

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยแกน EI ที่เหมาะสม  
OPTIMAL DESIGN OF SMALL EI-CORE TRANSFORMER



โดย

นายกฤษณะ	วงศ์วิทิศ
นายวีรศักดิ์	สมสุข
นายวิชัยเพชร	จันทร์ลา

อาจารย์ที่ปรึกษา

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 36979  
วัน, เดือน, ปี..... 30 ส.ค. 2543

พศ.ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย  
อ.วีรศักดิ์ วงศ์วิวัฒน์

ปริญญาโทปีการศึกษา 2542


ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

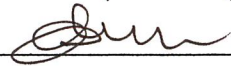
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยแกน EI ที่เหมาะสม

ผู้จัดทำ

1. นายกฤษณะ วงศ์วิฑิต
2. นายธีรศักดิ์ สมสุข
3. นายวิชัยเพชร จันทร์ลา

  
\_\_\_\_\_  
(ผศ.ดร.ชัยวุฒิ นิตโรทัย) อาจารย์ที่ปรึกษา

  
\_\_\_\_\_  
(อ.วีรศักดิ์ วงศ์วิวัฒน์) อาจารย์ที่ปรึกษา

## การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยแกน EI ที่เหมาะสม

นายกฤษณะ วงศ์วิทิต

นายธีรศักดิ์ สมสุข

นายวิชัยเพชร จันทร์ลา

ผศ.ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์วีรศักดิ์ วงศ์วิวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2542

### บทคัดย่อ

โครงการฉบับนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยเทคนิคการทำให้เหมาะสม โดยเน้นที่วัตถุประสงค์ของการออกแบบคือ ออกแบบให้น้ำหนักรวมของหม้อแปลงน้อย หรือออกแบบให้ราคารวมของหม้อแปลงต่ำ หรือออกแบบให้การการสูญเสียทางไฟฟ้าของหม้อแปลงน้อย หรือออกแบบให้น้ำหนักและความสูญเสียทางไฟฟ้าน้อย เพื่อให้ได้หม้อแปลงไฟฟ้าถูกต้องตามวัตถุประสงค์และมีคุณสมบัติตามการออกแบบ โปรแกรมการออกแบบนำเอาเทคนิคการทำให้เหมาะสมโดยใช้หลักการคณิตศาสตร์วิธีเชิงตัวเลขมาคำนวณช่วยในการออกแบบ มีการสร้างต้นแบบและทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กที่ออกแบบโดยโปรแกรม ทำการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการทดสอบต้นแบบ การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่เหมาะสมโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มีความสะดวกและง่ายต่อการใช้งาน และสมารถแสดงผลเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของการออกแบบได้

## Optimal Design of Small EI-Core Transformer

Kritsana Wongvithit

Theerasak Somsuk

Wichaipet Junla

Asst.Prof Dr.Chaiwut Chat-uthai Advisor

Veerasak Wongviwat Advisor

1999

### Abstract

This project presents the design of small transformers using the optimization techniques. The objective is to design the total minimum weight or the total minimum cost or the total minimum loss or the total minimum weight and loss of transformers. The numerical technique is used in the design program. The prototype of small transformers obtained from the program are constructed and tested. The comparison and analysis of the prototypes are illustrated. The optimal design program of small transformers is convenient and easy to use and the changes of design parameters can be analysed.

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญ	III
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานของการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า	3
2.1 การสร้างสมการวัตถุประสงค์	4
2.1.1 น้ำหนักรวมมีค่าน้อย	4
2.1.2 ราคารวมมีค่าต่ำ	8
2.1.3 ความสูญเสียทางไฟฟ้าน้อย	8
2.1.4 น้ำหนักและความสูญเสียทางไฟฟ้าน้อย	8
2.2 การกำหนดสมการเงื่อนไข	10
บทที่ 3 ทฤษฎีที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมเพื่อออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า	10
3.1 ลำดับการทำออปติไมเซชันพื้นฐาน	12
บทที่ 4 วิเคราะห์การทำงานของโปรแกรม	13
4.1 การวิเคราะห์ของ 2E กับ D ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อ $A_C$ เท่ากัน	17
4.2 หลักการออกแบบจากโปรแกรม	18
4.2.1 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำหนักรวมน้อย	20
4.2.2 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบความสูญเสียทางไฟฟ้ารวมน้อย	21
4.2.3 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบราคารวมต่ำ	22
4.2.4 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำหนักและความสูญเสียทางไฟฟ้ารวมน้อย	24
4.3 วิเคราะห์ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก $B_{MAX}$	24
บทที่ 5 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า	32
5.1 การทดสอบทางจรเสมือนของหม้อแปลงไฟฟ้า	32
5.1.1 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเบ็ดดวงจร	32
5.1.2 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบลัดดวงจร	34

5.1.3 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ	35
5.2 เปรียบเทียบข้อมูลจากการออกแบบโดยโปรแกรมกับหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ	41
5.2.1 หม้อแปลงแบบน้ำหนัและการสูญเสียรวมน้อยพิกัด 250 VA , 220/110 โวลต์ , $B_{MAX} = 1.4$ เทสลา	41
5.2.1.1 เปรียบเทียบข้อมูลจากออปติไมซ์ กับการปรับขนาดแกนเหล็ก มาตรฐาน	41
5.2.1.2 เปรียบเทียบข้อมูลจากการปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐานกับ หม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ	43
5.2.2 หม้อแปลงแบบน้ำหนัและการสูญเสียรวมน้อยพิกัด 450 VA , 220/110 โวลต์ , $B_{MAX} = 0.8$ เทสลา	45
5.2.2.1 เปรียบเทียบข้อมูลจากออปติไมซ์ กับการปรับขนาดแกนเหล็ก มาตรฐาน	45
5.2.2.2 เปรียบเทียบข้อมูลจากการปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐานกับ หม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ	46
5.2.3 หม้อแปลงแบบน้ำหนัและการสูญเสียรวมน้อยพิกัด 450 VA , 220/110 โวลต์ $B_{MAX} = 1.0$ เทสลา	47
5.2.3.1 เปรียบเทียบข้อมูลจากออปติไมซ์ กับการปรับขนาดแกนเหล็ก มาตรฐาน	47
5.2.3.2 เปรียบเทียบข้อมูลจากการปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐานกับ หม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ	48
5.2.4 หม้อแปลงแบบน้ำหนัและการสูญเสียรวมน้อยพิกัด 450 VA , 220/110 โวลต์ , $B_{MAX} = 1.4$ เทสลา	50
5.2.4.1 เปรียบเทียบข้อมูลจากออปติไมซ์ กับการปรับขนาดแกนเหล็ก มาตรฐาน	50
5.2.4.2 เปรียบเทียบข้อมูลจากการปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐานกับ หม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ	50
5.2.5 หม้อแปลงแบบการสูญเสียรวมน้อยพิกัด 450 VA , 220/110 โวลต์ , $B_{MAX} = 1.4$ เทสลา	52
5.2.5.1 เปรียบเทียบข้อมูลจากออปติไมซ์ กับการปรับขนาดแกนเหล็ก มาตรฐาน	52

5.2.5.2	เปรียบเทียบข้อมูลจากการปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐานกับ หม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ	54
5.2.6	หม้อแปลงแบบน้ำหนักรวมน้อยพิกัด 450 VA , 220/110 โวลต์ , $B_{MAX} = 0.8$ เทสลา	54
5.2.6.1	เปรียบเทียบข้อมูลจากออปติไมซ์ กับการปรับขนาดแกนเหล็ก มาตรฐาน	54
5.2.6.2	เปรียบเทียบข้อมูลจากการปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐานกับ หม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ	55
5.3	การทดสอบจ่ายภาระของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ	57
5.4	การทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า	63
บทที่ 6	สรุปและวิจารณ์ผล	66
	ภาคผนวก ก.	
	ภาคผนวก ข.	
	ภาคผนวก ค.	
	กิตติกรรมประกาศ	
	เอกสารอ้างอิง	

## สารบัญรูป

	หน้า
รูป 2.1 รูปร่างลักษณะของแกน EI มาตรฐาน	3
รูป 2.2 ปริมาตรของแกนเหล็ก	5
รูป 2.3 ความยาวเฉลี่ยของลวดตัวนำ	6
รูป 3.1 Classification of the transformation methods	12
รูป 3.2 อัลกอริทึมของการ Optimization	14
รูป 3.3 Block Diagram ลำดับการทำงานของโปรแกรมการออกแบบหม้อแปลง	16
รูป 5.1 วงจรการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเปิดวงจร	32
รูป 5.2 วงจรสมมูลย์ที่ได้จากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเปิดวงจร	33
รูป 5.3 วงจรการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบลัดวงจร	34
รูป 5.4 วงจรสมมูลย์ที่ได้จากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเปิดวงจรและแบบลัดวงจร	35
รูป 5.5 วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงไฟฟ้า Muti Design 450 VA,220/110 โวลต์, $B_{MAX}=0.8$ เทสลา	36
รูป 5.6 วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงไฟฟ้า Muti Design 450 VA,220/110 โวลต์, $B_{MAX}=1.4$ เทสลา	38
รูป 5.7 วงจรการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบจ่ายภาระทางไฟฟ้า	57
รูป 5.8 กราฟการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิหม้อแปลงไฟฟ้า Min Loss 450 VA,220/110 โวลต์ $B_{MAX}= 1.4$ เทสลา	63
รูป 5.9 กราฟการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิหม้อแปลงไฟฟ้า Multi 450 VA,220/110 โวลต์ $B_{MAX}= 1.4$ เทสลา	64
รูป 5.10 เปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของหม้อแปลงแบบ Min loss 450VA และ Multi 450VA	65

## สารบัญญัตราสาร

	หน้า
ตาราง 4.1 แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลง 2E และ D ที่มีผลต่อ ความยาวรอบแกนกลาง ปริมาตร และ พื้นที่ช่องว่าง	18
ตาราง 4.2 เปรียบเทียบการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 4 แบบ โดยให้ ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 1 เทสลา พิกัด 250 VA	19
ตาราง 4.3 เปรียบเทียบการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 4 แบบ โดยให้ ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 1 เทสลา พิกัด 750 VA	20
ตาราง 4.4 เปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนราคาของการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Min Cost โดยให้ค่า $B_{MAX}=1$ เทสลา พิกัดกำลัง 400 VA	22
ตาราง 4.5 เปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนราคาของการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Min Cost โดยให้ค่า $B_{MAX}=1$ เทสลา พิกัดกำลัง 800 VA	23
ตาราง 4.6 ผลการเปลี่ยนแปลง $B_{MAX}$ ของหม้อแปลงแบบน้ำหนักเบา 400 VA 220/110 โวลต์	26
ตาราง 4.7 ผลการเปลี่ยนแปลง $B_{MAX}$ ของหม้อแปลงแบบราคาต่ำ 400 VA 220/110 โวลต์	26
ตาราง 4.8 ผลการเปลี่ยนแปลง $B_{MAX}$ ของหม้อแปลงแบบความสูญเสียทางไฟฟ้าน้อย 400 VA 220/110 โวลต์	27
ตาราง 4.9 ผลการเปลี่ยนแปลง $B_{MAX}$ ของหม้อแปลงแบบน้ำหนักและความสูญเสียทาง ไฟฟ้าน้อย 400 VA 220/110 โวลต์	28
ตาราง 5.1 ผลการทดสอบแบบเปิดวงจร และการทดสอบลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Multi Design พิกัด 450 VA, 220/110 โวลต์, $B_{MAX}=0.8$ เทสลา	35
ตาราง 5.2 ผลการทดสอบแบบเปิดวงจร และการทดสอบลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Multi Design พิกัด 450 VA, 220/110 โวลต์, $B_{MAX}=1$ เทสลา	37
ตาราง 5.3 ค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Multi Design พิกัด 450 VA, 220/110 โวลต์, $B_{MAX}=1$ เทสลา	37
ตาราง 5.4 ผลการทดสอบแบบเปิดวงจร และการทดสอบลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Multi Design พิกัด 450 VA, 220/110 โวลต์, $B_{MAX}=1.4$ เทสลา	38
ตาราง 5.5 ค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Multi Design พิกัด 450 VA, 220/110 โวลต์, $B_{MAX}=1.4$ เทสลา	38
ตาราง 5.6 ผลการทดสอบแบบเปิดวงจร และการทดสอบลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Multi Design พิกัด 250 VA, 220/110 โวลต์, $B_{MAX}=1.4$ เทสลา	39

ตาราง 5.7	ค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Multi Design พิกัด 250 VA, 220/110 โวลต์, $B_{MAX} = 1.4$ เทสลา	39
ตาราง 5.8	ผลการทดสอบแบบเปิดวงจร และการทดสอบลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Min Weight พิกัด 450 VA,220/110 โวลต์, $B_{MAX} = 1.4$ เทสลา	40
ตาราง 5.9	ค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Min Weight พิกัด 450 VA, 220/110 โวลต์, $B_{MAX} = 1.4$ เทสลา	40
ตาราง 5.10	ผลการทดสอบแบบเปิดวงจร และการทดสอบลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Min Loss พิกัด 450 VA,220/110 โวลต์, $B_{MAX} = 1.4$ เทสลา	40
ตาราง 5.11	ค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Min Loss พิกัด 450 VA, 220/110 โวลต์, $B_{MAX} = 1.4$ เทสลา	41
ตาราง 5.12	เปรียบเทียบข้อมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Multi Design พิกัด 250 VA, 220/110 โวลต์, $B_{MAX} = 1.4$ เทสลา	42
ตาราง 5.13	เปรียบเทียบข้อมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Multi Design พิกัด 450 VA, 220/110 โวลต์, $B_{MAX} = 0.8$ เทสลา	46
ตาราง 5.14	เปรียบเทียบข้อมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Multi Design พิกัด 450 VA, 220/110 โวลต์, $B_{MAX} = 1.0$ เทสลา	49
ตาราง 5.15	เปรียบเทียบข้อมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Multi Design พิกัด 450 VA, 220/110 โวลต์, $B_{MAX} = 1.4$ เทสลา	51
ตาราง 5.16	เปรียบเทียบข้อมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Min Loss พิกัด 450 VA, 220/110 โวลต์, $B_{MAX} = 1.4$ เทสลา	53
ตาราง 5.17	เปรียบเทียบข้อมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Min Weight พิกัด 450 VA, 220/110 โวลต์, $B_{MAX} = 1.4$ เทสลา	55
ตาราง 5.18	ผลการทดสอบจ่ายภาระไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Multi Design พิกัด 250 VA,220/110 โวลต์, $B_{MAX} = 1.4$ เทสลา	58
ตาราง 5.19	ผลการทดสอบจ่ายภาระไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Multi Design พิกัด 250 VA,220/110 โวลต์, $B_{MAX} = 1.4$ เทสลา	60
ตาราง 5.20	ผลการทดสอบจ่ายภาระไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Min Weight พิกัด 450 VA,220/110 โวลต์, $B_{MAX} = 1.4$ เทสลา	61

ตาราง 5.21	ผลการทดสอบจ่ายภาระไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Min Loss พิกัด 450 VA,220/110 โวลต์, $B_{MAX} = 1.4$ เทสลา	61
ตาราง 5.22	ผลการทดสอบจ่ายภาระไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Multi Design พิกัด 450 VA,220/110 โวลต์, $B_{MAX} = 0.8$ เทสลา	61
ตาราง 5.23	ผลการทดสอบจ่ายภาระไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Multi Design พิกัด 450 VA,220/110 โวลต์, $B_{MAX} = 1.0$ เทสลา	62
ตาราง 5.24	ผลการทดสอบจ่ายภาระไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Multi Design พิกัด 450 VA,220/110 โวลต์, $B_{MAX} = 1.4$ เทสลา	62

## บทที่ 1

### คำนำ

วัตถุประสงค์ของปริญญาานิพนธ์นี้ก็เพื่อศึกษาการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสมซึ่งโดยปกติทั่วไปการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าจะไม่ได้คำนึงถึงจุดที่เหมาะสมของวัตถุประสงค์ในการนำหม้อแปลงไฟฟ้านั้นไปใช้แต่อย่างใด เพียงแต่ออกแบบมาเพื่อให้ใช้งานได้ตามความต้องการเท่านั้น จึงได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ ราคาแพงและการสูญเสียค่อนข้างมากซึ่งในปริญญาานิพนธ์นี้จะเป็นการนำเสนอการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำให้เกิดจุดความเหมาะสมของวัตถุประสงค์ในการนำหม้อแปลงไฟฟ้านั้นไปใช้ โดยการนำหลักการของ Numerical Optimization techniques มาใช้ในการออกแบบ ซึ่งจะทำได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีลักษณะเด่นที่แตกต่างกัน 4 แบบคือ หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีน้ำหนักน้อย หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีราคาต่ำ หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการสูญเสียน้อย และ หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีน้ำหนักและการสูญเสียน้อย อีกทั้งในปริญญาานิพนธ์นี้ได้วิเคราะห์ผลของการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กว่ามีผลอย่างไรกับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้ออกแบบมาจากโปรแกรม และได้สร้างโปรแกรมให้สามารถออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าโดยสามารถเลือกค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เหมาะสมเพื่อให้ได้หม้อแปลงไฟฟ้าตรงตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการมากที่สุด และได้มีการสร้างและทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าตัวต้นแบบด้วย ซึ่งเนื้อหาของปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบไปด้วย

บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าและการกำหนดค่าต่างๆในการออกแบบ รวมไปถึงการสร้างสมการหลัก (Objective Function) และสมการเงื่อนไข (Constraint Function) ที่จะนำไปใช้เขียนโปรแกรม Optimization Technique ที่นำมาใช้ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

บทที่ 3 เป็นการกล่าวถึงทฤษฎี Numerical Optimization Technique ซึ่งเป็นทฤษฎีที่นำมาใช้เพื่อคำนวณหาค่าที่เหมาะสม

บทที่ 4 เป็นการวิเคราะห์ผลของขนาดแกนกลางกับค่าของความหนาแน่นแม่เหล็กที่เปลี่ยนไปเมื่อพื้นที่หน้าตัดมีขนาดเท่ากัน การวิเคราะห์หลักการออกแบบของโปรแกรมในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละชนิดและการวิเคราะห์ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

บทที่ 5 เป็นการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าตัวต้นแบบ วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากโปรแกรมและจากการคำนวณว่าเป็นอย่างไร โดยจะแสดงให้เห็นถึงผล

ที่ได้จากการออกแบบจากโปรแกรมว่าสามารถนำไปสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าได้จริงและผลที่ได้มีความสอดคล้องกับทฤษฎี

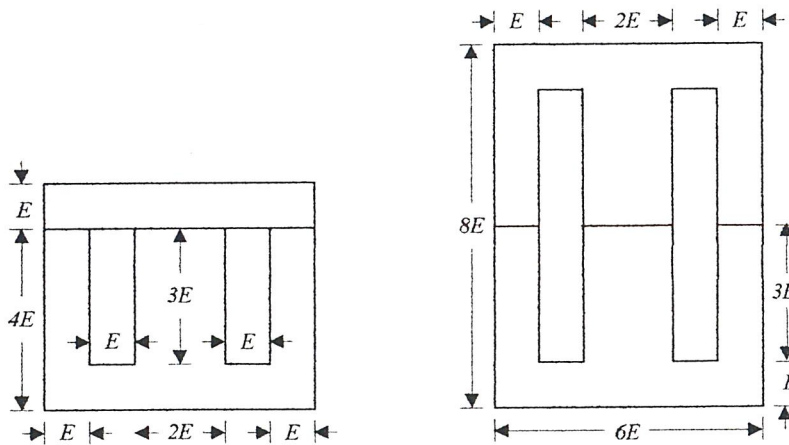
บทที่ 6 เป็นการสรุปและวิจารณ์ผลโดยรวมของโครงการนี้ ที่ได้จากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรมและจากการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ ซึ่งจะได้เห็นว่าหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบนั้นมีคุณลักษณะสมบัติต่างๆ ตรงกับที่โปรแกรมได้ออกแบบไว้หรือใกล้เคียงกันมาก

## บทที่ 2

## ทฤษฎีพื้นฐานของการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและปรับขนาดแรงดันไฟฟ้าหรือคงที่แรงดันไฟฟ้าเพื่อแยกกราวด์ของวงจร(Ground Isolated)ออกจากกัน ดังนั้นในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าตัวหนึ่งผู้ออกแบบจำเป็นต้องทราบขนาดพิกัดใช้งานต่างๆ คือขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าและขนาดพิกัดของแรงดันไฟฟ้าทั้งด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า รวมทั้งต้องออกแบบขีดจำกัดของการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วย ส่วนประกอบและหลักการการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กสามารถศึกษาได้จากหนังสือหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไป [1,2,3]

หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กซึ่งจะนำมาใช้ในการออกแบบเป็นชนิด Shell type เพราะจะได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กกว่าชนิด Core type โดยใช้แกนเหล็กแบบ EI และเป็นแกนเหล็กชนิดที่ผลิตขายตามท้องตลาด ด้วยเหตุผลทางการค้าจึงทำให้มีขนาดที่เป็นมาตรฐานและมีความสัมพันธ์ของขนาดความกว้างของแกนกลาง ( $2E$ ) กับส่วนต่างๆ ดังแสดงใน รูปที่ 2.1



รูป 2.1 รูปร่างลักษณะของแกน EI มาตรฐาน

## การกำหนดคุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้า

ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าจำเป็นต้องกำหนดคุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้า (Specification) ที่ต้องการออกแบบก่อนเพื่อนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานในการคำนวณ

- คุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าด้านการใช้งาน ที่จำเป็นต้องทราบมีดังต่อไปนี้
  1. พิกัดกำลังไฟฟ้า ( VA : VoltAmp )
  2. แรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ (  $V_p$  : volt )
  3. แรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ (  $V_s$  : volt )
  4. ความถี่ใช้งาน ( f : Hz )
  5. พิกัดการเพิ่มของอุณหภูมิ (  $T_{rise}$  :  $^{\circ}C$  )
  
- กำหนดชนิดของแกนเหล็กและลักษณะของลวดตัวนำ
  1. แกนเหล็กใช้แกนแบบ EI ขนาดตามมาตรฐาน ข้อมูลที่ควรทราบคือ ความหนาของแผ่นเหล็ก ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนัก(Watt/kg) ราคาต่อกิโลกรัม และคุณลักษณะของแกนเหล็กหรือ B-H Curve (แสดงในภาคผนวก ก.2) เพื่อจะทราบถึงช่วงการทำงานที่เหมาะสมของแกนเหล็ก [4]
  2. ลวดตัวนำใช้ลวดทองแดงแบบกลม หุ้มฉนวนชั้นเดียว ข้อมูลที่ควรทราบคือขนาดของพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำตามมาตรฐาน ความต้านทานจำเพาะและราคาต่อกิโลกรัม
  3. กระจวย (Bobbin) ระบุชนิดและความหนาของวัสดุที่เลือกใช้

### การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าโดย Numerical Optimization Technique

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าโดยวิธีนี้ ผู้ออกแบบจะต้องกำหนดเป้าหมายหรือวัตถุประสงค์ ในการออกแบบว่าต้องการหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีลักษณะและคุณสมบัติอย่างไร ซึ่งในโครงการนี้จะกำหนดให้มี 4 ลักษณะดังนี้

1. การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีน้ำหนักรวมน้อย (Minimum Weight Design)
2. การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีราคารวมต่ำ (Minimum Cost Design)
3. การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีความสูญเสียทางไฟฟ้าน้อย (Minimum Loss Design)
4. หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีน้ำหนักและการสูญเสียทางไฟฟ้าน้อย (Multi Design)

เมื่อกำหนดเป้าหมายที่ต้องการแล้ว ผู้ออกแบบจะต้องสร้างสมการเป้าหมาย(Objective Function) ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

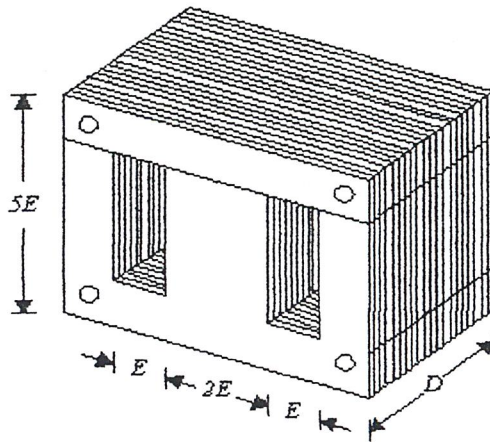
## 2.1 การสร้างสมการวัตถุประสงค์

### 2.1.1 น้ำหนักรวมนี้น้อย

น้ำหนักรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าจะคือน้ำหนักของวัสดุที่มีผลกระทบต่อตัวหม้อแปลงไฟฟ้ามากที่สุด คือน้ำหนักของลวดตัวนำรวมกับน้ำหนักของแกนเหล็ก ดังนั้นจึงต้องทำให้น้ำหนักรวมนี้น้อยที่สุด คือน้ำหนักของลวดตัวนำรวมกับน้ำหนักของแกนเหล็กแล้วมีค่านี้น้อยที่สุด

- สมการน้ำหนักของแกนเหล็ก

น้ำหนักของแกนเหล็กสามารถกำหนดได้จากปริมาตรของแกนเหล็กและค่าความหนาแน่นของแกนเหล็กซึ่งปริมาตรของแกนเหล็กสามารถพิจารณาได้จาก รูปที่ 2.2



รูป 2.2 ปริมาตรของแกนเหล็ก

และปริมาณทั้งสองนี้สามารถกำหนดเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{ปริมาตรของแกนเหล็ก } V_{CORE} = (5E)(6E)(D) - 2(3E)(E)(D) \quad (2-1)$$

$$= 30DE^2 - 6DE^2$$

$$= 24DE^2 \quad (2-2)$$

$$\text{น้ำหนักของแกนเหล็ก } W_{CORE} = (sf)\rho_{CORE}V_{CORE} \quad (2-3)$$

เมื่อ  $sf$  : Stacking Factor

$\rho_{CORE}$  : ความหนาแน่นของแกนเหล็ก ( $\text{kg/m}^3$ )

$V_{CORE}$  : ปริมาตรของแกนเหล็ก ( $\text{m}^3$ )

ดังนั้นหากเขียนสมการน้ำหนักของแกนเหล็กในฟังก์ชันของตัวแปร  $E$  และ  $D$  จะได้

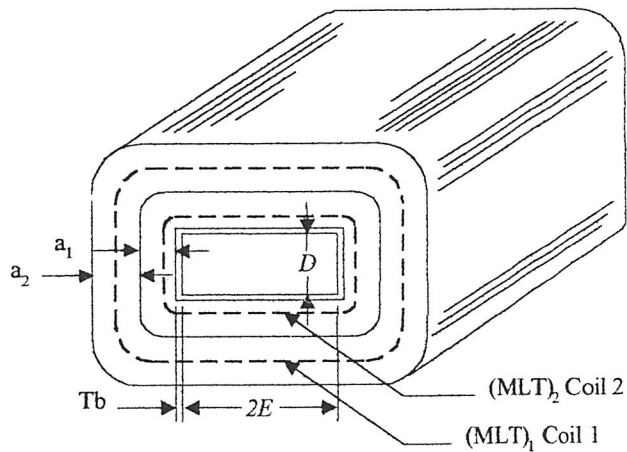
$$W_{core}(D, E) = (s.f.)\rho_{core} 24DE^2 \quad (2-4)$$

ตาราง 1.1 แสดงค่า Stacking factor ที่สัมพันธ์กับความหนาของแกนเหล็ก EI

Lamination Thickness (mm)	Stacking Factor
0.0127	0.50
0.0254	0.75
0.0508	0.85
0.1-0.25	0.90
0.27-0.36	0.95

- สมการน้ำหนักของลวดตัวนำ

ก่อนที่ผู้ออกแบบจะพิจารณาถึงน้ำหนักของลวดตัวนำควรพิจารณาความยาวเฉลี่ยต่อรอบของลวดตัวนำ (Mean turn length, MLT) ก่อน [5] เพื่อที่จะได้ทราบความยาวทั้งหมดของลวดตัวนำและทำให้ทราบน้ำหนักของลวดตัวนำได้ พิจารณา รูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ความยาวเฉลี่ยของลวดตัวนำ

จากรูป

$$MLTV_p = 2(2E + 2T_b) + 2(D + 2T_b) + \pi a_1 \quad (2-5)$$

$$MLTV_s = 2(2E + 2T_b) + 2(D + 2T_b) + \pi(2a_1 + a_2) \quad (2-6)$$

หรือ  $MLTV_s = MLTV_p + (a_1 + a_2 + 2c) \quad (2-7)$

เมื่อ  $MLTV_p$  : ความยาวเฉลี่ยต่อรอบของลวดตัวนำด้านปฐมภูมิ

$MLTV_s$  : ความยาวเฉลี่ยต่อรอบของลวดตัวนำด้านทุติยภูมิ

$T_b$  : ความหนาของกระสวย (Bobbin)

$a_1$  : ความหนาของลวดตัวนำด้านปฐมภูมิซึ่งกำหนดจาก

$$a_1 = \frac{(AWV_p \times NV_p)}{3E \times F_w}$$

$a_2$  : ความหนาของลวดตัวนำด้านทุติยภูมิซึ่งกำหนดจาก

$$a_2 = \frac{(AWV_s \times NV_s)}{3E \times F_w}$$

$c$  : ความหนาของฉนวนที่คั่นระหว่างลวดตัวนำด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ

ดังนั้นจะได้ความยาวเฉลี่ยต่อรอบของลวดตัวนำต่อรอบทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ

คือ

$$MLTV_p = 4E + 2D + 8T_b + \pi \frac{(AWV_p \times NV_p)}{3E \times F_w} \quad (2-8)$$

$$MLTV_s = MLTV_p + 2c + \frac{(AWV_p \times NV_p) + (AWV_s \times NV_s)}{3E \times F_w} \quad (2-9)$$

ซึ่งสามารถกำหนดความยาวของลวดตัวนำด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิได้

$$LV_p = NV_p \times MLTV_p \quad (2-10)$$

$$LV_s = NV_s \times MLTV_s \quad (2-11)$$

ดังนั้นปริมาตรของลวดตัวนำคือ

$$V_{cu} = (AWV_p \times NV_p \times MLV_p) + (AWL_s \times NV_s \times MLTV_s) \quad (2-12)$$

และน้ำหนักของลวดตัวนำสามารถกำหนดได้ดังนี้

$$W_{cu}(D, E) = \rho_{cu} V_{cu}(D, E) \quad (2-13)$$

เมื่อ  $\rho_{cu}$  : ความหนาแน่นของขดลวดตัวนำ

จากน้ำหนักของแกนเหล็กและน้ำหนักของลวดตัวนำที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นทำให้ผู้ออกแบบสามารถกำหนดฟังก์ชันน้ำหนักต่ำสุดของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งจะกำหนดให้เป็น Objective function ในฟังก์ชันของตัวแปร  $E$  และ  $D$  ได้ดังนี้

$$F(D, E) = W_{core}(D, E) + W_{cu}(D, E) \quad \text{มีค่าน้อยที่สุด} \quad (2-14)$$

### 2.1.2 ราคาธรรมมีค่าต่ำ

จาก Objective function ของน้ำหนักต่ำสุดนั้นจะเห็นได้ว่ามีความสัมพันธ์กับ Objective function ของราคาต่ำสุดดังนั้นจึงสามารถกำหนด Objective function ของราคาต่ำสุดในฟังก์ชันของตัวแปร  $E$  และ  $D$  ได้ ดังสมการ (2-15)

$$F(D, E) = C_c W_{core}(D, E) + C_w W_{cu}(D, E) \quad \text{มีค่าต่ำที่สุด} \quad (2-15)$$

เมื่อ  $C_c$  : ราคาของแกนเหล็ก Baht/kg

$C_w$  : ราคาของลวดตัวนำ Baht/kg

### 2.1.3 ความสูญเสียทางไฟฟ้ารวมน้อย

การคำนวณหาค่าลึงไฟฟ้าสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้านั้นสามารถพิจารณาได้เป็น ความสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็ก (Core Loss) และความสูญเสียเนื่องจากลวดตัวนำ (Copper Loss) ซึ่งสามารถกำหนดได้จาก

- ความสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss,  $P_{core}$ )

$$P_{core}(D, E) = P_c W_{core}(D, E) \quad (2-16)$$

เมื่อ  $P_c$ : ความสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนัก (W/kg) ค่าของ  $P_c$  สามารถดูได้จากกราฟคุณลักษณะของแกนเหล็ก ซึ่งได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.

- ความสูญเสียในลวดตัวนำ (Copper Loss,  $P_{cu}$ )

$$I^2 R = \left( \frac{VA}{V_p} f_v \right) (Rv_p + a^2 Rv_s) \quad (2-17)$$

เมื่อ  $a$ : Transformer Ratio

$Rv_p$ : ค่าความต้านทานของลวดตัวนำด้านปฐมภูมิ

$Rv_s$ : ค่าความต้านทานของลวดตัวนำด้านทุติยภูมิ

$$Rv_p = \left( \rho \frac{LV_p}{AWV_p} \right) \quad (2-18)$$

และ  $Rv_s = \left( \rho \frac{LV_s}{AWV_s} \right) \quad (2-19)$

เมื่อ  $\rho$ : ค่าความต้านทานจำเพาะของขดลวดตัวนำ

ดังนั้น  $R_{eq} = \rho \left( \frac{LV_p}{AWV_p} + \frac{LV_s}{AWV_s} \right) \quad (2-20)$

ซึ่งความต้านทานที่อุณหภูมิทำงานจะมีค่าเพิ่มขึ้น คำนวณได้จาก

$$R_{WARM} = \left( \frac{235^\circ C + T_2}{235^\circ C + T_1} \right) R_{eq} \quad (2-21)$$

เมื่อ  $R_{WARM}$  : ความต้านทานที่อุณหภูมิทำงาน  
 $T_1$  : อุณหภูมิห้อง(°C)  
 $T_2$  : อุณหภูมิทำงานขึ้นอยู่กับชนิดของฉนวน (°C)

ในการออกแบบเราจะกำหนดให้หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานในสภาวะที่อุณหภูมิสูงสุด (75°C) ที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ โดยที่ฉนวนของลวดตัวนำยังคงทนได้ดังนั้น

$$R_{warm} = \left( \frac{235^{\circ}C + 75}{235^{\circ}C + T_2} \right) R_{eq} \quad (2-22)$$

ดังนั้นค่าความสูญเสียเนื่องจากลวดตัวนำสามารถกำหนดได้โดยสมการ

$$P_{cu}(D, E) = R_{warm} \rho \left( \frac{VA}{VHV} \right)^2 \left( \frac{LHV}{AWHV} + a^2 \frac{LLV}{AWLV} \right) \quad (2-23)$$

จากสมการ (2-16) และสมการ(2-23) สามารถกำหนด Objective function ของกรณีความสูญเสียทางไฟฟ้ารวมน้อยที่สุดในฟังก์ชันของตัวแปร  $E$  และ  $D$  ได้ดังนี้

$$F(D, E) = P_{cu}(D, E) + P_{core}(D, E) \quad \text{มีค่าน้อยที่สุด} \quad (2-24)$$

#### 2.1.4 น้ำหนักและความสูญเสียทางไฟฟ้ารวมน้อย

หมายถึงการออกแบบที่ให้หม้อแปลงมีน้ำหนักและกำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งคู่ให้มีค่าน้อยที่สุด ซึ่ง Objective function ได้จากการนำเอาสมการของน้ำหนักของหม้อแปลง และสมการของความสูญเสียทางไฟฟ้ารวมกันเพื่อมาหาค่าน้อยที่สุด ดังนั้น Objective function ของสมการน้ำหนักและความสูญเสียทางไฟฟ้ารวมน้อยที่สุดในฟังก์ชันของตัวแปร  $E$  และ  $D$  คือ

$$F(D, E) = [W_{core}(D, E) + W_{cu}(D, E)] + [P_{cu}(D, E) + P_{core}(D, E)] \quad \text{มีค่าน้อยที่สุด} \quad (2-25)$$

#### 2.2 การกำหนดสมการเงื่อนไข (Constrain Function)

ในทางคณิตศาสตร์เมื่อต้องการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันเราสามารถกระทำได้โดยการหาค่า derivative ของฟังก์ชันนั้น และเนื่องจากจุดที่มีค่าต่ำสุดนั้นจะมีความชันเท่ากับศูนย์ ดังนั้นเรา

จึงเทียบให้ derivative ที่หาได้เท่ากับศูนย์แล้วจึงแก้สมการเพื่อหาค่าต่ำสุด หรือ สามารถหาค่าต่ำสุดได้ โดยกำหนดให้ตัวแปรที่มีอยู่เทียบเท่ากับศูนย์ทั้งหมด แต่เมื่อพิจารณาทางด้านวิศวกรรมแล้วไม่สามารถทำเช่นนั้นได้ เพราะหากกำหนดให้ตัวแปรเทียบเท่ากับศูนย์แล้ว จะไม่สามารถสร้างชิ้นงานได้เลย เช่น เมื่อต้องการให้น้ำหนักรวมของหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าต่ำสุด ซึ่งเราทราบว่า น้ำหนักรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า คือน้ำหนักของลวดตัวนำรวมกับน้ำหนักของแกนเหล็ก ถ้าหากเรากำหนดให้ น้ำหนักของลวดตัวนำและน้ำหนักของแกนเหล็กเป็นศูนย์ เพื่อให้ได้ค่าต่ำสุด เราจะไม่สามารถสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าได้ ดังนั้นเราจึงต้องกำหนดสมการเงื่อนไขขึ้นเพื่อกำหนดค่าของตัวแปรให้ค่าที่คำนวณได้เป็นจริง สามารถนำไปสร้างได้ในทางปฏิบัติ ซึ่งสมการเงื่อนไขสามารถพิจารณาได้ดังนี้

จากสมการวัตถุประสงค์ (Objective Function) จะเห็นได้ว่ามีตัวแปรซึ่งเกี่ยวกับขนาดของแกนเหล็ก ( $2E$ ) และขนาดความหนาของแกนเหล็ก ( $D$ ) ดังนั้นจะสามารถกำหนดสมการเงื่อนไข (Constrain Function) ได้ดังนี้

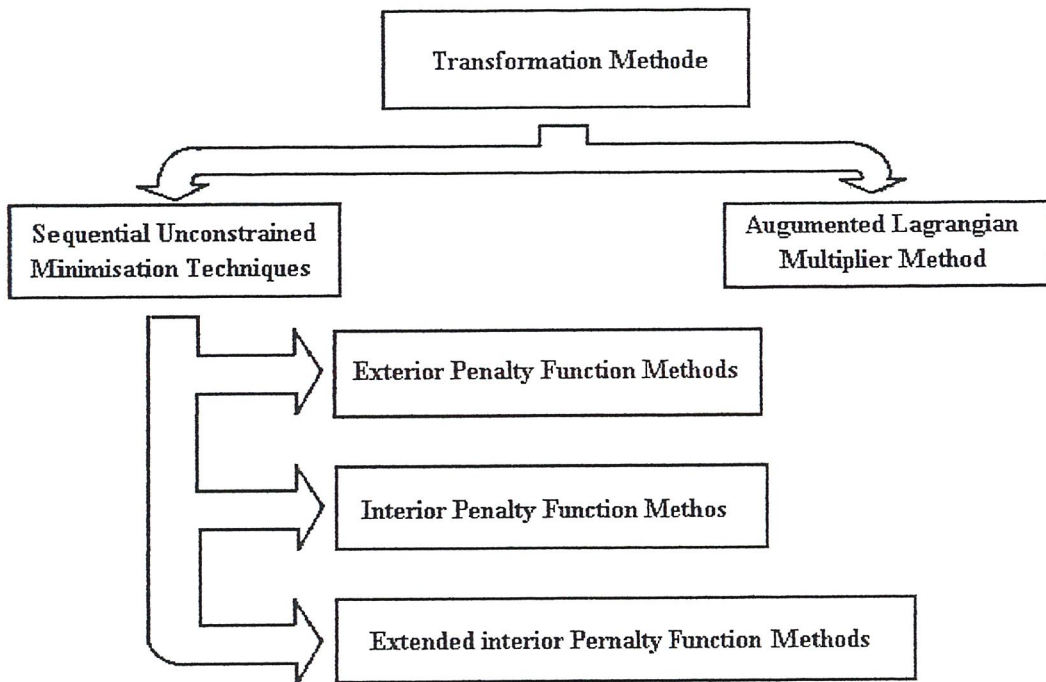
1. ขนาดเล็กสุดของแกนเหล็ก ( $2E$ ) จะต้องทำให้พื้นที่ช่องว่างมีขนาดเพียงพอที่จะพันลวดตัวนำลงได้
2. ขนาดใหญ่สุดของแกนเหล็ก ( $2E$ ) จะต้องไม่ใหญ่กว่าขนาดมาตรฐานที่มีการใช้งาน
3. ขนาดเล็กสุดของความหนาของแกนเหล็ก ( $D$ ) จะต้องมีขนาดมากกว่าศูนย์
4. ขนาดใหญ่สุดของความหนาของแกนเหล็ก ( $D$ ) จะต้องมีขนาดไม่มากกว่าผลหารของพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กกับขนาดแกนเหล็ก

