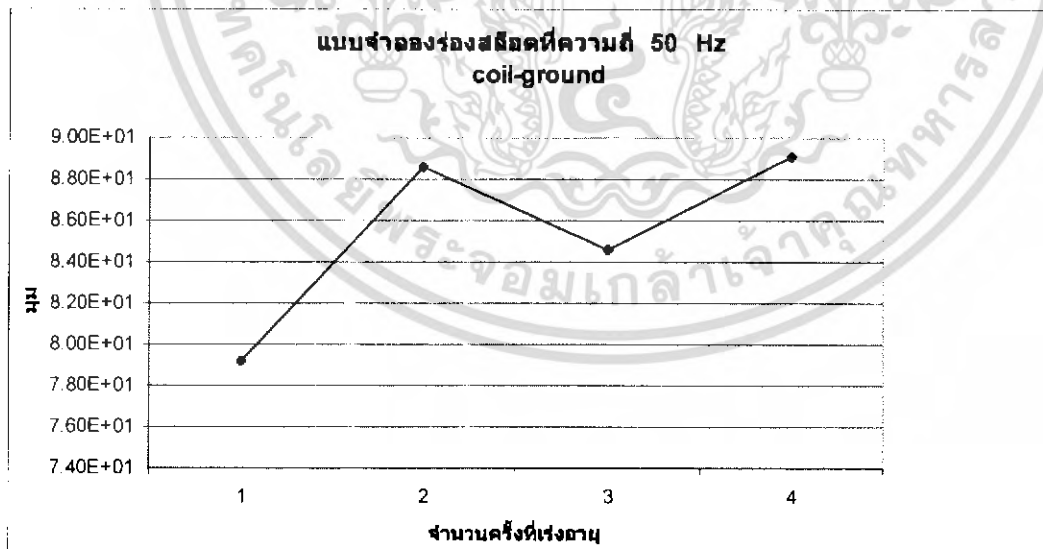


รูปที่ 5.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับจำนวนครั้งที่แรงอายุที่ความถี่ 1 KHz Coil to Ground

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

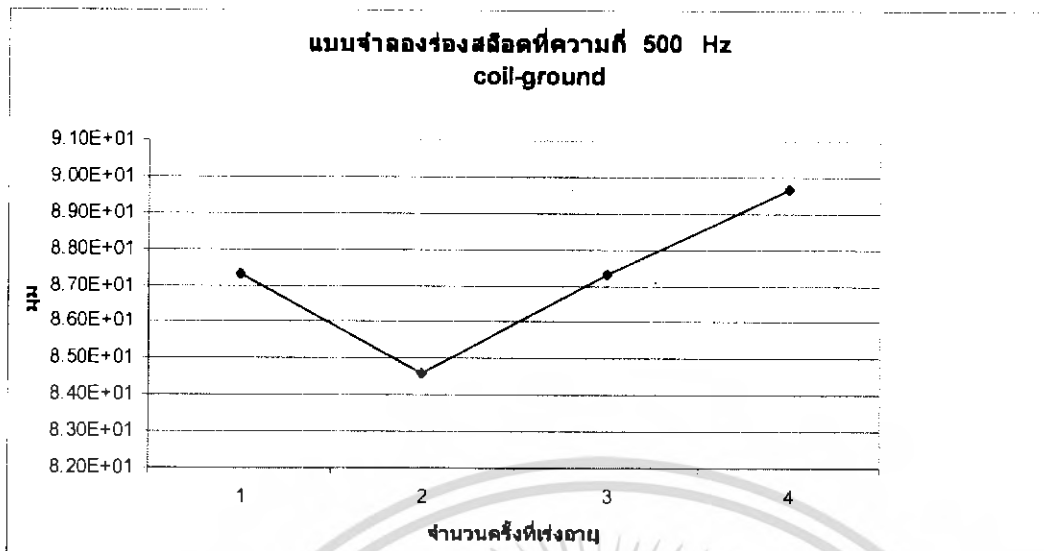


รูปที่ 5.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับจำนวนครั้งที่เรียงอายุที่ความถี่ 10 KHz Coil to Ground

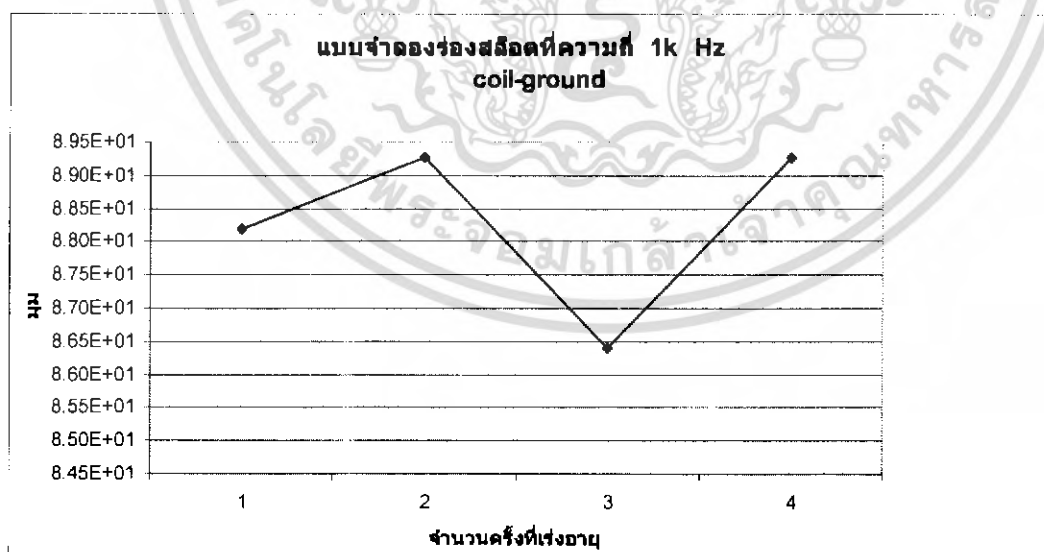


รูปที่ 5.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนมกับจำนวนครั้งที่เรียงอายุที่ความถี่ 50 Hz Coil to Ground

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

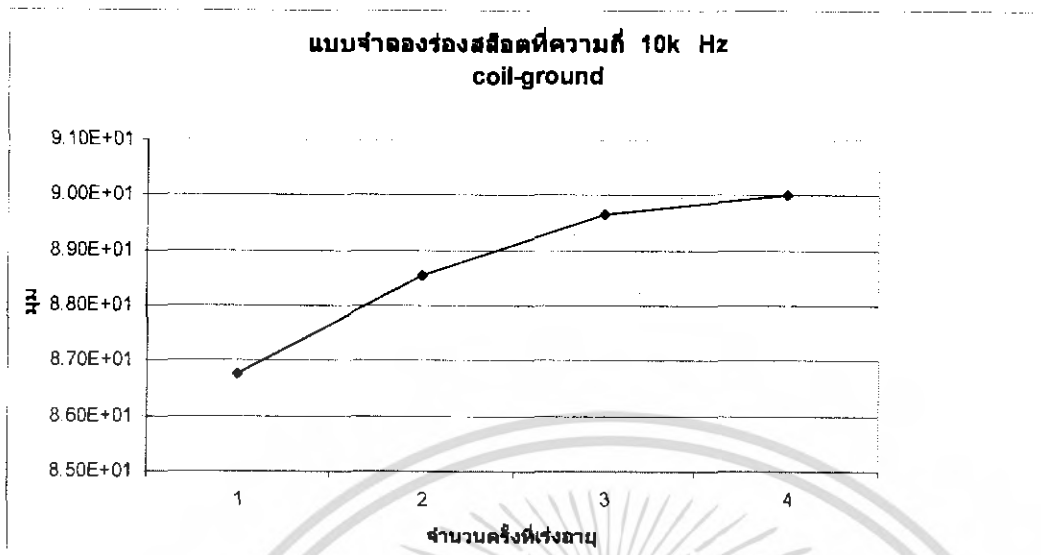


รูปที่ 5.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับจำนวนครั้งที่พันสายที่ความถี่ 500 Hz Coil to Ground

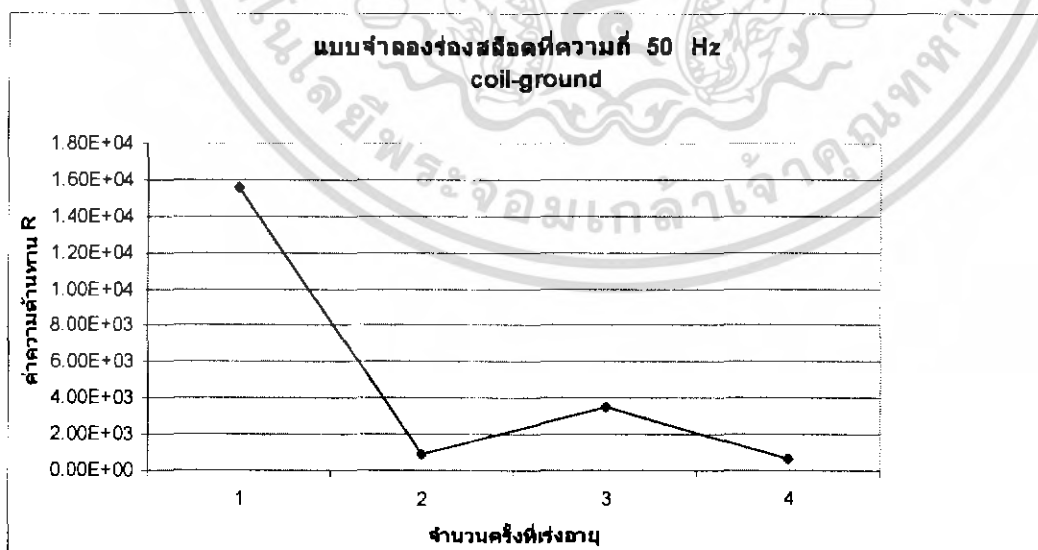


รูปที่ 5.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับจำนวนครั้งที่พันสายที่ความถี่ 1 KHz Coil to Ground

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

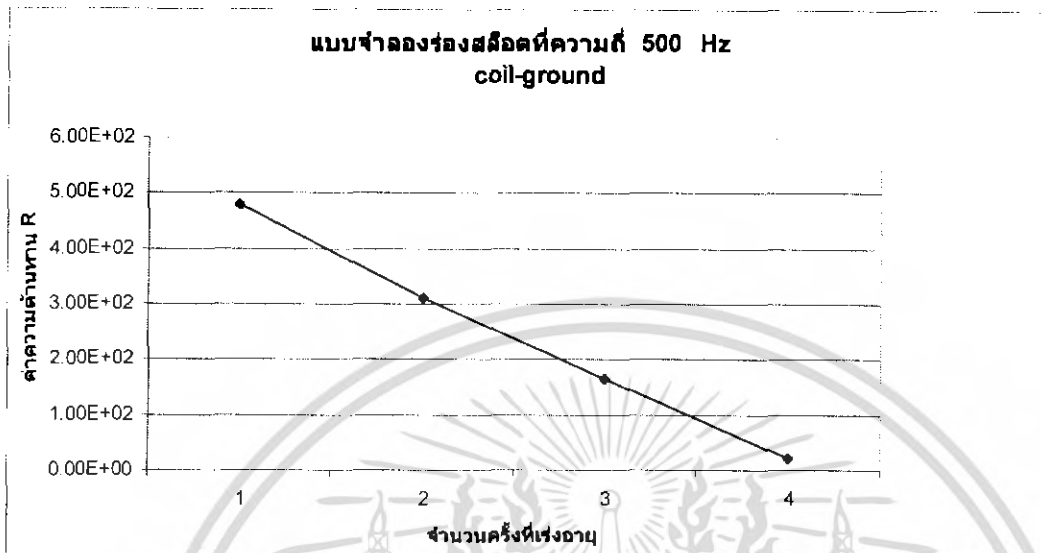


รูปที่ 5.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับจำนวนครั้งที่เรียงอายุที่ความถี่ 10 KHz Coil to Ground

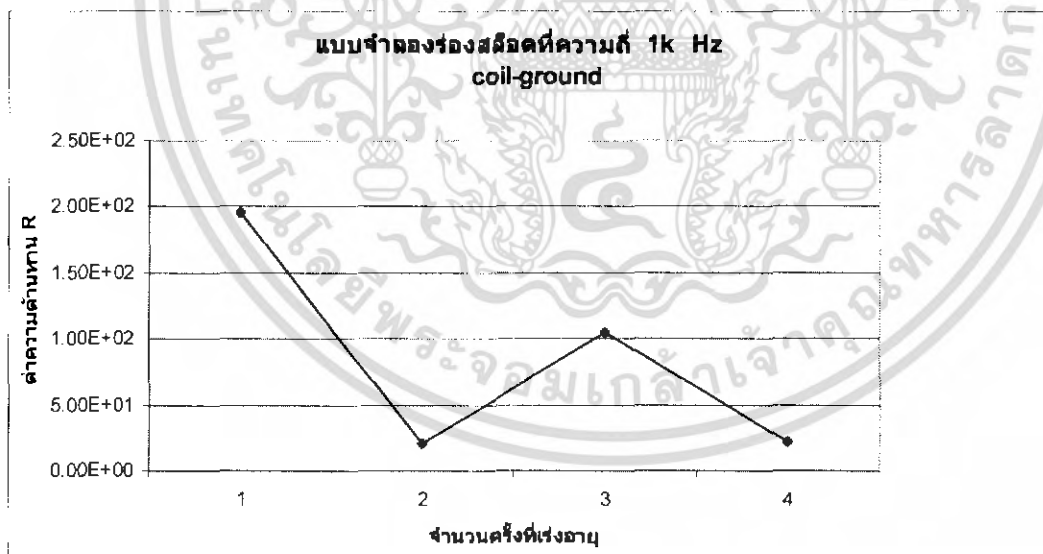


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน R กับจำนวนครั้งที่แรงอายุที่ความถี่ 50 Hz Coil to Ground

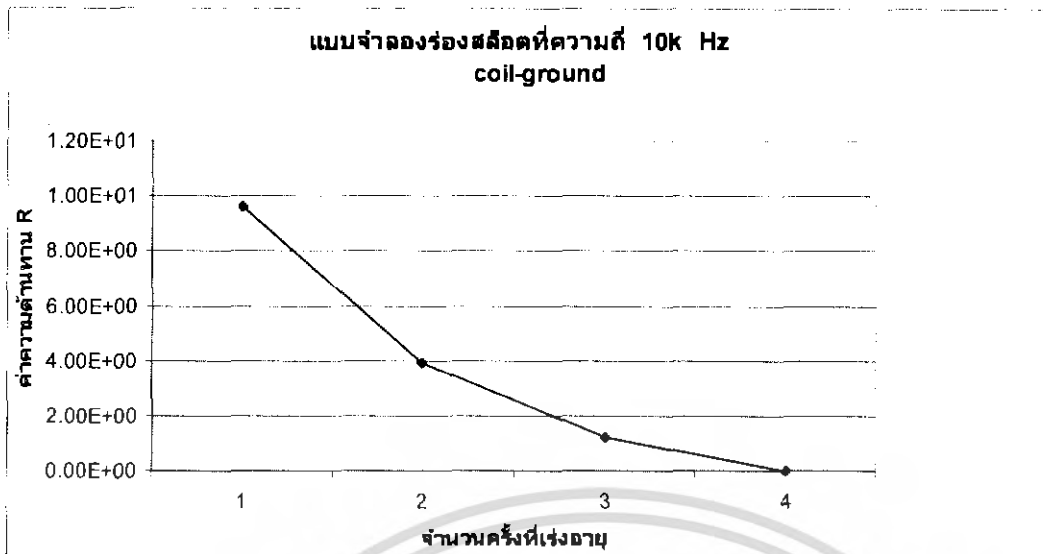


รูปที่ 5.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน R กับจำนวนครั้งที่แรงอายุที่ความถี่ 500 Hz Coil to Ground

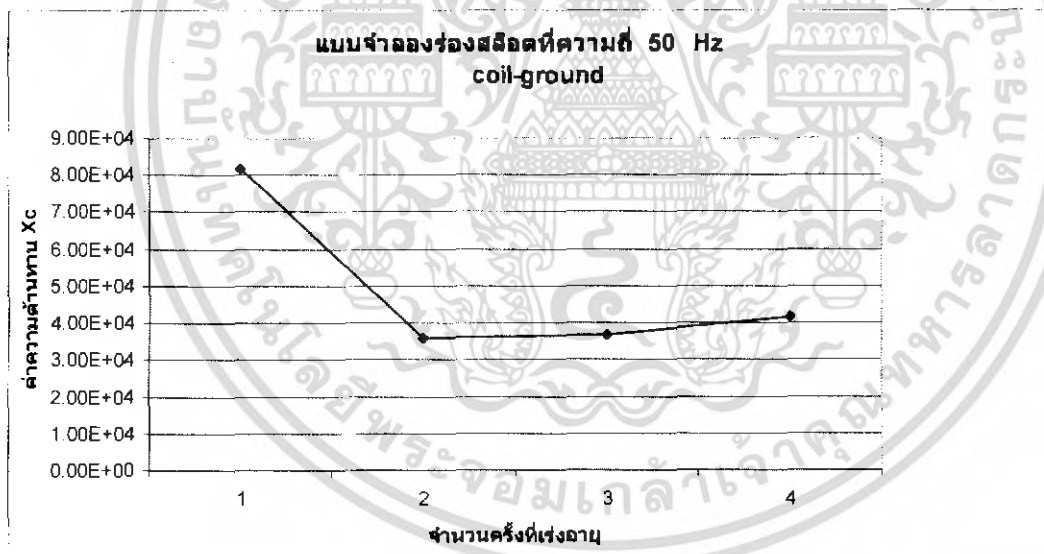


รูปที่ 5.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน R กับจำนวนครั้งที่แรงอายุที่ความถี่ 1 KHz Coil to Ground

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

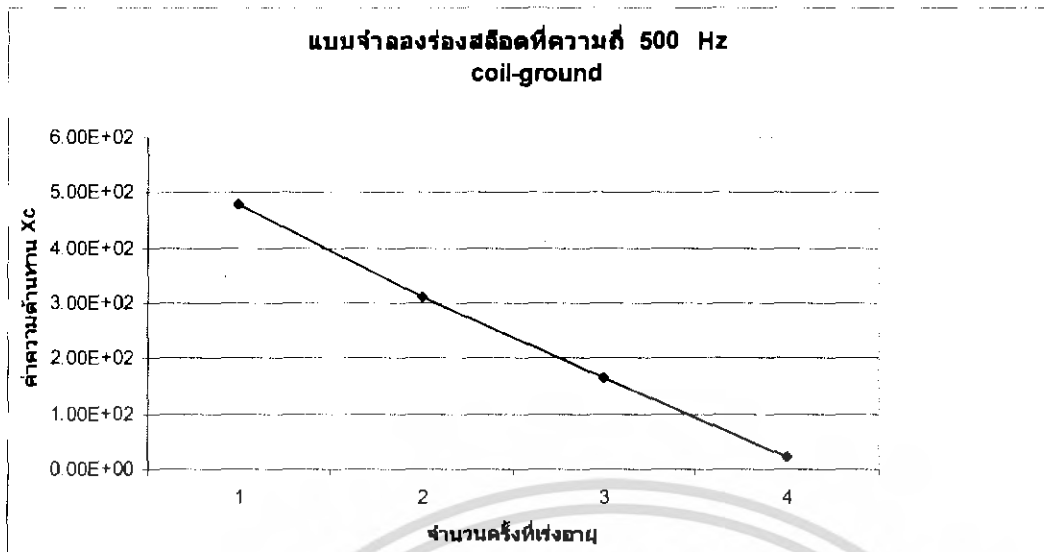


รูปที่ 5.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน R กับจำนวนครั้งที่แรงอายุที่ความถี่ 10 KHz Coil to Ground

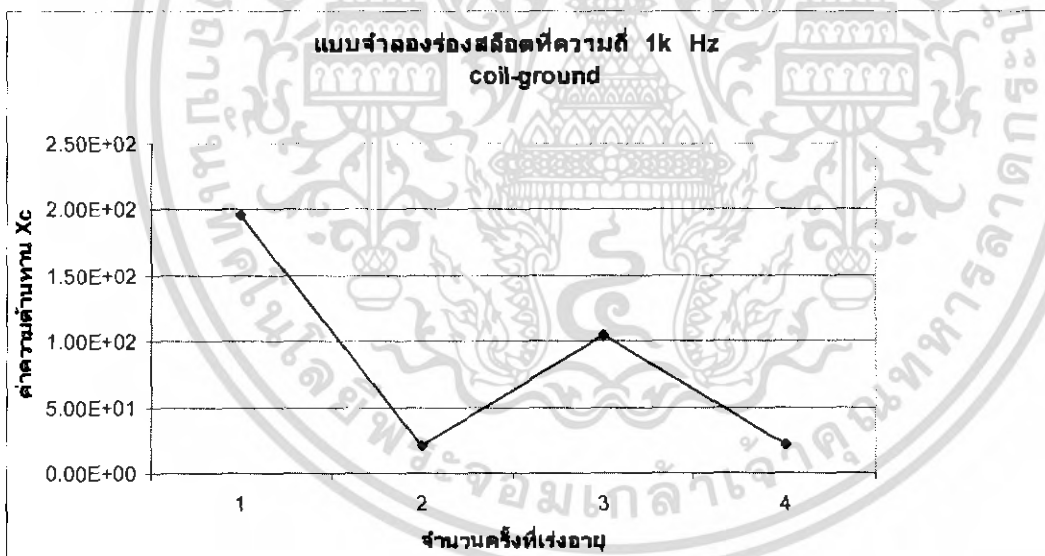


รูปที่ 5.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน Xc กับจำนวนครั้งที่แรงอายุที่ความถี่ 50 Hz Coil to Ground

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

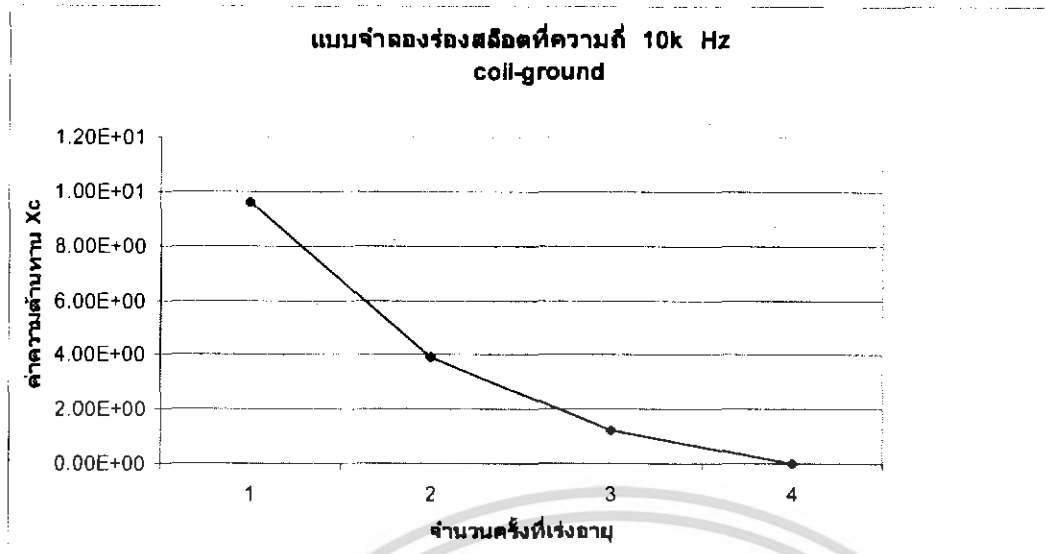


รูปที่ 5.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน  $X_c$  กับจำนวนครั้งที่การเรียงอายุที่ความถี่ 500 Hz Coil to Ground

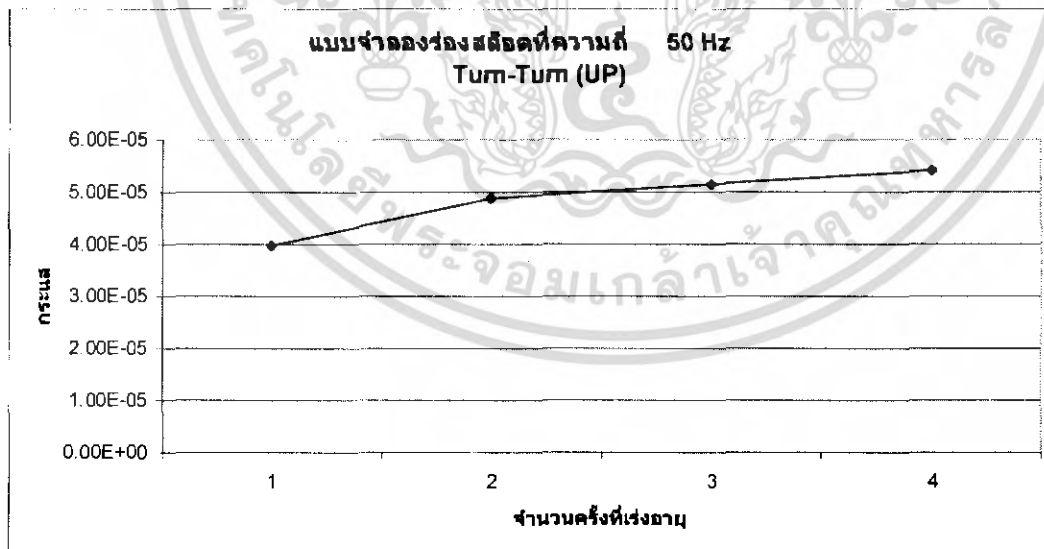


รูปที่ 5.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน  $X_c$  กับจำนวนครั้งที่การเรียงอายุที่ความถี่ 1 KHz Coil to Ground