เมื่อกำหนดสมการวัตถุประสงค์และสมการเงื่อนไขแล้ว เมื่อนำไปคำนวณโดยโปรแกรม จะทำให้ทราบค่า  $2E$ ,  $D$  และ  $V/N$  รวมถึงข้อมูลต่างๆที่จำเป็นต้องทราบในการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า

## บทที่ 3

## ทฤษฎีที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมเพื่อออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการของการ Optimization ซึ่งมีอัลกอริทึม(algorithm)ดังแสดงในรูป 3.2 และได้กล่าวถึงทฤษฎีต่างๆที่จำเป็นเช่น การหาค่า gradient ซึ่งใช้วิธี Finite Difference Approximation การ Optimization โดยการแปลงให้อยู่ในรูป Unconstrained ทฤษฎีในการหาทิศทาง ทฤษฎี Conjugate Gradient ทฤษฎี Variable Metric และยังได้กล่าวถึงทฤษฎี Transformation ในการแก้ปัญหาในกรณีที่ไม่เป็น linear โดยมีลักษณะเป็น non-linear โดยจะทำการเปลี่ยนรูปของ objective และ constraint functions ซึ่งวิธีการเปลี่ยนรูปนี้สามารถแยกออกได้เป็น 2 ชนิดดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูป 3.1 Classification of the transformation methods

วิธีแรกเกี่ยวกับวิธีการภายนอก(penalty)และภายใน(barrier) ซึ่งอ้างถึง Sequential Unconstrained Minimization Technique (SUMT) อย่างที่ 2 คือการปรับปรุงฟังก์ชัน Lagrangian ที่เรียกว่า วิธีการ Augmented Lagrangian Multiplier Methods (ALMM) ซึ่งใน

โครงการนี้จะใช้วิธีแรก(Sequential Unconstrained Minimization Technique)ซึ่งเป็นแบบ Exterior Penalty Function Methods เพียงอย่างเดียว ส่วนวิธีอื่นนั้นไม่ได้นำมาใช้ในการทำโครงการนี้ แต่สามารถศึกษาได้จากหนังสือที่เกี่ยวกับออปติไมเซชัน [6,7,8]

### 3.1 ลำดับการทำออปติไมเซชันพื้นฐาน

โดยมากการออกแบบการแก้ปัญหาของการออปติไมเซชัน สามารถจัดให้อยู่ในสูตรทางคณิตศาสตร์ของเงื่อนไขทั่วไปการออปติไมเซชันได้ดังนี้

$$\begin{array}{llll} \text{Minimise} & F(x) & \text{objective function} & (3-1) \end{array}$$

โดย

$$h_j(x) = 0 \quad j = 1, \dots, m \quad \text{เงื่อนไขของการเท่ากัน} \quad (3-2)$$

$$g_k(x) \leq 0 \quad k = 1, \dots, l \quad \text{เงื่อนไขของการไม่เท่ากัน} \quad (3-3)$$

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \quad i = 1, \dots, n \quad \text{เงื่อนไขขอบเขต} \quad (3-4)$$

เมื่อ  $x = (x_1, \dots, x_n)$  เป็นเวกเตอร์ของการออกแบบตัวแปร ( design variable ) และขอบเขตของฟังก์ชันเงื่อนไข ซึ่งเป็นขอบเขตที่ชัดเจนของการออกแบบตัวแปร  $x_i^L$  และ  $x_i^U$  โดยเป็นค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของขอบเขตตามลำดับ

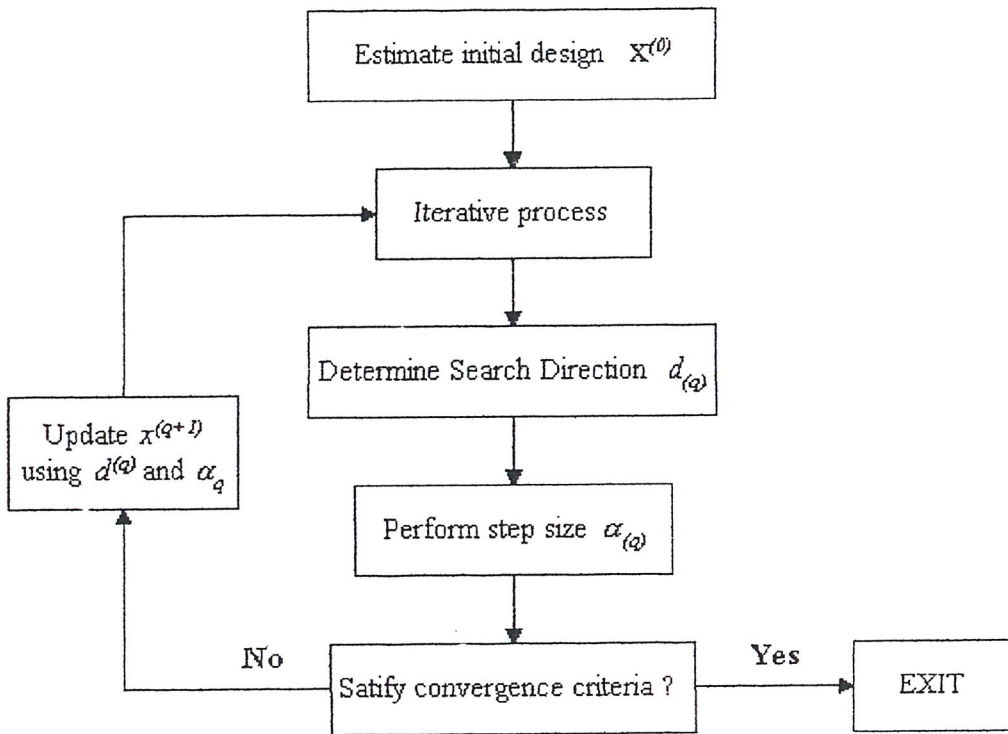
ฟังก์ชันหลัก (Objective function) และฟังก์ชันเงื่อนไข (constraint functions) อาจจะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นก็ได้ ในการออกแบบตัวแปร ฟังก์ชันเหล่านี้อาจจะทราบค่า  $x$  อย่างแน่นอนหรือรู้เป็นนัยและต้องหาค่าโดยการใช้เทคนิคการวิเคราะห์ตัวแปร(analytical)หรือ numerical ซึ่งวิธีแบบ numerical สามารถหาค่าได้ถ้ามีเงื่อนไขในการเท่ากัน ( equality constraints ) เป็นจำนวน  $m$  และจะต้องรู้ค่า  $x$  อย่างแน่นอน ซึ่งเป็นไปได้ที่จะใช้เงื่อนไขในการเท่ากันเหล่านั้นเพื่อที่จะลดตัวแปรที่ออกแบบ หลังจากนั้นปัญหาจะถูกลดลงเป็นปัญหาที่ไม่มีเงื่อนไข ด้วยตัวแปรไม่ทราบค่า  $n - m$  ตัว เงื่อนไขขอบเขตในสมการที่ (3-4) ถูกกำหนดให้เป็นขอบเขตของตัวแปรที่ออกแบบเพื่อที่จะป้องกันจากการเข้าสู่ค่าที่เป็นไปไม่ได้ทางกายภาพ ( non physical values ) รูปแบบที่แสดงไว้ในสมการที่ (3-1) ถึง (3-4) ไม่ได้แสดงไว้ในรูปแบบเดียว ยกตัวอย่างเช่น ปัญหาที่ต้องจัดอยู่ในรูปค่าสูงสุด (maximization) สามารถจัดใหม่โดยการทำ สมการที่ (3-1) จาก  $F(x)$  เปลี่ยนเป็น  $-F(x)$  และยังขึ้นอยู่กับสมการเงื่อนไขเดิมในสมการที่ (3-2) ถึง (3-4)

ปัญหาที่ไม่มีเงื่อนไขอาจจะกำหนดจากสมการที่ (3-1) โดยปราศจากเงื่อนไขในการหาตัวแปร  $x$  ดังเช่นปัญหาที่ไม่ได้ใช้ในการปฏิบัติจริงทางวิศวกรรม ปัญหาที่มีเงื่อนไขด้วยเงื่อนไขในการ

เท่ากันอาจจะถูกแปลงไปเป็นปัญหาที่ไม่มีเงื่อนไข โดยการลดจำนวนของตัวแปรที่ออกแบบลง บางทีปัญหาที่มีทั้งเงื่อนไขในการเท่ากันและไม่เท่ากันสามารถแก้ไขเป็นปัญหาที่ไม่มีเงื่อนไขโดยใช้ทฤษฎีการเปลี่ยนรูป (Transformation Method) เพราะฉะนั้นเป็นสิ่งสำคัญที่จะเข้าใจอย่างเพียงพอเกี่ยวกับทฤษฎี unconstrained Optimization

แผนผังทั่วไปของอัลกอริทึม Optimization แสดงในรูปที่ 3.2 กระบวนการของ Optimization ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ 3 ขั้นตอน

1. การดำเนินการหาทิศทางของ vector  $|d|$  ใน space
2. กระทำการค้นหาระยะทางที่ต้องเคลื่อนที่ไปในทิศทาง vector  $|d|$  โดยการกำหนดคทีละขั้น (Step size)
3. แสดงผลได้เมื่อกระบวนการมีการพุ่งเข้ามาหาค่าที่ยอมรับได้



รูป 3.2 อัลกอริทึมของการ Optimization

โดยมากอัลกอริทึม Optimization จะมีการตั้งค่าเริ่มต้นของการออกแบบตัวแปร  $(x^{(0)})$  จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลจากจุดเริ่มต้นและ update ค่าโดยการออกแบบข้อมูลซ้ำๆ ดังรูปแบบนี้

$$x^{(q+1)} = x^{(q)} + \alpha_q d^{(q)} \quad (3-5)$$

เมื่อ  $q$  เป็นจำนวนการทำซ้ำ อยู่ในส่วนที่ติดตามในในอัลกอริทึมต่างๆ ใช้สำหรับแสดงผลสถานะปัจจุบันของการค้นหาทิศทางของ vector  $|d|$  และ Step size  $\alpha$  รายละเอียดศึกษาเพิ่มเติมได้จากหนังสือที่เกี่ยวกับ Optimization [8,10,12]

จากทฤษฎีและข้อกำหนดที่ได้กล่าวมาทั้งหมด ทำให้สามารถเขียนสมการวัตถุประสงค์และสมการเงื่อนไขในกรณีต่างๆ ได้ดังนี้

1. กรณีน้ำหนักยา

สมการวัตถุประสงค์

$$F(D, E) = W_{core}(D, E) + W_{cu}(D, E) \quad (3-6)$$

2. กรณีราคาตัว

สมการวัตถุประสงค์

$$F(D, E) = C_c W_{core}(D, E) + C_w W_{cu}(D, E) \quad (3-7)$$

3. กรณีกำลังไฟฟ้าสูญเสียน้อย

สมการวัตถุประสงค์

$$F(D, E) = P_{cu}(D, E) + P_{core}(D, E) \quad (3-8)$$

4. กรณีน้ำหนักและกำลังไฟฟ้าสูญเสียน้อย

สมการวัตถุประสงค์

$$F(D, E) = [W_{core}(D, E) + W_{cu}(D, E)] + [P_{cu}(D, E) + P_{core}(D, E)] \quad (3-9)$$

ส่วนของสมการเงื่อนไขนั้นในทุกกรณีจะเหมือนกันคือ

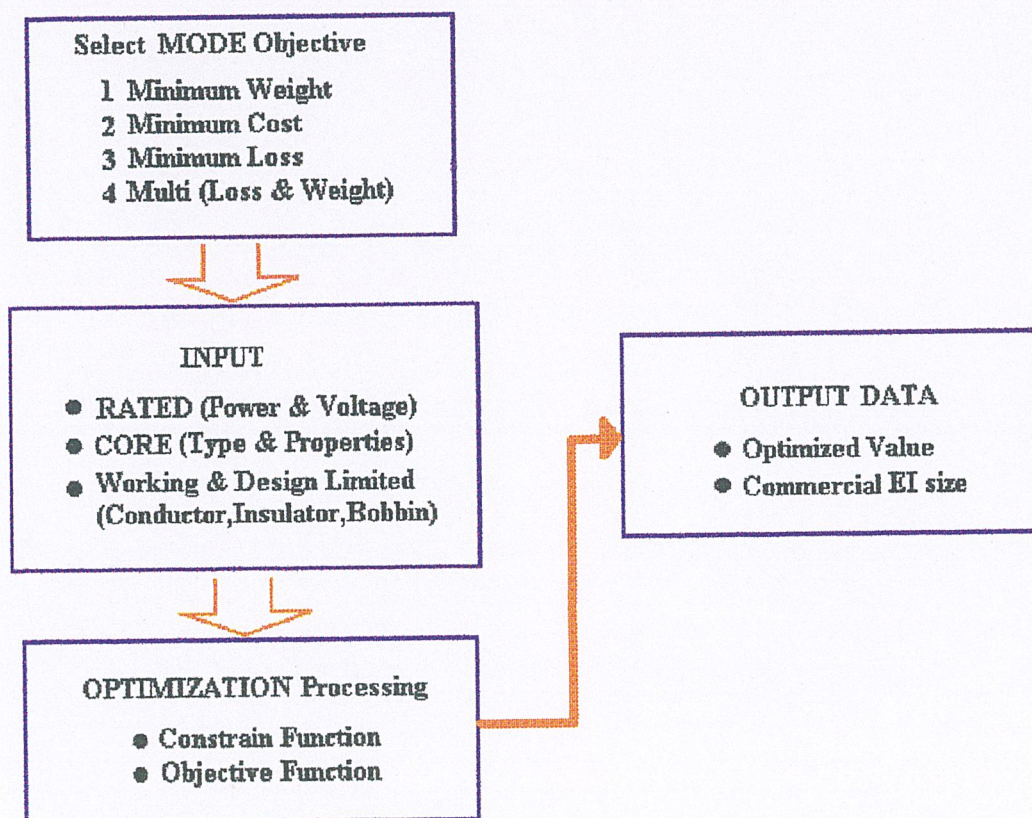
1. ขนาดเล็กสุดของแกนเหล็ก ( $2E$ ) จะต้องทำให้พื้นที่ช่องว่างมีขนาดเพียงพอที่จะพันลวดตัวนำลงได้ และขนาดใหญ่สุดของแกนเหล็ก ( $2E$ ) จะต้องไม่ใหญ่กว่าขนาดมาตรฐานที่มีการใช้งานซึ่งจะเขียนสมการได้ดังนี้

$$\sqrt{\frac{A_{HV} + A_{LV}}{3F_w}} \times 2 \leq 2E \leq 2E_{\max} \quad (3-10)$$

2. ขนาดเล็กสุดของความหนาของแกนเหล็ก ( $D$ ) จะต้องมีขนาดมากกว่าศูนย์ และขนาดใหญ่สุดของความหนาของแกนเหล็ก ( $D$ ) จะต้องมีขนาดไม่มากกว่าผลหารของพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กกับขนาดแกนเหล็กซึ่งจะเขียนสมการได้ดังนี้

$$0 \leq D \leq \frac{A_c}{2E_{\min}} \quad (3-11)$$

เมื่อทราบทฤษฎีของการอพติไมเซชันเพื่อหาค่าต่ำสุด นำมาออกแบบโปรแกรมเพื่อใช้ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยแกน EI โดยกำหนดสมการวัตถุประสงค์และสมการเงื่อนไขเพื่อให้ได้ข้อมูลในการสร้างหม้อแปลงตามลำดับการทำงานตามรูป 3.3



รูป 3.3 Block Diagram ลำดับการทำงานของโปรแกรมออกแบบหม้อแปลง

บทที่ 4

วิเคราะห์การทำงานของโปรแกรม

ในบทนี้จะเป็นการวิเคราะห์การทำงานของโปรแกรมในรูปแบบต่างๆ เช่น 1) การวิเคราะห์ผลของขนาดขากลางแกนเหล็ก  $2E$  กับความหนาแกนเหล็ก  $D$  ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก  $A_C$  เท่ากัน ว่ามีผลอย่างไรบ้างกับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบ 2) การวิเคราะห์หลักการออกแบบของโปรแกรมของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละแบบ 3) การวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก  $B_{MAX}$  ว่ามีผลอย่างไรต่อจุดที่เหมาะสมของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้ ออกแบบ เพื่อที่จะได้เป็นแนวคิดในการเลือกใช้ค่า ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่เหมาะสม เพื่อที่จะได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่ตรงตามวัตถุประสงค์มากที่สุด

4.1 การวิเคราะห์ผลของ  $2E$  กับ  $D$  ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อ  $A_C$  เท่ากัน

จากการคำนวณตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าที่พื้นที่หน้าตัดแกนกลางของแกนเหล็ก ( $EI$ -Shell type) เดียวกัน ถ้า  $2E > D$  จะได้ปริมาตรของแกนเหล็กมากกว่าขณะที่  $2E < D$  และเส้นรอบวงของแกนเหล็กจะน้อยที่สุดเมื่อ  $2E = D$  ซึ่งเส้นรอบวงจะมีค่ามากขึ้นเมื่อความแตกต่างระหว่างขนาด  $2E$  กับ  $D$  มีมาก ส่วนพื้นที่ลงขดลวด (Window Area) นั้นถ้าขนาดของ  $2E$  มากกว่า  $D$  ก็จะทำให้ได้ค่าของพื้นที่ลงขดลวดมากขึ้นไปด้วย

จากตารางค่าของ  $2E$  และ  $D$  เป็นตัวเลขที่สมมติ ซึ่งไม่ใช่ขนาดของแกนเหล็กที่มีอยู่จริง แต่จะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลง  $2E$  และ  $D$  ในอัตราส่วนที่เท่ากัน

ในการคำนวณกำหนดค่าต่างดังนี้

$2E$ : ขนาดขากลางแกนเหล็กแบบตัว E, (ซ.ม)

$D$ : ความหนาแกนเหล็กหม้อแปลง, (ซ.ม)

$A_C$ : พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก =  $2E \times D$  (ตร.ซม.)

พื้นที่ช่องว่างแกนเหล็กสำหรับลงขดลวด  $A_{WINDOW} = 3E \times E$  (ตร.ซม.)

ปริมาตรแกนแกนเหล็ก  $V_{CORE} = 24DE^2$  (ลบ.ซม.)

ความยาวรอบแกนกลาง  $L_{CORE} = 2(2E + D)$  (ซม.)

**ตารางที่ 4.1** แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลง  $2E$  และ  $D$  ที่มีผลต่อ ความยาวรอบแกนกลาง ปริมาตร และ พื้นที่ช่องว่าง

พื้นที่หน้าตัดแกนกลาง $A_c = 100$				
ความกว้าง $2E$	ความหนา $D$	$L_{CORE}$	$V_{CORE}$	$A_{WINDOW}$
5.00	20.00	50.0	3000	75.00
5.35	18.70	48.1	3219	85.86
5.77	17.33	46.2	3462	99.87
6.33	15.80	44.3	3799	120.20
7.07	14.14	42.4	4241	150
8.17	12.24	40.8	4902	200.00
10.00	10.00	40.0	6000	300.00
12.24	8.17	40.8	7344	450.00
14.14	7.07	42.4	8481	600.00
15.80	6.33	44.3	9481	748.00
17.33	5.77	46.2	10397	900.00
18.70	5.35	48.1	11225	1049.00
20.00	5.00	50	12000	1200.00

#### 4.2 หลักการการออกแบบจากโปรแกรม

พิจารณาผลที่ได้จากการใช้โปรแกรม ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 4 แบบซึ่งในหลายๆ ตารางนั้นมีข้อกำหนดที่เหมือนกันหมดดังนี้

ให้  $2E$  คือขนาดขากกลางแกนเหล็ก,  $D$  คือความหนาแกนเหล็ก,  $A_c$  คือพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กเท่ากับ  $2E \times D$

และแกนเหล็กที่ใช้นั้นใช้แกนเหล็ก EI ขนาดมาตรฐานเกรด RM14 (0.50 มม.) มีความหนาแน่นแกนเหล็ก 7650 กก. / ลบ.ม.

ใช้กระสวยรองขดลวด(Bobbin) หนา 3.00 มม., ลวดทองแดงที่ใช้มีความหนาแน่น 8900 กก./ลบ.ม.