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

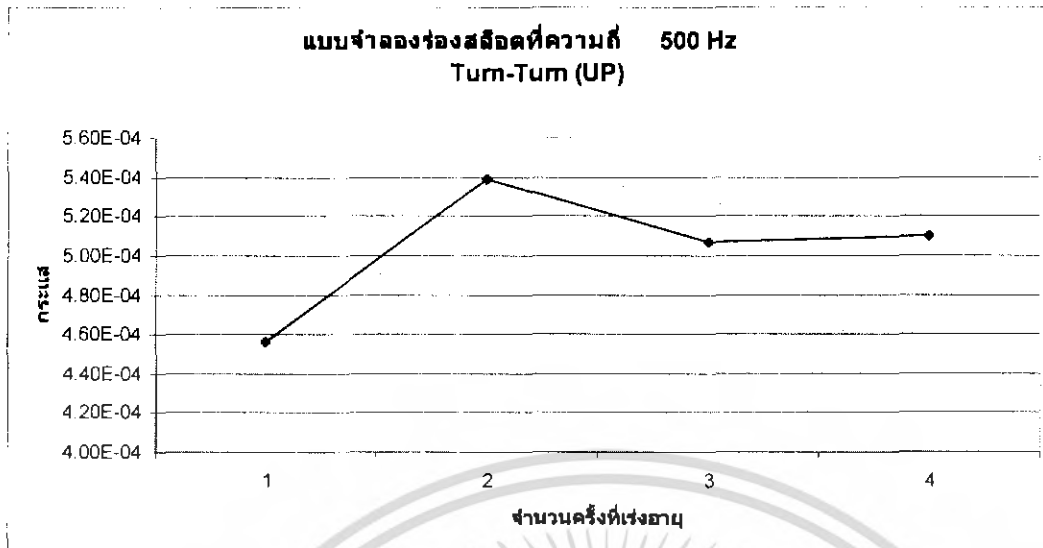


รูปที่ 5.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน  $X_c$  กับจำนวนครั้งที่แรงอายุที่ความถี่ 10 KHz Coil to Ground

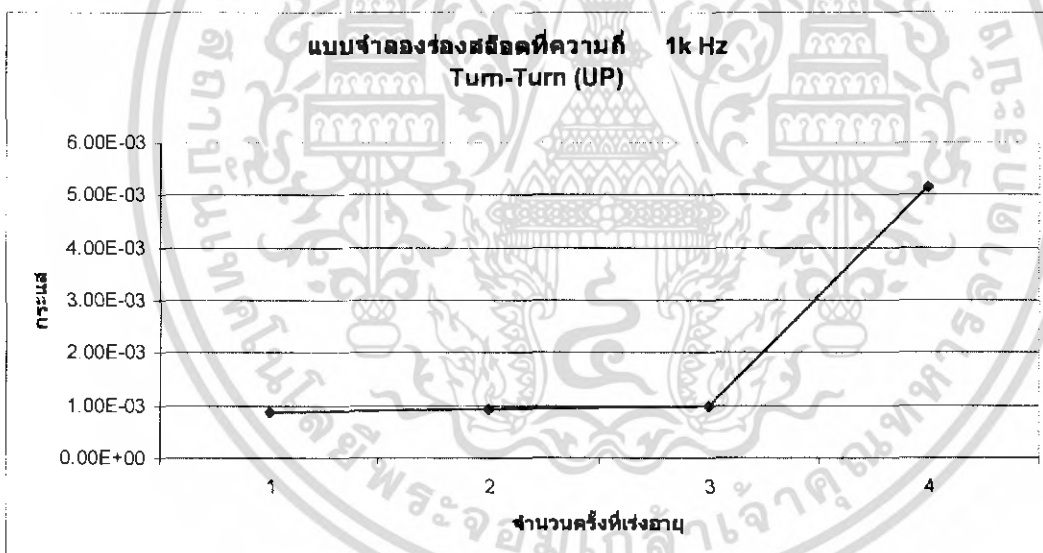


รูปที่ 5.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเสถกับจำนวนครั้งที่แรงอายุที่ความถี่ 50 Hz Turn – Turn (Up)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

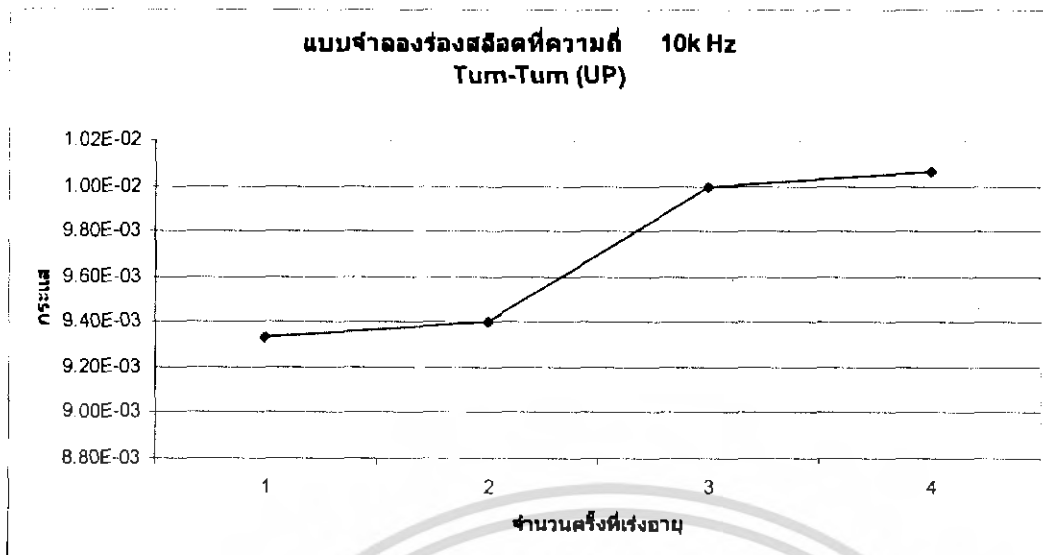


รูปที่ 5.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับจำนวนครั้งที่เร่งอายุที่ความถี่ 500 Hz Turn – Turn (Up)

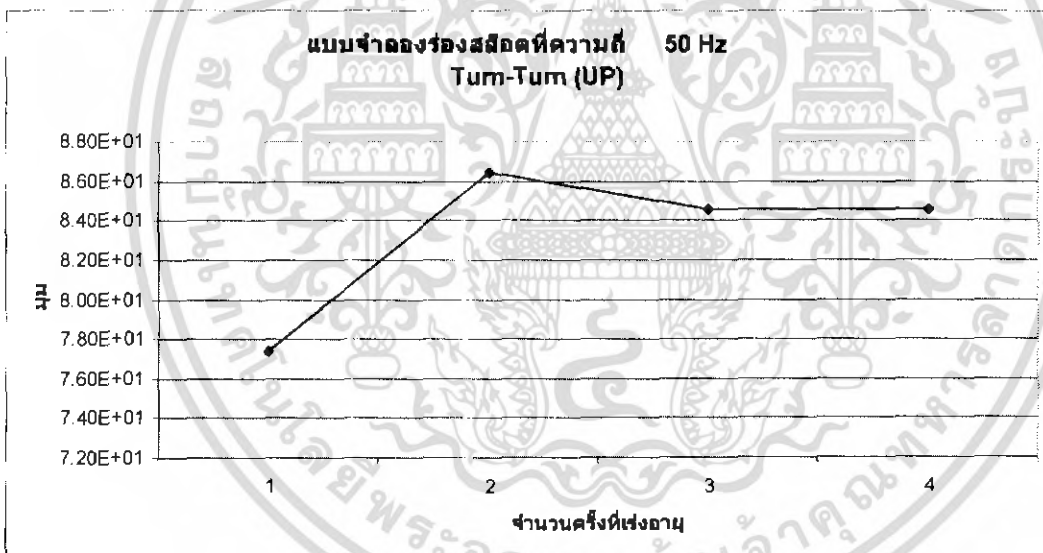


รูปที่ 5.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับจำนวนครั้งที่เร่งอายุที่ความถี่ 1 KHz Turn – Turn (Up)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

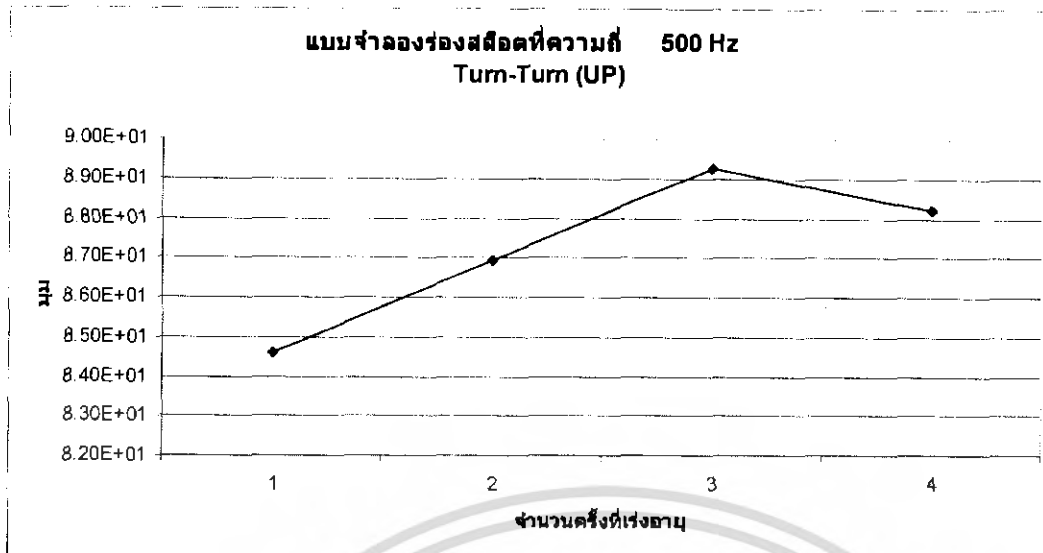


รูปที่ 5.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับจำนวนครั้งที่เสถียรที่ความถี่ 10 KHz Turn – Turn ( Up )

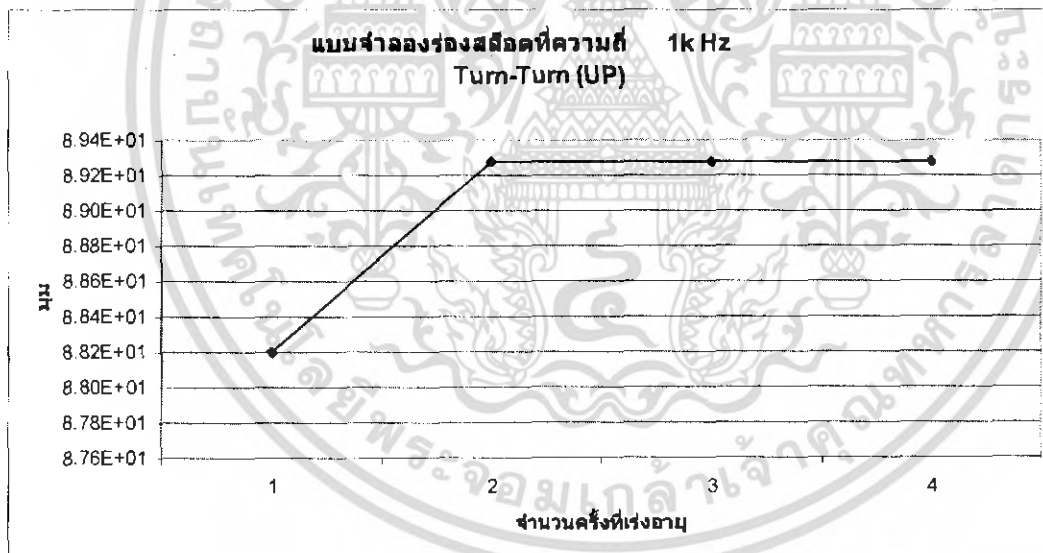


รูปที่ 5.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมมกับจำนวนครั้งที่เสถียรที่ความถี่ 50 Hz Turn – Turn ( Up )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

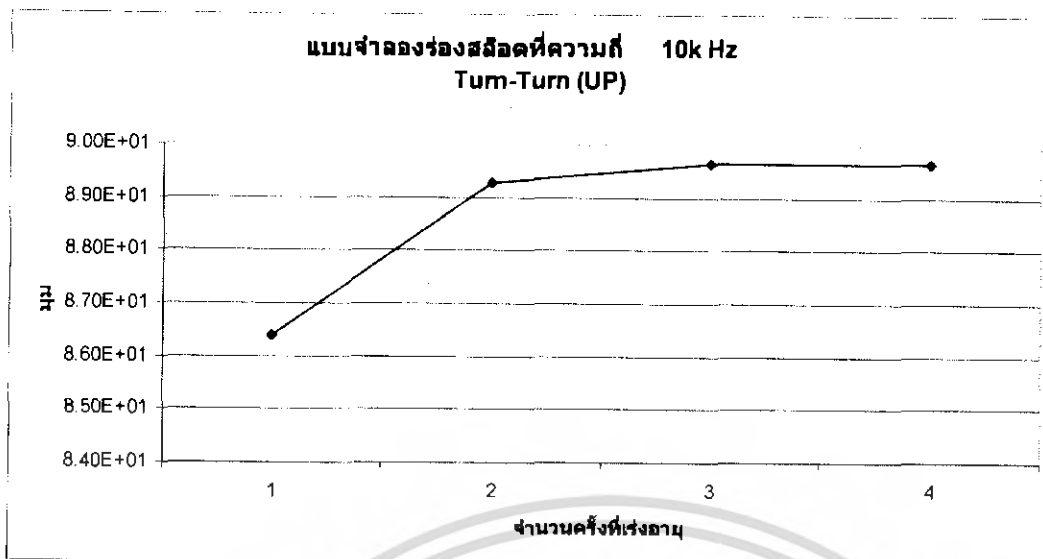


รูปที่ 5.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับจำนวนครั้งการเรียงอายุที่ความถี่ 500 Hz Turn - Turn ( Up )

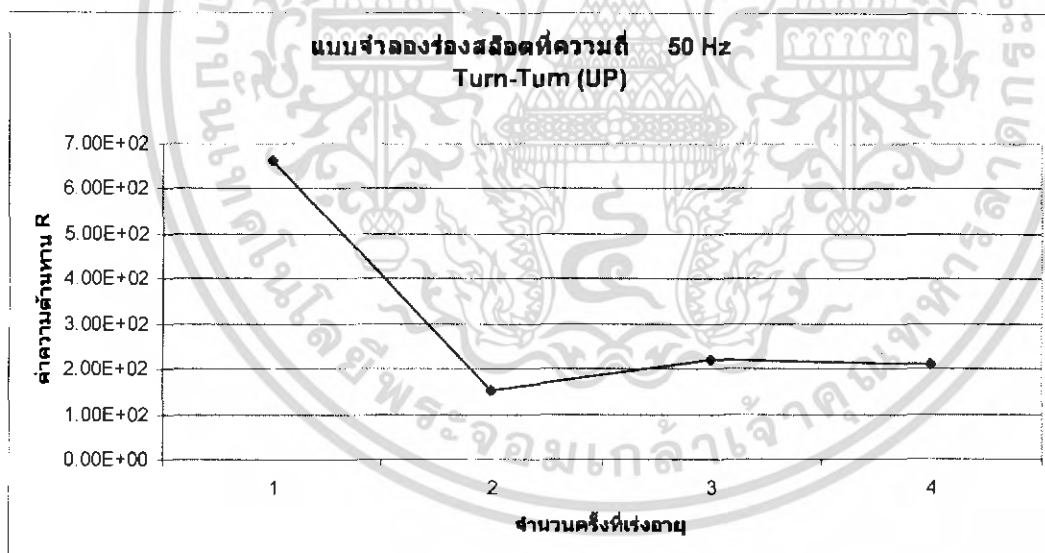


รูปที่ 5.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับจำนวนครั้งการเรียงอายุที่ความถี่ 1 KHz Turn - Turn ( Up )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

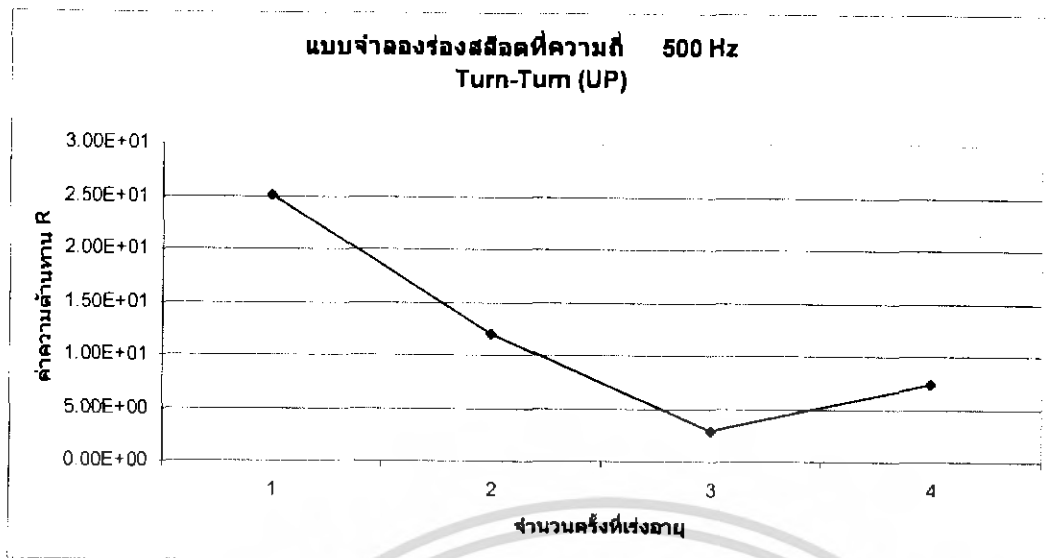


รูปที่ 5.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง μm กับจำนวนครั้งที่เร่งอายุที่ความถี่ 10 KHz Turn – Turn ( Up )

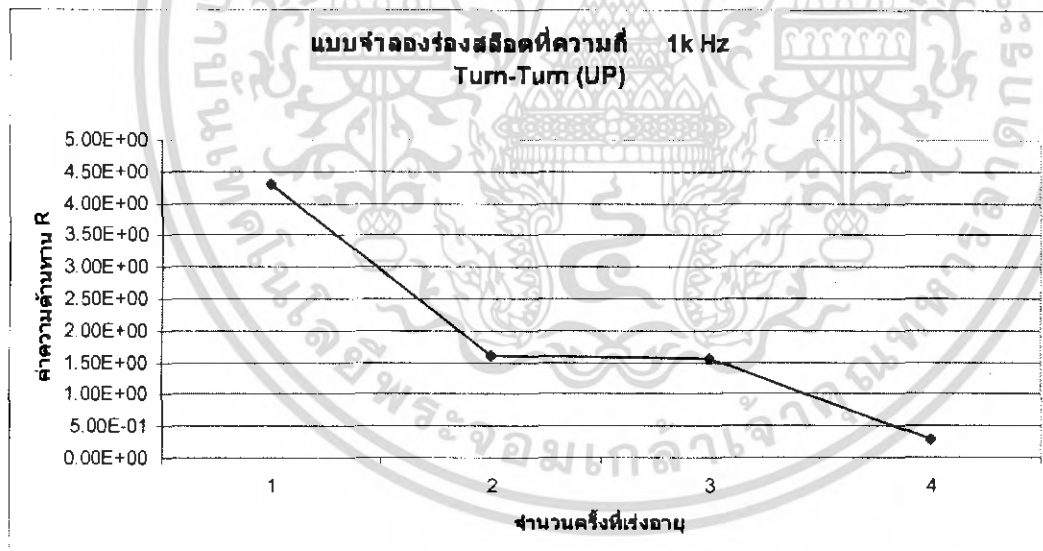


รูปที่ 5.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน R กับจำนวนครั้งที่เร่งอายุที่ความถี่ 50 Hz Turn – Turn ( Up )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

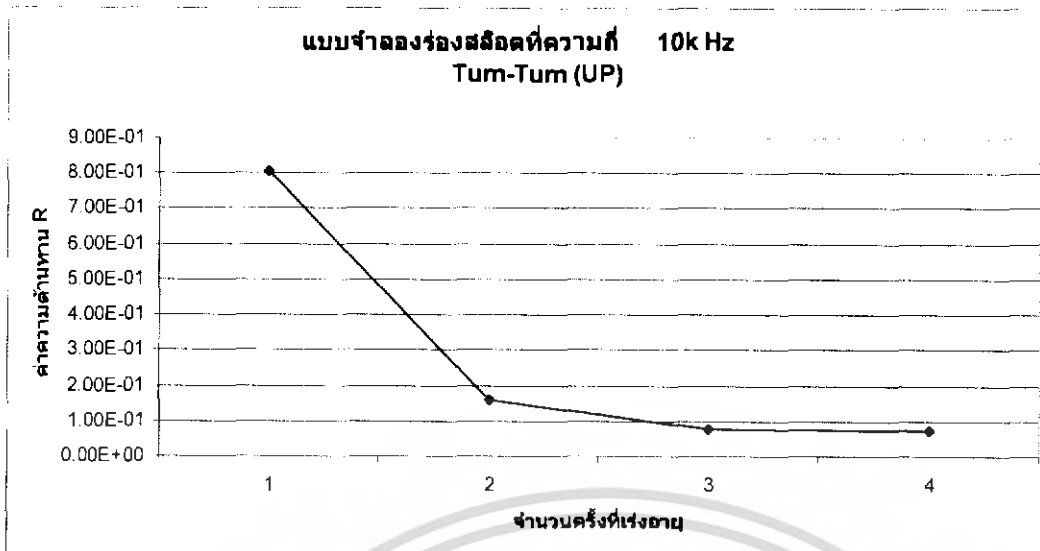


รูปที่ 5.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน R กับจำนวนครั้งที่การเร่งอายุที่ความถี่ 500 Hz Turn - Turn ( Up )

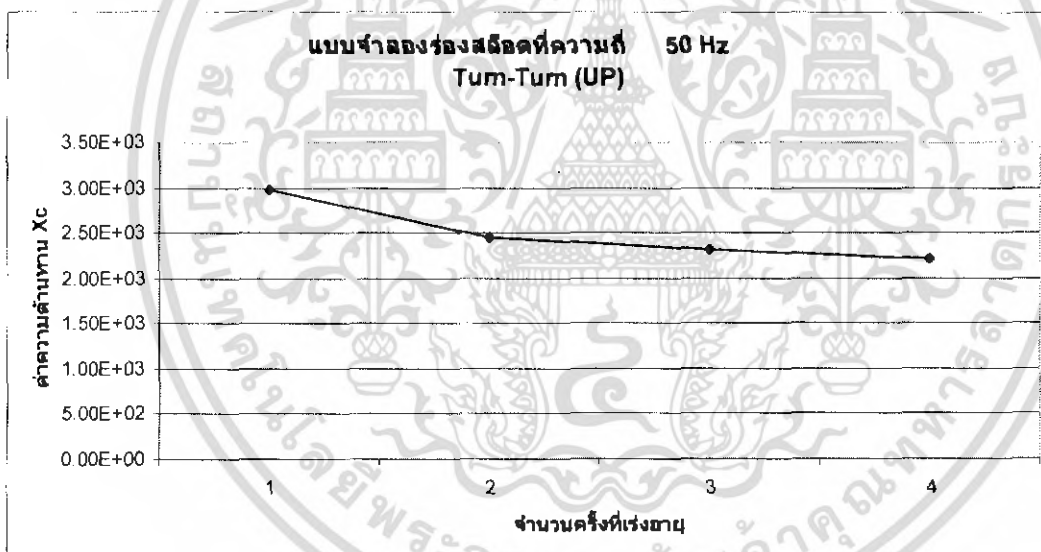


รูปที่ 5.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน R กับจำนวนครั้งที่การเร่งอายุที่ความถี่ 1 KHz Turn - Turn ( Up )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

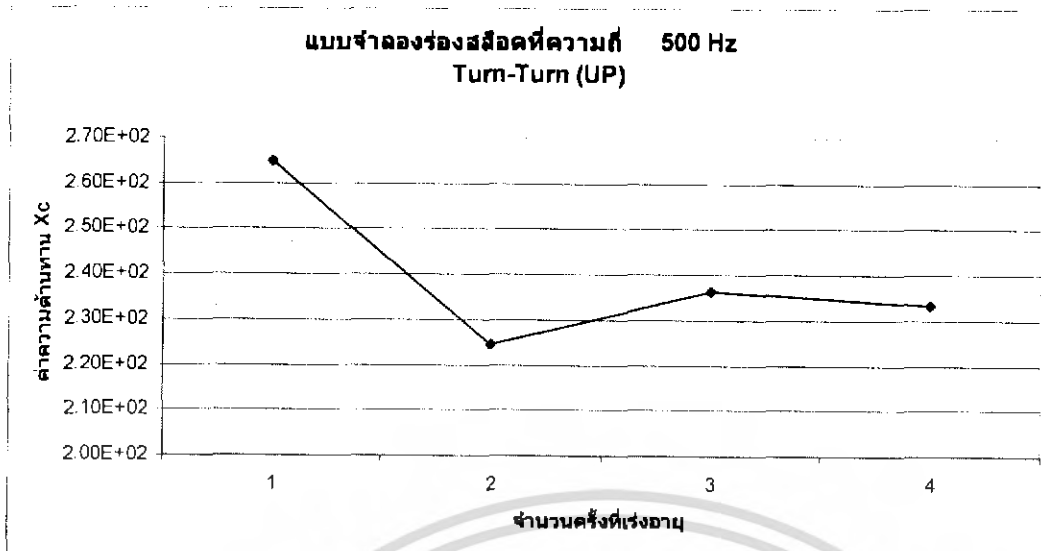


รูปที่ 5.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน R กับจำนวนครั้งที่เรียงอายุที่ความถี่ 10 KHz Turn – Turn ( Up )

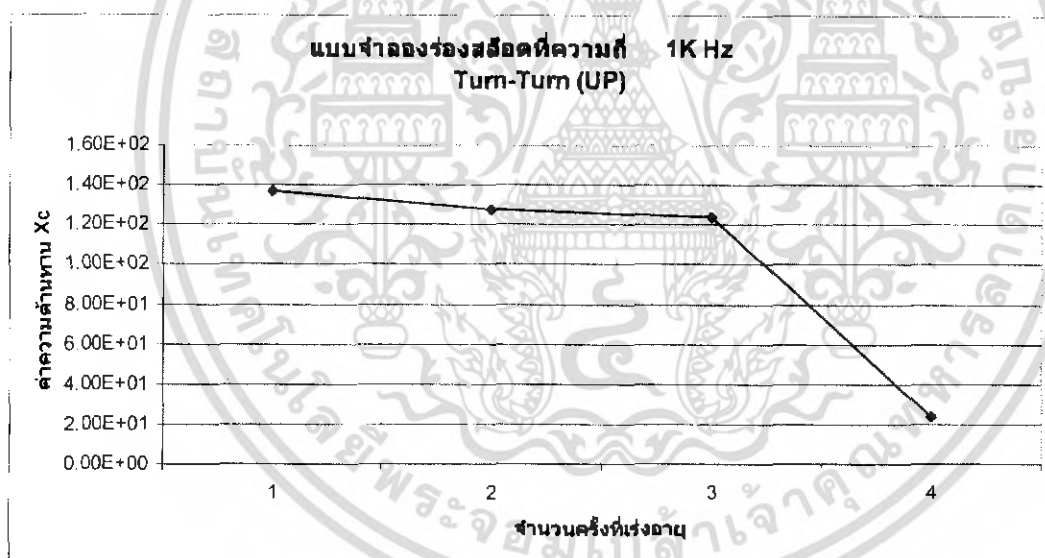


รูปที่ 5.47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน Xc กับจำนวนครั้งที่เรียงอายุที่ความถี่ 50 Hz Turn – Turn ( Up )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

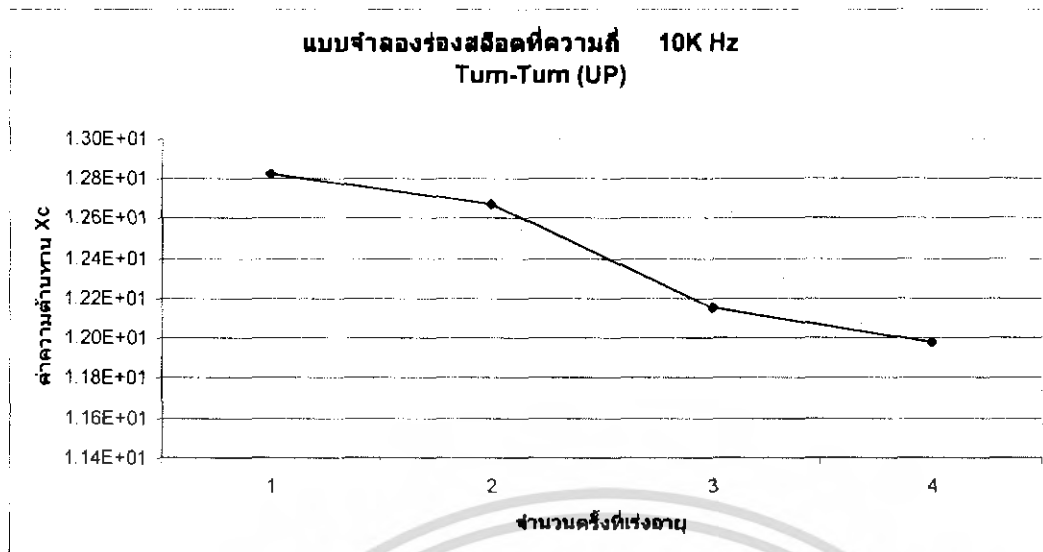


รูปที่ 5.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน  $X_c$  กับจำนวนครั้งที่เรียงอายุที่ความถี่ 500 Hz Turn - Turn ( Up )

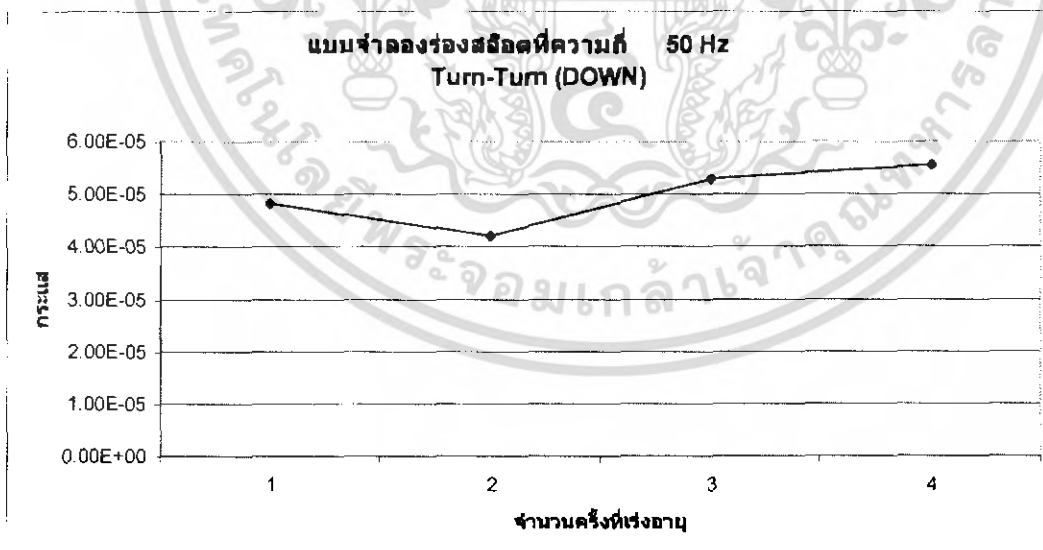


รูปที่ 5.49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน  $X_c$  กับจำนวนครั้งที่เรียงอายุที่ความถี่ 1 KHz Turn - Turn ( Up )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

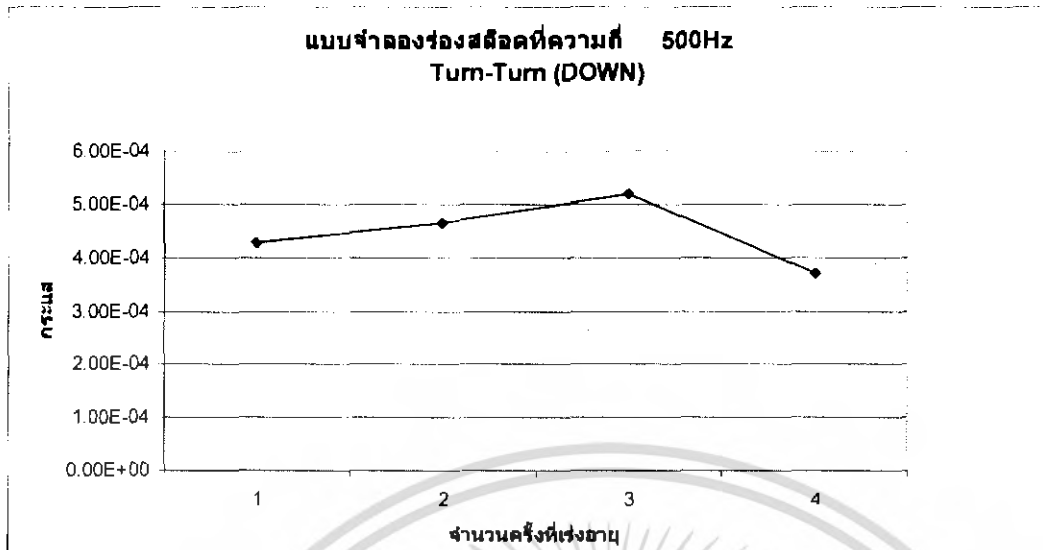


รูปที่ 5.50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน Xc กับจำนวนครั้งที่เรียงอายุที่ความถี่ 10 KHz Turn – Turn ( Up )

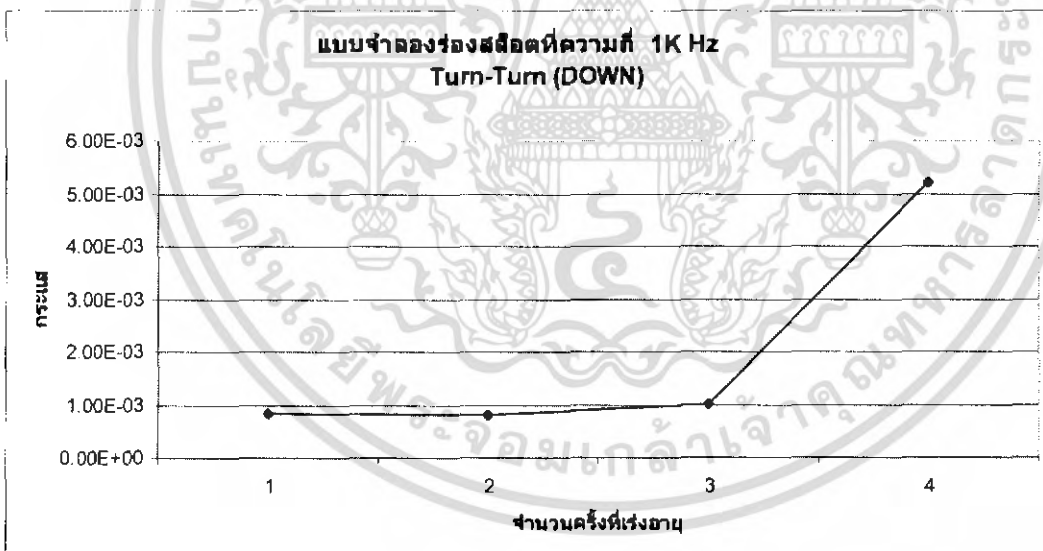


รูปที่ 5.51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับจำนวนครั้งที่เรียงอายุที่ความถี่ 50 Hz Turn – Turn ( Down )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

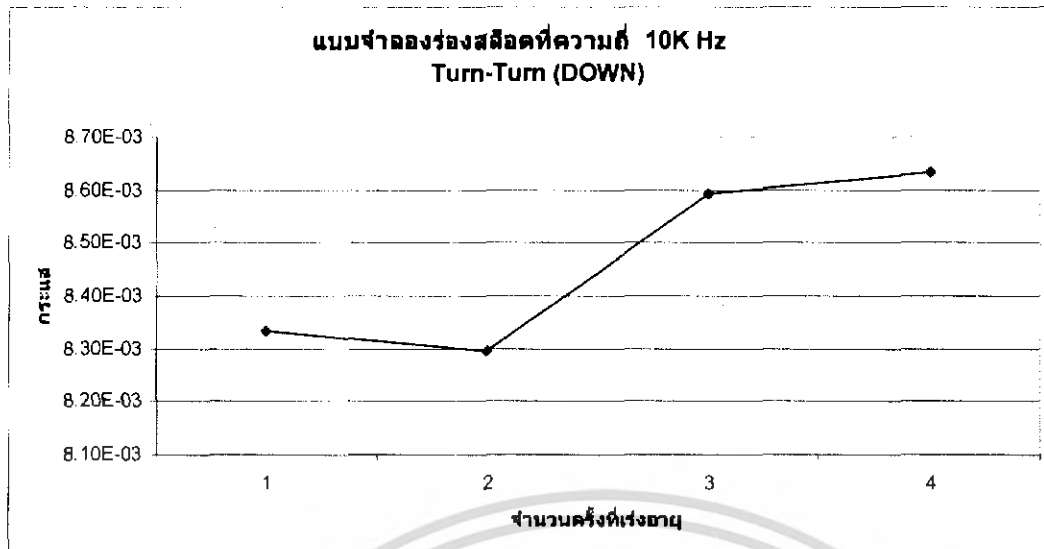


รูปที่ 5.52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับจำนวนครั้งที่เร่งอายุที่ความถี่ 500 Hz Turn – Turn ( Down )

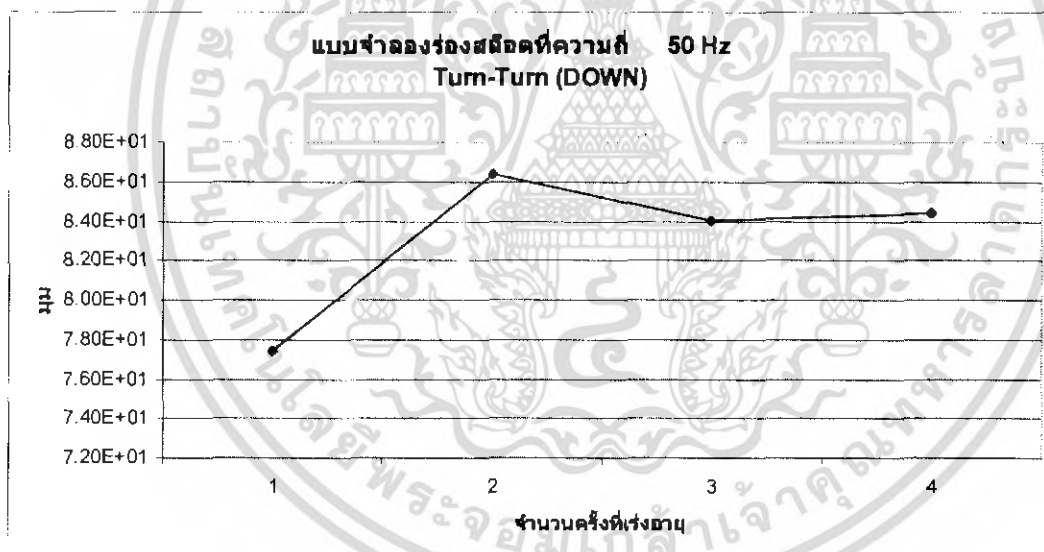


รูปที่ 5.53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับจำนวนครั้งที่เร่งอายุที่ความถี่ 1 KHz Turn – Turn ( Down )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

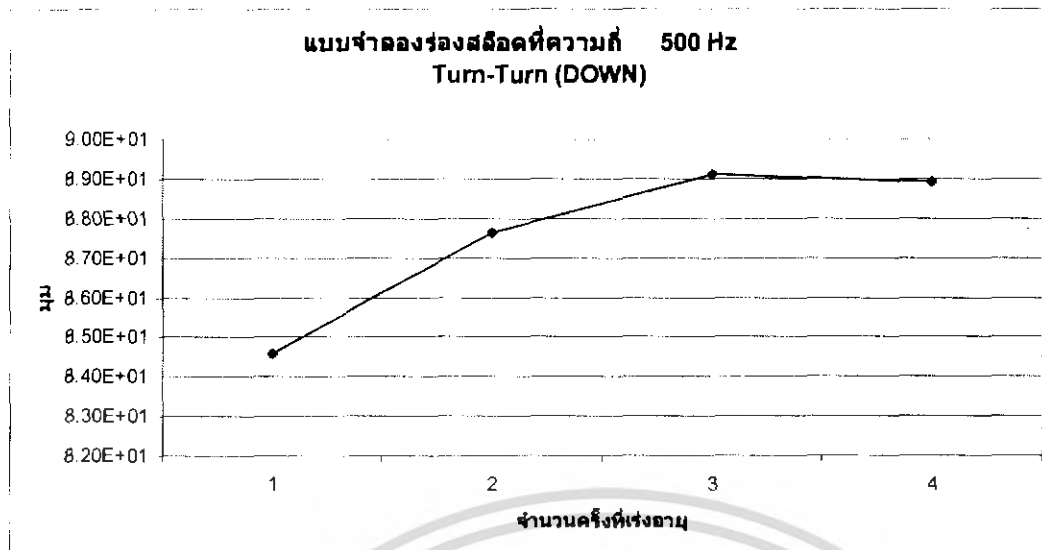


รูปที่ 5.54 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับจำนวนครั้งที่เร่งอายุที่ความถี่ 10 KHz Turn – Turn ( Down )

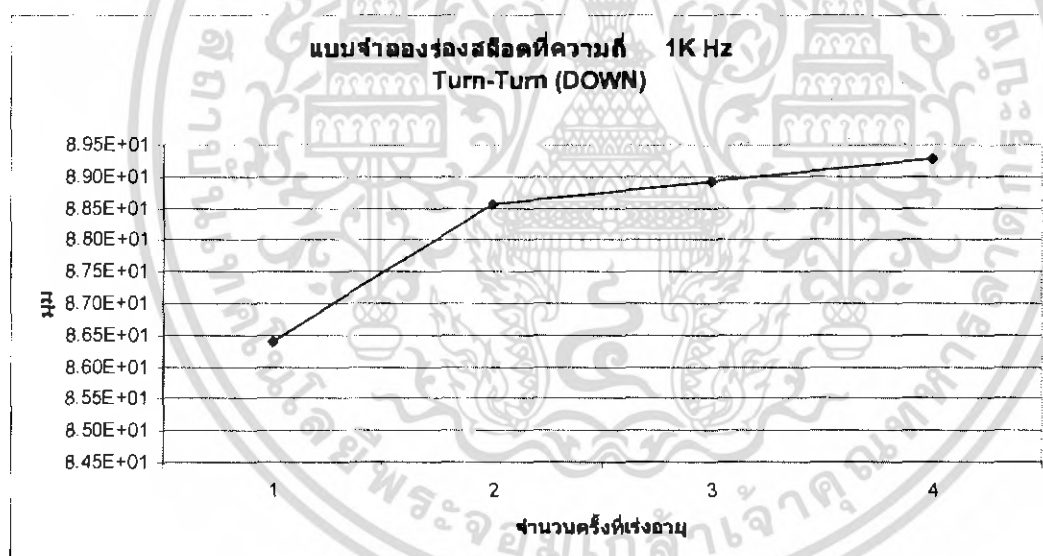


รูปที่ 5.55 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับจำนวนครั้งที่เร่งอายุที่ความถี่ 50 Hz Turn – Turn ( Down )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

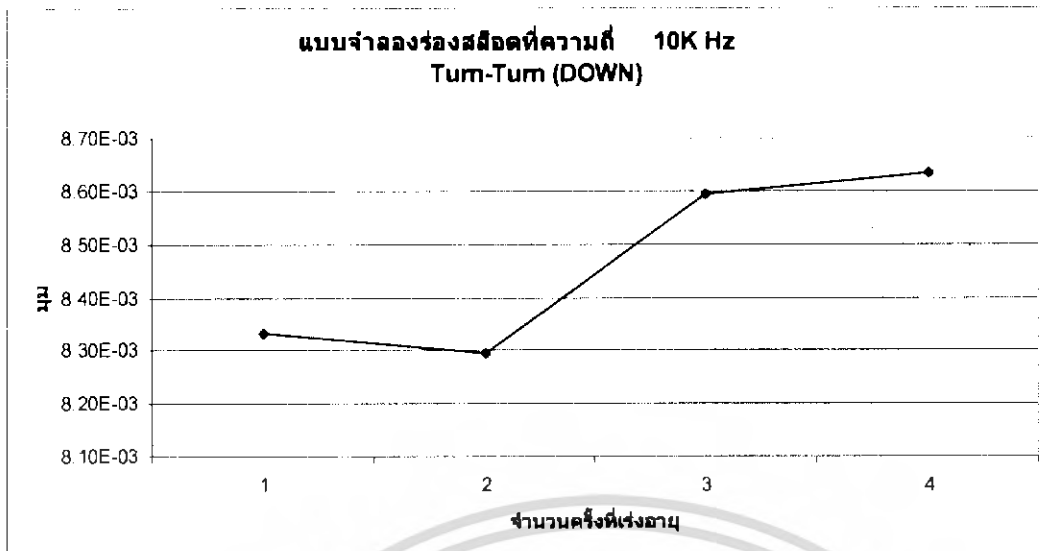


รูปที่ 5.56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมูกับจำนวนครั้งที่เร่งอายุที่ความถี่ 500 Hz Turn - Turn ( Down )

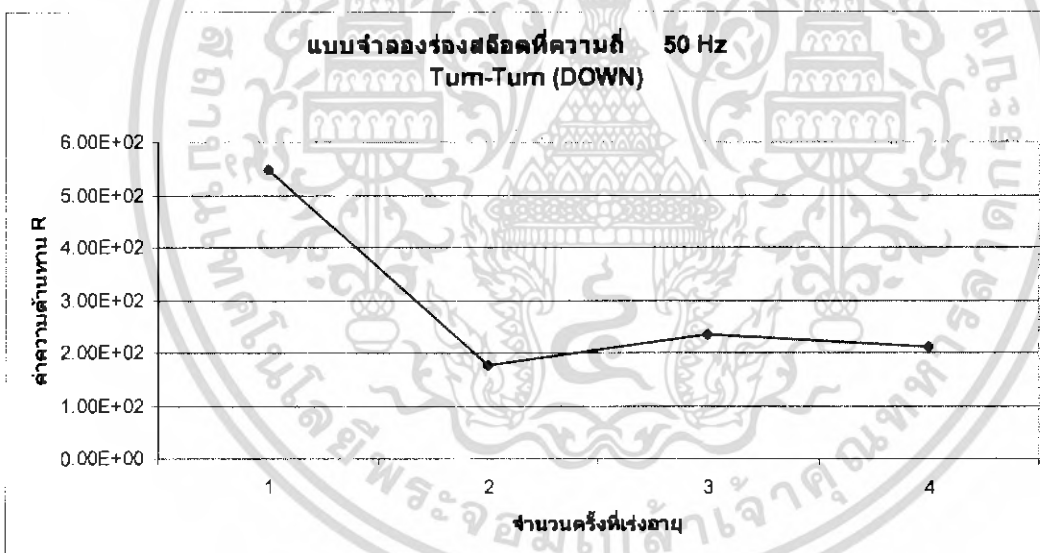


รูปที่ 5.57 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมูกับจำนวนครั้งที่เร่งอายุที่ความถี่ 1 KHz Turn - Turn ( Down )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

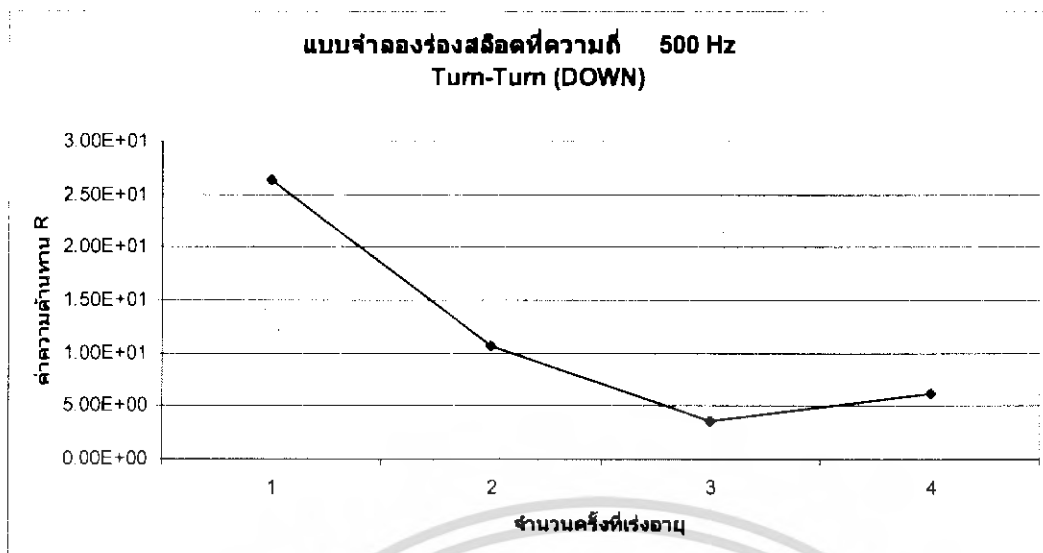


รูปที่ 5.58 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับจำนวนครั้งที่เร่งอายุที่ความถี่ 10 KHz Turn – Turn ( Down )



รูปที่ 5.59 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน R กับจำนวนครั้งที่เร่งอายุที่ความถี่ 50 Hz Turn – Turn ( Down )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

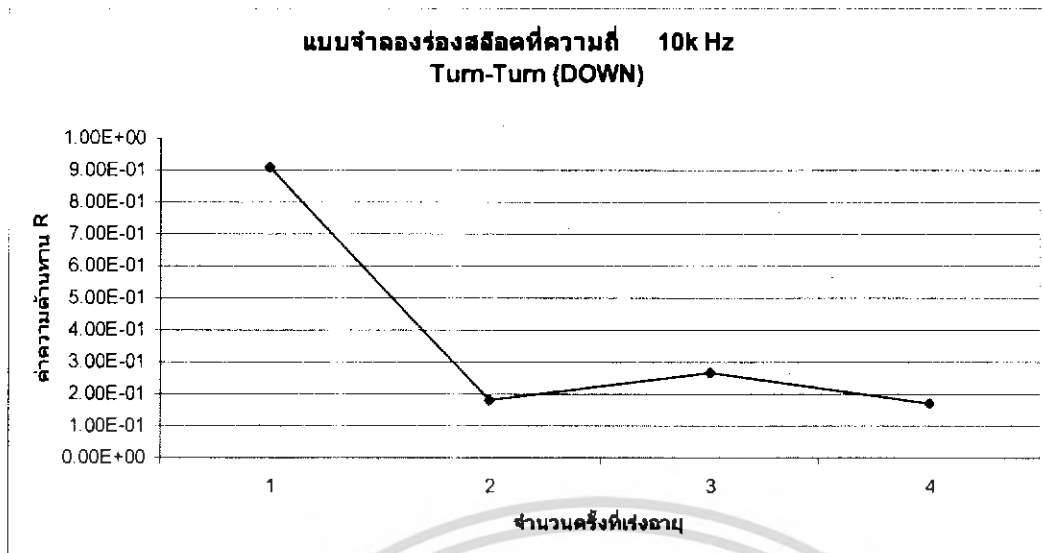


รูปที่ 5.60 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน R กับจำนวนครั้งที่เร่งอายุที่ความถี่ 500 Hz Turn - Turn (Down)

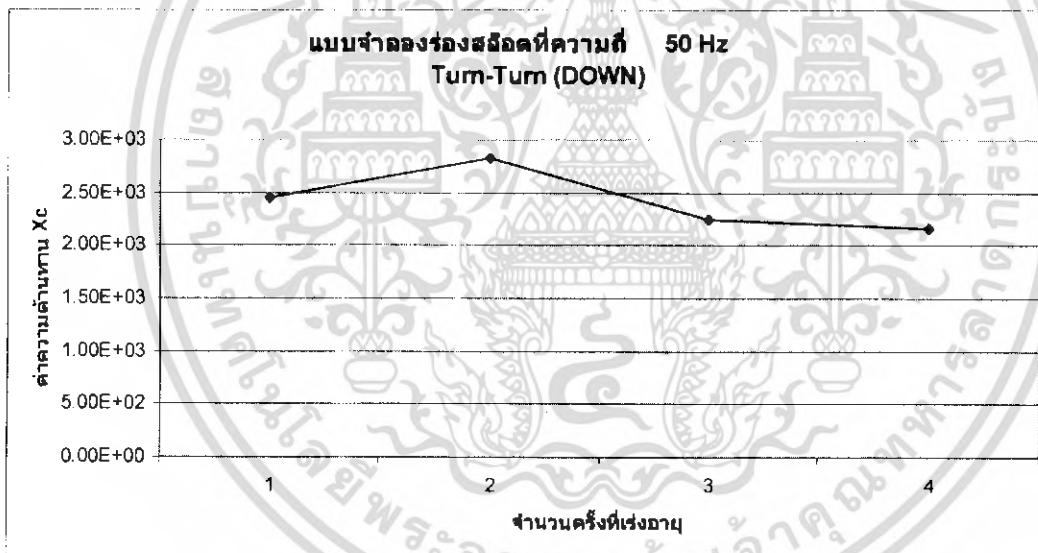


รูปที่ 5.61 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน R กับจำนวนครั้งที่เร่งอายุที่ความถี่ 1 KHz Turn - Turn (Down)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