สัมประสิทธิ์การพันขดลวด 0.45, สัมประสิทธิ์การประกอบแกนเหล็ก 0.98

ในการออกแบบใช้  $B_{MAX} = 1.0$  เทสลา ความถี่ใช้งาน 50 Hz และกำหนดอุณหภูมิแวดล้อม 35 องศาเซลเซียส อุณหภูมิขณะทำงาน 75 องศาเซลเซียส

**ตารางที่ 4.2** เปรียบเทียบการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 4 แบบ โดยให้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 1 เทสลา พิกัดกำลัง 250 VA

ชนิดของการออกแบบ	พิกัดแรงดัน 220 / 110 โวลต์		พิกัดกำลัง 250 VA	
	Min Weight	Min Loss	Multi	Min Cost
พื้นที่หน้าตัด $A_c$ (mm. <sup>2</sup> )	14.45	28.37	27.17	20.44
ความกว้าง $2E$ (mm.)	<b>4.08</b>	<b>2.91</b>	<b>2.98</b>	<b>3.43</b>
ความหนา $D$ (mm.)	<b>3.54</b>	<b>9.74</b>	<b>9.12</b>	<b>5.96</b>
น้ำหนักขดลวดด้านปฐมภูมิ (kg)	0.53	0.38	0.39	0.43
น้ำหนักขดลวดด้านทุติยภูมิ (kg)	0.71	0.46	0.46	0.54
จำนวนรอบขดลวดด้านปฐมภูมิ	699	356	372	494
จำนวนรอบขดลวดด้านทุติยภูมิ	350	178	186	247
<b>โวลต์ ต่อ รอบ</b>	<b>0.315</b>	<b>0.618</b>	<b>0.591</b>	<b>0.445</b>
น้ำหนักแกนเหล็ก EI (kg)	2.69	3.77	3.69	3.19
น้ำหนักลวดทองแดง (kg)	1.24	0.84	0.85	0.97
<b>น้ำหนักรวม</b> (kg)	<b>3.93</b>	<b>4.61</b>	<b>4.54</b>	<b>4.16</b>
ราคาแกนเหล็ก EI (บาท)	134	188	184	160
ราคาลวดทองแดง (บาท)	186	126	128	145
<b>ราคารวม</b> (บาท)	<b>321</b>	<b>314</b>	<b>312</b>	<b>305</b>
กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แกนเหล็ก(วัตต์)	5.99	8.40	8.22	7.13
กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวด (วัตต์)	23.06	15.65	15.85	17.96
<b>กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมด (วัตต์)</b>	<b>29.05</b>	<b>24.05</b>	<b>24.07</b>	<b>25.09</b>

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบ การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 4 แบบ โดยให้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 1 เทสลา พิกัดกำลัง 750 VA

ชนิดของการออกแบบ	พิกัดแรงดัน 220 / 110 โวลต์		พิกัดกำลัง 750 VA		
	Min Weight	Min Loss	Multi	Min Cost	
พื้นที่หน้าตัด Ac (mm. <sup>2</sup> )	25.50	47.52	31.81	40.11	
ความกว้าง 2E (mm.)	6.14	4.50	5.51	4.90	
ความหนา D (mm.)	4.15	10.56	5.78	8.19	
น้ำหนักขดลวดด้านปฐมภูมิ (kg)	1.59	1.10	1.34	1.18	
น้ำหนักขดลวดด้านทุติยภูมิ (kg)	2.19	1.35	1.78	1.49	
จำนวนรอบขดลวดด้านปฐมภูมิ	396	213	318	252	
จำนวนรอบขดลวดด้านทุติยภูมิ	198	106	159	126	
<b>โวลต์ ต่อ รอบ</b>	<b>0.555</b>	<b>1.035</b>	<b>0.692</b>	<b>0.873</b>	
น้ำหนักแกนเหล็ก EI (kg)	7.14	9.74	7.98	8.95	
น้ำหนักลวดทองแดง (kg)	3.78	2.45	3.13	2.67	
<b>น้ำหนักรวม (kg)</b>	<b>10.92</b>	<b>12.19</b>	<b>11.11</b>	<b>11.62</b>	
ราคาแกนเหล็ก EI (บาท)	357	487	399	448	
ราคาลวดทองแดง (บาท)	567	368	469	400	
<b>ราคารวม (บาท)</b>	<b>924</b>	<b>851</b>	<b>868</b>	<b>848</b>	
กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แกนเหล็ก (วัตต์)	15.92	21.73	17.80	19.98	
กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวด (วัตต์)	39.54	25.67	32.63	27.89	
<b>กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมด (วัตต์)</b>	<b>55.46</b>	<b>47.40</b>	<b>50.43</b>	<b>47.87</b>	

#### 4.2.1 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำหนักรวมน้อย (Minimum Weight)

หลักการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดนี้ มีเป้าหมายให้น้ำหนักของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยรวมมีค่าน้อยที่สุด โดยน้ำหนักของหม้อแปลงไฟฟ้าส่วนที่สำคัญประกอบไปด้วย น้ำหนักของแกนเหล็กและน้ำหนักของขดลวดทองแดง ซึ่งน้ำหนักส่วนใหญ่ของหม้อแปลงไฟฟ้าจะอยู่ที่น้ำหนัก

ของแกนเหล็ก ดังนั้นการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้จึงออกแบบให้พื้นที่หน้าตัดแกนกลางของแกนเหล็ก ( $A_c$ ) มีค่าน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ (เมื่อเปรียบเทียบกับ การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบอื่นๆ จากโปรแกรมการออกแบบนี้ )

$$\text{จากสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของฟาราเดย์} \quad V = 4.44 f(\mathbf{s.f.}) B_{MAX} A_c \quad (4-1)$$

$$\text{จะได้สมการของโวลต์ต่อรอบคือ} \quad V/N = 4.44 f(\mathbf{s.f.}) B_{MAX} A_c \quad (4-2)$$

เมื่อค่าของสัมประสิทธิ์การประกอบแกนเหล็ก ( $\mathbf{s.f.}$ ), ความถี่  $f$  และ  $B_{MAX}$  มีค่าคงที่ ดังนั้นเมื่อพื้นที่หน้าตัด  $A_c$  มีค่าน้อย จึงทำให้  $V/N$  มีค่าต่ำกว่าการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบอื่นๆ มีผลให้ต้องใช้จำนวนรอบของลวดทองแดงมาก ดังนั้นพื้นที่ลวดจะต้องมีค่ามากไปด้วย ซึ่งได้ จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าเมื่อ  $2E < D$  จะทำให้ปริมาตร (หรือน้ำหนัก) ของแกนเหล็กมีค่าน้อยกว่าเมื่อออกแบบให้  $2E > D$  แต่เนื่องจากเหตุผลในการลงลวดที่ค่าพื้นที่ลวดขึ้นอยู่กับความกว้างแกนกลางของแกนเหล็ก  $2E$  โดยไม่ขึ้นอยู่กับความหนา  $D$  ดังนั้นการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดนี้ จึงมีการออกแบบให้  $2E > D$  เพื่อมีพื้นที่ช่องว่างพอสำหรับพื้นที่ของลวด จากที่กล่าวมาจะเห็นว่าหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Minimum Weight นี้ ปริมาณของลวดทองแดงมาก ซึ่งการสูญเสียส่วนใหญ่ของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับ การสูญเสียในลวดทองแดง (Copper Loss) ดังนั้นการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดนี้ จึงมีการสูญเสียรวม (Copper Loss + Core Loss) สูง และราคาแพงกว่าการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบอื่น ในโปรแกรม

#### 4.2.2 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบความสูญเสียทางไฟฟ้ารวมน้อย ( Minimum Loss )

ในหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งตัวจะประกอบไปด้วยการสูญเสียในลวดทองแดงและการสูญเสียในแกนเหล็ก แต่การสูญเสียในลวดทองแดงเป็นอัตราส่วนที่มากกว่าการสูญเสียในแกนเหล็ก ดังนั้นการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้ จะเน้นการลดปริมาณลวดทองแดงเพื่อลดการสูญเสียในทองแดง โดยการทำให้  $V/N$  มีค่ามากๆ ทำให้แกนเหล็ก  $A_c$  มีค่ามากกว่าการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบอื่นๆ ซึ่งสัมพันธ์กับสมการ (4-2) โวลต์ต่อรอบหาได้จาก

$$V/N = 4.44 * f * (\mathbf{s.f.}) * B_{MAX} * A_c$$

และเนื่องจากการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้จะใช้ปริมาณลวดทองแดงที่น้อย ดังนั้นจึงต้องการพื้นที่ช่องว่างลวดน้อย ทำให้รูปทรงของแกนเหล็กส่วนมากมีลักษณะ  $2E$  น้อยกว่า  $D$  และเนื่องจากน้ำหนักของหม้อแปลงไฟฟ้าขึ้นอยู่กับน้ำหนักของแกนเหล็กเสียส่วนใหญ่ เมื่อในการออกแบบพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก ( $A_c$ ) มีค่ามาก ทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดนี้มีน้ำหนักมากขึ้นด้วย

### 4.2.3 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบราคาขั้นต่ำ ( Minimum Cost )

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบเมื่อเปลี่ยนราคา ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Min Cost ให้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 1 เทสลา พิกัดกำลัง 400VA

ราคาแกนเหล็ก/ราคาฉนวน (Baht/kg)	พิกัดแรงดัน 220 / 110 โวลต์		พิกัดกำลัง 400 VA	
	60/120	30/120	50/150	30/150
พื้นที่หน้าตัด Ac (mm. <sup>2</sup> )	23.91	31.41	29.02	32.14
ความกว้าง 2E (mm.)	4.48	3.91	4.07	3.87
ความหนา D (mm.)	5.33	8.02	7.12	8.30
น้ำหนักขดลวดด้านปฐมภูมิ (kg)	0.80	0.70	0.72	0.69
น้ำหนักขดลวดด้านทุติยภูมิ (kg)	1.00	0.83	0.87	0.82
จำนวนรอบขดลวดด้านปฐมภูมิ	422	322	348	314
จำนวนรอบขดลวดด้านทุติยภูมิ	211	161	174	157
<b>โวลต์ ต่อ รอบ</b>	<b>0.521</b>	<b>0.684</b>	<b>0.632</b>	<b>0.700</b>
น้ำหนักแกนเหล็ก EI (kg)	4.89	5.60	5.39	5.67
น้ำหนักลวดทองแดง (kg)	1.80	1.53	1.59	1.51
<b>น้ำหนักรวม</b>	<b>6.69</b>	<b>7.13</b>	<b>6.98</b>	<b>7.18</b>
ราคาแกนเหล็ก EI (บาท)	293.00	168.00	269.00	170.00
ราคาขดลวดทองแดง (บาท)	216.00	183.00	238.00	226.00
<b>ราคารวม</b> (บาท)	<b>510.00</b>	<b>351.00</b>	<b>508.00</b>	<b>396.00</b>
กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แกนเหล็ก (วัตต์)	10.90	12.50	12.02	12.66
กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวด (วัตต์)	21.56	18.24	19.01	18.03
<b>กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมด</b> (วัตต์)	<b>32.46</b>	<b>30.74</b>	<b>31.02</b>	<b>30.68</b>

**ตารางที่ 4.5** เปรียบเทียบเมื่อเปลี่ยนราคา ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Min Cost ให้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 1 เทสลา พิกัดกำลัง 800 VA

ราคาแกนเหล็ก/ราคาลวด (Baht/kg)	พิกัดแรงดัน 220 / 110 โวลต์		พิกัดกำลัง 800 VA	
	60/120	30/120	50/150	30/150
พื้นที่หน้าตัด Ac (mm. <sup>2</sup> )	33.28	48.51	49.34	36.09
ความกว้าง 2E (mm.)	5.77	4.79	4.74	5.72
ความหนา D (mm.)	5.77	10.14	10.41	6.31
น้ำหนักขดลวดด้านปฐมภูมิ (kg)	1.75	1.42	1.42	1.64
น้ำหนักขดลวดด้านทุติยภูมิ (kg)	1.78	1.35	1.33	1.64
จำนวนรอบขดลวดด้านปฐมภูมิ	304	208	204	280
จำนวนรอบขดลวดด้านทุติยภูมิ	152	104	102	140
<b>โวลต์ ต่อ รอบ</b>	<b>0.725</b>	<b>1.056</b>	<b>1.078</b>	<b>0.786</b>
น้ำหนักแกนเหล็ก EI (kg)	8.75	10.58	10.65	9.40
น้ำหนักลวดทองแดง (kg)	3.53	2.77	2.75	3.29
<b>น้ำหนักรวม (kg)</b>	<b>12.28</b>	<b>13.35</b>	<b>13.41</b>	<b>12.69</b>
ราคาแกนเหล็ก EI (บาท)	525.00	317.00	533.00	282.00
ราคาลวดทองแดง (บาท)	424.00	333.00	413.00	493.00
<b>ราคารวม (บาท)</b>	<b>949.00</b>	<b>650.00</b>	<b>946.00</b>	<b>775.00</b>
กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แกนเหล็ก (วัตต์)	19.52	23.61	23.77	20.98
กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวด (วัตต์)	33.27	25.94	25.76	30.90
<b>กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมด (วัตต์)</b>	<b>52.78</b>	<b>49.54</b>	<b>49.52</b>	<b>51.88</b>

โดยปกติแล้วราคาของหม้อแปลงไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับราคาของลวดทองแดงกับราคาของแกนเหล็ก และราคาของลวดทองแดงมีอัตราส่วนมากกว่าราคาของแกนเหล็ก ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้ จะพยายามลดราคาของวัสดุตัวที่แพงกว่าลงให้มากที่สุด ดังนั้นจึงต้องลดปริมาณของขดลวดทองแดงเพื่อให้ราคาโดยรวมมีค่าถูกที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ การจะลดขดลวด

ทองแดงมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับ ราคาของแกนเหล็กและราคาขดลวดทองแดง ยิ่งขดลวดทองแดง มีราคาสูงกว่าราคาของแกนเหล็กมาก ๆ ขดลวดทองแดงก็จะลดปริมาณมากตามความเหมาะสม ซึ่งถูกเลือกโดยโปรแกรม การให้ขดลวดทองแดงมีค่าน้อยจะทำได้โดยการเพิ่ม  $V/N$  ให้มีค่าสูง ดังนั้นการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้จะมีพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก ( $A_c$ ) ค่อนข้างใหญ่เพื่อที่จะให้ค่า  $V/N$  มากและค่า  $B_{MAX}$  คงที่นั่นเอง จะสังเกตว่าการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้ จะพยายามลดขดลวดทองแดงซึ่งคล้ายกับการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Minimum Loss จึงทำให้มีการสูญเสียค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Minimum Weight แต่จะมีน้ำหนักมากกว่า การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบราคาต่ำสุดนี้ รูปแบบของหม้อแปลงจะเปลี่ยนแปลงไป เมื่อราคาของเหล็กและทองแดงเปลี่ยนแปลงไปดัง ตารางที่ 4.4 และ ตาราง 4.5

#### 4.2.4 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีน้ำหนักและการสูญเสียน้อย ( Multi Design )

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้ น้ำหนักและการสูญเสียรวมน้อยนั้น ได้รวมเอาข้อดีของ หลักการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำหนักเบาที่สุดและการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ กำลังไฟฟ้าสูญเสียน้อยที่สุดมารวมกันคือการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำหนักน้อยที่สุดไม่ ค่อยคำนึงถึงการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าและการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ ความสูญเสียทางไฟฟ้าน้อยที่สุดนั้นจะไม่ค่อยคำนึงถึงเรื่องน้ำหนักของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้นการ ออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำหนักและการสูญเสียรวมน้อยนั้นจะคำนึงถึงทั้งสองอย่างนี้ โดย ที่จะออกแบบให้น้ำหนักรวมมีค่าไม่มากคือมีค่าน้อยกว่าการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Minimum Loss แต่จะมากกว่าการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Minimum Weight และจะมีการ สูญเสียค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Minimum Weight แต่จะมากกว่า การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Minimum Loss ซึ่งก็คือจะออกแบบให้น้ำหนักและการสูญเสีย ทางไฟฟ้าอยู่ในช่วงระหว่างการออกแบบทั้งสองอย่างดังที่กล่าวไว้แล้วเสียเป็นส่วนใหญ่

#### 4.3 วิเคราะห์ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก $B_{MAX}$

โดยปกติแล้วในการเลือกค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพื่อที่จะนำมาใช้ในการ ออกแบบนั้น จะเลือกโดยที่ไม่ได้คำนึงว่าค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กค่าใดที่จะทำให้การ ออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้ามีน้ำหนักรวมน้อยที่สุดหรือราคาต่ำที่สุดหรือหรือการกำลังไฟฟ้าสูญเสีย น้อยที่สุด เพราะว่าในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมนี้เมื่อออกแบบแล้วจะต้อง

กำหนดค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ค่าใดค่าหนึ่ง โปรแกรมก็จะคำนวณจุดที่เหมาะสมตามวัตถุประสงค์การออกแบบแต่ละแบบที่ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กค่านั้นๆ แต่ไม่ใช่จุดที่เหมาะสมของค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมด จึงมีการสร้างโปรแกรมขึ้นมาใหม่เพื่อสามารถที่จะเลือกค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เหมาะสมเพื่อที่จะได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่ตรงตามจุดประสงค์การออกแบบและมีค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ทำให้การออกแบบตามวัตถุประสงค์นั้นมีค่าต่ำที่สุด

จากที่ทราบกันคืออยู่แล้วว่าเมื่อค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนไปก็จะมีผลให้ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนักของแกนเหล็กเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยซึ่งสามารถพิจารณาได้จากกราฟคุณสมบัติการสูญเสียในแกนเหล็กในภาคผนวก ก.2 ซึ่งเห็นได้ว่าถ้าค่า  $B_{MAX}$  เพิ่มขึ้นจะทำให้ความสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเป็นฟังก์ชันลึอก เมื่อค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงไป ค่าที่ได้จากการออกแบบก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่น น้ำหนัก ราคา และการกำลังไฟฟ้าสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นต้น ซึ่งสามารถพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

พิจารณาตารางที่ 4.6 ถึงตารางที่ 4.9 ซึ่งเป็นตารางแสดงผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าตามวัตถุประสงค์การออกแบบทั้ง 4 แบบโดยใช้หม้อแปลงขนาด 400 VA ซึ่งแสดงไว้เฉพาะข้อมูลที่เปรียบเทียบกันเท่านั้น ส่วนรายละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก ก. จากตารางจะเห็นว่าเมื่อค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้น จะทำให้โปรแกรมพยายามลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียต่างๆลงมา เพื่อที่จะไปหักล้างกับค่าความสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนักของแกนเหล็กที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง และเพื่อที่จะทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าก่อนข้างจะคงที่หรือไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนักเมื่อค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นนั่นเอง ซึ่งการลดค่าการสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้านั้นสามารถทำได้สองส่วนคือ

1. ลดการสูญเสียในแกนเหล็ก(Core Loss) สามารถทำได้โดยการปรับขนาดของแกนกลาง ( $2E$ )และความหนาของแกนเหล็ก( $D$ ) เพื่อที่จะทำให้น้ำหนักแกนเหล็กนั้นลดลง ซึ่งจะมีผลทำให้พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก( $A_c$ )เปลี่ยนแปลงไปด้วย

2. ลดการสูญเสียในขดลวดทองแดง(Copper Loss)สามารถทำได้โดยการเพิ่มค่า  $V/N$  เพื่อที่จะลดจำนวนรอบการพันของขดลวดลงและลดค่าความยาวเฉลี่ยต่อรอบ โดยการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก( $A_c$ ) ซึ่งไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มค่า  $V/N$  หรือการลดค่าความยาวเฉลี่ยต่อรอบของขดลวดนั้นก็จะมีจุดประสงค์เดียวกันนั่นก็คือเพื่อลดความยาวทั้งหมดของขดลวดลงเพื่อให้ค่าความต้านทานของขดลวดทองแดงลดลงทำให้การสูญเสียในขดลวดทองแดง( $I^2R$ )นั้นลดลงและมีผลให้น้ำหนักของขดลวดทองแดงนั้นลดลงด้วย

ตาราง 4.6 ผลการเปลี่ยนแปลง  $B_{MAX}$  ของหม้อแปลงแบบน้ำหนักเบา 400 VA 220/110 โวลต์

$B_{MAX}$	V/N	$W_{CORE}$	$W_{CU}$	$W_{TOTAL}$	$C_{CORE}$	$C_{CU}$	$C_{TOTAL}$	$L_{CORE}$	$L_{CU}$	$L_{TOTAL}$
0.50	0.289	7.27	3.65	<b>10.92</b>	364.00	547.00	<b>911.00</b>	5.09	43.63	<b>48.72</b>
0.60	0.366	6.83	2.81	<b>9.64</b>	342.00	421.00	<b>763.00</b>	6.47	33.60	<b>40.07</b>
0.70	0.336	5.61	2.90	<b>8.51</b>	281.00	435.00	<b>716.00</b>	7.02	34.69	<b>41.71</b>
0.80	0.354	5.04	2.67	<b>7.71</b>	252.00	401.00	<b>653.00</b>	7.87	31.96	<b>39.83</b>
0.90	0.370	4.57	2.49	<b>7.07</b>	229.00	374.00	<b>602.00</b>	8.58	29.79	<b>38.36</b>
1.00	0.385	4.21	2.33	<b>6.54</b>	210.00	350.00	<b>560.00</b>	9.38	27.88	<b>37.26</b>
1.10	0.431	4.04	2.05	<b>6.09</b>	202.00	307.00	<b>509.00</b>	10.56	24.52	<b>35.08</b>
1.20	0.451	3.79	1.92	<b>5.71</b>	190.00	288.00	<b>478.00</b>	11.37	22.95	<b>34.32</b>
1.30	0.451	3.50	1.88	<b>5.38</b>	175.00	282.00	<b>457.00</b>	12.69	22.49	<b>35.18</b>
1.40	0.464	3.29	1.80	<b>5.09</b>	165.00	270.00	<b>435.00</b>	13.95	21.52	<b>35.47</b>
1.50	0.467	3.09	1.76	<b>4.85</b>	154.00	264.00	<b>418.00</b>	14.88	21.05	<b>35.93</b>
1.60	0.458	2.86	1.77	<b>4.63</b>	143.00	265.00	<b>409.00</b>	15.99	21.16	<b>37.15</b>
1.70	0.502	2.82	1.59	<b>4.42</b>	141.00	239.00	<b>380.00</b>	18.07	19.04	<b>37.11</b>