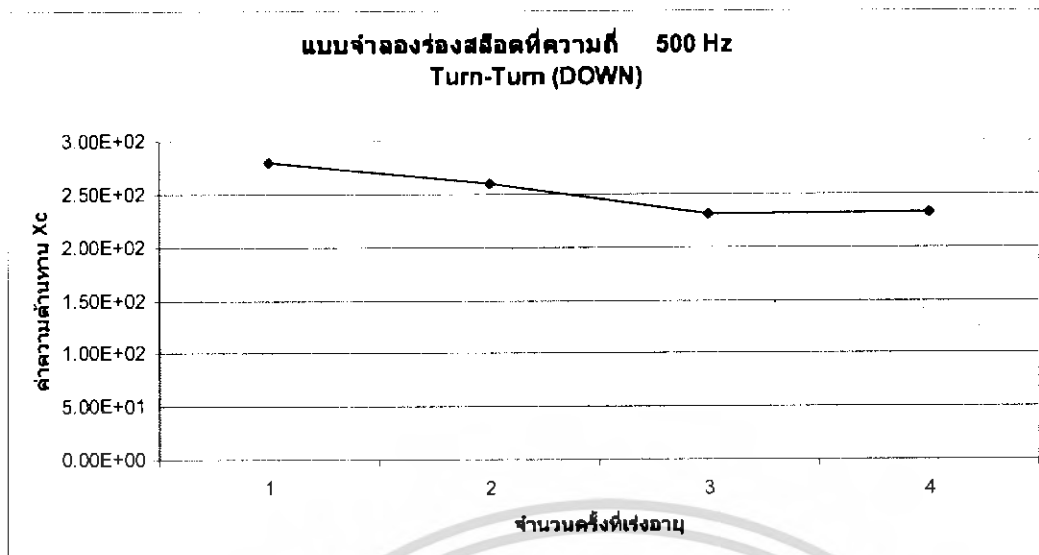


รูปที่ 5.62 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน R กับจำนวนครั้งที่แรงอายุที่ความถี่ 10 KHz Turn – Turn ( Down )

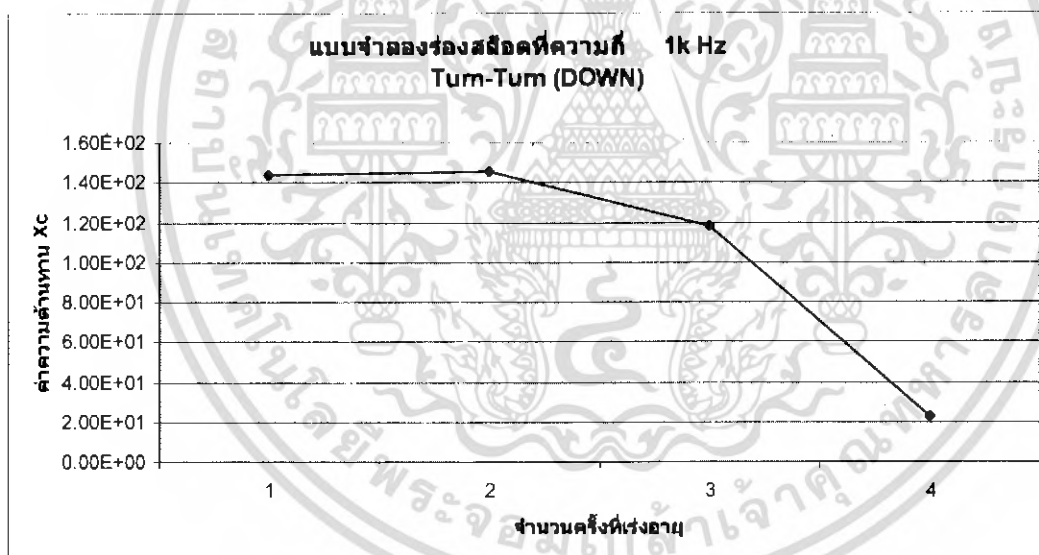


รูปที่ 5.63 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน Xc กับจำนวนครั้งที่แรงอายุที่ความถี่ 50 Hz Turn – Turn ( Down )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

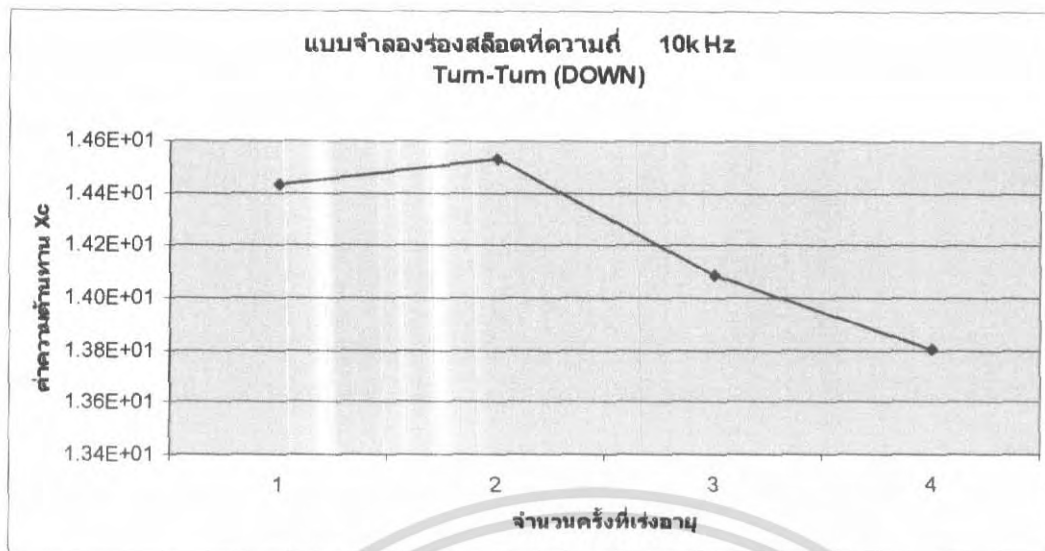


รูปที่ 5.64 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน  $X_c$  กับจำนวนครั้งที่เร่งอายุที่ความถี่ 500 Hz Turn – Turn ( Down )

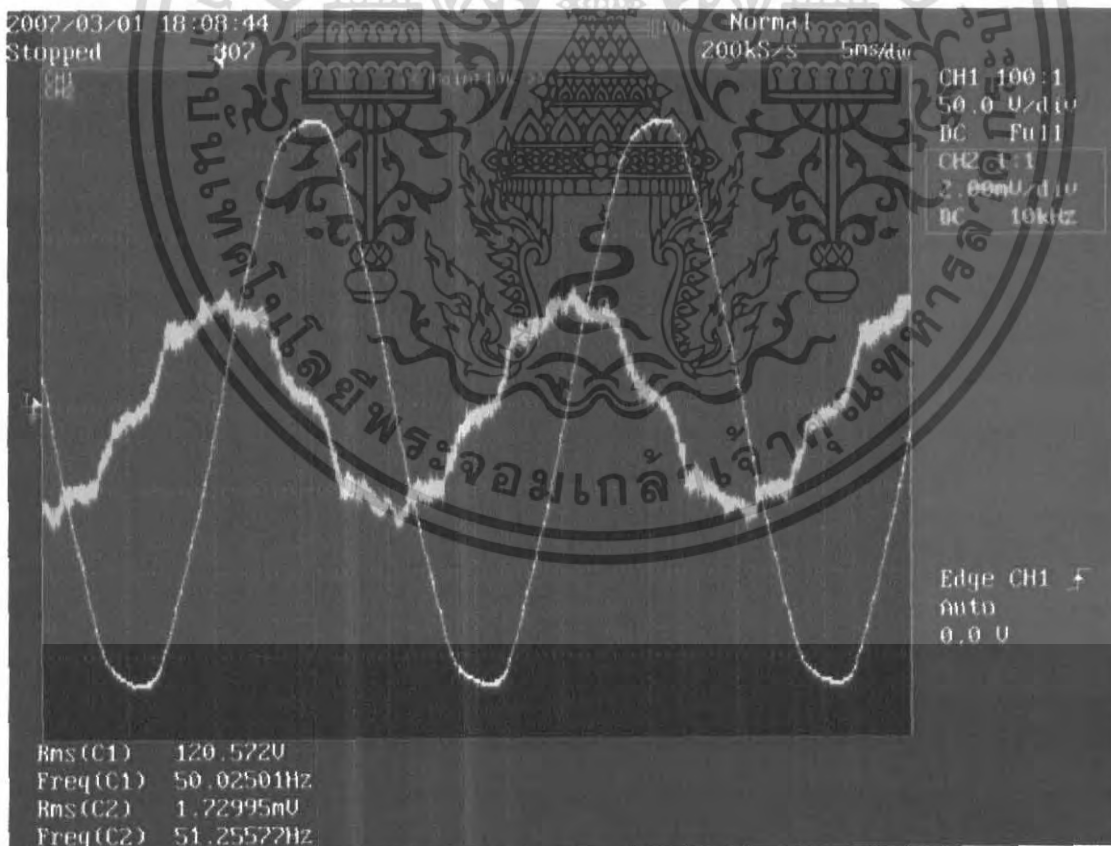


รูปที่ 5.65 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน  $X_c$  กับจำนวนครั้งที่เร่งอายุที่ความถี่ 1 KHz Turn – Turn ( Down )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

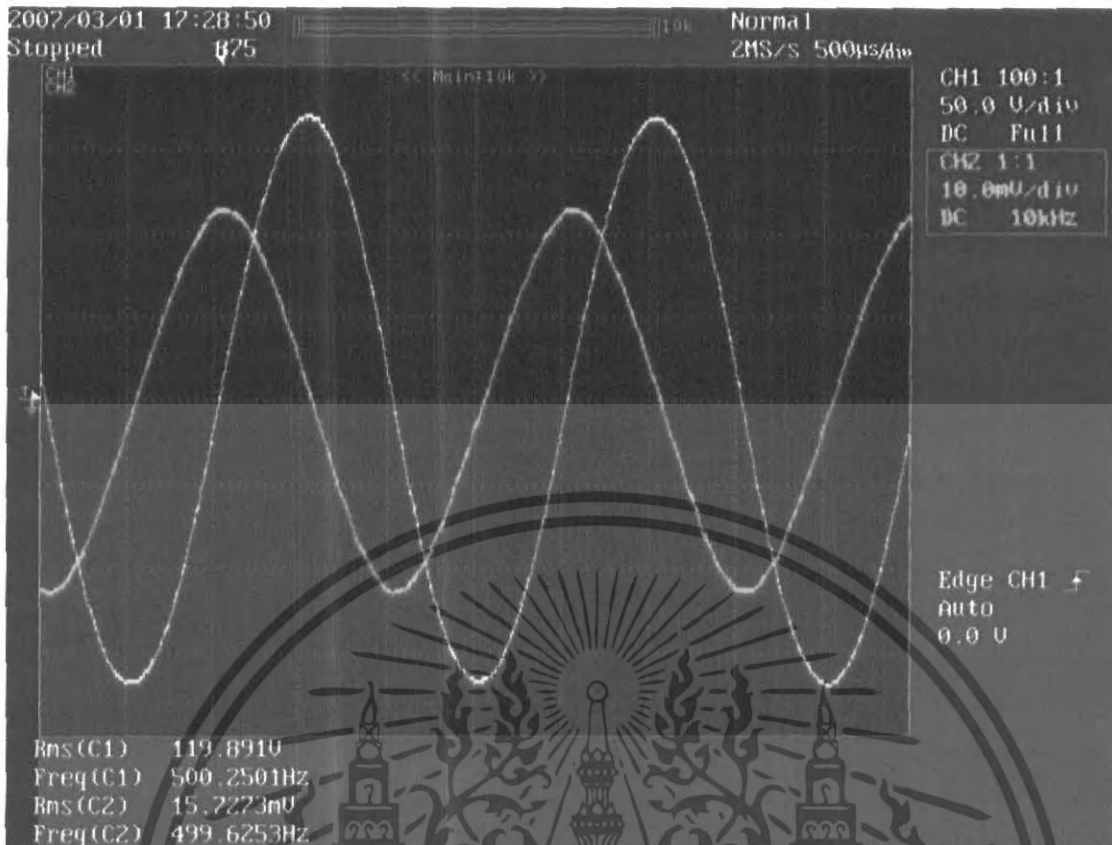


รูปที่ 5.66 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน Xc กับจำนวนครั้งที่เร่งอายุที่ความถี่ 10 KHz Turn – Turn (Down)

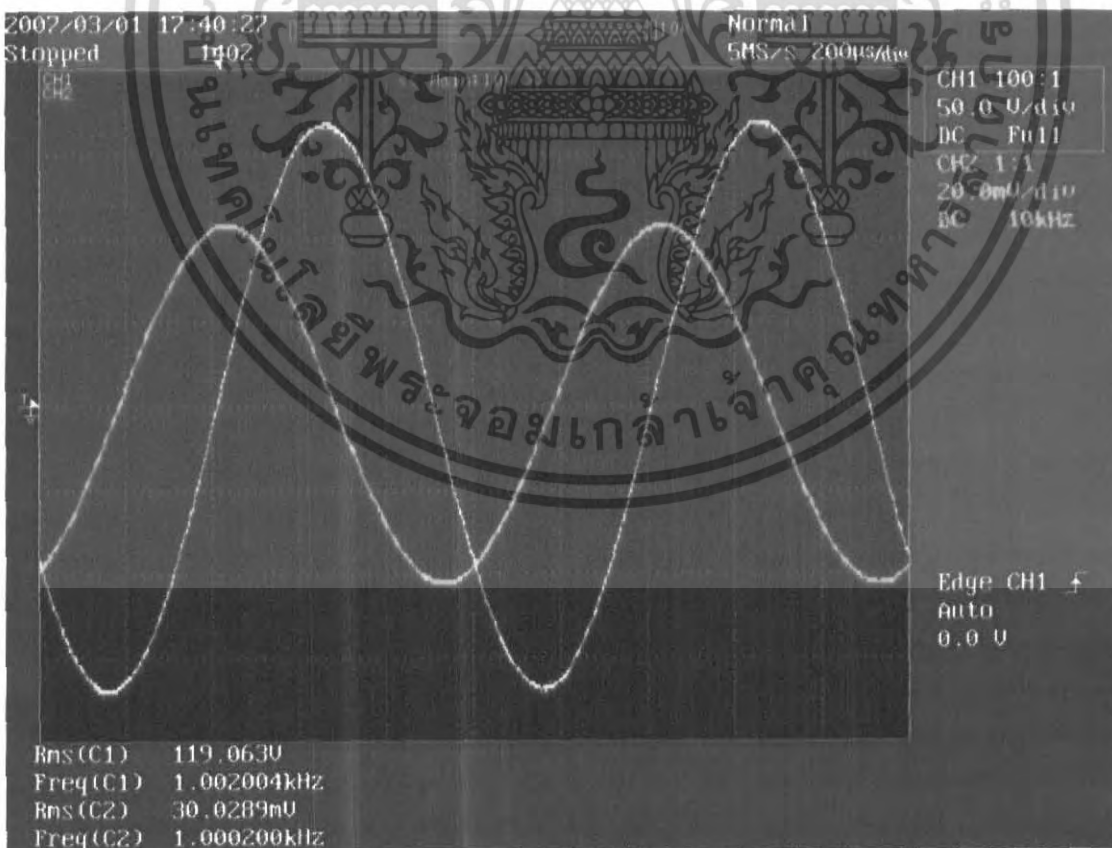


รูปที่ 5.67 ค่าแรงดันและกระแสก่อนการทดลอง Turn to Turn บนก่อนการทดลองที่ความถี่ 50 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

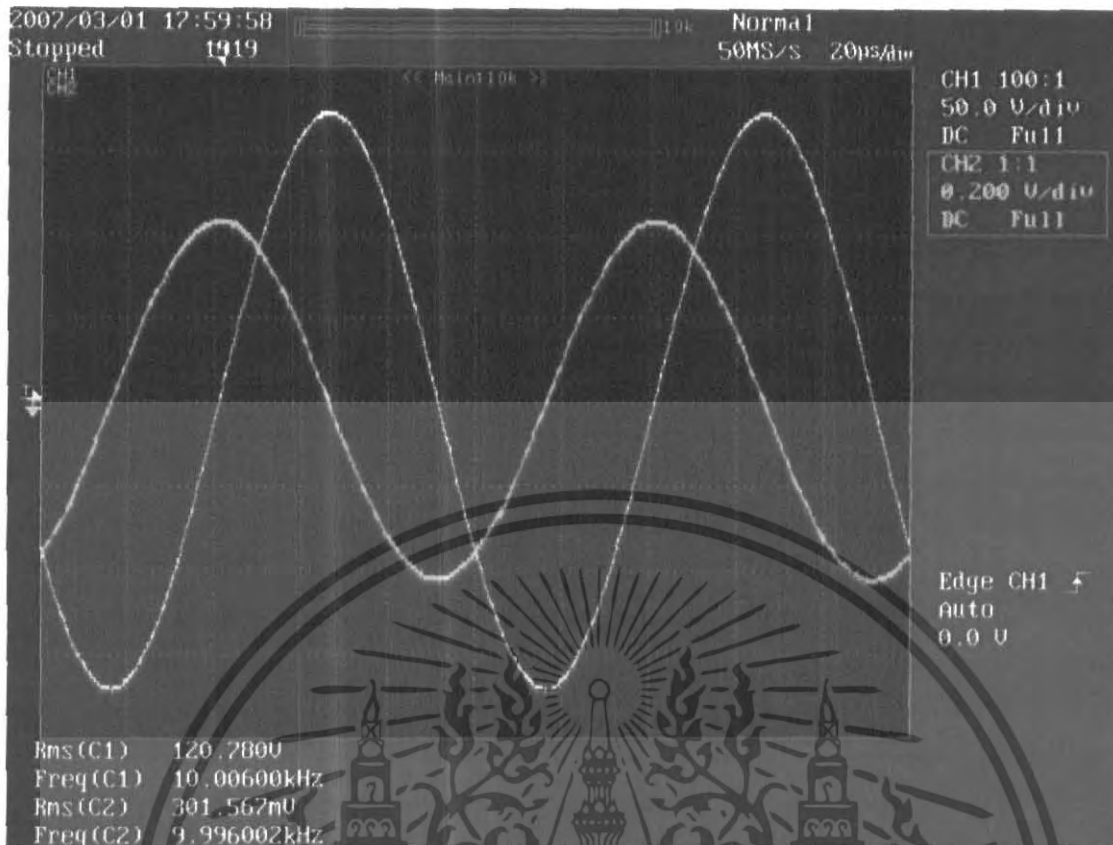


รูปที่ 5.68 ค่าแรงดันและกระแสก่อนการทดลอง Turn to Turn บนก่อนการทดลองที่ความถี่ 500 Hz

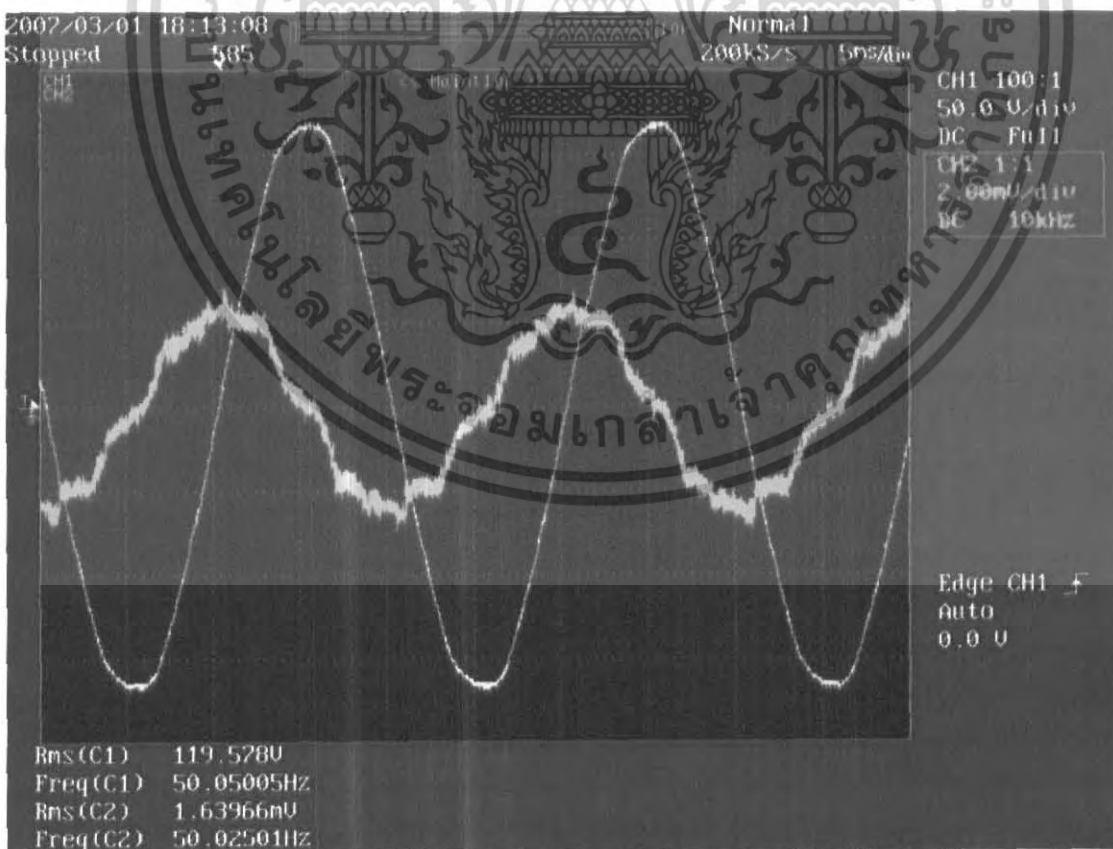


รูปที่ 5.69 ค่าแรงดันและกระแสก่อนการทดลอง Turn to Turn บนก่อนการทดลองที่ความถี่ 1k Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

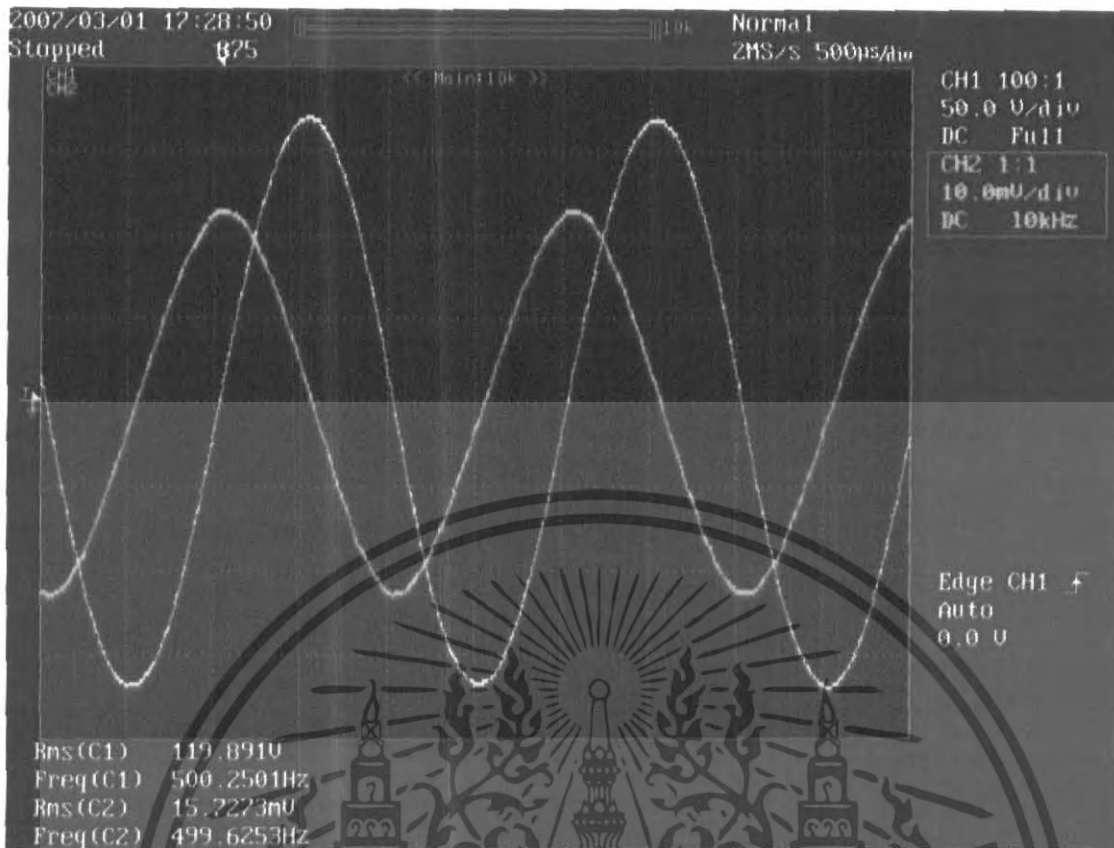


รูปที่ 5.70 ค่าแรงดันและกระแสก่อนการทดลอง Turn to Turn บนก่อนการทดลองที่ความถี่ 10k Hz

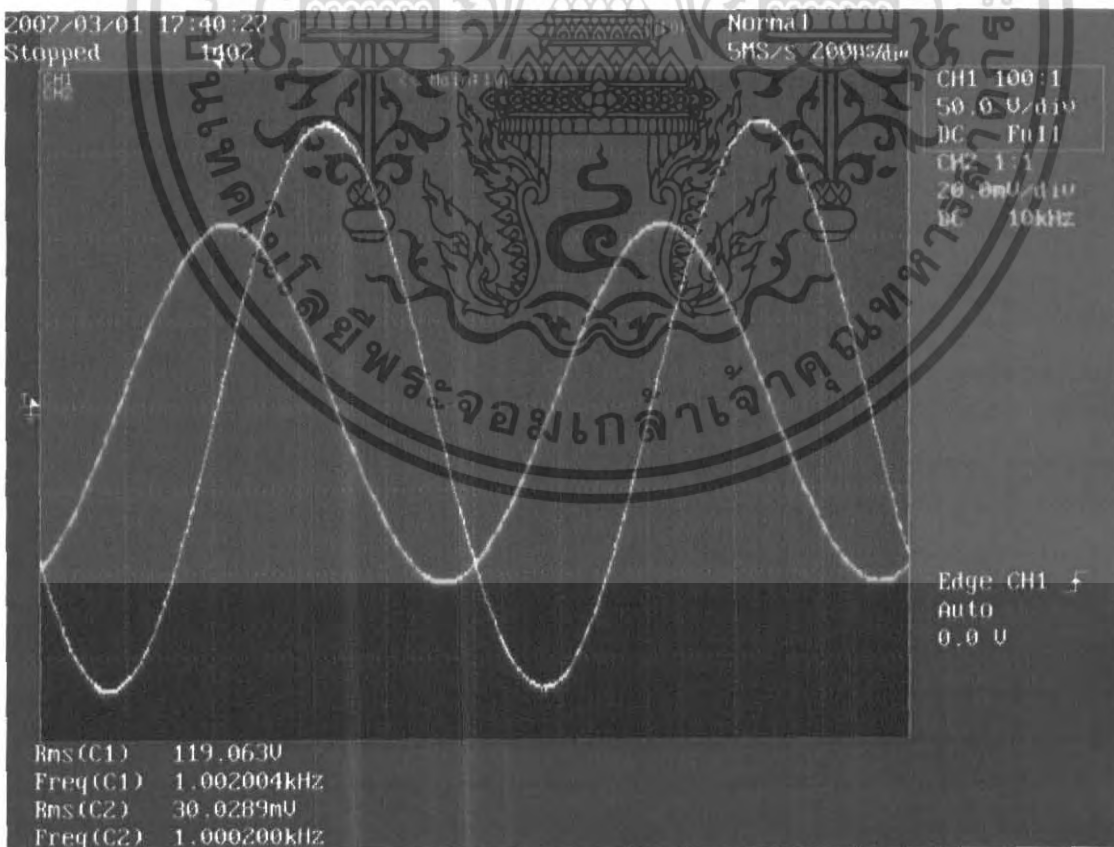


รูปที่ 5.71 ค่าแรงดันและกระแสก่อนการทดลอง Turn to Turn ล่างก่อนการทดลองที่ความถี่ 50 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

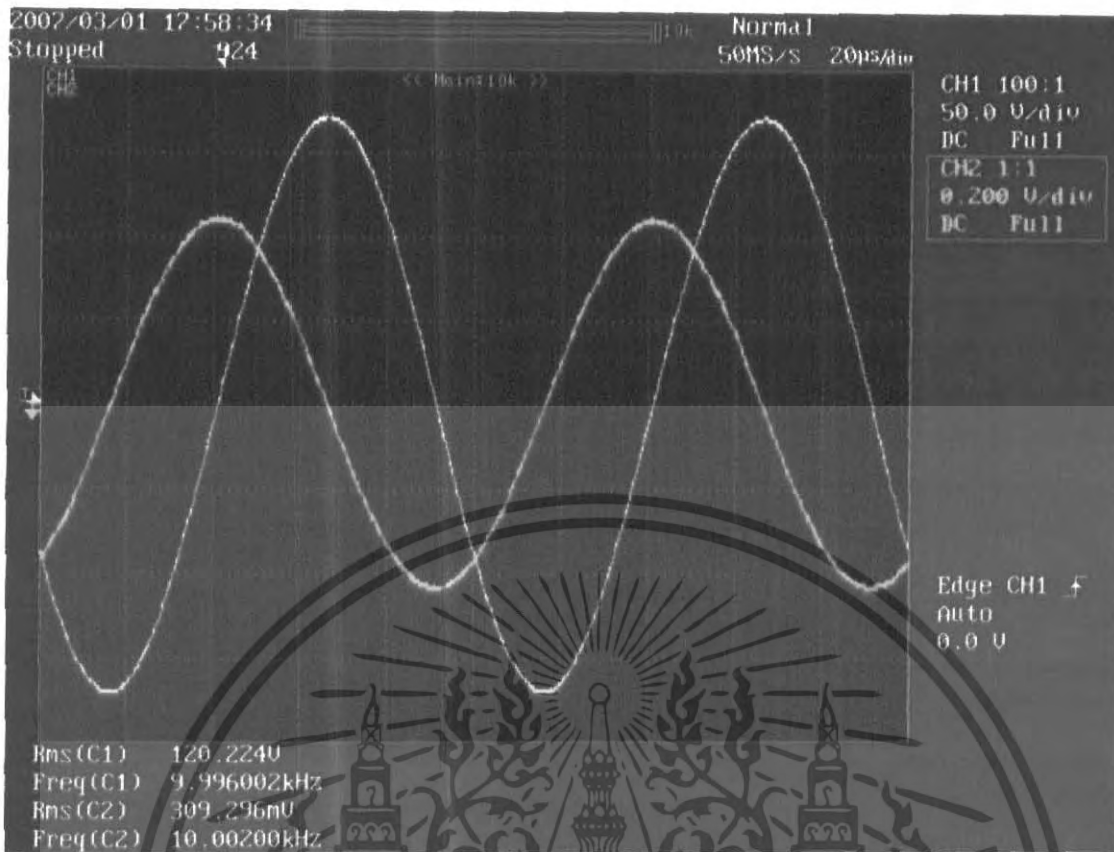


รูปที่ 5.72 ค่าแรงดันและกระแสก่อนการทดลอง Turn to Turn ล่างก่อนการทดลองที่ความถี่ 500 Hz

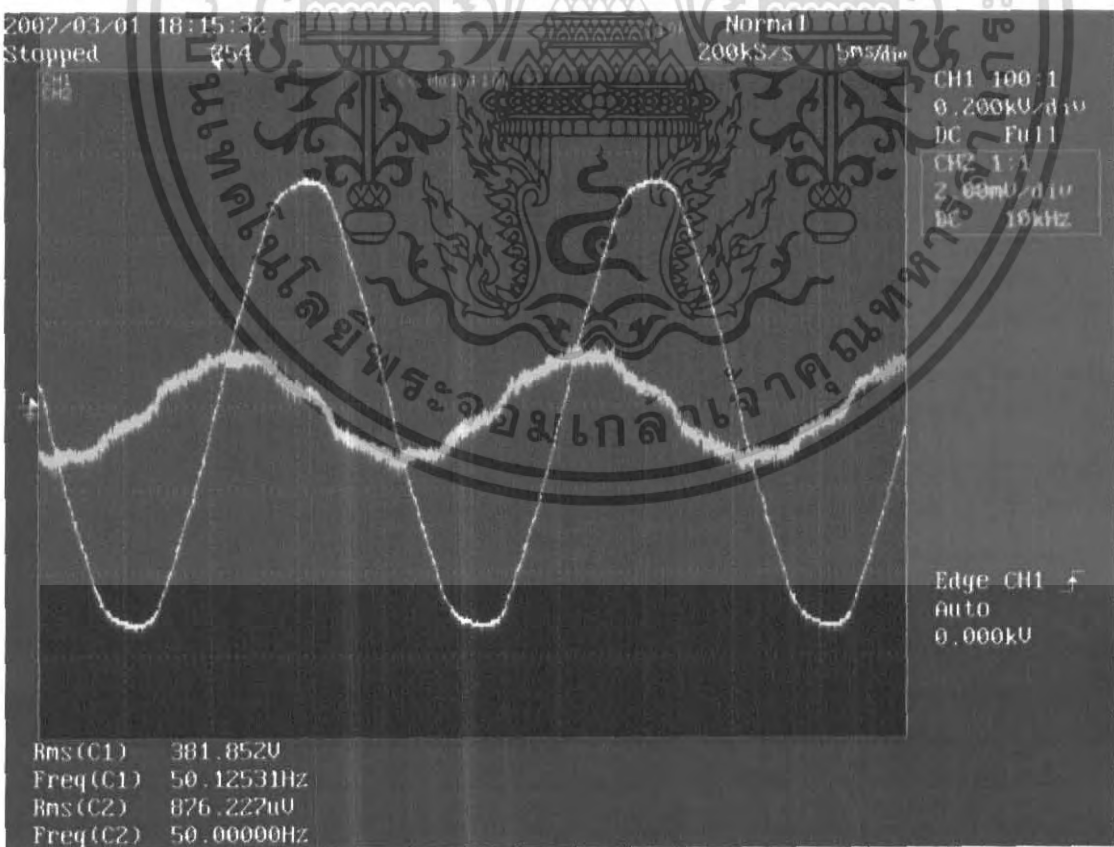


รูปที่ 5.73 ค่าแรงดันและกระแสก่อนการทดลอง Turn to Turn ล่างก่อนการทดลองที่ความถี่ 1k Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

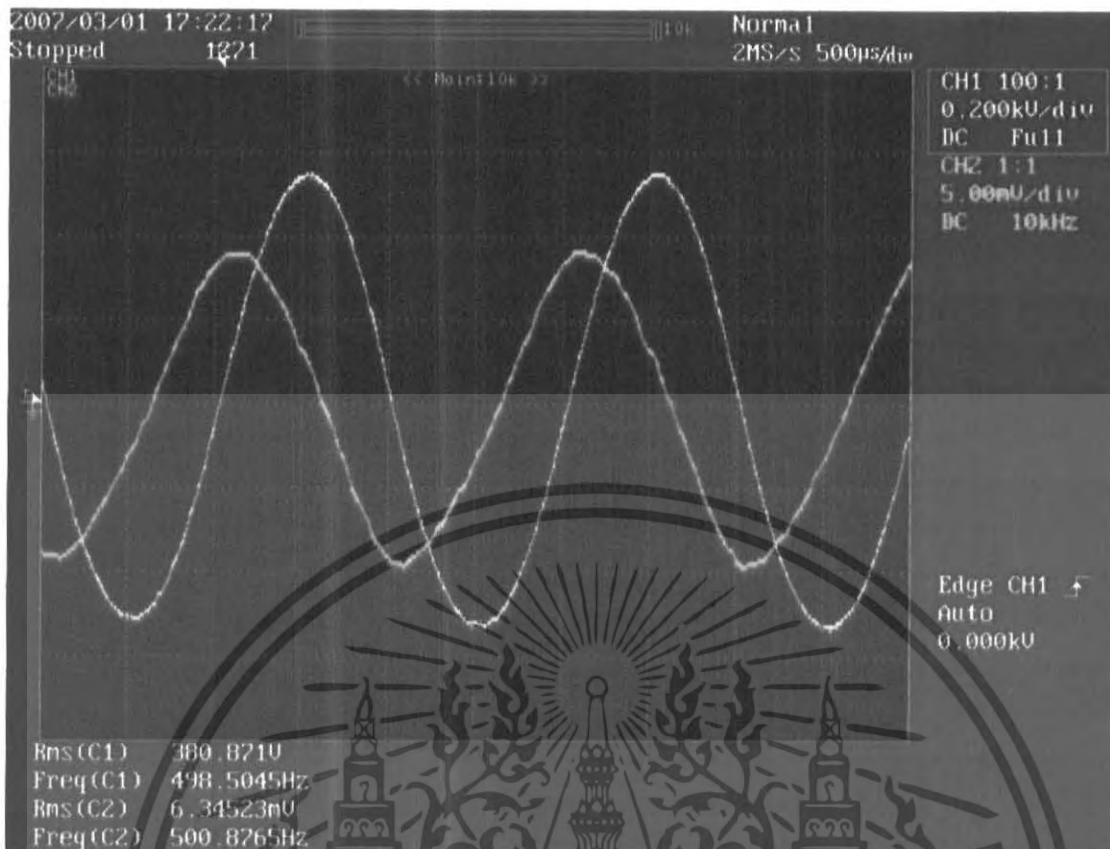


รูปที่ 5.74 ค่าแรงดันและกระแสก่อนการทดลอง Turn to Turn ล่างก่อนการทดลองที่ความถี่ 10k Hz

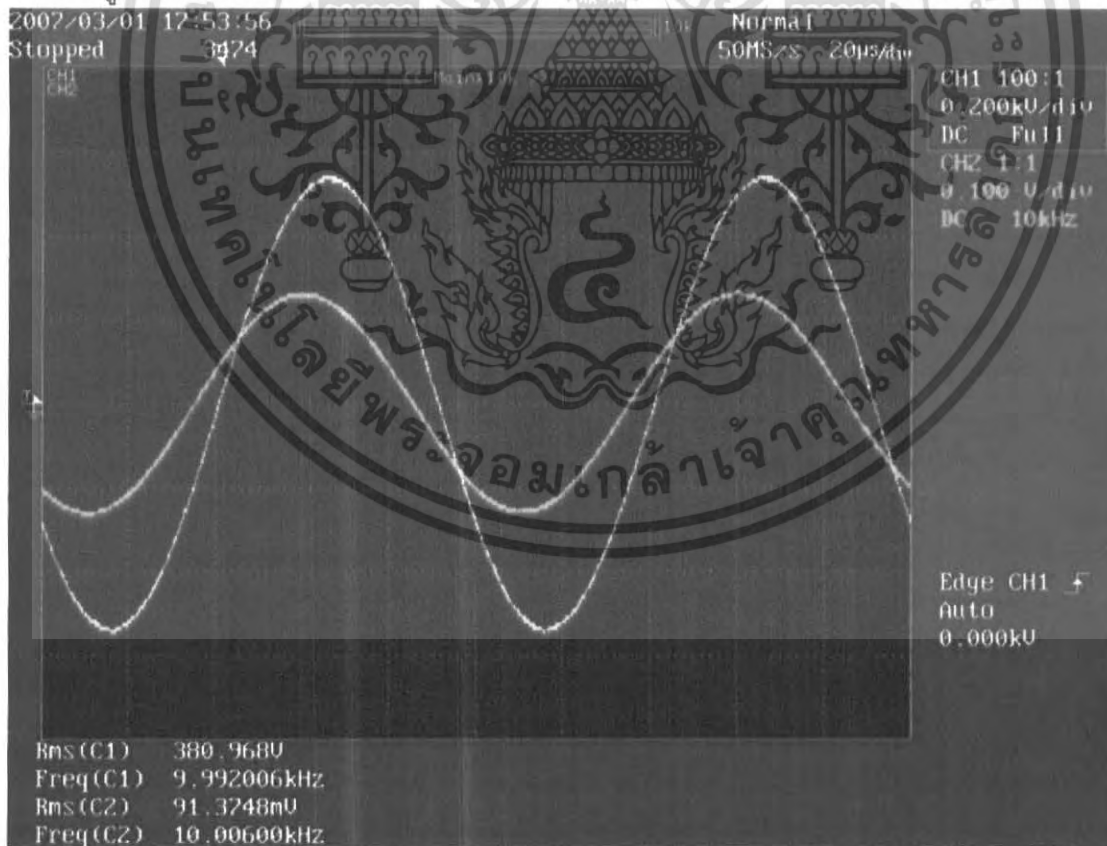


รูปที่ 5.75 ค่าแรงดันและกระแสก่อนการทดลอง coil to coil ก่อนการทดลองที่ความถี่ 50 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

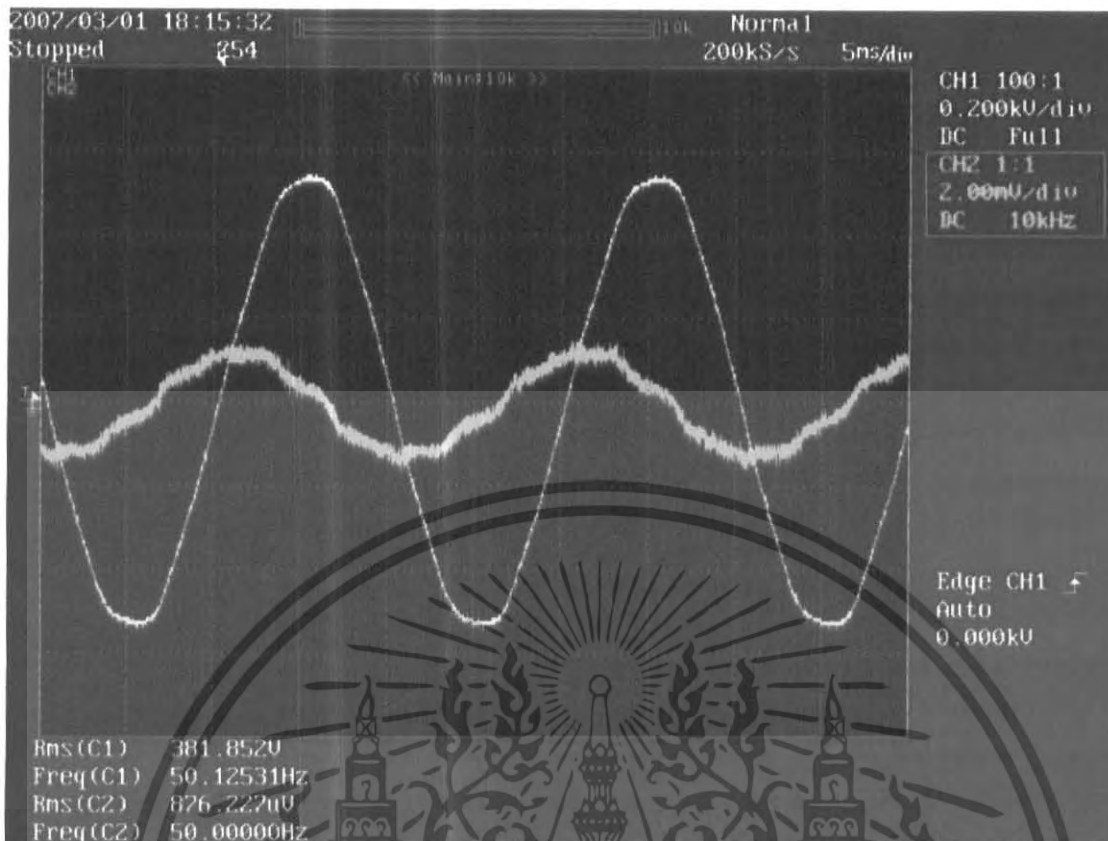


รูปที่ 5.76 ค่าแรงดันและกระแสก่อนการทดลอง coil to coil ก่อนการทดลองที่ความถี่ 500 Hz

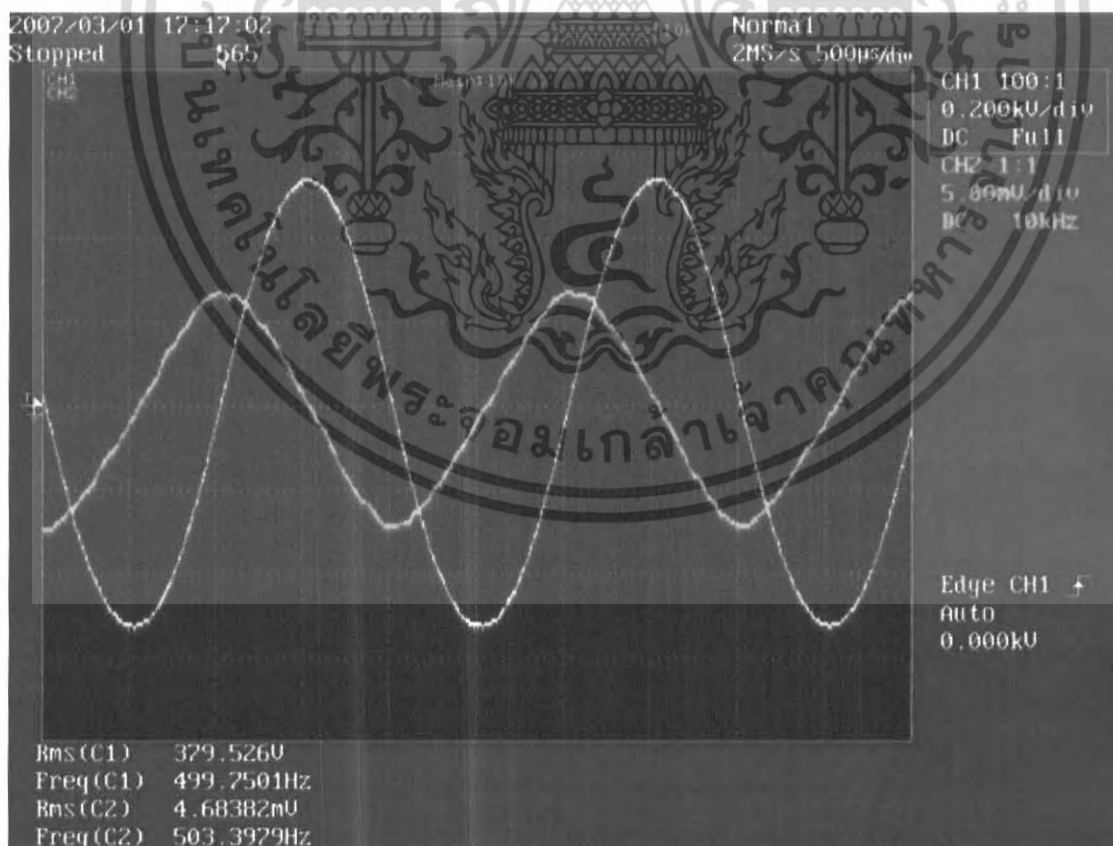


รูปที่ 5.77 ค่าแรงดันและกระแสก่อนการทดลอง coil to coil ก่อนการทดลองที่ความถี่ 10k Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

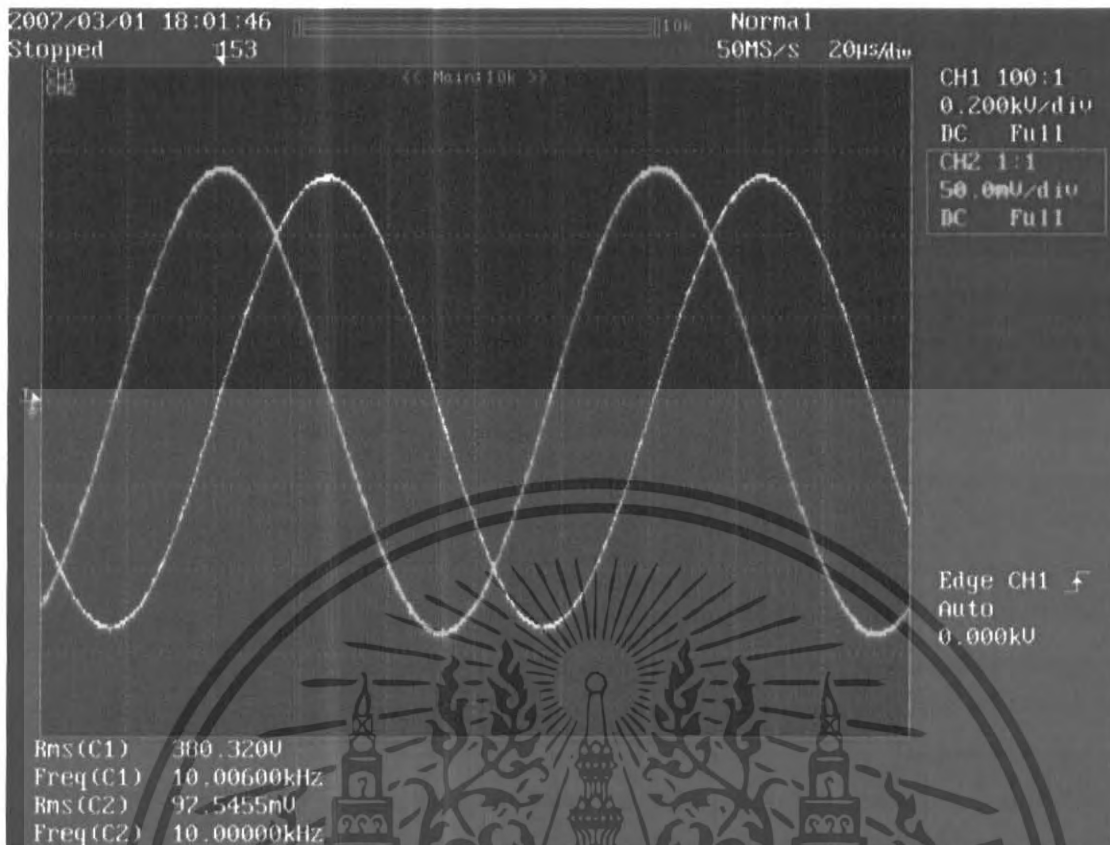


รูปที่ 5.78 ค่าแรงดันและกระแสก่อนการทดลอง coil to ground ก่อนการทดลองที่ความถี่ 50 Hz

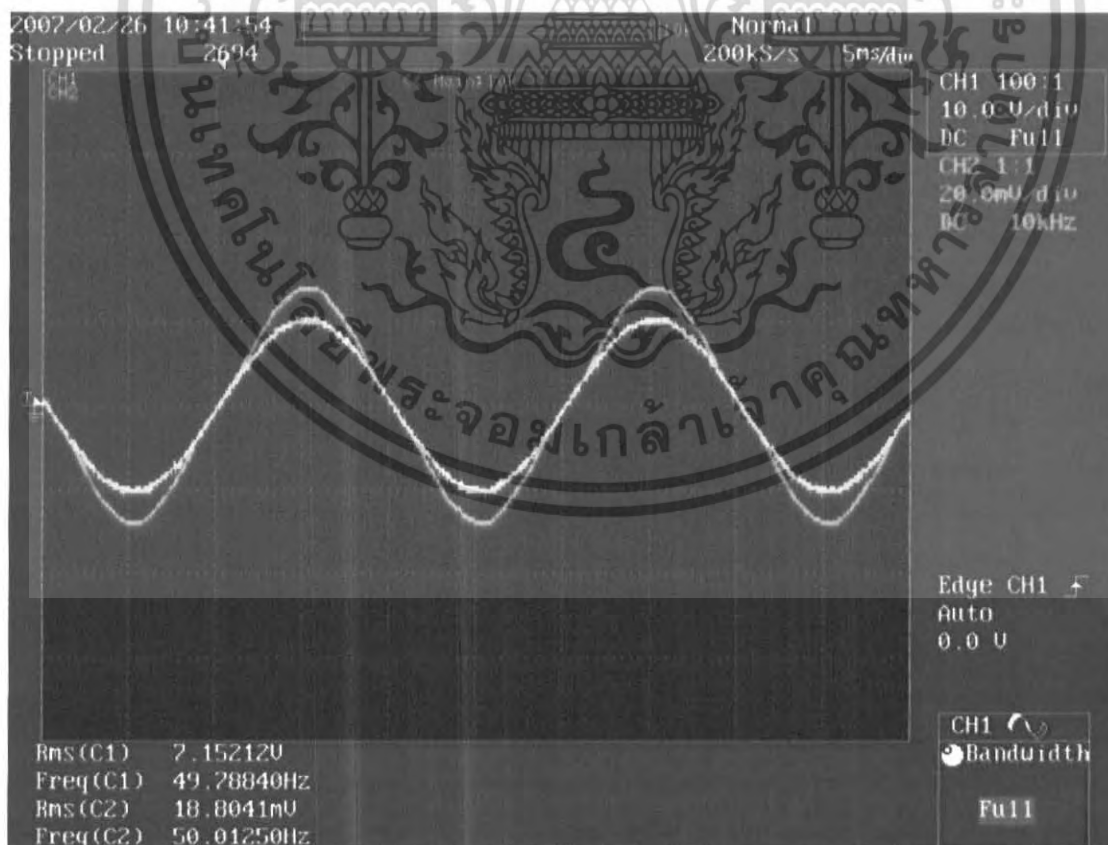


รูปที่ 5.79 ค่าแรงดันและกระแสก่อนการทดลอง coil to ground ก่อนการทดลองที่ความถี่ 500 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.80 ค่าแรงดันและกระแสก่อนการทดลอง coil to ground ก่อนการทดลองที่ความถี่ 10k Hz