W : น้ำหนัก, C : ราคา, L : กำลังไฟฟ้าสูญเสีย, CORE : แกนเหล็ก, CU : ลวดทองแดง TOTAL : รวม

ตาราง 4.7 ผลการเปลี่ยนแปลง  $B_{MAX}$  ของหม้อแปลงแบบราคาต่ำ 400 VA 220/110 โวลต์

$B_{MAX}$	V/N	$W_{CORE}$	$W_{CU}$	$W_{TOTAL}$	$C_{CORE}$	$C_{CU}$	$C_{TOTAL}$	$L_{CORE}$	$L_{CU}$	$L_{TOTAL}$
0.50	0.449	9.09	2.63	<b>11.72</b>	454.00	394.00	<b>848.00</b>	6.36	31.36	<b>37.72</b>
0.60	0.445	7.55	2.44	<b>9.99</b>	378.00	366.00	<b>743.00</b>	7.15	29.15	<b>36.30</b>
0.70	0.518	6.96	2.08	<b>9.05</b>	348.00	313.00	<b>661.00</b>	8.70	24.92	<b>33.62</b>
0.80	0.475	5.92	2.08	<b>8.01</b>	296.00	312.00	<b>609.00</b>	9.26	24.86	<b>34.12</b>
0.90	0.588	5.84	1.73	<b>7.57</b>	292.00	259.00	<b>551.00</b>	10.96	20.65	<b>31.61</b>
1.00	0.649	5.52	1.56	<b>7.08</b>	276.00	234.00	<b>510.00</b>	12.31	18.65	<b>30.96</b>
1.10	0.641	4.97	1.51	<b>6.48</b>	249.00	227.00	<b>475.00</b>	13.00	18.03	<b>31.03</b>
1.20	0.695	4.70	1.39	<b>6.10</b>	235.00	209.00	<b>444.00</b>	14.11	16.62	<b>30.74</b>
1.30	0.706	4.38	1.33	<b>5.71</b>	219.00	200.00	<b>419.00</b>	15.88	15.91	<b>31.78</b>
1.40	0.760	4.22	1.24	<b>5.45</b>	211.00	185.00	<b>396.00</b>	17.86	14.76	<b>32.62</b>
1.50	0.788	4.01	1.18	<b>5.18</b>	200.00	176.00	<b>377.00</b>	19.33	14.04	<b>33.37</b>
1.60	0.819	3.83	1.12	<b>4.95</b>	192.00	167.00	<b>359.00</b>	21.40	13.35	<b>34.75</b>
1.70	0.797	3.56	1.10	<b>4.66</b>	178.00	166.00	<b>344.00</b>	22.76	13.20	<b>35.96</b>

W : น้ำหนัก, C : ราคา, L : กำลังไฟฟ้าสูญเสีย, CORE : แกนเหล็ก, CU : ลวดทองแดง TOTAL : รวม

จะเห็นว่า ไม่ว่าจะลดการสูญเสียจากขดลวดทองแดงหรือจากแกนเหล็กนั้นก็จะมีผลทำให้น้ำหนักของหม้อแปลงไฟฟ้าลดลงเช่นกัน ดังนั้นเมื่อค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้น

**ตาราง 4.8** ผลการเปลี่ยนแปลง  $B_{MAX}$  ของหม้อแปลงแบบความสูญเสียทางไฟฟ้าน้อย  
400 VA 220/110 โวลต์

$B_{MAX}$	V/N	$W_{CORE}$	$W_{CU}$	$W_{TOTAL}$	$C_{CORE}$	$C_{CU}$	$C_{TOTAL}$	$L_{CORE}$	$L_{CU}$	$L_{TOTAL}$
0.50	0.563	10.51	2.33	12.84	525.00	350.00	875.00	7.36	27.90	35.26
0.60	0.673	9.44	2.00	11.44	472.00	300.00	772.00	8.94	23.95	32.88
0.70	0.729	8.41	1.79	10.20	420.00	269.00	689.00	10.51	21.40	31.91
0.80	0.753	7.38	1.65	9.04	369.00	248.00	617.00	11.54	19.73	31.27
0.90	0.796	6.75	1.52	8.27	338.00	227.00	565.00	12.66	18.12	30.78
1.00	0.792	6.09	1.43	7.52	304.00	215.00	519.00	13.58	17.07	30.65
1.10	0.756	5.36	1.39	6.75	268.00	209.00	477.00	14.02	16.60	30.62
1.20	0.774	4.96	1.32	6.28	248.00	197.00	445.00	14.89	15.74	30.63
1.30	0.770	4.58	1.27	5.85	229.00	191.00	420.00	16.59	15.17	31.76
1.40	0.757	4.21	1.24	5.45	210.00	185.00	396.00	17.83	14.79	32.62
1.50	0.852	4.22	1.12	5.34	211.00	168.00	379.00	20.36	13.41	33.77
1.60	0.738	3.64	1.19	4.82	182.00	178.00	360.00	20.29	14.20	34.49
1.70	0.651	3.22	1.27	4.49	161.00	190.00	351.00	20.61	15.16	35.78

W : น้ำหนัก, C : ราคา, L : กำลังไฟฟ้าสูญเสีย, CORE : แกนเหล็ก, CU : ลวดทองแดง TOTAL : รวม

ก็จะทำให้น้ำหนักและราคาโดยรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าลดลงแต่ค่าการสูญเสียทางไฟฟ้าโดยรวมนั้นจะมากขึ้นหรือน้อยลงเมื่อค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นนั้นก็ขึ้นอยู่กับว่าโปรแกรมสามารถลดค่าการสูญเสียต่างๆของหม้อแปลงไฟฟ้าได้เป็นอัตราส่วนที่มากกว่าหรือน้อยกว่าค่าความสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนักของแกนเหล็กที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าการสูญเสียโดยรวมที่น้อยที่สุดจึงมีเพียงค่าเดียวคือที่ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เหมาะสม

การลดลงของน้ำหนักของแกนเหล็กพิจารณาได้จากสมการของโวลต์ต่อรอบ สมการ(4-2) คือ  $V/N = 4.44 f(s.f.)B_{MAX}A_C$  ถ้าหากพิจารณาที่ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่พิกัดเดียวกันและวัสดุประสงค์ในการออกแบบเดียวกันนั้น จากสมการถ้าหาก  $B_{MAX}$  เพิ่มขึ้น แต่ค่าของ  $V/N$  นั้นเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นค่าที่จะลดลงในสมการคือค่าพื้นที่หน้าตัด  $A_C$  ซึ่งทำให้น้ำหนักของแกนเหล็กนั้นลดลงด้วย การที่น้ำหนักจะลดลงเล็กน้อยเพียงใด หรืออาจจะไม่ลดลงเลยนั้นก็ขึ้นอยู่กับว่าการลดลงของพื้นที่หน้าตัด  $A_C$  นั้นมีการปรับขนาดแกนเหล็ก  $2E$  และ  $D$  เป็นอย่างไร เพราะจากที่

ได้พิสูจน์ในตารางที่ 4.1 ที่พื้นที่หน้าตัด  $A_C$  เกี่ยวกับการปรับขนาด  $2E$  และ  $D$  ต่างกันจะทำให้ ปริมาตร

**ตาราง 4.9** ผลการเปลี่ยนแปลง  $B_{MAX}$  ของหม้อแปลงแบบน้ำหนักรวมและความสูญเสียทางไฟฟ้าในอ้อย 400 VA 220/110 โวลต์

$B_{MAX}$	V/N	$W_{CORE}$	$W_{CU}$	$W_{TOTAL}$	$C_{CORE}$	$C_{CU}$	$C_{TOTAL}$	$L_{CORE}$	$L_{CU}$	$L_{TOTAL}$
0.50	0.352	8.30	3.06	11.36	415.00	459.00	874.00	5.81	36.55	42.36
0.60	0.496	8.20	2.26	10.47	410.00	340.00	750.00	7.77	27.02	34.79
0.70	0.602	7.51	1.94	9.44	375.00	290.00	666.00	9.38	23.10	32.48
0.80	0.658	7.04	1.72	8.76	352.00	257.00	609.00	11.01	20.51	31.52
0.90	0.666	6.15	1.62	7.78	308.00	244.00	551.00	11.54	19.43	30.97
1.00	0.671	5.58	1.54	7.12	279.00	231.00	510.00	12.44	18.37	30.82
1.10	0.732	5.27	1.41	6.68	264.00	212.00	475.00	13.78	16.85	30.64
1.20	0.758	4.97	1.32	6.30	249.00	198.00	447.00	14.92	15.80	30.72
1.30	0.706	4.38	1.33	5.71	219.00	200.00	419.00	15.88	15.89	31.78
1.40	0.620	3.86	1.40	5.27	193.00	211.00	404.00	16.36	16.76	33.13
1.50	0.680	3.72	1.29	5.01	186.00	193.00	379.00	17.97	15.37	33.34
1.60	0.642	3.39	1.31	4.70	170.00	196.00	366.00	18.95	15.64	34.59
1.70	0.704	3.34	1.20	4.54	167.00	179.00	347.00	21.40	14.31	35.71

W : น้ำหนัก, C : ราคา, L : กำลังไฟฟ้าสูญเสีย, CORE : แกนเหล็ก, CU : ลวดทองแดง TOTAL : รวม

ต่างกันซึ่งส่งผลให้น้ำหนักต่างกัน การที่จะปรับขนาด  $2E$  และ  $D$  ใดๆก็ขึ้นอยู่กับพื้นที่ที่ขดลวด ต้องการและวัตถุประสงค์ของการออกแบบ

ดังนั้นในกรออกแบบในวัตถุประสงค์ต่างกันเมื่อค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก เพิ่มขึ้นแล้วแนวโน้มของการออกแบบพอสรุปได้ดังนี้

#### 1. การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ น้ำหนักรวมน้อย

- การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าตามวัตถุประสงค์แบบนี้ขนาดของแกนเหล็ก  $2E$  และ  $D$  จะ

เป็นในลักษณะที่ ขนาด  $2E$  มากกว่า  $D$  เพราะเป้าหมายต้องการให้น้ำหนักรวมน้อยที่สุด การออกแบบจะเน้นในการลดน้ำหนักเหล็กให้มากและใช้ส่วนที่เป็นขดลวดมาทดแทน พิจารณาจากสมการ (4-2) เป็นสมการของโวลต์ต่อรอบโดยด้านขวามือเป็นส่วนของแกนเหล็ก และด้านซ้ายมือจะเป็น ส่วนของขดลวด ถ้าหากการออกแบบต้องพยายามลดน้ำหนักเหล็กให้มาก ฉะนั้นด้านซ้ายของสมการ

ที่เป็น โวลต์ต่อรอบจะมีค่าต่ำ ดังนั้นการออกแบบในวัตถุประสงคนี้อาจของ โวลต์ต่อรอบจะมีค่าต่ำกว่าการออกแบบในลักษณะอื่นๆ และก็จะทำให้ใช้จำนวนรอบของขดลวดมากด้วยจึงเป็นเหตุผลให้ขนาดของ  $2E$  มากกว่า  $D$

เมื่อค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นจากตาราง 4.ก และตาราง 4.ข จะเห็นว่าโปรแกรมจะลดขนาด  $A_c$  ลงแต่ก็ไม่เสมอไป ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับจุดเกิดการอพติไมซ์ แต่ส่วนมากพื้นที่หน้าตัดจะลดลง การเปลี่ยนแปลงของขนาด  $2E$  จะลดลงแต่ไม่มากนักเพราะจำนวนรอบของขดลวดบังคับอยู่ แต่ส่วนที่ลดลงคือความหนา  $D$  แต่จะไม่เห็นความแตกต่างมากนัก เพราะเดิมพื้นที่หน้าตัดก็น้อยอยู่แล้ว

- เมื่อค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้น แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของโวลต์ต่อรอบจะเพิ่มขึ้นเพราะจากการออกแบบนั้นพยายามลดพื้นที่หน้าตัดลง แต่การลดลงของพื้นที่หน้าตัดเป็นส่วนที่น้อยกว่าการเพิ่มขึ้นของ  $B_{MAX}$

- การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักของแกนเหล็กจะลดลงตามขนาด  $A_c$  ที่ลดลงเมื่อค่า  $B_{MAX}$  เพิ่มขึ้น เพราะการที่พื้นที่หน้าตัดลดลงทำให้ปริมาตรลดลงและน้ำหนักแกนเหล็กก็ลดลงด้วย

- น้ำหนักของขดลวดจะมีแนวโน้มที่ลดลงเรื่อยๆ เมื่อความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้น เพราะหากพื้นที่หน้าตัดลดลงตามขนาดของ  $2E$  และ  $D$  แล้ว จะทำให้ความยาวเฉลี่ยต่อรอบลดลง และการเพิ่มขึ้นของโวลต์ต่อรอบไม่มากนักทำให้จำนวนรอบไม่แตกต่างกันมากดังนั้นน้ำหนักของขดลวดจึงลดลง

## 2. การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ ราคาต่ำ

การออกแบบตามวัตถุประสงค์แบบนี้อยู่ในข้อกำหนดความเป็นจริงที่ว่าราคาของลวดทองแดงต่อกิโลกรัมจะเป็นอัตราส่วนที่มากกว่า 2 เท่าของราคาของแกนเหล็กต่อกิโลกรัม

- เนื่องจากการออกแบบตามวัตถุประสงค์แบบนี้จะมีขนาดแกนเหล็ก  $2E$  น้อยกว่า  $D$  เพราะการออกแบบจะเน้นไปที่การลดราคาของขดลวดซึ่งมีราคาต่อกิโลกรัมที่แพงกว่าราคาของแกนเหล็ก ดังนั้นการออกแบบจะใช้ปริมาณของลวดทองแดงน้อย ดังนั้นแกนเหล็กที่ออกแบบจะออกแบบใช้แกนเหล็กที่มีพื้นที่ลงขดลวดน้อยคือเลือกขนาด  $2E$  ให้เล็กลง

เมื่อค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้น จากสมการที่ (4-2) ได้สมการของโวลต์ต่อรอบ คือ  $V/N = 4.44f(s.f.)B_{MAX}A_c$  โดยการออกแบบจะให้โวลต์ต่อรอบให้สูงขึ้นเพื่อที่จะให้ใช้จำนวนรอบขดลวดลดลง เพื่อที่จะทำให้น้ำหนักขดลวดลดลงและทำให้ราคาขดลวดซึ่งแพงกว่านั้นลดลง แต่การเพิ่มขึ้นของโวลต์ต่อรอบเป็นอัตราส่วนที่น้อยกว่าการเพิ่มขึ้นของ  $B_{MAX}$  ดังนั้น  $A_c$  จะมี

แนวโน้มน้ำที่ลดลง และขนาดของ  $2E$  และ  $D$  จะลดลงตามพื้นที่หน้าตัด  $A_C$  แต่ขนาดของ  $2E$  จะน้อยกว่า  $D$  ตามเหตุผลดังที่กล่าวมาข้างต้น

- เมื่อค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้น การออกแบบจะลดขนาดแกนเหล็ก  $2E$  และ  $D$  ลงเพื่อลดความยาวลวดและน้ำหนักเหล็ก จากสมการ(4-2) โวลต์ต่อรอบจะเพิ่มขึ้นเพราะการลดลงของ  $A_C$  เป็นอัตราส่วนที่น้อยกว่าการเพิ่มขึ้นของ  $B_{MAX}$

- เมื่อ  $B_{MAX}$  เพิ่มขึ้นขนาดของพื้นที่หน้าตัดมีแนวโน้มน้ำที่ลดลงดังนั้นน้ำหนักของแกนเหล็กลดลงแน่นอน ทำให้ราคาของแกนเหล็กลดลงตามไปด้วย และการออกแบบได้ขนาดของแกนเหล็กที่  $2E$  น้อยกว่า  $D$  อยู่ตลอดการเพิ่มขึ้นของค่า  $B_{MAX}$  และเนื่องจากโวลต์ต่อรอบเพิ่มขึ้นทำให้จำนวนรอบลดลง ดังนั้นก็ทำให้ราคาของขดลวดลดลงได้มากตามน้ำหนักของลวดทองแดงที่ลดลงจากการลดลงของราคาแกนเหล็กและราคาขดลวดที่ลดลงทั้งคู่ทำให้ราคามีแนวโน้มที่ต่ำลงเรื่อยๆ เมื่อค่าความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้น

### 3. การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ กำลังไฟฟ้าสูญเสียน้อย

เนื่องจากการออกแบบตามวัตถุประสงค์นี้กำลังไฟฟ้าสูญเสียส่วนใหญ่จะอยู่ที่  $I^2R$  ดังนั้นเป้าหมายการออกแบบจะลดปริมาณของลวดทองแดงที่ใช้ ซึ่งเหมือนกับการออกแบบ แบบราคารวมต่ำที่มีราคาของลวดทองแดงมากกว่าราคาเหล็กอยู่มากกว่า 2 เท่า ดังนั้นผลของน้ำหนักและราคาที่ได้จึงคล้ายกัน จะไม่ขอกกล่าวซ้ำ

- เมื่อค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำหนักของลวดทองแดงลดลง ดังนั้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดจาก  $I^2R$  จะลดลงตามปริมาณขดลวดที่ลดลง สำหรับน้ำหนักแกนเหล็กก็ลดลงตามค่า  $B_{MAX}$  ที่เพิ่มขึ้น แต่กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นที่แกนเหล็กนั้นคิดตามความสูญเสียทางไฟฟ้าต่อกิโลกรัม ซึ่งค่า  $B_{MAX}$  เพิ่มขึ้นมีค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างไม่เป็นเชิงเส้น แต่จะเพิ่มขึ้นในลักษณะฟังก์ชันลอกล็อก ดังนั้นถึงแม้ว่าน้ำหนักแกนเหล็กจะลดลง(ลดลงในอัตราที่น้อยกว่าการเพิ่มขึ้นของความสูญเสียต่อกิโลกรัม) แต่ความสูญเสียทางไฟฟ้าต่อกิโลกรัมเพิ่มขึ้นอย่างมากทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นที่แกนเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่  $B_{MAX}$  ลดลง กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมที่เกิดขึ้นคือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กรวมกับกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวด ซึ่งจะมีที่ค่า  $B_{MAX}$  ค่าหนึ่งที่ทำให้กำลังไฟฟ้ามามีค่าต่ำกว่าค่าอื่นๆ

### 4. การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ น้ำหนักและกำลังไฟฟ้าสูญเสียน้อย

การออกแบบหม้อแปลงตามวัตถุประสงค์นี้ต้องการทำให้น้ำหนักรวมที่เกิดขึ้นน้อยที่สุด และต้องมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมน้อยที่สุด เมื่อค่า  $B_{MAX}$  เพิ่มขึ้นน้ำหนักรวมมีแนวโน้มที่ลดลง

ตลอด แต่ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจะน้อยที่สุดที่  $B_{MAX}$  ค่าหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นจุดที่เหมาะสมในการเลือกขนาด  $B_{MAX}$  ควรเป็นจุดที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียน้อยที่สุด

ดังนั้นผลของ  $B_{MAX}$  ที่เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเกิดผลคล้ายเดียวกับการออกแบบ แบบน้ำหนักรวมเบาสุด และการเปลี่ยนแปลงของโวลต์ต่อรอบและกำลังไฟฟ้าสูญเสียก็คล้ายกับการออกแบบ แบบกำลังไฟฟ้าสูญเสียน้อย