รูปที่ 5.81 ค่าแรงดันและกระแสหลังจากจนวนเสื่อมสภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองการป้อนสัญญาณแรงดันแก่แบบจำลองร่องสลัดก่อนการทดลอง จะเห็นได้ว่า มุมของกระแสและแรงดันมีลักษณะ มุมของกระแสมีค่านำมุมของแรงดัน (  $I$  lead  $V$  ) และเมื่อป้อน ความถี่สูงขึ้น ที่แรงดันเท่าเดิม จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงดังนี้ ค่าของกระแสจะมีค่ามากขึ้น และมุม ระหว่างกระแสและแรงดันมีค่าเพิ่มขึ้นดังรูป ส่วนค่าของ  $R$  และ  $X_c$  มีค่าลดลง ซึ่งค่า  $X_c$  เกิดจากการที่  $C$  และ  $R$  ต่อขนานกัน แต่เมื่อดูจากการเปลี่ยนแปลงมุม ค่าของ  $R$  และ  $X_c$  ต่อขนานเพียงอย่างเดียว เพราะค่าของ  $X_c$  ลดลงไม่เป็นอัตราส่วนเดียวกับค่าของความถี่ที่ความถี่ 50 KHz ถึง 100 KHz แต่จะมี ค่าใกล้เคียงกันเมื่อความถี่สูงขึ้น ประกอบกับการที่นำขบวนไปทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งผลการ ทดสอบนั้นไม่มีการไหล

เมื่อทำการเร่งอายุทางความร้อน โดยแบ่งการทดสอบเป็น 4 แบบ คือ Coil to Coil , Coil to Ground , Turn to Turn (Up) , Turn to turn (Down) ที่ความถี่ 50 , 500 , 1k , 10k Hz

จะสังเกตเห็นว่า การเร่งอายุทางความร้อนส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์  $R$  และ  $X_c$  ของขบวนทั้ง 4 แบบ มีค่าลดลง เมื่อเพิ่มความถี่ที่ป้อนให้กับขบวน มุมเฟสระหว่างกระแส ( $I$ ) และ แรงดัน ( $V$ ) ที่ความถี่ ต่างๆจะมีค่าเพิ่มทั้ง 4 แบบขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการเสื่อมสภาพของระบบขบวนนั้นสังเกตได้จากการ เปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์  $R$  และ  $C$  และสามารถหาวงจรสมมูลขบวนอย่างง่ายคือ



รูปที่ 5.82 วงจรสมมูลขบวนอย่างง่ายคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### สรุปและวิจารณ์การทดลอง

จากการทดสอบที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าการทดสอบด้วยการเร่งอายุทางความร้อนนั้น สัมพันธ์จากการที่ค่าของกระแสเพียงอย่างเดียว แล้วนำมาหาค่าอิมพีแดนซ์ ( Impedance ) ของระบบฉนวน ซึ่งจะไม่ทราบว่าการเสื่อมสภาพของระบบฉนวนนั้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์ตัวใดในระบบฉนวน

ในการออกแบบการทดสอบเพื่อวินิจฉัยค่าอิมพีแดนซ์ในระบบฉนวนนั้น จากมาตรฐาน IEEE 402 – 2000 ของระบบฉนวนประกอบด้วย R และ C ดังนั้นเราจึงสามารถสร้างสัญญาณแรงดันและสัญญาณความถี่ เนื่องจากค่าของ  $X_c$  จะเปลี่ยนแปลงตามค่าของความถี่ แล้วนำมาสังเกตลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่า R และ  $X_c$  เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น และค่าของ R และ  $X_c$  เมื่อผ่านการเร่งอายุทางความร้อน

ในการทดสอบการเร่งอายุของฉนวนและทดสอบด้วยวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ สามารถแบ่งการทดสอบออกเป็น 4 อย่างได้ดังนี้

1. การทดสอบระหว่างเส้นลวดกับเส้นลวดในชุดบน ( Turn to Turn up )
2. การทดสอบระหว่างเส้นลวดกับเส้นลวดในชุดล่าง ( Turn to Turn down )
3. การทดสอบระหว่างชุดลวดกับชุดลวด ( Coil to Coil )
4. การทดสอบระหว่างชุดลวดกับกราวด์ ( Coil to Ground )

โดยการทดสอบเหล่านี้จะทดสอบที่ความถี่ 50 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 10 kHz และ 40 kHz

ผลการทดสอบทั้ง 4 แบบที่ความถี่ 40 kHz นั้นการเปลี่ยนแปลงค่าของมุมระหว่างกระแส ( I ) และแรงดัน ( V ) เป็น 90 องศาทำให้การสังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่า R และ  $X_c$  ไม่ได้ จึงตัดความถี่ที่ 40 kHz ออก

ก่อนการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนของฉนวนนั้นได้ทำการทดสอบด้วยวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ ซึ่งการทดสอบแบ่งออกเป็น 4 แบบดังนี้

1. การทดสอบระหว่างเส้นลวดกับเส้นลวดในชุดบน ( Turn to Turn up ) ทดสอบที่แรงดัน 120 V ที่ความถี่ 50 Hz, 500 Hz, 1 kHz และ 10 kHz
2. การทดสอบระหว่างเส้นลวดกับเส้นลวดในชุดล่าง ( Turn to Turn down ) ทดสอบที่แรงดัน 120 V ที่ความถี่ 50 Hz, 500 Hz, 1 kHz และ 10 kHz
3. การทดสอบระหว่างชุดลวดกับชุดลวด ( Coil to Coil ) ทดสอบที่แรงดัน 380 V ที่ความถี่ 50 Hz, 500 Hz, 1 kHz และ 10 kHz
4. การทดสอบระหว่างชุดลวดกับกราวด์ ( Coil to Ground ) ทดสอบที่แรงดัน 380 V ที่ความถี่ 50 Hz, 500 Hz, 1 kHz และ 10 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความถี่ค่าของกระแสจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่า  $X_c$  ในระบบฉนวนซึ่งค่าของ  $X_c$  จะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้น และมุมระหว่างกระแสกับแรงดันมีค่าเพิ่มขึ้นทั้ง 4 แบบการทดลอง ทำให้นำมาเขียนวงจรสมมูลอย่างง่ายได้ดังรูป 5.81 ซึ่งประกอบด้วยค่า  $R$  และ  $C$

หลังการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนของฉนวนนั้น เห็นการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์  $R$  และ  $X_c$  โดยที่ค่า  $R$  และ  $X_c$  มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มรอบการทดสอบการเร่งอายุทางความร้อนทั้ง 4 แบบการทดลอง จะเห็นได้ว่าฉนวนที่เสื่อมสภาพนั้นค่ามุมระหว่างกระแสและแรงดันจะมีมุมเฟสเดียวกัน(0 องศา) เนื่องจากการเสื่อมสภาพของค่า  $C$  เกิดจากการที่แตกตัวของโมเลกุลน้ำเข้าไปในระบบฉนวนทำให้ค่าของเปอร์มิตติวิตี (permittivity) ของระบบฉนวนลดลง

แนวทางในการพัฒนาต่อ เนื่องจากระบบฉนวนในเครื่องจักรไฟฟ้ามีอยู่หลายชนิด เช่น ฉนวน Class F ฉนวน Class H เป็นต้น ดังนั้นฉนวนแต่ละ Class จะมีค่า Impedance ไม่เท่ากัน ทำให้ค่า  $R$  และ  $X_c$  ไม่เท่ากัน มุมระหว่างกระแส ( $I$ ) และแรงดัน ( $V$ ) แต่ละ Class ไม่เท่ากันและศึกษามุมของฉนวนแต่ละ Class ว่ามีค่ามุมระหว่างกระแสและแรงดันเป็นค่าเท่าใด ซึ่งอาจนำไปตรวจสอบฉนวนในเครื่องจักรกลที่มีอยู่เป็นฉนวนตรงตามป้ายชื่อ ( Nameplate ) ที่ให้มา เพื่อนำไปคาดคะเนอายุการใช้งานของเครื่องจักรกลตัวนั้นๆ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Keng C.Wu. **Transistor Circuits for Spacecraft Power System**, New Jersey, Lockheed Martin Naval Electronic & Surveillance Systems,2006
- [2] Noelle D.Humenick, "IEEE Recommended Practice for testing Insulation Resistance of Rotating Mechinary," **IEEE std43-2000(R2006)**,2006
- [3] สำรวย สังข์สะอาด, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**, พิมพ์ครั้งที่ 2, พิมพ์เมื่อ เมษายน 2547
- [4] เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์, "เทคนิคการทดสอบเพื่อยืนยันระดับชั้นทางความร้อนของ ฉนวนเครื่องจักรกลไฟฟ้าโดยการใช้แบบจำลองร่องสลิต," **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก  
ผลการทดลอง

ความถี่ 50Hz						
Turn to turn บนก่อนการทดลอง						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	IXc(K $\Omega$ )
1	121.05	39.77E-06	77.40	3.044E+06	664.0547	2970.81
2	120.86	28.25E-06	77.40	4.278E+06	933.2734	4175.23
3	119.01	29.21E-06	79.20	4.074E+06	763.4586	4002.19
4	119.01	44.05E-06	79.20	2.702E+06	506.2219	2653.71
5	119.84	43.59E-06	81.00	2.749E+06	430.1147	2715.64
6	119.91	35.83E-06	79.20	3.346E+06	627.0404	3287.06
7	119.96	38.15E-06	79.20	3.144E+06	589.1525	3088.45
8	119.16	45.43E-06	79.20	2.623E+06	491.4705	2576.38
9	119.06	26.60E-06	77.40	4.476E+06	976.4518	4368.39
10	121.56	41.18E-06	79.20	2.952E+06	553.1015	2899.46

ความถี่ 500Hz						
Turn to turn บนก่อนการทดลอง						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	IXc(K $\Omega$ )
1	121.35	04.56E-04	84.60	266.1E+3	25.0440	264.94
2	120.39	03.13E-04	87.12	385.2E+3	19.3537	384.71
3	119.52	03.41E-04	84.60	350.4E+3	32.9760	348.85
4	121.13	05.02E-04	84.60	241.4E+3	22.7161	240.31
5	119.90	05.02E-04	84.60	239.0E+3	22.4936	237.96
6	119.50	04.13E-04	84.60	289.4E+3	27.2359	288.13
7	120.50	04.40E-04	86.40	273.9E+3	17.1960	273.32
8	119.60	05.29E-04	84.60	226.3E+3	21.2950	225.28
9	121.25	03.18E-04	86.40	381.7E+3	23.9688	380.97
10	120.17	04.66E-04	86.40	257.9E+3	16.1921	257.37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 1kHz						
Turn to turn บนก่อนการทดลอง						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	jXc(K $\Omega$ )
1	119.10	08.71E-04	88.20	136.8E+3	4.2955	136.69
2	119.75	06.35E-04	86.40	188.6E+3	11.8412	188.21
3	121.47	06.59E-04	86.40	184.4E+3	11.5802	184.06
4	119.82	09.98E-04	88.56	120.1E+3	3.0179	120.06
5	121.40	09.95E-04	87.84	122.0E+3	4.5965	121.87
6	119.63	08.05E-04	86.76	148.7E+3	8.4039	148.45
7	119.90	08.51E-04	86.40	140.8E+3	8.8430	140.55
8	121.90	10.45E-04	87.12	116.6E+3	5.8585	116.45
9	119.60	06.27E-04	88.20	190.7E+3	5.9890	190.57
10	119.20	09.14E-04	86.40	130.5E+3	8.1921	130.21

ความถี่ 10kHz						
Turn to turn บนก่อนการทดลอง						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	jXc(K $\Omega$ )
1	120	9337.5E-6	86.4	12.9E+3	0.8070	12.83
2	120.7	6749.2E-6	86.4	17.9E+3	1.1229	17.85
3	119.87	6719.6E-6	86.04	17.8E+3	1.2320	17.80
4	120.43	10392.2E-6	86.76	11.6E+3	0.6550	11.57
5	120.42	10196.1E-6	87.12	11.8E+3	0.5934	11.80
6	119.1	8362.7E-6	87.48	14.2E+3	0.6262	14.23
7	119.57	8808.8E-6	86.76	13.6E+3	0.7672	13.55
8	119.38	10917.6E-6	86.76	10.9E+3	0.6180	10.92
9	121.2	6573.5E-6	86.4	18.4E+3	1.1577	18.40
10	120.87	9502.1E-6	86.04	12.7E+3	0.8785	12.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 50Hz						
Turn to turn ล้างก่อนการทดลอง						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	JXc(K $\Omega$ )
1	120.78	48.15E-06	77.40	2.508E+06	547.2055	2448.06
2	121.15	58.57E-06	77.40	2.068E+06	451.2180	2018.63
3	120.82	50.35E-06	79.20	2.400E+06	449.6333	2357.06
4	120.18	60.55E-06	77.40	1.985E+06	432.9777	1937.03
5	120.42	52.95E-06	79.20	2.274E+06	426.1407	2233.91
6	120.07	62.37E-06	79.20	1.925E+06	360.7548	1891.14
7	119.12	57.50E-06	77.40	2.072E+06	451.9281	2021.81
8	120.05	70.15E-06	79.20	1.711E+06	320.6789	1681.06
9	121.15	53.52E-06	77.40	2.263E+06	493.7600	2208.96
10	121.16	58.77E-06	77.40	2.062E+06	449.7169	2011.92

ความถี่ 500Hz						
Turn to turn ล้างก่อนการทดลอง						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	JXc(K $\Omega$ )
1	120.10	04.27E-04	84.60	281.1E+3	26.4569	279.89
2	119.36	05.05E-04	84.60	236.3E+3	22.2343	235.21
3	120.10	04.50E-04	88.20	267.1E+3	8.3906	266.99
4	120.70	05.51E-04	84.60	219.1E+3	20.6225	218.16
5	120.23	04.76E-04	84.60	252.7E+3	23.7802	251.57
6	119.69	05.64E-04	86.40	212.3E+3	13.3299	211.87
7	121.10	05.18E-04	84.60	233.8E+3	22.0010	232.75
8	119.10	06.38E-04	84.60	186.7E+3	17.5679	185.85
9	121.17	04.92E-04	84.60	246.3E+3	23.1770	245.19
10	119.49	05.19E-04	86.40	230.4E+3	14.4675	229.95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 1kHz						
Turn to turn ล้างก่อนการทดลอง						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	JXc(K $\Omega$ )
1	121.40	08.44E-04	86.40	143.9E+3	9.0371	143.64
2	120.67	10.30E-04	87.84	117.2E+3	4.4178	117.13
3	120.94	08.93E-04	86.76	135.5E+3	7.6587	135.29
4	120.29	10.70E-04	87.12	112.5E+3	5.6511	112.33
5	120.24	09.45E-04	86.76	127.2E+3	7.1913	127.03
6	120.67	11.15E-04	87.84	108.2E+3	4.0790	108.15
7	119.10	10.23E-04	88.92	116.5E+3	2.1955	116.46
8	121.49	12.62E-04	86.76	96.3E+3	5.4409	96.11
9	121.80	09.60E-04	86.40	126.9E+3	7.9665	126.62
10	119.35	10.12E-04	86.40	117.9E+3	7.4052	117.70

ความถี่ 10kHz						
Turn to turn ล้างก่อนการทดลอง						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	JXc(K $\Omega$ )
1	120.49	83.32E-04	86.4	14.5E+3	0.9080	14.43
2	121.1	99.74E-04	86.4	12.1E+3	0.7624	12.12
3	119.04	83.92E-04	86.76	14.2E+3	0.8018	14.16
4	121.04	01.04E-02	86.4	11.6E+3	0.7308	11.62
5	121.74	92.20E-04	86.4	13.2E+3	0.8291	13.18
6	120	01.08E-02	87.12	11.1E+3	0.5583	11.10
7	120.29	01.07E-02	86.4	11.2E+3	0.7059	11.22
8	119.32	01.21E-02	86.4	9.9E+3	0.6192	9.84
9	119.72	92.70E-04	86.4	12.9E+3	0.8109	12.89
10	120.6	01.00E-02	86.76	12.0E+3	0.6796	12.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 50 Hz						
coll to coll ก่อนทดลอง						
Num.	V	I(A)	มุม	Z(k $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	JXc(K $\Omega$ )
1	379.333	06.16E-06	77.4	61601461.5	13438	60118
2	318.13	05.73E-06	81	55533915.2	8687	54850
3	380.878	05.76E-06	81	66091869.1	10339	65278
4	380.085	05.98E-06	81	63574552.0	9945	62792
5	379.542	05.80E-06	79.2	65438275.9	12262	64279
6	380.493	04.61E-06	82.8	82523656.1	10343	81873
7	381.843	05.24E-06	82.8	72850940.3	9131	72276
8	379.077	05.74E-06	77.4	66000223.9	14398	64411
9	380.892	05.74E-06	77.4	66307983.1	14465	64711
10	380.329	05.57E-06	79.2	68325497.2	12803	67115

ความถี่ 500 Hz						
coll to coll ก่อนทดลอง						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	JXc(K $\Omega$ )
1	380.896	62.40E-06	86.58	6104476.09	364	6094
2	380.255	63.01E-06	84.6	6034522.31	568	6008
3	380.7	59.41E-06	85.32	6407482.66	523	6386
4	381.82	64.91E-06	83.34	5882380.95	682	5843
5	379.5	60.18E-06	84.24	6305891.24	633	6274
6	380.2	51.09E-06	83.34	7441637.01	863	7391
7	381.23	52.00E-06	86.4	7331346.15	460	7317
8	381.9	60.73E-06	84.6	6288772.46	592	6261
9	379.4	61.09E-06	86.4	6210416.67	390	6198
10	380.9	56.55E-06	86.4	6736173.63	423	6723

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 1kHz						
coil to coil ก่อนทดลอง						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	JXc(K $\Omega$ )
1	380.88	102.7E-6	86.4	3707681.42	233	3700
2	379.89	115.9E-6	86.4	3277482.35	206	3271
3	379.74	102.3E-6	87.48	3713013.33	163	3709
4	379.39	127.7E-6	87.84	2970313.17	112	2968
5	379.3	111.8E-6	88.2	3392113.82	107	3390
6	380.46	96.4E-6	86.4	3948169.81	248	3940
7	381.38	103.2E-6	86.4	3696193.83	232	3689
8	381.63	112.7E-6	88.2	3385427.42	106	3384
9	381.2	121.8E-6	87.84	3129253.73	118	3127
10	379.23	113.2E-6	86.4	3350626.51	210	3344

ความถี่ 10kHz						
coil to coil ก่อนทดลอง						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	JXc(K $\Omega$ )
1	381.8	1301.5E-6	88.2	293360.452	9	293
2	380.45	1330.2E-6	86.4	286010.466	18	285
3	380.06	1233.1E-6	86.4	308205.756	19	308
4	380.244	1379.5E-6	90	275637.041	0	276
5	381.048	1259.7E-6	90	302480.24	0	302
6	379.056	1026.7E-6	90	369199.813	0	369
7	382.73	1109.5E-6	90	344957.188	0	345
8	379.263	1217.0E-6	86.4	311637.634	20	311
9	380.915	1296.0E-6	86.4	293927.012	18	293
10	380.693	1222.1E-6	90	311495.247	0	311

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 50 Hz						
coll to Groundก่อนทดลอง						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	jXc(K $\Omega$ )
1	381.43	04.58E-06	79.20	83283129.6	15606	81808
2	379.64	06.66E-06	81.00	57018708.3	8920	56317
3	380.71	09.07E-06	81.00	41977175.9	6567	41460
4	381.05	04.33E-06	81.00	88061545.4	13776	86977
5	381.31	06.76E-06	79.20	56368178.7	10562	55370
6	381.53	04.44E-06	79.20	85894232.1	16095	84373
7	380.94	09.12E-06	82.80	41770170	5235	41441
8	381.38	08.73E-06	77.40	43669232.1	9526	42618
9	380.11	09.67E-06	77.40	39305679.9	8574	38359
10	379.31	09.12E-06	79.20	41607302.4	7796	40870

ความถี่ 500 Hz						
coll to Groundก่อนทดลอง						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	jXc(K $\Omega$ )
1	379.31	37.4E-6	87.30	10142718.2	478	10131
2	380.00	72.0E-6	84.60	5280844.94	497	5257
3	380.20	102.5E-6	86.40	3707624.11	233	3700
4	379.30	39.3E-6	86.94	9658101.85	516	9644
5	379.30	103.1E-6	86.40	3679276.9	231	3672
6	381.50	44.9E-6	87.30	8494939.27	400	8486
7	381.80	104.5E-6	84.60	3652000	344	3636
8	381.10	95.8E-6	84.60	3977324.48	374	3960
9	381.90	100.0E-6	86.40	3819000	240	3811
10	379.60	96.4E-6	86.40	3939245.28	247	3931

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 1kHz						
coil to Groundก่อนทดลอง						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	JXc(K $\Omega$ )
1	380.00	60.9E-6	88.20	6238805.97	196	6236
2	379.58	115.0E-6	86.40	3300695.65	207	3294
3	379.90	210.5E-6	87.48	1805140.39	79	1803
4	379.68	50.9E-6	86.40	7458000	468	7443
5	379.00	125.9E-6	86.40	3010108.3	189	3004
6	380.33	89.5E-6	88.20	4247340.1	133	4245
7	379.60	206.4E-6	87.48	1839471.37	81	1838
8	378.50	181.8E-6	87.12	2081750	105	2079
9	381.50	206.8E-6	87.12	1844615.38	93	1842
10	379.60	191.4E-6	86.76	1983657.96	112	1980

ความถี่ 10kHz						
coil to Groundก่อนทดลอง						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	JXc(K $\Omega$ )
1	379.72	002233.24E-06	86.76	170.0E+3	9.6099	169.76
2	381.69	001750.98E-06	86.04	218.0E+3	15.0541	217.47
3	378.90	001877.75E-06	88.92	201.8E+3	3.8033	201.75
4	378.28	001971.21E-06	88.56	191.9E+3	4.8226	191.84
5	379.52	002151.76E-06	87.84	176.4E+3	6.6476	176.25
6	380.06	002149.35E-06	88.92	176.8E+3	3.3329	176.79
7	379.53	002151.50E-06	87.48	176.4E+3	7.7560	176.23
8	381.36	001218.54E-06	90.00	313.0E+3	0.0000	312.96
9	381.56	001453.84E-06	87.12	262.4E+3	13.1865	262.12
10	380.37	001232.56E-06	88.92	308.6E+3	5.8167	308.55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 50Hz						
Turn to turn บนหลังการทดลองครั้งที่ 1						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	JXc(K $\Omega$ )
1	119.92	48.79E-06	86.40	2.5E+6	154.3328	2453.05
2	119.77	33.93E-06	88.20	3.5E+6	110.8681	3527.88
3	120.25	36.64E-06	89.10	3.3E+6	51.5524	3281.66
4	120.96	56.40E-06	88.74	2.1E+6	47.1618	2144.23
5	120.59	55.07E-06	88.74	2.2E+6	48.1466	2189.01
6	119.50	44.60E-06	88.38	2.7E+6	75.7474	2678.30
7	121.03	47.57E-06	89.10	2.5E+6	39.9657	2544.09
8	121.00	58.43E-06	89.46	2.1E+6	19.5161	2070.66
9	120.31	34.08E-06	89.28	3.5E+6	44.3635	3530.15
10	120.73	50.84E-06	88.92	2.4E+6	44.7559	2374.10

ความถี่ 500Hz						
Turn to turn บนบนหลังการทดลองครั้งที่ 1						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	JXc(K $\Omega$ )
1	121.34	05.39E-04	86.94	225.0E+3	12.0114	224.69
2	120.85	05.53E-04	88.56	218.4E+3	5.4886	218.34
3	120.18	05.54E-04	87.12	216.8E+3	10.8952	216.57
4	120.14	05.42E-04	88.20	221.8E+3	6.9658	221.65
5	121.34	05.33E-04	88.20	227.9E+3	7.1573	227.75
6	120.06	04.29E-04	87.30	280.1E+3	13.1934	279.77
7	120.70	04.59E-04	88.20	262.7E+3	8.2521	262.58
8	120.79	05.57E-04	88.38	217.0E+3	6.1353	216.93
9	121.00	03.32E-04	87.66	364.2E+3	14.8696	363.88
10	120.62	04.84E-04	89.28	249.0E+3	3.1287	248.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 1kHz						
Turn to turn บนหลังการทดลองครั้งที่ 1						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	JXc(K $\Omega$ )
1	120.91	09.46E-04	89.28	127.9E+3	1.6067	127.85
2	120.73	09.65E-04	87.84	125.1E+3	4.7148	125.00
3	120.60	07.01E-04	88.92	172.2E+3	3.2451	172.14
4	119.18	10.45E-04	88.92	114.0E+3	2.1487	113.98
5	120.45	10.08E-04	88.92	119.5E+3	2.2527	119.50
6	120.18	08.58E-04	88.56	140.1E+3	3.5214	140.08
7	121.02	09.14E-04	88.56	132.4E+3	3.3263	132.32
8	120.60	11.01E-04	88.56	109.5E+3	2.7518	109.47
9	120.55	06.59E-04	89.28	182.9E+3	2.2980	182.86
10	119.37	09.69E-04	88.20	123.2E+3	3.8708	123.17

ความถี่ 10kHz						
Turn to turn บนหลังการทดลองครั้งที่ 1						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	JXc(K $\Omega$ )
1	119.157	9402.1E-6	89.28	12.7E+3	0.1593	12.67
2	121.542	6740.0E-6	89.28	18.0E+3	0.2266	18.03
3	118.783	6930.0E-6	89.28	17.1E+3	0.2154	17.14
4	121.76	10999.0E-6	88.56	11.1E+3	0.2782	11.07
5	121.09	10664.5E-6	89.28	11.4E+3	0.1427	11.35
6	119.916	8582.6E-6	88.92	14.0E+3	0.2634	13.97
7	121.75	9220.3E-6	88.2	13.2E+3	0.4148	13.20
8	119.42	10101.5E-6	88.56	11.8E+3	0.2971	11.82
9	120.407	6607.3E-6	88.2	18.2E+3	0.5724	18.21
10	120.517	9743.2E-6	88.92	12.4E+3	0.2331	12.37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 50Hz						
Turn to turn ล้างหลังการทดลองครั้งที่ 1						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	JXc(K $\Omega$ )
1	119.33	42.04E-06	86.40	2.8E+6	178.2244	2832.80
2	119.77	49.73E-06	88.20	2.4E+6	75.6595	2407.52
3	119.52	43.86E-06	89.10	2.7E+6	42.8070	2724.95
4	121.15	54.94E-06	88.74	2.2E+6	48.4928	2204.75
5	121.21	47.20E-06	88.74	2.6E+6	56.4619	2567.07
6	120.66	55.25E-06	88.38	2.2E+6	61.7365	2182.90
7	120.59	52.92E-06	89.10	2.3E+6	35.7913	2278.36
8	121.37	63.32E-06	89.46	1.9E+6	18.0658	1916.78
9	119.86	47.22E-06	89.28	2.5E+6	31.8991	2538.31
10	120.88	51.32E-06	88.92	2.4E+6	44.3952	2354.96

ความถี่ 500Hz						
Turn to turn ล้างหลังการทดลองครั้งที่ 1						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	JXc(K $\Omega$ )
1	121.14	04.65E-04	87.66	260.5E+3	10.6363	260.29
2	120.75	05.31E-04	87.30	227.4E+3	10.7102	227.11
3	119.49	04.28E-04	89.64	279.0E+3	1.7530	279.00
4	120.13	05.30E-04	87.48	226.5E+3	9.9606	226.32
5	119.33	04.52E-04	86.22	263.8E+3	17.3886	263.19
6	119.75	05.28E-04	88.20	226.8E+3	7.1237	226.68
7	120.71	05.08E-04	88.56	237.5E+3	5.9677	237.40
8	120.07	06.13E-04	88.38	196.0E+3	5.5409	195.92
9	121.21	04.52E-04	88.38	268.4E+3	7.5867	268.25
10	121.66	04.93E-04	88.56	246.9E+3	6.2052	246.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 1kHz						
Turn to turn ล้างหลังการทดลองครั้งที่ 1						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	jXc(K $\Omega$ )
1	120.06	08.23E-04	88.56	145.9E+3	3.6653	145.81
2	119.41	09.70E-04	88.92	123.1E+3	2.3212	123.13
3	120.10	08.53E-04	88.92	140.8E+3	2.6547	140.82
4	120.20	10.62E-04	88.92	113.2E+3	2.1334	113.17
5	120.41	09.08E-04	89.28	132.7E+3	1.6670	132.65
6	119.90	10.47E-04	89.28	114.5E+3	1.4391	114.51
7	119.90	10.08E-04	89.28	118.9E+3	1.4944	118.92
8	121.68	12.23E-04	88.56	99.5E+3	2.5012	99.50
9	119.62	08.94E-04	88.20	133.7E+3	4.2006	133.66
10	120.74	09.95E-04	87.84	121.3E+3	4.5716	121.21

ความถี่ 10kHz						
Turn to turn ล้างหลังการทดลองครั้งที่ 1						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	jXc(K $\Omega$ )
1	120.547	82.95E-04	89.28	14.5E+3	0.1826	14.53
2	119.904	97.77E-04	89.64	12.3E+3	0.0771	12.26
3	119.801	85.43E-04	88.92	14.0E+3	0.2643	14.02
4	121.236	01.06E-02	88.92	11.4E+3	0.2147	11.39
5	119.956	91.39E-04	88.128	13.1E+3	0.4288	13.12
6	120.069	01.07E-02	88.92	11.3E+3	0.2125	11.27
7	121.28	01.02E-02	89.28	11.9E+3	0.1493	11.88
8	119.8	01.21E-02	88.92	9.9E+3	0.1861	9.87
9	119.13	89.84E-04	88.2	13.3E+3	0.4165	13.25
10	119.78	98.20E-04	89.28	12.2E+3	0.1533	12.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 50 Hz						
coil to coil หลังการทดลองครั้งที่ 1						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	JXc(K $\Omega$ )
1	381.514	6.41E-06	82.8	59.5E+6	7461.0160	59060.02
2	380.395	5.69E-06	82.8	66.9E+6	8380.3333	66337.17
3	381.265	5.92E-06	85.86	64.4E+6	4646.4252	64192.53
4	380.308	6.75E-06	86.4	56.3E+6	3536.6752	56213.84
5	379.985	6.11E-06	86.4	62.2E+6	3906.2376	62087.87
6	381.588	4.36E-06	86.4	87.5E+6	5495.3748	87346.48
7	381.87	5.38E-06	85.68	71.0E+6	5349.7058	70818.17
8	379.333	5.72E-06	86.76	66.3E+6	3747.2922	66196.02
9	379.307	6.62E-06	82.8	57.3E+6	7176.3347	56806.54
10	381.107	5.28E-06	83.52	72.1E+6	8138.9800	71657.29

ความถี่ 500 Hz						
coil to coil หลังการทดลองครั้งที่ 1						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	JXc(K $\Omega$ )
1	380.896	64.41E-06	86.58	5.9E+6	352.8020	5903.52
2	379.34	59.90E-06	84.96	6.3E+6	556.3815	6308.74
3	379.36	66.14E-06	84.42	5.7E+6	557.7148	5708.53
4	381.46	70.23E-06	87.3	5.4E+6	255.8633	5425.57
5	381.43	64.40E-06	88.56	5.9E+6	148.8347	5920.70
6	380.265	48.12E-06	89.28	7.9E+6	99.3043	7901.97
7	379.402	58.09E-06	88.56	6.5E+6	164.1413	6529.60
8	379.429	62.09E-06	87.12	6.1E+6	307.0495	6103.41
9	379.879	67.37E-06	86.76	5.6E+6	318.7117	5630.05
10	379.898	58.88E-06	86.94	6.5E+6	344.4225	6442.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 1kHz ครั้งที่ 1						
coil to coil หลังการทดลองครั้งที่ 1						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	jXc(K $\Omega$ )
1	379.413	134.4E-6	88.2	2.8E+6	88.6614	2821.25
2	379.916	113.2E-6	87.84	3.4E+6	126.5106	3354.21
3	379.7	125.7E-6	89.28	3.0E+6	37.9731	3021.65
4	380.06	138.5E-6	87.12	2.7E+6	137.8762	2740.65
5	379.337	122.1E-6	89.28	3.1E+6	39.0398	3106.53
6	381.756	94.1E-6	89.28	4.1E+6	50.9772	4056.43
7	379.754	112.2E-6	89.64	3.4E+6	21.2720	3385.50
8	381.085	123.1E-6	88.56	3.1E+6	77.7835	3094.25
9	380.836	129.8E-6	89.28	2.9E+6	36.8642	2933.41
10	380.751	113.8E-6	87.84	3.3E+6	126.1328	3344.19

ความถี่ 10kHz						
coil to coil หลังการทดลองครั้งที่ 1						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	jXc(K $\Omega$ )
1	381.8	1314.3E-6	89.28	290.5E+3	3.6505	290.48
2	380.789	1217.9E-6	88.92	312.7E+3	5.8930	312.60
3	381.425	1267.8E-6	89.28	300.8E+3	3.7805	300.82
4	380.955	1386.7E-6	90	274.7E+3	0.0000	274.72
5	381.068	1246.6E-6	90	305.7E+3	0.0000	305.70
6	379.598	0948.6E-6	90	400.2E+3	0.0000	400.16
7	378.791	1166.3E-6	90	324.8E+3	0.0000	324.78
8	381.783	1265.9E-6	89.28	301.6E+3	3.7898	301.57
9	380.713	1334.3E-6	89.28	285.3E+3	3.5854	285.30
10	379.322	1170.0E-6	90	324.2E+3	0.0000	324.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 50 Hz						
coil to Ground หลังการทดลองครั้งที่ 1						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	IXc(K $\Omega$ )
1	381.688	10.68E-06	88.56	35.7E+6	897.7944	35714.58
2	381.188	09.57E-06	86.94	39.8E+6	2126.1225	39771.90
3	381.273	10.02E-06	88.2	38.1E+6	1195.5033	38041.53
4	381.203	09.39E-06	88.2	40.6E+6	1275.2179	40578.09
5	379.942	09.82E-06	89.28	38.7E+6	486.2613	38693.41
6	380.405	09.80E-06	88.2	38.8E+6	1219.2775	38798.04
7	379.4	10.12E-06	88.74	37.5E+6	824.5636	37489.20
8	380.881	08.55E-06	88.2	44.6E+6	1399.8843	44545.04
9	380.22	10.02E-06	88.2	38.0E+6	1192.3206	37940.26
10	381.606	08.70E-06	88.2	43.9E+6	1377.5868	43835.52

ความถี่ 500 Hz						
coil to Ground หลังการทดลองครั้งที่ 1						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	IXc(K $\Omega$ )
1	380.67	01.15E-04	84.60	3.3E+6	310.1674	3281.23
2	380.45	99.98E-06	83.70	3.8E+6	417.5686	3782.29
3	380.03	01.05E-04	85.86	3.6E+6	260.3511	3596.87
4	379.75	01.00E-04	86.40	3.8E+6	238.0851	3784.25
5	379.00	01.07E-04	88.56	3.5E+6	88.9763	3539.51
6	381.15	99.41E-06	87.30	3.8E+6	180.6065	3829.75
7	380.70	01.06E-04	86.58	3.6E+6	213.4258	3571.31
8	380.64	94.27E-06	88.38	4.0E+6	114.1563	4036.38
9	380.52	01.08E-04	86.76	3.5E+6	200.0241	3533.43
10	381.70	96.21E-06	86.76	4.0E+6	224.2299	3961.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 1kHz						
coll to Groundหลังการทดลองครั้งที่ 1						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	Xc(K $\Omega$ )
1	381.52	02.26E-04	89.28	1.7E+6	21.2191	1688.47
2	379.45	01.97E-04	89.28	1.9E+6	24.2007	1925.73
3	379.92	02.11E-04	87.48	1.8E+6	79.1676	1798.83
4	379.24	01.96E-04	87.84	1.9E+6	72.9453	1934.02
5	379.24	02.09E-04	89.64	1.8E+6	11.4181	1817.22
6	379.00	01.96E-04	89.64	1.9E+6	12.1793	1938.38
7	380.26	02.09E-04	88.20	1.8E+6	57.1661	1819.05
8	380.25	01.85E-04	88.92	2.1E+6	38.6479	2050.09
9	380.52	02.11E-04	88.20	1.8E+6	56.5913	1800.76
10	379.13	01.86E-04	89.28	2.0E+6	25.5604	2033.92

ความถี่ 10kHz						
coll to Groundหลังการทดลองครั้งที่ 1						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	Xc(K $\Omega$ )
1	381.47	24.43E-04	8.86	156.1E+3	154.2589	24.03
2	380.46	19.93E-04	8.93	190.9E+3	188.6037	29.63
3	381.49	20.93E-04	8.93	182.3E+3	180.0916	28.29
4	381.74	19.74E-04	9.00	193.4E+3	190.9804	30.25
5	379.85	21.06E-04	9.00	180.4E+3	178.1523	28.22
6	379.93	19.12E-04	8.89	198.7E+3	196.3328	30.72
7	380.63	20.95E-04	8.96	181.7E+3	179.4937	28.31
8	380.51	18.63E-04	9.00	204.3E+3	201.7816	31.96
9	379.22	20.88E-04	9.00	181.6E+3	179.3639	28.41
10	380.08	18.78E-04	9.00	202.4E+3	199.8731	31.66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 50Hz						
Turn to turn บนหลังการทดลองครั้งที่ 1						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	jXc(K $\Omega$ )
1	119.92	48.79E-06	86.40	2.5E+6	154.3328	2453.05
2	119.77	33.93E-06	88.20	3.5E+6	110.8681	3527.88
3	120.25	36.64E-06	89.10	3.3E+6	51.5524	3281.66
4	120.96	56.40E-06	88.74	2.1E+6	47.1618	2144.23
5	120.59	55.07E-06	88.74	2.2E+6	48.1466	2189.01
6	119.50	44.60E-06	88.38	2.7E+6	75.7474	2678.30
7	121.03	47.57E-06	89.10	2.5E+6	39.9657	2544.09
8	121.00	58.43E-06	89.46	2.1E+6	19.5161	2070.66
9	120.31	34.08E-06	89.28	3.5E+6	44.3635	3530.15
10	120.73	50.84E-06	88.92	2.4E+6	44.7559	2374.10

ความถี่ 500Hz						
Turn to turn บน						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	jXc(K $\Omega$ )
1	121.34	05.39E-04	86.94	225.0E+3	12.0114	224.69
2	120.85	05.53E-04	88.56	218.4E+3	5.4886	218.34
3	120.18	05.54E-04	87.12	216.8E+3	10.8952	216.57
4	120.14	05.42E-04	88.20	221.8E+3	6.9658	221.65
5	121.34	05.33E-04	88.20	227.9E+3	7.1573	227.75
6	120.06	04.29E-04	87.30	280.1E+3	13.1934	279.77
7	120.70	04.59E-04	88.20	262.7E+3	8.2521	262.58
8	120.79	05.57E-04	88.38	217.0E+3	6.1353	216.93
9	121.00	03.32E-04	87.66	364.2E+3	14.8696	363.88
10	120.62	04.84E-04	89.28	249.0E+3	3.1287	248.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 1kHz						
Turn to turn บนหลังการทดลองครั้งที่ 1						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	jXc(K $\Omega$ )
1	120.91	09.46E-04	89.28	127.9E+3	1.6067	127.85
2	120.73	09.65E-04	87.84	125.1E+3	4.7148	125.00
3	120.60	07.01E-04	88.92	172.2E+3	3.2451	172.14
4	119.18	10.45E-04	88.92	114.0E+3	2.1487	113.98
5	120.45	10.08E-04	88.92	119.5E+3	2.2527	119.50
6	120.18	08.58E-04	88.56	140.1E+3	3.5214	140.08
7	121.02	09.14E-04	88.56	132.4E+3	3.3263	132.32
8	120.60	11.01E-04	88.56	109.5E+3	2.7518	109.47
9	120.55	06.59E-04	89.28	182.9E+3	2.2980	182.86
10	119.37	09.69E-04	88.20	123.2E+3	3.8708	123.17

ความถี่ 10kHz						
Turn to turn บนหลังการทดลองครั้งที่ 1						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	jXc(K $\Omega$ )
1	119.157	9402.1E-6	89.28	12.7E+3	0.1593	12.67
2	121.542	6740.0E-6	89.28	18.0E+3	0.2266	18.03
3	118.783	6930.0E-6	89.28	17.1E+3	0.2154	17.14
4	121.76	10999.0E-6	88.56	11.1E+3	0.2782	11.07
5	121.09	10664.5E-6	89.28	11.4E+3	0.1427	11.35
6	119.916	8582.6E-6	88.92	14.0E+3	0.2634	13.97
7	121.75	9220.3E-6	88.2	13.2E+3	0.4148	13.20
8	119.42	10101.5E-6	88.56	11.8E+3	0.2971	11.82
9	120.407	6607.3E-6	88.2	18.2E+3	0.5724	18.21
10	120.517	9743.2E-6	88.92	12.4E+3	0.2331	12.37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 50Hz						
Turn to turn ล้างหลังการทดลองครั้งที่ 1						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	jXc(K $\Omega$ )
1	119.33	42.04E-06	86.40	2.8E+6	178.2244	2832.80
2	119.77	49.73E-06	88.20	2.4E+6	75.6595	2407.52
3	119.52	43.86E-06	89.10	2.7E+6	42.8070	2724.95
4	121.15	54.94E-06	88.74	2.2E+6	48.4928	2204.75
5	121.21	47.20E-06	88.74	2.6E+6	56.4619	2567.07
6	120.66	55.25E-06	88.38	2.2E+6	61.7365	2182.90
7	120.59	52.92E-06	89.10	2.3E+6	35.7913	2278.36
8	121.37	63.32E-06	89.46	1.9E+6	18.0658	1916.78
9	119.86	47.22E-06	89.28	2.5E+6	31.8991	2538.31
10	120.88	51.32E-06	88.92	2.4E+6	44.3952	2354.96

ความถี่ 500Hz						
Turn to turn ล้างหลังการทดลองครั้งที่ 1						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	jXc(K $\Omega$ )
1	121.14	04.65E-04	87.66	260.5E+3	10.6363	260.29
2	120.75	05.31E-04	87.30	227.4E+3	10.7102	227.11
3	119.49	04.28E-04	89.64	279.0E+3	1.7530	279.00
4	120.13	05.30E-04	87.48	226.5E+3	9.9606	226.32
5	119.33	04.52E-04	86.22	263.8E+3	17.3886	263.19
6	119.75	05.28E-04	88.20	226.8E+3	7.1237	226.68
7	120.71	05.08E-04	88.56	237.5E+3	5.9677	237.40
8	120.07	06.13E-04	88.38	196.0E+3	5.5409	195.92
9	121.21	04.52E-04	88.38	268.4E+3	7.5867	268.25
10	121.66	04.93E-04	88.56	246.9E+3	6.2052	246.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 1kHz						
Turn to turn ล้างหลังการทดลองครั้งที่ 1						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	JXc(K $\Omega$ )
1	120.06	08.23E-04	88.56	145.9E+3	3.6653	145.81
2	119.41	09.70E-04	88.92	123.1E+3	2.3212	123.13
3	120.10	08.53E-04	88.92	140.8E+3	2.6547	140.82
4	120.20	10.62E-04	88.92	113.2E+3	2.1334	113.17
5	120.41	09.08E-04	89.28	132.7E+3	1.6670	132.65
6	119.90	10.47E-04	89.28	114.5E+3	1.4391	114.51
7	119.90	10.08E-04	89.28	118.9E+3	1.4944	118.92
8	121.68	12.23E-04	88.56	99.5E+3	2.5012	99.50
9	119.62	08.94E-04	88.20	133.7E+3	4.2006	133.66
10	120.74	09.95E-04	87.84	121.3E+3	4.5716	121.21

ความถี่ 10kHz						
Turn to turn ล้างหลังการทดลองครั้งที่ 1						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	JXc(K $\Omega$ )
1	120.547	82.95E-04	89.28	14.5E+3	0.1826	14.53
2	119.904	97.77E-04	89.64	12.3E+3	0.0771	12.26
3	119.801	85.43E-04	88.92	14.0E+3	0.2643	14.02
4	121.236	01.06E-02	88.92	11.4E+3	0.2147	11.39
5	119.956	91.39E-04	88.128	13.1E+3	0.4288	13.12
6	120.069	01.07E-02	88.92	11.3E+3	0.2125	11.27
7	121.28	01.02E-02	89.28	11.9E+3	0.1493	11.88
8	119.8	01.21E-02	88.92	9.9E+3	0.1861	9.87
9	119.13	89.84E-04	88.2	13.3E+3	0.4165	13.25
10	119.78	98.20E-04	89.28	12.2E+3	0.1533	12.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 50 Hz						
coll to coll หลังการทดลองครั้งที่ 1						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	JXc(K $\Omega$ )
1	381.514	6.41E-06	82.8	59.5E+6	7461.0160	59060.02
2	380.395	5.69E-06	82.8	66.9E+6	8380.3333	66337.17
3	381.265	5.92E-06	85.86	64.4E+6	4646.4252	64192.53
4	380.308	6.75E-06	86.4	56.3E+6	3536.6752	56213.84
5	379.985	6.11E-06	86.4	62.2E+6	3906.2376	62087.87
6	381.588	4.36E-06	86.4	87.5E+6	5495.3748	87346.48
7	381.87	5.38E-06	85.68	71.0E+6	5349.7058	70818.17
8	379.333	5.72E-06	86.76	66.3E+6	3747.2922	66196.02
9	379.307	6.62E-06	82.8	57.3E+6	7176.3347	56806.54
10	381.107	5.28E-06	83.52	72.1E+6	8138.9800	71657.29

ความถี่ 500 Hz						
coll to coll หลังการทดลองครั้งที่ 1						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	JXc(K $\Omega$ )
1	380.896	64.41E-06	86.58	5.9E+6	352.8020	5903.52
2	379.34	59.90E-06	84.96	6.3E+6	556.3815	6308.74
3	379.36	66.14E-06	84.42	5.7E+6	557.7148	5708.53
4	381.46	70.23E-06	87.3	5.4E+6	255.8633	5425.57
5	381.43	64.40E-06	88.56	5.9E+6	148.8347	5920.70
6	380.265	48.12E-06	89.28	7.9E+6	99.3043	7901.97
7	379.402	58.09E-06	88.56	6.5E+6	164.1413	6529.60
8	379.429	62.09E-06	87.12	6.1E+6	307.0495	6103.41
9	379.879	67.37E-06	86.76	5.6E+6	318.7117	5630.05
10	379.898	58.88E-06	86.94	6.5E+6	344.4225	6442.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 1kHz ครั้งที่ 1						
coil to coil หลังการทดลองครั้งที่ 1						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	jXc(K $\Omega$ )
1	379.413	134.4E-6	88.2	2.8E+6	88.6614	2821.25
2	379.916	113.2E-6	87.84	3.4E+6	126.5106	3354.21
3	379.7	125.7E-6	89.28	3.0E+6	37.9731	3021.65
4	380.06	138.5E-6	87.12	2.7E+6	137.8762	2740.65
5	379.337	122.1E-6	89.28	3.1E+6	39.0398	3106.53
6	381.756	94.1E-6	89.28	4.1E+6	50.9772	4056.43
7	379.754	112.2E-6	89.64	3.4E+6	21.2720	3385.50
8	381.085	123.1E-6	88.56	3.1E+6	77.7835	3094.25
9	380.836	129.8E-6	89.28	2.9E+6	36.8642	2933.41
10	380.751	113.8E-6	87.84	3.3E+6	126.1328	3344.19

ความถี่ 10kHz						
coil to coil หลังการทดลองครั้งที่ 1						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	jXc(K $\Omega$ )
1	381.8	1314.3E-6	89.28	290.5E+3	3.6505	290.48
2	380.789	1217.9E-6	88.92	312.7E+3	5.8930	312.60
3	381.425	1267.8E-6	89.28	300.8E+3	3.7805	300.82
4	380.955	1386.7E-6	90	274.7E+3	0.0000	274.72
5	381.068	1246.6E-6	90	305.7E+3	0.0000	305.70
6	379.598	0948.6E-6	90	400.2E+3	0.0000	400.16
7	378.791	1166.3E-6	90	324.8E+3	0.0000	324.78
8	381.783	1265.9E-6	89.28	301.6E+3	3.7898	301.57
9	380.713	1334.3E-6	89.28	285.3E+3	3.5854	285.30
10	379.322	1170.0E-6	90	324.2E+3	0.0000	324.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 50 Hz						
coil to Groundหลังการทดลองครั้งที่ 1						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	jXc(K $\Omega$ )
1	381.688	10.68E-06	88.56	35.7E+6	897.7944	35714.58
2	381.188	09.57E-06	86.94	39.8E+6	2126.1225	39771.90
3	381.273	10.02E-06	88.2	38.1E+6	1195.5033	38041.53
4	381.203	09.39E-06	88.2	40.6E+6	1275.2179	40578.09
5	379.942	09.82E-06	89.28	38.7E+6	486.2613	38693.41
6	380.405	09.80E-06	88.2	38.8E+6	1219.2775	38798.04
7	379.4	10.12E-06	88.74	37.5E+6	824.5636	37489.20
8	380.881	08.55E-06	88.2	44.6E+6	1399.8843	44545.04
9	380.22	10.02E-06	88.2	38.0E+6	1192.3206	37940.26
10	381.606	08.70E-06	88.2	43.9E+6	1377.5868	43835.52

ความถี่ 500 Hz						
coil to Groundหลังการทดลองครั้งที่ 1						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	jXc(K $\Omega$ )
1	380.67	01.15E-04	84.60	3.3E+6	310.1674	3281.23
2	380.45	99.98E-06	83.70	3.8E+6	417.5686	3782.29
3	380.03	01.05E-04	85.86	3.6E+6	260.3511	3596.87
4	379.75	01.00E-04	86.40	3.8E+6	238.0851	3784.25
5	379.00	01.07E-04	88.56	3.5E+6	88.9763	3539.51
6	381.15	99.41E-06	87.30	3.8E+6	180.6065	3829.75
7	380.70	01.06E-04	86.58	3.6E+6	213.4258	3571.31
8	380.64	94.27E-06	88.38	4.0E+6	114.1563	4036.38
9	380.52	01.08E-04	86.76	3.5E+6	200.0241	3533.43
10	381.70	96.21E-06	86.76	4.0E+6	224.2299	3961.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 1kHz						
coil to Groundหลังการทดลองครั้งที่ 1						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	JXc(K $\Omega$ )
1	381.52	02.26E-04	89.28	1.7E+6	21.2191	1688.47
2	379.45	01.97E-04	89.28	1.9E+6	24.2007	1925.73
3	379.92	02.11E-04	87.48	1.8E+6	79.1676	1798.83
4	379.24	01.96E-04	87.84	1.9E+6	72.9453	1934.02
5	379.24	02.09E-04	89.64	1.8E+6	11.4181	1817.22
6	379.00	01.96E-04	89.64	1.9E+6	12.1793	1938.38
7	380.26	02.09E-04	88.20	1.8E+6	57.1661	1819.05
8	380.25	01.85E-04	88.92	2.1E+6	38.6479	2050.09
9	380.52	02.11E-04	88.20	1.8E+6	56.5913	1800.76
10	379.13	01.86E-04	89.28	2.0E+6	25.5604	2033.92

ความถี่ 10kHz						
coil to Groundหลังการทดลองครั้งที่ 1						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	JXc(K $\Omega$ )
1	381.47	24.43E-04	88.56	156.1E+3	3.9233	156.07
2	380.46	19.93E-04	89.28	190.9E+3	2.3991	190.90
3	381.49	20.93E-04	89.28	182.3E+3	2.2908	182.29
4	381.74	19.74E-04	90.00	193.4E+3	0.0000	193.36
5	379.85	21.06E-04	90.00	180.4E+3	0.0000	180.37
6	379.93	19.12E-04	88.92	198.7E+3	3.7456	198.69
7	380.63	20.95E-04	89.64	181.7E+3	1.1417	181.71
8	380.51	18.63E-04	90.00	204.3E+3	0.0000	204.30
9	379.22	20.88E-04	90.00	181.6E+3	0.0000	181.60
10	380.08	18.78E-04	90.00	202.4E+3	0.0000	202.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 50Hz						
Turn to turn บนหลังการทดลองครั้งที่ 2						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	Xc(K $\Omega$ )
1	120.09	51.50E-06	84.60	2.3E+6	219.4423	2321.46
2	123.37	36.60E-06	84.60	3.4E+6	317.2006	3355.63
3	120.23	38.43E-06	83.34	3.1E+6	362.7887	3106.99
4	120.00	80.00E-06	0.00	1.5E+6	1500.0000	0.00
5	121.74	58.64E-06	83.70	2.1E+6	227.8022	2063.41
6	119.52	49.96E-06	82.80	2.4E+6	299.8146	2373.28
7	122.34	52.25E-06	83.34	2.3E+6	271.5595	2325.69
8	121.20	63.73E-06	86.40	1.9E+6	119.4133	1898.02
9	119.68	35.86E-06	84.96	3.3E+6	293.2040	3324.60
10	119.57	55.52E-06	82.98	2.2E+6	263.1951	2137.38