## บทที่ 5

### การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

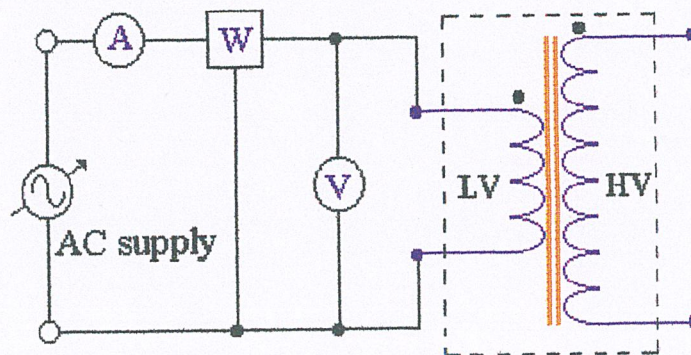
ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าตัวต้นแบบที่ได้สร้างขึ้นจริงโดยใช้ข้อมูลจากโปรแกรม เพื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการออกแบบโดยโปรแกรมและวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งมีการทดสอบหลายๆอย่างและแต่ละอย่างก็มีจุดประสงค์และวิธีการทดสอบที่แตกต่างกันดังนี้

#### 5.1 การทดสอบหาวจรเสมือนของหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer Equivalent Circuit Test)

การทดสอบหาวจรเสมือนของหม้อแปลงไฟฟ้านั้น ก็เพื่อที่จะทำให้สามารถคำนวณหา กำลังไฟฟ้าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เต็มพิกัด แรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อม(Voltage Drop)เนื่องจากอิมพีแดนซ์(ความต้านทานสมมูลย์และความต้านทานเหนี่ยวนำสมมูลย์)ของขดลวด(Voltage Regulation) กำลังไฟฟ้าที่ต้องใช้ กำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกไปและอื่นๆได้อีกตามต้องการ ซึ่งมีการทดสอบอยู่ 2 อย่างเพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งตัวดังนี้

##### 5.1.1 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเปิดวงจร (Open Circuit Test)

การทดสอบแบบเปิดวงจรหรืออาจเรียกว่าการทดสอบแบบไร้ภาระไฟฟ้า(No-Load Test) จาก การทดสอบนี้จะจะทำให้ทราบถึงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก ทราบค่ากระแสไฟฟ้าในขณะที่ไม่ต้องจ่ายภาระซึ่งเป็นกระแสกระตุ้นของหม้อแปลง ( $I_0$ ) และหามุมต่างเฟสระหว่างกระแสกระตุ้นและแรงดันไฟฟ้า ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ใช้หาค่าความต้านทานเสมือนในแกนเหล็ก( $R_C$ )



รูปที่ 5.1 วงจรการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเปิดวงจร

และความต้านทานเหนี่ยวนำในแกนเหล็ก( $X_M$ )ได้ โดยการทดสอบจะเปิดวงจรทางด้านแรงดันสูง (High Voltage)และป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเข้าทางด้านแรงดันต่ำ(Low Voltage) วงจรการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.1 โดยเครื่องมือวัดจะอยู่ทางด้านแรงดันต่ำซึ่งเป็นด้านทดสอบ

การทดสอบทำได้โดยปรับค่าแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าที่ด้านทดสอบจนกระทั่งถึงค่าพิกัดแรงดันไฟฟ้าที่ด้านแรงดันต่ำ ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าในหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีค่าประมาณ 3-5% ของพิกัดกระแสไฟฟ้าทำการบันทึกข้อมูลที่ประกอบด้วย แรงดันไฟฟ้าที่พิกัดขณะไร้อภาระ  $V_{OC}$  , กระแสกระตุ้น  $I_{OC}$  และกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แกนเหล็ก  $W_{OC}$  นำข้อมูลเหล่านี้มาคำนวณหาค่า  $R_C$  และ  $jX_M$  ได้ดังนี้

$$\theta_{OC} = \cos^{-1} \left[ \frac{W_{OC}}{V_{OC} I_{OC}} \right] \tag{5-1}$$

$$I_{C,L} = I_{OC} \cos \theta_{OC} \tag{5-2}$$

$$I_{M,L} = I_{OC} \sin \theta_{OC} \tag{5-3}$$

$$R_{C,L} = \frac{V_{OC}}{I_{C,L}} \tag{5-4}$$

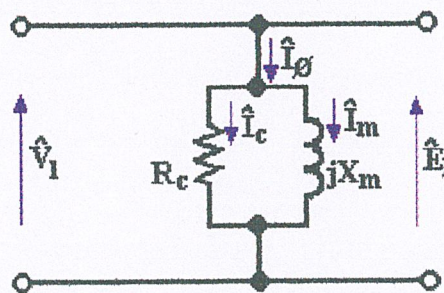
$$X_{M,L} = \frac{V_{OC}}{I_{M,L}} \tag{5-5}$$

และเมื่อย้ายข้างพารามิเตอร์มาอยู่ทางด้านแรงดันสูงจากสมการข้างล่างนี้

$$R_{C,H} = a^2 R_{C,L} \tag{5-6}$$

$$X_{M,H} = a^2 X_{M,L} \tag{5-7}$$

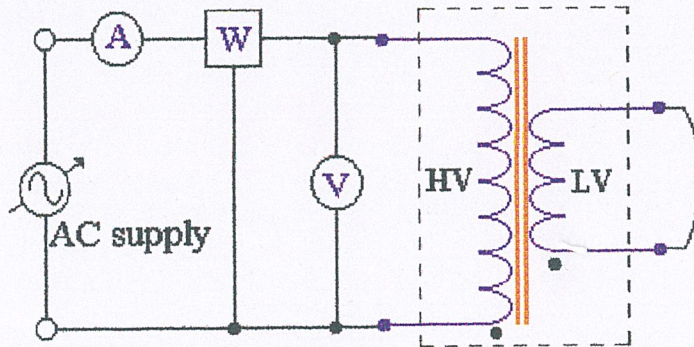
ซึ่งจะเขียนเป็นวงจรสมมูลย์จากพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง ดังรูปที่ 5.2 ซึ่งเป็นวงจรสมมูลย์ทั้งหมดที่คิดทางด้านศักดาไฟฟ้าต่ำเท่านั้น



รูป 5.2 วงจรสมมูลย์ที่ได้จากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเปิดวงจร

### 5.1.2 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบลัดวงจร (Short Circuit Test)

การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบลัดวงจรนั้น ทำให้ทราบค่าอิมพีแดนซ์สมมูล  $Z_{eq}$  ค่าความต้านทานเหนี่ยวนำสมมูล (Leakage reactance)  $X_{eq}$  ความต้านทานสมมูล  $R_{eq}$  ซึ่งค่าจากการทดลองจะทราบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียความต้านทานของขดลวดทองแดง (Copper loss) ที่พิกัดภาระไฟฟ้า อีกทั้งยังสามารถคำนวณหาโวลต์เตจเรกูเลชัน (Voltage regulation) ของหม้อแปลงไฟฟ้าได้จากการที่ทราบค่าอิมพีแดนซ์สมมูลทำให้รู้ว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าหายไปเท่าใด โดยการทดสอบจะลัดวงจรทางด้านแรงดันต่ำ โดยให้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับและเครื่องมือวัดอยู่ทางด้านแรงดันสูง วิธีการทดสอบทำได้โดยการลัดวงจรขดลวดทางด้านศักดาไฟฟ้าแรงดันต่ำ และป้อนไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายที่สามารถปรับแรงดันไฟฟ้าได้ โดยค่อยๆปรับแรงดันไฟฟ้าขึ้นจนมีกระแสไหลเท่ากับพิกัดกระแสของด้านที่ทำการทดสอบ (ด้านแรงดันสูง) วงจรการทดสอบแสดงในรูปที่ 5-3 แล้วบันทึกข้อมูล แรงดันขณะทดสอบแบบลัดวงจร  $V_{sc}$  , กระแสขณะทดสอบแบบลัดวงจร  $I_{sc}$  และกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวดทองแดง  $W_{sc}$



รูป 5.3 วงจรการทดลองหม้อแปลงไฟฟ้าแบบลัดวงจร

ในการทดสอบแบบลัดวงจร จะพบว่าศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้าทางด้านแรงดันสูงประมาณ 2-12% ของพิกัดแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าตัวต้นแบบ (ที่ทำการทดสอบ) ทำให้คิดว่ากระแสกระตุ้นขณะทำการลัดวงจรมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับพิกัดกระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำการทดสอบ ดังนั้นการลัดวงจรจึงทำให้สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์อนุกรม (Series impedance) ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

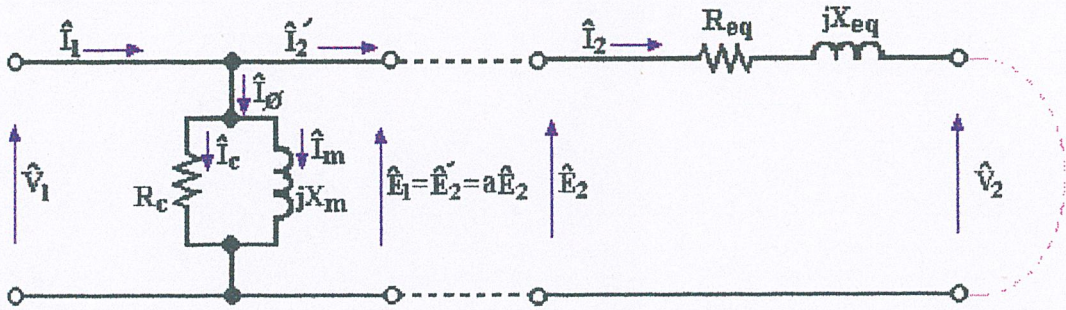
$$\theta_{sc} = \cos^{-1} \left[ \frac{W_{sc}}{V_{sc} I_{sc}} \right] \quad (5-8)$$

$$Z_{eq,H} = \frac{|V_{sc}|}{|I_{sc}|} \angle \theta_{sc} \quad (5-9)$$

$$R_{eq,H} = |Z_{eq,H}| \cos \theta_{SC} , R_{eq,L} = \frac{1}{a^2} R_{eq,H} \tag{5-10}$$

$$X_{eq} = |Z_{eq,H}| \sin \theta_{SC} , X_{eq,L} = \frac{1}{a^2} X_{eq,H} \tag{5-11}$$

เมื่อทำการทดสอบแบบเปิดวงจรและทดสอบแบบลัดวงจรเสร็จแล้วทำให้สามารถรู้ค่าการสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าและสามารถเขียนวงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งตัวได้ดังรูปที่ 5.4



รูป 5.4 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบเปิดวงจรและการทดสอบแบบลัดวงจร

### 5.1.3 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ

- หม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำหนักและการสูญเสียรวมน้อย พิกัด 450VA, 220/110 โวลต์,  
 $B_{MAX} = 0.8$  เทสลา

ตาราง 5.1 ผลการทดสอบแบบเปิดวงจรและการทดสอบแบบลัดวงจร

	แรงดัน	กระแส	กำลังไฟฟ้า	มุมต่างเฟส
MULTI DESIGN 450 VA 220/110V B=0.8T				
การทดสอบแบบเปิดวงจร	110	0.158	11.4	49.01
การทดสอบแบบลัดวงจร	10.94	2.045	21.0	20.17

การทดสอบเปิดวงจร (แสดงการคำนวณ)

$$\theta_{oc} = \cos^{-1} \left[ \frac{11.4}{110 \times 0.158} \right] = 49.01^\circ$$

$$R_{C,L} = \frac{V_{OC}}{I_{OC} \cos \theta_{OC}} = \frac{110}{0.158 \cos 49.01^\circ} = 1061.402 \quad \Omega$$

$$R_{C,H} = a^2 R_{C,L} = 2^2 \times 1061.402 = 4245.608 \quad \Omega$$

$$X_{M,L} = \frac{V_{OC}}{I_{OC} \sin \theta_{OC}} = \frac{110}{0.158 \sin 49.01^\circ} = 922.338 \quad \Omega$$

$$X_{M,H} = a^2 X_{M,L} = 2^2 \times 922.338 = 3689.352 \quad \Omega$$

การทดสอบลัดวงจร (แสดงการคำนวณ)

$$\theta_{SC} = \cos^{-1} \left[ \frac{P_{SC}}{V_{SC} I_{SC}} \right] = \cos^{-1} \left[ \frac{21}{10.94 \times 2.045} \right] = 20.17^\circ$$

$$Z_{eq,H} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} = \frac{10.94}{2.045} = 5.35 \quad \Omega$$

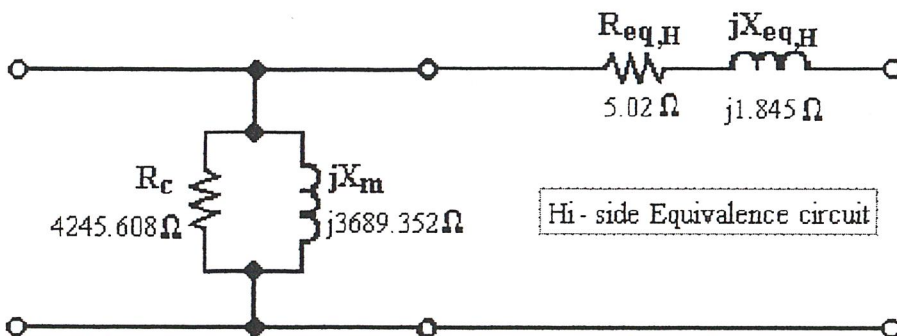
$$R_{eq,H} = \frac{P_{SC}}{I_{SC}^2} = \frac{21}{2.045^2} = 5.02 \quad \Omega$$

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq,H}^2 - R_{eq,H}^2} = \sqrt{5.35^2 - 5.02^2} = 1.845 \quad \Omega$$

$$R_{eq,L} = \frac{1}{a^2} R_{eq,H} = \frac{1}{2^2} \times 5.02 = 1.255 \quad \Omega$$

$$X_{eq,L} = \frac{1}{a^2} X_{eq,H} = \frac{1}{2^2} \times 1.845 = 0.46125 \quad \Omega$$

นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้มาเขียนเป็นวงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงไฟฟ้าตัวนี้ทางด้านแรงดันสูง โดยมีอัตราส่วนหม้อแปลงเท่ากับ 220:110 ได้ดังรูป 5.5



รูป 5.5 วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงไฟฟ้า Multi Design 450VA, 220/110 โวลต์  $B_{MAX} = 0.8$  เทสลา

จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบทำให้ทราบว่าเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าตัวนี้จ่ายกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่พิกัดจะทำให้เกิดการสูญเสียจากขดลวดทองแดงมีค่าเท่ากับ 21 วัตต์ และการสูญเสียในแกนเหล็ก 11.4 วัตต์

2. หม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำหนัและการสูญเสียรวมน้อย พิกัด 450VA, 220/110 โวลต์,

$$B_{MAX}=1.0 \text{ เทสลา}$$

จากการทดสอบ ได้ข้อมูลต่างๆดังนี้

ตาราง 5.2 ผลการทดสอบแบบเปิดวงจรและการทดสอบแบบลัดวงจร

	แรงดัน	กระแส	กำลังไฟฟ้า	มุมต่างเฟส
MULTI DESIGN 450 VA 220/110V B=1.0T				
การทดสอบแบบเปิดวงจร	110	0.256	13.8	60.66
การทดสอบแบบลัดวงจร	8.95	2.045	17.6	15.93

คำนวณหาค่าวงจรสมมูลย์จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ ได้ค่าต่างๆดังนี้

ตาราง 5.3 ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากการทดสอบแบบเปิดวงจรและการทดสอบแบบลัดวงจร

	ด้านแรงดันต่ำ	ด้านแรงดันสูง
$R_c$ (โอห์ม)	876.929	3507.716
$X_M$ (โอห์ม)	492.915	1971.660
$R_{eq}$ (โอห์ม)	1.043	4.172
$X_{eq}$ (โอห์ม)	0.331	1.323

หม้อแปลงไฟฟ้าตัวนี้มีการสูญเสียจากแกนเหล็กเท่ากับ 13.8 วัตต์และการสูญเสียจากขดลวดทองแดงเท่ากับ 17.6 วัตต์เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าตัวนี้ได้รับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่พิกัด

3. หม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำหนัและการสูญเสียรวมน้อย พิกัด 450VA, 220/110 โวลต์,

$$B_{MAX}= 1.4 \text{ เทสลา}$$

จากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าตัวต้นแบบตัวนี้ด้วยการทดสอบแบบเปิดวงจรและการทดสอบแบบลัดวงจรได้ข้อมูลจากการทดสอบดังตารางที่ 5.4 และคำนวณหาพารามิเตอร์ของวงจรเสมือนได้ดังตารางที่ 5.5

ซึ่งเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าตัวนี้ได้รับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่พิกัดจะทำให้เกิดการสูญเสียจากแกนเหล็กเท่ากับ 16.2 วัตต์ และการสูญเสียจากขดลวดทองแดงเท่ากับ 15.6 วัตต์

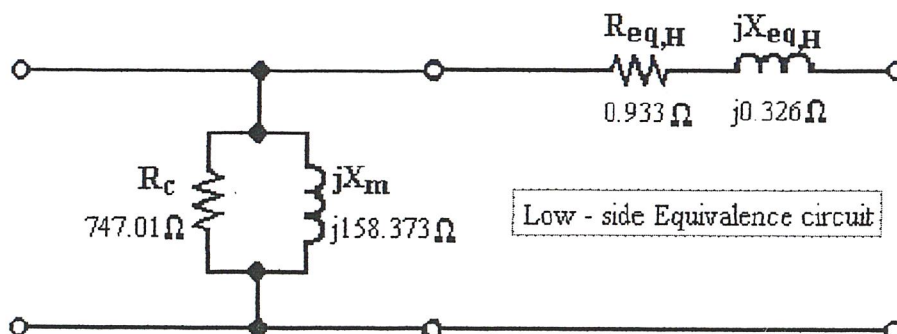
ตาราง 5.4 ผลการทดสอบแบบเปิดวงจรและการทดสอบแบบลัดวงจร

	แรงดัน	กระแส	กำลังไฟฟ้า	มุมต่างเฟส
MULTI DESIGN 450 VA 220/110V B=1.4T				
การทดสอบแบบเปิดวงจร	110	0.710	16.2	78.03
การทดสอบแบบลัดวงจร	8.08	2.045	15.6	19.25

ตาราง 5.5 ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากการทดสอบแบบเปิดวงจรและการทดสอบแบบลัดวงจร

	ด้านแรงดันต่ำ	ด้านแรงดันสูง
$R_c$ (โอห์ม)	747.010	2988.040
$X_M$ (โอห์ม)	158.373	633.492
$R_{eq}$ (โอห์ม)	0.933	3.730
$X_{eq}$ (โอห์ม)	0.326	1.303

และเขียนเป็นวงจรสมมูลย์โดยมีพารามิเตอร์อยู่ทางด้านแรงดันต่ำได้ดังรูปที่ 5.6



รูป 5.6 วงจรสมมูลย์ทางด้านแรงดันต่ำของ Multi Design 450VA, 220/110 โวลต์,  $B_{MAX}=1.4$  เทสลา

4. หม้อแปลงไฟฟ้าแบบนำหนักและการสูญเสียรวมน้อย พิกัด 250VA, 220/110 โวลต์,

$$B_{MAX}=1.4 \text{ เทสลา}$$

จากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าได้ข้อมูลจากการทดสอบแบบเปิดวงจร และจากการทดสอบแบบลัดวงจร ได้ข้อมูลต่างๆ ดังในตารางที่ 5.6 และนำไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรเสมือนได้ค่าต่างๆ ดังตารางที่ 5.7

ตาราง 5.6 ผลการทดสอบแบบเปิดวงจรและการทดสอบแบบลัดวงจร

	แรงดัน	กระแส	กำลังไฟฟ้า	มุมต่างเฟส
MULTI DESIGN 250 VA 220/110V B=1.4T				
การทดสอบแบบเปิดวงจร	110	0.409	10.2	76.90
การทดสอบแบบลัดวงจร	9.82	1.136	10.5	19.74

ตาราง 5.7 ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากการทดสอบแบบเปิดวงจรและการทดสอบแบบลัดวงจร

	ด้านแรงดันต่ำ	ด้านแรงดันสูง
$R_C$ (โอห์ม)	1186.619	4746.476
$X_M$ (โอห์ม)	276.135	1104.540
$R_{eq}$ (โอห์ม)	2.034	8.136
$X_{eq}$ (โอห์ม)	0.730	2.920

ซึ่งจากการทดสอบทำให้ทราบว่าเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าตัวนี้ได้รับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่พิกัดจะมีการสูญเสียที่แกนเหล็กเท่ากับ 10.2 วัตต์ และการสูญเสียที่ขดลวดทองแดงเท่ากับ 10.90 วัตต์นั่นเอง

5. หม้อแปลงไฟฟ้าแบบนำหนักรวมน้อย พิกัด 450VA, 220/110 โวลต์,  $B_{MAX}=1.4$  เทสลา

จากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าได้ผลการทดสอบแบบเปิดวงจรและลัดวงจรได้ดังนี้

ตาราง 5.8 ผลการทดสอบแบบเปิดวงจรและการทดสอบแบบลัดวงจร

	แรงดัน	กระแส	กำลังไฟฟ้า	มุมต่างเฟส
MINIMUM WEIGHT 450 VA 220/110V B=1.4T				
การทดสอบแบบเปิดวงจร	110	0.342	12.3	70.92
การทดสอบแบบลัดวงจร	12.09	2.045	22.2	26.12

และนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาคำนวณหาพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลย์ได้ค่าต่างๆดังในตารางที่ 5.9 ซึ่งเป็นค่าของ  $R_C$ ,  $X_M$ ,  $R_{eq}$ ,  $X_{eq}$  ของวงจรสมมูลย์ทั้งทางด้านแรงดันต่ำและทางด้านแรงดันสูง ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งสองด้านต่างกันด้วยอัตราส่วนหม้อแปลงกำลังสอง

ตาราง 5.9 ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากการทดสอบแบบเปิดวงจรและการทดสอบแบบลัดวงจร

	ด้านแรงดันต่ำ	ด้านแรงดันสูง
$R_C$ (โอห์ม)	983.938	3935.752
$X_M$ (โอห์ม)	340.334	1361.336
$R_{eq}$ (โอห์ม)	1.327	5.308
$X_{eq}$ (โอห์ม)	0.651	2.603

ซึ่งเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าให้หม้อแปลงไฟฟ้าตัวนี้จะเกิดการสูญเสียในแกนเหล็กเท่ากับ 12.3 วัตต์และการสูญเสียที่ขดลวดทองแดงเท่ากับ 22.2 วัตต์

6. หม้อแปลงไฟฟ้าแบบการสูญเสียรวมน้อย พิกัด 450VA, 220/110 โวลต์,  $B_{MAX}=1.4$  เทสลา

ตาราง 5.10 ผลการทดสอบแบบเปิดวงจรและการทดสอบแบบลัดวงจร

	แรงดัน	กระแส	กำลังไฟฟ้า	มุมต่างเฟส
MINIMUM LOSS 450 VA 220/110V B=1.4T				
การทดสอบแบบเปิดวงจร	110	0.780	17.5	78.23
การทดสอบแบบลัดวงจร	7.97	2.045	15.5	18.01

ตาราง 5.11 ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากการทดสอบแบบเปิดวงจรและการทดสอบแบบลัดวงจร

	ด้านแรงดันต่ำ	ด้านแรงดันสูง
$R_C$ (โอห์ม)	691.358	2765.432
$X_M$ (โอห์ม)	144.055	576.220
$Req$ (โอห์ม)	0.927	3.706
$Xeq$ (โอห์ม)	0.301	1.205

จากการทดสอบได้ข้อมูลจากการทดสอบดังตารางที่ 5.10 และจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบนำมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรสมมุทธ์ได้ดังตารางที่ 5.11 ที่เป็นพารามิเตอร์ด้านแรงดันสูงและด้านแรงดันต่ำ

และจากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าตัวนี้เมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่พิกัดจะมีการสูญเสียในแกนเหล็กเท่ากับ 17.5วัตต์และการสูญเสียในขดลวดทองแดงเท่ากับ 15.5วัตต์

## 5.2 เปรียบเทียบข้อมูลจากการออกแบบกับหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ

### 5.2.1 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำหนักรวมและการสูญเสียรวมน้อย

พิกัด 250 VA, 220/110 โวลต์,  $B_{MAX}=1.4$  เทสลา

#### 5.2.1.1. เปรียบเทียบข้อมูล จากการออกแบบกับ การปรับขนาดแกนมาตรฐาน

จากตารางที่ 5.12 สำหรับค่าที่ได้จากการออกแบบได้ขนาดแกนเหล็กขากลางกว้าง  $2E = 3.24$  เซนติเมตร และมีความหนา  $D = 5.02$  เซนติเมตร โดยมีพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กเท่ากับ  $A_C = 16.29$  ตารางเซนติเมตร แต่เมื่อปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐานแล้วได้ขนาดแกนเหล็กขากลางกว้างเป็น 3.20 เซนติเมตร และมีความหนา 5.09 เซนติเมตร โดยมีพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กมีค่าเท่ากับ 16.29 ตารางเซนติเมตรเท่าเดิม ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนั้นทำให้ขนาดแกนเหล็กขากลางลดลงและความหนาของแกนเหล็กจะเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาตรของแกนเหล็กลดลงส่งผลให้น้ำหนักของแกนเหล็ก(ปริมาตรแกนเหล็กคูณกับความหนาแน่นแกนเหล็ก  $7.75 \text{ g/cm}^3$ )ลดลงจาก 2.46 กิโลกรัม เป็น 2.42 กิโลกรัม

$$\text{ความหนาแน่นแกนเหล็ก } EI \quad V_{CORE} = 24DE^2 \quad (5-12)$$

$$\text{น้ำหนักแกนเหล็ก} \quad We_{CORE} = \rho_{CORE} V_{CORE} \quad (5-13)$$

ตาราง 5.12 เปรียบเทียบข้อมูลของหม้อแปลง Multi 250VA, 220/110 โวลต์,  $B_{MAX}=1.4$  เทสลา

หม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำหนัลดและความสูญเสียทางไฟฟ้ารวมน้อย			
พิกัด 250 VA 220/110 โวลต์ $B_{MAX}=1.4$ เทสลา			
	การออกแบบ	ปรับขนาดตามมาตรฐาน	พื่นหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ
$A_c$ (ซ.ม.)	16.29	16.29	15.74
2E (ซ.ม.)	3.24	3.20	3.20
D (ซ.ม.)	5.02	5.09	4.92
รอบค้ำปฐมภูมิ (รอบ)	444	444	444
รอบค้ำทุติยภูมิ (รอบ)	222	222	222
ลวดค้ำปฐมภูมิ (S.W.G.)	#22	#22	#22
ลวดค้ำทุติยภูมิ (S.W.G.)	#19	#19	#19
โวลต์ต่อรอบ (โวลต์)	0.496	0.496	0.496
น.น.แกนเหล็ก (ก.ก.)	2.46	2.42	2.34
น.น.ขดลวด (ก.ก.)	0.70	0.70	0.70
น้ำหนักรวม (ก.ก.)	3.15	3.12	3.04
ราคาแกนเหล็กEI (บาท)	123.00	121.00	117.00
ราคาลวดทองแดง (บาท)	104.00	105.00	105.00
ราคารวม (บาท)	227.00	226.00	222.00
W-core (วัตต์)	10.31	9.97	10.20
W-cu (วัตต์)	11.26	11.31	10.50
W-total (วัตต์)	21.58	21.28	20.70

$A_c$ : พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก, 2E: ขนาดขากลางแกนเหล็ก, D: ความหนาแกนเหล็ก

W-core: กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แกนเหล็ก, W-cu: กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวด, W-total: กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวม

แกนเหล็ก EI เกรด RM23 หนา 0.05 ม.ม., กระสวยรองขดลวดหนา 3.00 ม.ม.

สัมประสิทธิ์การอัดแกนเหล็ก 0.98, สัมประสิทธิ์การพันขดลวด 0.45

อุณหภูมิปรกติ 35° เซลเซียส, อุณหภูมิการทำงาน 75° เซลเซียส

โดยที่น้ำหนักของขดลวดทองแดง ( มีความยาวต่อรอบตามขนาด  $2E$  และ  $D$  ) มีค่าเปลี่ยนแปลงไปไม่มากนัก ไม่เห็นความแตกต่าง ซึ่งราคาของแกนเหล็กและราคาของขดลวดทองแดงจะขึ้นอยู่กับน้ำหนัก ( กิโลกรัม ) ที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อพิจารณาที่กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กจะขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าสูญเสียต่อกิโลกรัมที่อ่านค่าได้จากกราฟคุณสมบัติการสูญเสียในแกนเหล็ก ( ภาคผนวก ก.2 ) ซึ่งหลังการปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐานแล้วกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กลดลงจาก 10.31 วัตต์ เป็น 9.97 วัตต์ ส่วนกำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดงเมื่อปรับขนาดของแกนเหล็กมาตรฐานนั้นมีผลให้จำนวนรอบของขดลวดต่อชั้นและจำนวนชั้นเปลี่ยนแปลงไป เมื่อพันด้วยลวดเบอร์ 22 และเบอร์ 19 ( S.W.G. ) ทำให้ความยาวของขดลวดทองแดงเพิ่มขึ้นตามความยาวรอบพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก โดยเฉพาะลวดเบอร์ 22 เป็นลวดที่เส้นเล็กและมีความต้านทานในสายมากอยู่แล้ว ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นนี้ทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดงเพิ่มมากขึ้น โดยที่การเปลี่ยนแปลงความยาวของขดลวดนี้ไม่ทำให้น้ำหนักของขดลวดทองแดงเปลี่ยนแปลงไปมากนัก น้ำหนักลวดที่ได้จากการอพติไมซ์กับการปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐานจึงไม่แตกต่างกันซึ่งน้ำหนักรวมได้ค่าจากการอพติไมซ์ กับการปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐานเป็น 3.15 กิโลกรัม และ 3.12 กิโลกรัมตามลำดับ ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมจากการอพติไมซ์กับการปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐานเป็น 21.58 วัตต์ และ 21.28 วัตต์ ตามลำดับ โดยรวมแล้วค่าต่างๆ จากการปรับขนาดแกนเหล็กจะดีกว่าค่าที่ได้การอพติไมซ์ ก็เนื่องจากการอพติไมซ์ได้กำหนดให้สัมประสิทธิ์การพันขดลวด ( Window factor ) เป็น 0.45 ซึ่งทำให้แกนเหล็กต้องมีขนาดดังที่ได้จากตาราง 5.12 ตามสดมภ์แรก แต่การปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐานจะเป็นการตรวจสอบให้ขดลวดสามารถลงในช่องว่างแกนเหล็กได้ เป็นผลให้สัมประสิทธิ์การพันขดลวด ( เมื่อตรวจสอบจากโปรแกรม ) มีค่าเป็น 0.47 เป็นผลให้ขนาดแกนเหล็กลดลงทำให้น้ำหนักและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กลดลงดังกล่าวจากข้างต้น

### 5.2.1.2. เปรียบเทียบข้อมูล จากการปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐาน กับ หม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ

ข้อมูลที่ใช้ในการพันคือ ใช้ข้อมูลเมื่อปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐานแล้วในตารางที่ 5.12 สำหรับข้อมูลที่ออกแบบไว้นั้น ใช้แกนเหล็กขนาดกลางกว้าง 3.20 เซนติเมตร แกนเหล็กหนา 5.09 เซนติเมตร โดยมีพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กมีค่าเท่ากับ 16.29 ตารางเซนติเมตร จำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเป็น 444/222 รอบ แต่สำหรับการพันหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบนี้ใช้แกนเหล็กกลางขนาด 3.20 เซนติเมตร โดยมีความหนาของแกนเหล็ก ( เลือกใช้เหล็กแต่ละแผ่นหนา 0.50 มิลลิเมตร ) รวมกับค่าสัมประสิทธิ์ในการอัดแกนเหล็ก ( stacking factor ) แล้วให้ความหนา 4.92 เซนติเมตร ทำให้ได้พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กเพียง 15.74 ตารางเซนติเมตร โดยหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบมีจำนวนรอบปฐมภูมิและทุติยภูมิ 444/222 รอบ ใช้ลวดเบอร์ 22 และเบอร์ 19

(S.W.G.) พิจารณาที่น้ำหนักของแกนเหล็กและน้ำหนักของขดลวดซึ่งได้ค่าที่ใกล้เคียงกันทั้งข้อมูลจากการออกแบบ(ปรับขนาดแกนมาตรฐาน)และจากหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ เนื่องจากพันด้วยจำนวนรอบเท่าเดิม

$$\text{จากสมการของฟาราเดย์} \quad V = 4.4 f B_{MAX} (s.f.) N A_C \quad (5-14)$$

$$\text{จะได้สมการของโวลต์ต่อรอบ} \quad \frac{V}{N} = 4.44 f B_{MAX} (s.f.) A_C \quad (5-15)$$

จากการออกแบบได้ค่าโวลต์ต่อรอบเท่าเดิมคือ 0.496 โวลต์ หากพิจารณาที่สมการ(5-15)พบว่าเมื่อตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงไปคือค่าของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก  $B_{MAX}$  โดยค่าที่ใช้ในการออกแบบเท่ากับ 1.4 เทสลา เมื่อคำนวณกลับจากข้อมูลหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบจะทำให้แกนเหล็กต้องรับค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นคือมีค่าประมาณ 1.45 เทสลา ทำให้ต้องใช้กระแสกระตุ้นในตัวหม้อแปลงไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย และหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กต่อกิโลกรัมเพิ่มขึ้น(จากกราฟการสูญเสียในแกนเหล็ก ภาคผนวก ก.2) ทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กมากกว่าที่ได้ทำการออกแบบไว้เมื่อคิดตามน้ำหนักแกนเหล็ก ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบได้มาจากการทดสอบแบบเปิดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า ในกรณีเดียวกันนี้หากพิจารณาที่ค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดแกนเหล็ก ซึ่งมีข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตกำหนดไว้ว่าแผ่นเหล็กบางเกรด(GRADE) RM23 ความหนา 0.05 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดแกนเหล็กค่าสุด 0.96(การออกแบบได้กำหนดไว้ 0.98) ถ้าคิดว่าแกนเหล็กที่ได้อัดไปนั้นไม่สามารถอัดให้ได้เท่าที่ออกแบบไว้จะทำให้ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเหล็กเพิ่มขึ้นเป็น 1.48 เทสลา ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กไม่ตรงตามค่าที่ได้ออกแบบไว้ และค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กเป็นค่าที่อ่านมาจากกราฟคุณสมบัติของแกนเหล็กซึ่งเป็นลักษณะของกราฟล็อก(nonlinear Log-graph) ทำให้ค่าที่ได้จากการออกแบบนั้นเป็นค่าที่ใกล้เคียงเท่านั้น ส่วนค่าการสูญเสียในขดลวดพิจารณาได้ดังนี้ ค่าที่ได้จากการออกแบบจะกำหนดไว้ว่าชั้นหนึ่งพัน 59 รอบ จำนวน 8 ชั้นซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดคิดตามขนาดความยาวของลวด แต่การพันหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบจะมีความผิดพลาดจากการพันขดลวดทำให้ความยาวของขดลวดทองแดงมีการเปลี่ยนแปลงไปบ้าง และค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดงจากหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบเป็นค่าที่ได้จากการทดสอบแบบลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ และเนื่องจากผลของอุณหภูมิขณะที่ทดลอง(ซึ่งจากค่าที่ได้ออกแบบไว้ได้กำหนดค่าอุณหภูมิเมื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้าเต็มพิกัดมีค่าเท่ากับ  $75^{\circ}C$ ) ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ค่าของกำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดมีค่าไม่ตรงกับที่ได้ออกแบบไว้

## 5.2.2 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำหนักระบายความร้อน

พิกัด 450VA, 220/110 โวลต์,  $B_{MAX}=0.8$  เทสลา

### 5.2.2.1. เปรียบเทียบข้อมูล จากการออกแบบไมซ์ กับ การปรับขนาดแกนมาตรฐาน

ในตารางที่ 5.13 ขนาดแกนเหล็กที่ได้จากการออกแบบไมซ์ ได้ขนาดขากลางแกนเหล็ก 4.11 ซม. และแกนเหล็กหนา 8.38 ซม. ซึ่งได้พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กเท่ากับ 36.88 ตร.ซม. โดยใช้ขดลวดเบอร์ 19 และ 17 (S.W.G) จำนวนรอบด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเป็น 343/171 รอบ เนื่องจากการปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐานเป็นการปรับขนาดที่โตขึ้น ปริมาตรของแกนเหล็กจากการปรับค่าแล้วจะเพิ่มมากขึ้นจากสมการที่ (5-12)  $V_{CORE} = 24DE^2$  เป็นผลทำให้น้ำหนักของแกนเหล็กเพิ่มขึ้นตามปริมาตรที่เพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อความกว้างของขากลางแกนเหล็ก(2E) เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความหนาของแกนเหล็ก (D) ลดลง และ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก ( $A_c$ ) เท่าเดิม ซึ่งเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า ผลของการเพิ่มขึ้นของความกว้างของขากลางแกนเหล็ก(2E) ในขณะที่ความหนาของแกนเหล็ก (D) ลดลงนี้ จะทำให้ความยาวเฉลี่ยต่อรอบเมื่อปรับแกนเหล็กมาตรฐานมีความยาวลดลง ทำให้น้ำหนักของขดลวดลดลงด้วย แต่น้ำหนักรวมของการปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐานจะมากกว่าการออกแบบไมซ์ จากตาราง 5.13 การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักแกนเหล็กมากกว่าการลดลงของน้ำหนักขดลวด เนื่องจากน้ำหนักของแกนเหล็กจากการออกแบบไมซ์น้อยกว่าและน้ำหนักของลวดทองแดงมากกว่าค่าเมื่อปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐานแล้ว ดังนั้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แกนเหล็กของการออกแบบไมซ์น้อยกว่าเมื่อปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐาน และกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวดของการออกแบบไมซ์มากกว่าเมื่อปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐาน ผลรวมคือกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของการออกแบบไมซ์น้อยกว่าเมื่อปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐาน คือ 10.57 วัตต์+20.76 วัตต์ น้อยกว่า 11.42 วัตต์ + 20.60 วัตต์

ตาราง 5.13 เปรียบเทียบข้อมูลของหม้อแปลง Multi 450VA, 220/110 โวลต์,  $B_{MAX}=0.8$  เทสลา

หม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำหนักรวมและความสูญเสียทางไฟฟ้ารวมน้อย				
พิกัด 450 VA 220/110 โวลต์ $B_{MAX} = 0.8$ เทสลา				
		การออกพีคใหม่	ปรับขนาดแกนมาตรฐาน	พื้นหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ
$A_c$	(ซ.ม.)	36.88	36.88	37.52
2E	(ซ.ม.)	4.11	4.44	4.44
D	(ซ.ม.)	8.38	8.31	8.45
รอบด้านปฐมภูมิ	(รอบ)	342	342	342
รอบด้านทุติยภูมิ	(รอบ)	171	171	171
ลวดด้านปฐมภูมิ (S.W.G.)		#19	#19	#19
ลวดด้านทุติยภูมิ (S.W.G.)		#17	#17	#17
โวลต์ต่อรอบ	(โวลต์)	0.642	0.642	0.642
น.น. แกนเหล็ก	(ก.ก.)	7.05	7.05	7.05
น.น. ขดลวด	(ก.ก.)	1.58	1.57	1.59
น้ำหนักรวม	(ก.ก.)	8.62	9.18	9.34
ราคาแกนเหล็กEI	(บาท)	352.00	381.00	388.00
ราคาลวดทองแดง	(บาท)	237.00	235.00	238.00
ราคารวม	(บาท)	589.00	616.00	627.00
W-core	(วัตต์)	10.57	11.42	11.40
W-cu	(วัตต์)	20.76	20.60	21.00
W-total	(วัตต์)	31.33	32.02	32.40

$A_c$ : พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก, 2E: ขนาดขากลางแกนเหล็ก, D: ความหนาแกนเหล็ก

W-core: กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แกนเหล็ก, W-cu: กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวด, W-total: กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวม

แกนเหล็ก EI เกรด RM23 หนา 0.05 ม.ม., กระจวยรองขดลวดหนา 3.00 ม.ม.