ความถี่ 500Hz						
Turn to turn บนหลังการทดลองครั้งที่ 2						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	Xc(K $\Omega$ )
1	119.92	05.07E-04	89.28	236.4E+3	2.9703	236.36
2	119.22	03.48E-04	89.10	342.1E+3	5.3738	342.08
3	120.44	03.65E-04	88.92	329.7E+3	6.2148	329.66
4	0.00	80.00E-06	0.00	000.0E+0	0.0000	0.00
5	120.08	05.63E-04	89.28	213.2E+3	2.6786	213.14
6	120.07	04.51E-04	89.28	266.2E+3	3.3457	266.22
7	121.30	04.80E-04	89.82	252.8E+3	0.7941	252.77
8	121.16	05.96E-04	90.00	203.1E+3	0.0000	203.14
9	121.54	03.49E-04	89.64	348.2E+3	2.1880	348.23
10	120.04	05.13E-04	90.00	233.8E+3	0.0000	233.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 1kHz						
Turn to turn บนหลังการทดลองครั้งที่ 2						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	jXc(K $\Omega$ )
1	121.68	09.80E-04	89.28	124.1E+3	1.5601	124.14
2	121.44	06.86E-04	88.20	177.0E+3	5.5611	176.96
3	121.25	07.28E-04	88.56	166.5E+3	4.1842	166.45
4	-	-	-	-	-	-
5	119.31	10.91E-04	88.92	109.4E+3	2.0620	109.38
6	121.07	08.61E-04	89.64	140.6E+3	0.8831	140.55
7	120.09	09.29E-04	89.28	129.3E+3	1.6243	129.25
8	120.88	11.33E-04	88.92	106.7E+3	2.0103	106.64
9	121.54	06.78E-04	89.64	179.1E+3	1.1256	179.13
10	121.45	10.15E-04	88.56	119.7E+3	3.0076	119.64

ความถี่ 10kHz						
Turn to turn บนหลังการทดลองครั้งที่ 2						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	jXc(K $\Omega$ )
1	121.528	10000.0E-6	89.64	12.2E+3	0.0764	12.15
2	120.839	6970.0E-6	90	17.3E+3	0.0000	17.34
3	119.625	7259.8E-6	89.64	16.5E+3	0.1035	16.48
4	-	-	-	-	-	-
5	120.477	11075.0E-6	89.28	10.9E+3	0.1367	10.88
6	119.357	8910.0E-6	89.64	13.4E+3	0.0842	13.40
7	119.323	9394.7E-6	89.64	12.7E+3	0.0798	12.70
8	120.807	11538.0E-6	90	10.5E+3	0.0000	10.47
9	120.083	6845.7E-6	89.64	17.5E+3	0.1102	17.54
10	120.943	10201.4E-6	89.64	11.9E+3	0.0745	11.86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 50Hz						
Turn to turn ล้างล้างการทดลองครั้งที่ 2						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	jXc(K $\Omega$ )
1	119.40	45.69E-06	83.52	2.6E+6	294.9267	2596.60
2	119.55	52.92E-06	84.06	2.3E+6	233.7761	2246.86
3	119.02	45.90E-06	82.98	2.6E+6	316.8726	2573.29
4	121.78	58.59E-06	84.06	2.1E+6	215.1159	2067.52
5	119.24	62.37E-06	84.60	1.9E+6	179.9092	1903.24
6	120.88	79.49E-06	83.70	1.5E+6	166.8822	1511.60
7	118.45	55.39E-06	84.60	2.1E+6	201.2501	2129.00
8	119.50	68.14E-06	85.14	1.8E+6	148.5716	1747.35
9	119.59	53.49E-06	87.12	2.2E+6	112.3386	2233.02
10	119.79	55.46E-06	83.88	2.2E+6	230.2939	2147.82

ความถี่ 500Hz						
Turn to turn ล้างล้างการทดลองครั้งที่ 2						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	jXc(K $\Omega$ )
1	119.51	04.34E-04	88.38	275.6E+3	7.7925	275.53
2	119.72	05.18E-04	89.10	231.0E+3	3.6282	230.96
3	119.76	04.53E-04	89.82	264.3E+3	0.8302	264.26
4	120.64	04.51E-04	89.28	267.6E+3	3.3631	267.62
5	121.28	04.85E-04	89.64	249.8E+3	1.5697	249.83
6	118.94	05.65E-04	89.64	210.7E+3	1.3237	210.66
7	120.44	05.31E-04	89.10	226.6E+3	3.5593	226.57
8	120.55	06.49E-04	89.28	185.7E+3	2.3338	185.71
9	121.36	04.82E-04	88.74	251.9E+3	5.5400	251.88
10	121.53	05.26E-04	89.64	230.9E+3	1.4508	230.91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 1kHz						
Turn to turn ล้างล้างการทดลองครั้งที่ 2						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	JXc(K $\Omega$ )
1	119.73	08.54E-04	89.28	140.3E+3	1.7627	140.27
2	120.37	10.17E-04	88.92	118.4E+3	2.2316	118.38
3	121.25	07.28E-04	88.20	166.4E+3	5.2282	166.36
4	121.19	10.85E-04	88.92	111.7E+3	2.1044	111.63
5	121.02	09.63E-04	88.92	125.6E+3	2.3677	125.60
6	120.90	11.04E-04	89.28	109.5E+3	1.3761	109.50
7	120.44	09.28E-04	89.64	129.8E+3	0.8157	129.82
8	119.94	11.14E-04	88.92	107.7E+3	2.0298	107.67
9	119.40	09.11E-04	88.56	131.0E+3	3.2926	130.98
10	121.83	09.91E-04	88.92	122.9E+3	2.3165	122.88

ความถี่ 10kHz						
Turn to turn ล้างล้างการทดลองครั้งที่ 2						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	JXc(K $\Omega$ )
1	121.077	85.94E-04	88.92	14.1E+3	0.2656	14.09
2	121.643	01.04E-02	88.92	11.7E+3	0.2213	11.74
3	121.045	89.97E-04	88.92	13.5E+3	0.2536	13.45
4	119.347	01.09E-02	89.28	10.9E+3	0.1370	10.90
5	121.058	96.10E-04	88.92	12.6E+3	0.2374	12.59
6	119.487	01.11E-02	89.28	10.8E+3	0.1354	10.78
7	120.898	01.05E-02	89.28	11.5E+3	0.1445	11.50
8	121.027	01.27E-02	88.92	9.5E+3	0.1790	9.50
9	119.938	93.08E-04	89.28	12.9E+3	0.1619	12.88
10	119.251	99.85E-04	89.64	11.9E+3	0.0750	11.94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 50 Hz						
coil to coil หลังการทดลองครั้งที่ 2						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	jXc(K $\Omega$ )
1	379.924	6.59E-06	84.6	57.7E+6	5425.4942	57395.73
2	381.853	5.53E-06	86.04	69.1E+6	4769.5384	68898.78
3	380.427	5.70E-06	86.4	66.7E+6	4190.7384	66609.88
4	381.506	6.66E-06	85.5	57.3E+6	4494.3868	57106.60
5	380.363	5.75E-06	87.3	66.2E+6	3116.0958	66076.65
6	381.069	4.19E-06	86.76	90.9E+6	5140.2056	90801.88
7	381.204	5.14E-06	88.02	74.2E+6	2562.4208	74119.92
8	381.128	5.89E-06	88.2	64.7E+6	2032.5161	64675.71
9	381.742	6.69E-06	88.2	57.1E+6	1792.3477	57033.43
10	380.159	5.36E-06	85.32	70.9E+6	5786.8293	70688.72

ความถี่ 500 Hz						
coil to coil หลังการทดลองครั้งที่ 2						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(M $\Omega$ )	jXc(M $\Omega$ )
1	380.354	64.08E-06	86.4	5.9E+6	372.6955	5923.83
2	378.4	57.00E-06	86.4	6.6E+6	416.8409	6625.50
3	381.17	59.89E-06	87.48	6.4E+6	279.8352	6358.35
4	381.677	67.43E-06	88.02	5.7E+6	195.5685	5656.96
5	378.558	56.23E-06	89.28	6.7E+6	84.5925	6731.30
6	381.128	45.85E-06	89.64	8.3E+6	52.2241	8311.61
7	378.403	52.48E-06	89.64	7.2E+6	45.3041	7210.28
8	379.37	57.06E-06	89.1	6.6E+6	104.4283	6647.56
9	382.772	64.05E-06	89.64	6.0E+6	37.5490	5976.03
10	380.33	53.03E-06	89.82	7.2E+6	22.5322	7172.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 1kHz						
coil to coil หลังการทดลองครั้งที่ 2						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	JXc(K $\Omega$ )
1	379.113	132.7E-6	88.56	2.9E+6	71.8098	2856.62
2	379.759	121.1E-6	87.84	3.1E+6	118.1829	3133.41
3	379.325	122.4E-6	87.84	3.1E+6	116.8132	3097.10
4	380.352	137.3E-6	88.2	2.8E+6	87.0187	2768.98
5	379.35	122.7E-6	89.28	3.1E+6	38.8435	3090.90
6	379.595	90.8E-6	87.84	4.2E+6	157.6035	4178.58
7	379.33	110.4E-6	90	3.4E+6	0.0000	3436.12
8	381.824	120.9E-6	88.56	3.2E+6	79.3335	3155.92
9	380.148	130.4E-6	89.28	2.9E+6	36.6219	2914.12
10	381.205	113.2E-6	88.92	3.4E+6	63.4680	3366.68

ความถี่ 10kHz						
coil to coil หลังการทดลองครั้งที่ 2						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(M $\Omega$ )	JXc(M $\Omega$ )
1	380.437	1373.5E-6	89.28	277.0E+3	3.4807	276.97
2	379.066	1202.4E-6	90	315.3E+3	0.0000	315.27
3	379.323	1207.4E-6	90	314.2E+3	0.0000	314.16
4	381.13	1353.4E-6	90	281.6E+3	0.0000	281.60
5	381.577	1296.8E-6	90	294.3E+3	0.0000	294.26
6	379.093	0962.4E-6	90	393.9E+3	0.0000	393.92
7	381.178	1173.3E-6	90	324.9E+3	0.0000	324.89
8	379.267	1221.2E-6	89.64	310.6E+3	1.9513	310.56
9	381.998	1357.6E-6	90	281.4E+3	0.0000	281.38
10	380	1152.2E-6	89.64	329.8E+3	2.0723	329.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 50Hz						
coll to Groundหลังการทดลองครั้งที่ 2						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	Xc(K $\Omega$ )
1	381.126	10.29E-06	84.6	37.0E+6	3485.6293	36874.11
2	381.876	09.09E-06	85.5	42.0E+6	3296.1106	41881.06
3	380.356	09.67E-06	85.86	39.3E+6	2839.6416	39230.97
4	380.706	08.93E-06	84.06	42.6E+6	4412.3755	42408.10
5	381.299	09.66E-06	86.22	39.5E+6	2602.2117	39386.08
6	381.228	09.47E-06	86.4	40.3E+6	2527.7196	40176.95
7	381.633	09.59E-06	86.22	39.8E+6	2623.5020	39708.32
8	381.532	08.30E-06	86.4	46.0E+6	2886.3364	45877.00
9	381.642	09.85E-06	86.94	38.7E+6	2068.2939	38690.14
10	381.766	08.66E-06	85.14	44.1E+6	3734.8407	43925.34

ความถี่ 500 Hz						
coll to Groundหลังการทดลองครั้งที่ 2						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	Xc(K $\Omega$ )
1	380.90	01.09E-04	87.30	3.5E+6	164.4775	3487.74
2	378.65	97.54E-06	86.76	3.9E+6	219.4093	3875.87
3	380.05	01.01E-04	88.02	3.8E+6	130.4565	3773.55
4	381.49	93.31E-06	87.66	4.1E+6	166.9345	4085.18
5	379.25	99.97E-06	88.56	3.8E+6	95.3345	3792.44
6	378.10	87.41E-06	86.40	4.3E+6	271.5937	4316.86
7	379.68	99.80E-06	88.56	3.8E+6	95.6052	3803.21
8	379.52	87.49E-06	88.20	4.3E+6	136.2619	4335.92
9	382.61	99.21E-06	89.64	3.9E+6	24.2323	3856.65
10	382.61	90.09E-06	88.20	4.2E+6	133.4023	4244.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 1kHz						
coil to Groundหลังการทดลองครั้งที่ 2						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	Xc(K $\Omega$ )
1	380.48	02.28E-04	86.40	1.7E+6	104.9932	1668.82
2	380.32	02.04E-04	85.68	1.9E+6	140.3120	1857.42
3	381.34	02.11E-04	87.48	1.8E+6	79.3699	1803.42
4	379.27	01.90E-04	88.20	2.0E+6	62.6092	1992.26
5	379.58	02.09E-04	88.20	1.8E+6	57.0021	1813.83
6	380.92	01.82E-04	87.48	2.1E+6	91.8510	2087.02
7	379.89	02.09E-04	87.12	1.8E+6	91.3540	1815.90
8	380.44	01.81E-04	87.12	2.1E+6	105.6465	2100.00
9	379.86	02.05E-04	89.28	1.9E+6	23.2648	1851.25
10	380.11	01.88E-04	88.56	2.0E+6	50.9062	2025.07

ความถี่ 10kHz						
coil to Groundหลังการทดลองครั้งที่ 2						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	Xc(K $\Omega$ )
1	381.32	19.80E-04	8.96	192.6E+3	190.2188	30.01
2	381.28	19.70E-04	8.96	193.6E+3	191.2070	30.16
3	380.10	20.16E-04	8.89	188.6E+3	186.3122	29.15
4	379.02	18.15E-04	9.00	208.9E+3	206.3027	32.68
5	381.63	21.00E-04	8.93	181.8E+3	179.5617	28.21
6	381.86	18.06E-04	8.93	211.5E+3	208.9200	32.82
7	379.23	20.70E-04	8.96	183.2E+3	180.9250	28.54
8	379.36	18.00E-04	9.00	210.8E+3	208.1660	32.97
9	379.99	20.83E-04	9.00	182.5E+3	180.2121	28.54
10	381.25	18.68E-04	8.89	204.1E+3	201.6181	31.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 50Hz						
Turn to turn บนหลังการทดลองครั้งที่ 3						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	Xc(K $\Omega$ )
1	120.28	54.06E-06	84.60	2.2E+6	209.3768	2214.97
2	120.22	38.39E-06	84.06	3.1E+6	324.1148	3115.12
3	120.47	39.35E-06	82.62	3.1E+6	393.2415	3036.09
4	-	-	-	-	-	-
5	120.80	61.00E-06	82.80	2.0E+6	248.1838	1964.58
6	120.06	49.02E-06	84.78	2.4E+6	222.8133	2438.87
7	119.79	51.46E-06	85.14	2.3E+6	197.1931	2319.18
8	720.80	64.22E-06	84.24	11.2E+6	1126.4220	11166.95
9	120.00	80.00E-06	0.00	1.5E+6	1500.0000	0.00
10	120.54	53.86E-06	82.80	2.2E+6	280.4947	2220.34

ความถี่ 500Hz						
Turn to turn ล่างหลังการทดลองครั้งที่ 3						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	Xc(K $\Omega$ )
1	119.04	05.10E-04	88.20	233.3E+3	7.3280	233.18
2	121.61	03.70E-04	88.92	328.8E+3	6.1974	328.74
3	120.35	03.78E-04	88.20	318.1E+3	9.9931	317.98
4	-	-	-	-	-	-
5	120.29	05.78E-04	88.56	208.1E+3	5.2293	208.02
6	119.89	04.68E-04	87.48	256.0E+3	11.2562	255.76
7	120.07	04.88E-04	88.56	245.9E+3	6.1793	245.82
8	119.59	05.98E-04	89.10	200.0E+3	3.1419	200.00
9	-	-	-	-	-	-
10	120.07	05.38E-04	88.20	223.2E+3	7.0123	223.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 1kHz						
Turn to turn ล้างล้างการทดลองครั้งที่ 3						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	jXc(K $\Omega$ )
1	120.21	44.77E-04	89.64	26.9E+3	0.1687	26.85
2	119.10	52.26E-04	89.28	22.8E+3	0.2864	22.79
3	118.82	45.52E-04	88.20	26.1E+3	0.8199	26.09
4	-	-	-	-	-	-
5	120.30	56.58E-04	88.56	21.3E+3	0.5343	21.25
6	120.53	57.94E-04	88.92	20.8E+3	0.3921	20.80
7	121.19	54.38E-04	89.64	22.3E+3	0.1400	22.28
8	121.02	66.10E-04	90.00	18.3E+3	0.0000	18.31
9	-	-	-	-	-	-
10	120.79	53.03E-04	89.64	22.8E+3	0.1431	22.78

ความถี่ 10kHz						
Turn to turn ล้างล้างการทดลองครั้งที่ 3						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	jXc(K $\Omega$ )
1	119.21	17.27E-04	89.28	69.0E+3	0.8675	69.03
2	120.168	20.85E-04	90	57.6E+3	0.0000	57.63
3	120.428	18.07E-04	89.28	66.6E+3	0.8374	66.63
4	-	-	-	-	-	-
5	120.004	14.79E-04	90	81.1E+3	0.0000	81.15
6	121.29	19.16E-04	89.64	63.3E+3	0.3979	63.32
7	119.971	21.09E-04	89.64	56.9E+3	0.3574	56.88
8	120.632	25.50E-04	90	47.3E+3	0.0000	47.31
9	-	-	-	-	-	-
10	120.413	20.79E-04	89.64	57.9E+3	0.3639	57.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 50 Hz						
coil to coil หลังการทดลองครั้งที่ 3						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	jXc(K $\Omega$ )
1	380.947	6.83E-06	87.3	55.8E+6	2628.7275	55742.03
2	380.821	5.56E-06	88.2	68.5E+6	2152.1095	68481.24
3	381.265	5.41E-06	89.1	70.5E+6	1106.7160	70449.93
4	381.9	6.43E-06	88.38	59.4E+6	1679.8551	59396.89
5	381.691	5.60E-06	82.8	68.2E+6	8547.6841	67661.89
6	379.881	5.60E-06	82.8	67.9E+6	8503.9141	67315.41
7	379.193	4.79E-06	88.02	79.2E+6	2736.6454	79159.50
8	381.069	5.47E-06	85.5	69.6E+6	5463.8160	69424.37
9	380.204	6.83E-06	87.12	55.6E+6	2795.8497	55574.81
10	380.361	5.02E-06	89.1	75.7E+6	1189.4520	75716.64

ความถี่ 500 Hz						
coil to coil หลังการทดลองครั้งที่ 3						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(M $\Omega$ )	jXc(M $\Omega$ )
1	379.289	65.31E-06	89.46	5.8E+6	54.7338	5807.26
2	379.208	59.37E-06	89.28	6.4E+6	80.2591	6386.48
3	380.441	61.59E-06	88.56	6.2E+6	155.2393	6175.47
4	380.757	69.78E-06	88.74	5.5E+6	119.9858	5455.22
5	379.985	67.55E-06	87.66	5.6E+6	229.6634	5620.27
6	381.035	46.57E-06	87.84	8.2E+6	308.3619	8175.68
7	379.938	55.28E-06	89.1	6.9E+6	107.9548	6872.05
8	379.248	61.83E-06	88.2	6.1E+6	192.6630	6130.64
9	380.033	65.68E-06	89.64	5.8E+6	36.3541	5785.87
10	381.696	57.69E-06	89.82	6.6E+6	20.7866	6616.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 1kHz						
coil to coil หลังการทดลองครั้งที่ 3						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	IXc(K $\Omega$ )
1	379.955	134.2E-6	88.92	2.8E+6	53.3585	2830.42
2	380.524	118.5E-6	89.28	3.2E+6	40.3585	3211.46
3	379.733	122.2E-6	87.12	3.1E+6	156.1762	3104.41
4	382.257	138.5E-6	86.76	2.8E+6	156.0237	2756.16
5	382.426	119.1E-6	88.2	3.2E+6	100.8250	3208.30
6	380.636	93.1E-6	89.64	4.1E+6	25.7022	4090.58
7	382.814	117.7E-6	88.92	3.3E+6	61.3246	3252.98
8	380.824	121.4E-6	89.64	3.1E+6	19.7179	3138.17
9	379.046	130.4E-6	89.28	2.9E+6	36.5409	2907.68
10	379.326	114.6E-6	89.64	3.3E+6	20.7990	3310.22

ความถี่ 10kHz						
coil to coil หลังการทดลองครั้งที่ 3						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(M $\Omega$ )	IXc(M $\Omega$ )
1	381.578	1372.1E-6	89.64	278.1E+3	1.7473	278.09
2	381.97	0992.1E-6	90	385.0E+3	0.0000	385.00
3	382.072	1305.3E-6	90	292.7E+3	0.0000	292.71
4	380.74	1343.9E-6	90	283.3E+3	0.0000	283.31
5	382.589	1254.8E-6	90	304.9E+3	0.0000	304.91
6	378.182	0924.4E-6	90	409.1E+3	0.0000	409.12
7	379.255	1130.1E-6	90	335.6E+3	0.0000	335.58
8	381.762	1256.8E-6	90	303.8E+3	0.0000	303.76
9	381.419	1330.9E-6	90	286.6E+3	0.0000	286.59
10	380.143	1145.2E-6	90	332.0E+3	0.0000	331.95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 50Hz						
coil to Groundหลังการทดลองครั้งที่ 3						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	IXc(K $\Omega$ )
1	381.342	09.18E-06	89.1	41.5E+6	652.5769	41540.92
2	381.991	08.84E-06	88.2	43.2E+6	1357.8207	43206.56
3	379.481	08.51E-06	89.1	44.6E+6	700.7006	44604.31
4	381.394	08.85E-06	88.92	43.1E+6	812.6689	43108.32
5	381.048	09.02E-06	88.74	42.2E+6	928.7749	42227.22
6	379.181	09.60E-06	89.1	39.5E+6	620.3065	39486.69
7	381.048	08.56E-06	88.2	44.5E+6	1398.2991	44494.60
8	381.997	07.68E-06	86.4	49.8E+6	3124.4679	49661.99
9	380.262	09.36E-06	87.3	40.6E+6	1913.4145	40573.86
10	379.919	08.08E-06	89.46	47.0E+6	443.1440	47017.65

ความถี่ 500 Hz						
coil to Groundหลังการทดลองครั้งที่ 3						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	IXc(K $\Omega$ )
1	379.96	01.08E-04	89.64	3.5E+6	22.0276	3505.75
2	379.18	01.03E-04	89.10	3.7E+6	57.6086	3667.18
3	381.14	01.02E-04	88.38	3.7E+6	105.1346	3717.39
4	380.03	65.68E-06	86.40	5.8E+6	363.3088	5774.63
5	380.55	01.05E-04	88.92	3.6E+6	68.5007	3633.64
6	380.53	89.73E-06	87.30	4.2E+6	199.7825	4236.38
7	381.06	99.96E-06	89.10	3.8E+6	59.8768	3811.56
8	379.82	89.31E-06	88.20	4.3E+6	133.5769	4250.48
9	379.03	01.04E-04	87.84	3.6E+6	137.3698	3642.12
10	380.78	97.15E-06	88.02	3.9E+6	135.4228	3917.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 1kHz						
coll to Groundหลังการทดลองครั้งที่ 3						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	Xc(K $\Omega$ )
1	379.22	02.17E-04	89.28	1.7E+6	21.9275	1744.84
2	379.14	01.96E-04	89.28	1.9E+6	24.2729	1931.47
3	380.31	02.01E-04	89.64	1.9E+6	11.8935	1892.89
4	380.97	01.85E-04	88.56	2.1E+6	51.8594	2062.99
5	383.41	02.09E-04	88.92	1.8E+6	34.5590	1833.19
6	383.52	01.74E-04	86.76	2.2E+6	124.7686	2204.04
7	379.87	01.94E-04	86.40	2.0E+6	123.1096	1956.77
8	379.40	01.75E-04	87.12	2.2E+6	108.8909	2164.49
9	381.12	02.06E-04	86.76	1.9E+6	104.7685	1850.74
10	381.16	01.88E-04	86.76	2.0E+6	114.7598	2027.24

ความถี่ 10kHz						
coll to Groundหลังการทดลองครั้งที่ 3						
Num.	V	I(A)	มุม	Z( $\Omega$ )	R(K $\Omega$ )	Xc(K $\Omega$ )
1	379.87	21.57E-04	9.00	176.1E+3	173.9356	27.55
2	382.73	19.33E-04	9.11	198.0E+3	195.4661	31.34
3	378.68	19.89E-04	8.93	190.4E+3	188.0699	29.55
4	378.56	18.74E-04	9.04	202.0E+3	199.4931	31.73
5	380.16	20.61E-04	9.14	184.5E+3	182.1175	29.31
6	380.80	17.22E-04	9.22	221.1E+3	218.2424	35.41
7	379.63	19.22E-04	9.22	197.5E+3	194.9528	31.63
8	379.74	17.29E-04	9.14	219.7E+3	216.8692	34.91
9	380.28	19.96E-04	9.22	190.5E+3	188.0245	30.51
10	378.17	18.33E-04	9.22	206.3E+3	203.5923	33.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำโครงการนุสึศึกษาซึ่งต่อความกรุณาที่ รศ. พิชิต ล้ายอง และ อาจารย์เปี่ยม ภูมิ สฤกพฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำแนะนำ ตลอดจนอาจารย์ในภาควิชาที่ประสิทธิ์ ประสาทความรู้ให้กับผู้จัดทำในครั้งนี้ ถ้าปราศจากท่านโครงการนี้ก็คงไม่สำเร็จลุล่วงไปได้

นอกจากนั้นผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องจักรกล ไฟฟ้าที่ให้เบิกใช้เครื่องมือ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเบิก งบประมาณของโครงการ และผู้จัดทำต้องขอขอบคุณเพื่อนร่วมห้องปฏิบัติการ(lab) ที่คอยเอาใจ ใส่อคอยตามไถ่ตลอดเวลา โดยเฉพาะอย่างยิ่ง

ท้ายที่สุดนี้ ผู้จัดทำต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยส่งเสียเงินทอง ให้ ผู้จัดทำเรียนหนังสือจนจบในครั้งนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้แต่ง



นาย อริชฐ์ สิงห์พันธ์ นักศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นาย อริชฐ์ จตุรวิวงศ์ นักศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นาย เอกสิทธิ์ เอี่ยมเรือง นักศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้