สัมประสิทธิ์การอัดแกนเหล็ก 0.98, สัมประสิทธิ์การพันขดลวด 0.45

อุณหภูมิปรกติ 35 ° เซลเซียส, อุณหภูมิการทำงาน 75 °เซลเซียส

### 5.2.2.2. เปรียบเทียบข้อมูล จากการปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐาน กับ หม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ

ข้อมูลจากการออกแบบในการปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐาน ใช้แกนเหล็กขนาดขากลางกว้าง  $2E = 4.44$  ซ.ม. และมีความหนาของแกนเหล็ก  $D = 8.31$  ซ.ม. โดยด้านปฐมภูมิใช้ลวดเบอร์ 19 (S.W.G) จำนวน 343 รอบ และด้านทุติยภูมิใช้ลวดเบอร์ 17 (S.W.G) จำนวน 171 รอบ แต่ในการ

หม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบใช้แกนเหล็กขนาดกลาง  $2E=4.44$  ซม. และเมื่ออัดแกนเหล็กแล้วได้ความหนาของแกนเหล็ก 8.45 ซม. ซึ่งรวมค่าสัมประสิทธิ์การอัดแกนเหล็ก 0.98 แล้ว ซึ่งทำให้พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กเพิ่มมากขึ้นกว่าเดิมมากคือ มีพื้นที่ 37.52 ตร.ซม. และเมื่อค่าโวลต์ต่อรอบเท่าเดิมคือ 0.642 โวลต์ และจากสมการ(5-15) โวลต์ต่อรอบ  $\frac{V}{N} = 4.44 f B_{max} (sf) A_c$  จะเห็นได้ว่าเมื่อพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กเพิ่มมากขึ้นอย่างนี้แล้ว เมื่อคำนวณกลับเพื่อหาค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะได้ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 0.79 เทสลา ซึ่งมีค่าน้อยกว่าที่ออกแบบไว้คือ 0.8 เทสลา หากสมมติการอัดแกนเหล็กทำให้มีสัมประสิทธิ์การอัดแกนเหล็กค่าสุด เท่ากับ 0.96 ( แต่จากที่ออกแบบไว้มีค่าเท่ากับ 0.98 ) ทำให้ได้ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเท่ากับ 0.8 เทสลา เห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ดังนั้นพิจารณากราฟความสัมพันธ์ของวัตต์ต่อกิโลกรัมของแกนเหล็ก ( Core Loss curve) จากค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux density; Induction) ได้ค่าวัตต์ต่อกิโลกรัมไม่เปลี่ยนแปลง เพราะฉะนั้นค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กจากการพันจริงที่ได้จากการทดสอบแบบเปิดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบมีค่าที่ใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้เป็นอย่างมาก ส่วนกำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดงเนื่องจากความยาวของลวดทองแดงที่ใช้ในการพันหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบยาวมากกว่าที่ได้ออกแบบไว้ ดังนั้นค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดงจากหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบซึ่งเป็นค่าจากการทดสอบแบบลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบนั้นได้ค่ามากกว่าที่ออกแบบไว้เล็กน้อย ( ทั้งนี้ไม่ใช่เป็นเพราะความยาวลวดที่เพิ่มขึ้นเพียงอย่างเดียว เนื่องจากความยาวลวดที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลมากแต่ผลอย่างอื่นที่เข้ามาเกี่ยวข้องคือความผิดพลาดจากเทคนิคการทดสอบ ) สำหรับน้ำหนักของแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบจะมากกว่าที่ได้ออกแบบไว้ด้วยเพราะใช้แกนเหล็กมากกว่าที่ได้ออกแบบไว้และความยาวลวดมากกว่าที่ได้ออกแบบไว้ก็ทำให้น้ำหนักลวดมากขึ้นไปด้วย พิจารณาแล้วพบว่าในการพันจริงนั้นใช้แกนเหล็กมากกว่าที่ออกแบบไว้ประมาณสามแผ่น (RM23 หนาแผ่นละ 0.05 มม.) ซึ่งทั้งหมดที่ผ่านมาเป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการพันจริงให้ค่าไม่ตรงกับที่ออกแบบไว้แต่ค่าที่ได้คือว่าเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้อย่างมาก

### 5.2.3 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำหนักและการสูญเสียรวมน้อย

พิกัด 450VA, 220/110โวลต์,  $B_{MAX}=1.0$  เทสลา

#### 5.2.3.1 เปรียบเทียบค่า จากการออกแบบกับ การปรับขนาดแกนมาตรฐาน

จากการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าจากตาราง 5.14 ในสคัมภ์ออปติไมซ์นั้นหม้อแปลงไฟฟ้าตัวนี้ใช้โวลต์ต่อรอบ 0.764 โวลต์ ดังนั้นจำนวนรอบด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเป็น 288/144 รอบโดย

ใช้แกนเหล็กที่มีขนาดจากกลางแกนเหล็กเท่ากับ 3.70 ซม. แกนเหล็กหนาเท่ากับ 9.48 ซม. แต่เมื่อปรับค่าเข้าสู่ขนาดแกนเหล็กมาตรฐานแล้วได้ขนาดจากกลางแกนเหล็กเท่ากับ 3.80 ซม. และแกนเหล็กหนา 9.24 ซม. ซึ่งผลจากการปรับขนาดของแกนเหล็กทำให้น้ำหนักของแกนเหล็กเพิ่มขึ้น พิจารณาได้จากปริมาตรของแกนเหล็กจากสมการ(5-12) ปริมาตร  $V_{CORE}=24DE^2$  ถ้าขนาดพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กเดียวกันแล้ว หากค่าขนาดจากแกนเหล็ก  $2E$  เพิ่มขึ้น โดยที่ความหนาของแกนเหล็ก  $D$  ลดลงแล้ว ปริมาตรจะเพิ่มขึ้นและน้ำหนักก็เพิ่มขึ้นด้วย ผลของขนาดจากกลางแกนเหล็กที่กว้างขึ้นนี้ทำให้ลวดสามารถพันได้จำนวนรอบต่อชั้นมากขึ้น(แสดงในรูปที่ 5.7) จึงทำให้ความยาวเฉลี่ยต่อรอบสั้นลง ลวดที่ใช้จึงใช้สั้นกว่าซึ่งทำให้น้ำหนักของขดลวดทองแดงที่ใช้มีน้อยลงด้วย ส่วนราคาและกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แกนเหล็กและขดลวดทองแดงนั้นแปรตามน้ำหนักเหล็กและขดลวดทองแดง แต่ในการปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐานมีน้ำหนักแกนเหล็กและน้ำหนักขดลวดทองแดงมากกว่าค่าจากการออกแบบ ดังนั้นจึงทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียและราคาจากการปรับแกนเหล็กมาตรฐานมีค่าสูงกว่า( ดังตารางที่ 5.14 ในแถว *W- total* )

### 5.2.3.2 เปรียบเทียบค่าจากการปรับขนาดแกนมาตรฐาน กับ หม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ

ข้อมูลที่ใช้ในการพันหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบนี้คือ มีจำนวนรอบปฐมภูมิ 288 รอบ และด้านทุติยภูมิ 144 รอบ โดยใช้ขนาดจากกลางแกนเหล็กเท่ากับ 3.80 ซม. และหนา 9.24 ซม. แต่ในการพันหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบจริง อัดแกนเหล็กด้วยความหนา 9.25 ซม. ถือได้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบนี้สามารถสร้างได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้ออกแบบมาก ดังนั้นผลที่ได้น่าจะใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบมากที่สุด เมื่อพิจารณาที่น้ำหนักของแกนเหล็ก น้ำหนักของขดลวด ราคาของแกนเหล็ก และราคาของขดลวดทองแดง ทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกันกับที่ออกแบบไว้มาก ต่อจากนั้นหากพิจารณาที่กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กจากการทดสอบแบบเปิดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบได้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าเท่ากับ 13.80 วัตต์ แต่ที่ออกแบบไว้มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กเท่ากับ 12.76 วัตต์ ซึ่งมีค่าที่แตกต่างกันข้อนี้บอกได้ว่าในการออกแบบนั้นได้คิดค่าวัตต์ต่อกิโลกรัม(ซึ่งเป็นค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียต่อการใช้เหล็กหนึ่งกิโลกรัม)ไว้ 2.1วัตต์ สำหรับค่า  $B_{MAX} = 1.0$  เทสลา ซึ่งเป็นค่าที่อ่านได้จากกราฟ จะได้กำลังไฟฟ้าในแกนเหล็กเป็น  $W - core = 2.1 \times 6.08 = 12.76$  วัตต์ ในทำนองเดียวกันนี้จากกราฟการสูญเสียในแกนเหล็ก(ภาคผนวก ก.2)สามารถอ่านค่าวัตต์ต่อกิโลกรัมจากกราฟได้เป็น 2.235วัตต์/กิโลกรัม ซึ่งเป็นค่าที่แก้ไขโดยการใส่โปรแกรมในการอ่านค่าจากกราฟการสูญเสียในแกนเหล็ก ได้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก  $W - core = 2.235 \times 6.08 = 13.61$  วัตต์ และเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบคือ 13.8 วัตต์ ดังในตาราง 5.13 จากนั้นพิจารณาที่กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขด

ตาราง 5.14 เปรียบเทียบข้อมูลของหม้อแปลง Multi 450VA, 220/110 โวลต์,  $B_{MAX}=1.0$  เทสลา

หม้อแปลงไฟฟ้าแบบนำหนักและความสูญเสียทางไฟฟ้ารวมน้อย				
ฟิลล์ 450 VA 220/110 โวลต์ $B_{MAX}=1.0$ เทสลา				
	การออกแบบ	ปรับขนาดตามมาตรฐาน	พันหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ	
$A_c$ (ซ.ม.)	35.10	35.10	35.15	
2E (ซ.ม.)	3.70	3.80	3.80	
D (ซ.ม.)	9.48	9.24	9.25	
รอบด้านปฐมภูมิ (รอบ)	288	288	288	
รอบด้านทุติยภูมิ (รอบ)	144	144	144	
ลวดด้านปฐมภูมิ (S.W.G.)	#19	#19	#19	
ลวดด้านทุติยภูมิ (S.W.G.)	#17	#17	#17	
โวลต์ต่อรอบ (โวลต์)	0.764	0.764	0.764	
น.น.แกนเหล็ก (ก.ก.)	5.92	6.08	6.09	
น.น.ขดลวด (ก.ก.)	1.45	1.43	1.42	
น้ำหนักรวม (ก.ก.)	7.37	7.51	7.51	
ราคาแกนเหล็กEI (บาท)	296.00	304.00	304.00	
ราคาขดลวดทองแดง (บาท)	218.00	215.00	213.00	
ราคารวม (บาท)	514.00	519.00	517.00	
W-core (วัตต์)	12.43	12.76	13.80	
W-cu (วัตต์)	19.10	18.86	17.60	
W-total (วัตต์)	31.53	31.62	31.40	

$A_c$ : พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก, 2E: ขนาดขากลางแกนเหล็ก, D: ความหนาแกนเหล็ก

W-core: กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แกนเหล็ก, W-cu: กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวด, W-total: กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวม

แกนเหล็ก EI เกรด RM23 หนา 0.05 มม., กระแสขดลวดหนา 3.00 มม.

สัมประสิทธิ์การอัดแกนเหล็ก 0.98, สัมประสิทธิ์การพันขดลวด 0.45

อุณหภูมิปรกติ 35 °เซลเซียส, อุณหภูมิการทำงาน 75 °เซลเซียส

ขดลวดทองแดงซึ่งค่าจากการออกแบบเป็นค่าที่คำนวณจากอุณหภูมิการทำงานที่ 75 °c แต่การทดสอบแบบลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ เพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวดโดยขณะทำการทดสอบนั้นเป็นอุณหภูมิแวดล้อมประมาณ 31 °c ดังนั้นความต้านทานของขดลวดทองแดงจึงยังไม่เพิ่มขึ้นเท่ากับที่ออกแบบไว้

## 5.2.4 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบนำหนักและความสูญเสียทางไฟฟ้าน้อย

พิกัด 450 VA, 2220/110 โวลต์,  $B_{MAX} = 1.4$  เทสลา

### 5.2.4.1 เปรียบเทียบค่าจากการออกแบบกับ การปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐาน

จากตารางที่ 5.15 ค่าที่ได้จากการออกแบบได้ขนาดขากลางแกนเหล็กที่มีขนาด  $2E = 3.96$  ซม. และความหนาของแกนเหล็ก  $D = 5.53$  ซม. ซึ่งพันขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเป็น 330/165 รอบ โปรแกรมจะปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐาน ได้ค่า  $2E = 3.80$  ซม. และความหนาของแกนเหล็ก  $D = 5.76$  ซม. นำหนักของแกนเหล็กจากค่าการออกแบบหนัก 4.03 ก.ก. ซึ่งเมื่อปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐานแล้วได้ขนาด  $2E$  ลดลง และเพิ่มความหนาของแกนเหล็ก  $D$  ขึ้น นำหนักของแกนเหล็กลดลงเพราะปริมาตรของแกนเหล็กลดลง แต่แน่นอนที่เมื่อลดขนาดขากลางแกนเหล็กลง ทำให้ขดลวดทองแดงมีจำนวนรอบต่อชั้นลดลง(จากรูป 5.7)แต่จะมีจำนวนชั้นเพิ่มมากขึ้น และทำให้ความยาวเฉลี่ยต่อรอบเมื่อปรับขนาดแกนมาตรฐานยาวกว่าค่าที่ได้จากการออกแบบ ดังนั้นนำหนักของขดลวดทองแดงจึงเพิ่มขึ้นจาก 1.18 ก.ก. เป็น 1.20 ก.ก. เมื่อพิจารณาที่ราคาและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กและขดลวดทองแดงจะขึ้นอยู่กับนำหนักของแกนเหล็กและนำหนักขดลวดทองแดง แต่กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กลดลงมากจึงทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมน้อยลง เป้าหมายหลักการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้เพื่อทำให้น้ำหนักและกำลังไฟฟ้าสูญเสียน้อย จากการพิจารณากำลังไฟฟ้าและน้ำหนักที่ได้จากการปรับแกนเหล็กมาตรฐานมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการออกแบบ ทั้งนี้เพราะว่าก่อนการออกแบบได้ตั้งข้อกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การพันขดลวดเป็น 0.45 แต่เมื่อปรับแกนเหล็กมาตรฐานแล้ว โปรแกรมจะตรวจสอบว่าลวดสามารถลงได้พอดีกับช่องว่างของแกนเหล็ก และทำให้สัมประสิทธิ์การพันขดลวดเพิ่มขึ้นเป็น 0.4886

### 5.2.4.2 เปรียบเทียบค่าระหว่าง ข้อมูลการปรับขนาดแกนมาตรฐาน กับ หม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ

จากข้อมูลในตาราง 5.15 จะพันขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิพันด้วยจำนวนรอบ 330/165 รอบ โดยใช้แกนเหล็กขากลางขนาด 3.80 ซม. และแกนเหล็กมีความหนาเท่ากับ 5.76 ซม. แต่จากหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบมีขนาดของแกนเหล็ก ( ที่ถูกจำกัดโดยขนาดของกระสวยรองรับขดลวด ) มีความหนาแกนเหล็กเพียง 5.60 ซม. ดังนั้นนำหนักของแกนเหล็กที่ซึ่งจากหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบจะมีน้ำหนักน้อยกว่าที่ออกแบบไว้และเนื่องจากขนาดของกระสวยรองรับขดลวดเล็กลง ทำให้ความยาวขดลวดน้อยลงและนำหนักของขดลวดลดลงด้วย เมื่อทำการทดสอบแบบเปิดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก 16.20 วัตต์ ซึ่งต่างจากค่าที่ได้ที่ออกแบบไว้

คือ 15.91 วัตต์ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อพื้นที่

ตาราง 5.15 เปรียบเทียบข้อมูลของหม้อแปลง Multi 450VA, 220/110 โวลต์,  $B_{MAX}=1.4$  เทสลา

หม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำหนักรวมและความสูญเสียทางไฟฟ้ารวมน้อย				
พิกัด 450 VA 220/110 โวลต์ $B_{MAX}=1.4$ เทสลา				
	การอพติไมต์	ปรับขนาดแกนมาตรฐาน	พันหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ	
$A_c$ (ซ.ม.)	21.88	21.88	21.28	
2E (ซ.ม.)	3.96	3.80	3.80	
D (ซ.ม.)	5.53	5.76	5.60	
รอบค้ำปฐมภูมิ (รอบ)	330	330	330	
รอบค้ำทุติยภูมิ (รอบ)	165	165	165	
ลวดค้ำปฐมภูมิ (S.W.G.)	#19	#19	#19	
ลวดค้ำทุติยภูมิ (S.W.G.)	#17	#17	#17	
โวลต์ต่อรอบ (โวลต์)	0.667	0.667	0.667	
น.น.แกนเหล็ก (ก.ก.)	4.03	3.87	3.76	
น.น.ขดลวด (ก.ก.)	1.18	1.20	1.18	
น้ำหนักรวม (ก.ก.)	5.21	5.06	4.94	
ราคาแกนเหล็กEI (บาท)	201.00	193.00	188.00	
ราคาลวดทองแดง (บาท)	177.00	179.00	177.00	
ราคารวม (บาท)	379.00	373.00	365.00	
W-core (วัตต์)	16.91	15.91	16.20	
W-cu (วัตต์)	15.54	15.72	15.60	
W-total (วัตต์)	32.45	31.63	31.80	

$A_c$ : พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก, 2E: ขนาดจากกลางแกนเหล็ก, D: ความหนาแกนเหล็ก

W-core: กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แกนเหล็ก, W-cu: กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวด, W-total: กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวม

แกนเหล็ก EI เกรด RM23 หนา 0.05 ม.ม., กระจายรองขดลวดหนา 3.00 ม.ม.

สัมประสิทธิ์การอัดแกนเหล็ก 0.98, สัมประสิทธิ์การพันขดลวด 0.45

อุณหภูมิปรกติ 35° เซลเซียส, อุณหภูมิการทำงาน 75° เซลเซียส

หน้าตัดแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบมีค่าลดลง พิจารณาได้จากสมการ(5-15) โวลต์ต่อรอบของคือ  $\frac{V}{N} = 4.44 f B_{max} (s.f.) A_c$  เมื่อตัวแปรอื่นคงที่โดย  $B_{MAX}$  สามารถเปลี่ยนแปลงได้

ดังนั้น ได้ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 1.44 เทสลา และลองคำนวณโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การอัดแกนเหล็กต่ำสุดของแกนเหล็กเป็น 0.96 จากเดิมที่ได้ออกแบบไว้ 0.98 ซึ่งทำให้ได้ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 1.47 เทสลา เมื่อค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มสูงขึ้นค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียต่อกิโลกรัมของแกนเหล็กจะมีค่ามากขึ้น ซึ่งหมายถึงกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กจะเพิ่มขึ้น นี่ก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้กำลังไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้าตัวต้นแบบต่างจากค่าที่ออกแบบไว้ เมื่อพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดงจากหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบโดยการทดสอบแบบลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 15.60 วัตต์ ซึ่งต่างจากค่าที่ออกแบบไว้คือ 15.72 วัตต์ ทั้งนี้ก็เนื่องจากความยาวของขดลวดทองแดงที่พันจริงนั้นสั้นกว่าและในการออกแบบคิดที่อุณหภูมิการทำงาน 75 C ในขณะที่ทดสอบแบบลัดวงจรนั้นทดสอบที่อุณหภูมิแวดล้อมปกติ 31 C

## 5.2.5 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบการสูญเสียรวมน้อย พิกัด 450 VA 220/110 โวลต์ $B_{MAX} = 1.4$ เทสลา

### 5.2.5.1 เปรียบเทียบข้อมูล จากการออปติไมซ์ กับ การปรับขนาดแกนมาตรฐาน

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบการสูญเสียรวมน้อยนี้จะออกแบบให้ขนาดของแกนเหล็ก  $2E$  มีค่าน้อยและให้ความหนาของแกนเหล็ก  $D$  มีค่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับ การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบอื่นๆจาก โปรแกรมเมื่อทำการออปติไมซ์สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าตามพิกัดดังกล่าว ได้ค่าขนาดของแกนเหล็กมีค่าเท่ากับ 3.84 ซม.และมีความหนา 6.05 ซม. โดยจำนวนรอบด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเป็น 311 รอบและ 155 รอบตามลำดับ โดยมีค่าโวลต์ต่อรอบเป็น 0.708 โวลต์ จากนั้นโปรแกรมได้ปรับค่าขนาดแกนเหล็กมาตรฐานได้ขนาดขากลางแกนเหล็กเท่ากับ 3.80 ซม. ความหนาของแกนเหล็ก 6.11 ซม. โดยมีจำนวนรอบของขดลวดเท่ากัน จากสมการ(5-12)หาปริมาตรของแกนเหล็ก  $E-I$  มาตรฐาน  $V_{CORE} = 24 DE^2$  จากข้อมูลเมื่อปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐานแล้วขนาด  $2E$  ลดลง ทำให้น้ำหนักของแกนเหล็กลดลงตามปริมาตรที่ลดลงคือจาก 4.15 ก.ก. เป็น 4.10 ก.ก. เนื่องจากพื้นที่การลงขดลวดทำให้ได้รอบต่อชั้นน้อยลงเมื่อปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐานแล้ว ดังนั้นความยาวเฉลี่ยต่อรอบจะเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความยาวลวดเมื่อปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐานเพยามากขึ้นกว่าค่าที่ได้จากการออปติไมซ์ ดังนั้นน้ำหนักลวดจะเพิ่มมากขึ้นจากเดิม 1.14 ก.ก. เป็น 1.15 ก.ก. แต่ผลของการลดลงของน้ำหนักที่แกนเหล็กมีมากกว่าจึงทำให้น้ำหนักรวมเมื่อปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐานแล้วเบาว่า เมื่อพิจารณาที่เป้าหมายของการออกแบบหม้อแปลงแบบนี้แล้วคือต้องการให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียต่ำที่สุด แต่จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมจากการออปติไมซ์นั้นได้กำหนดให้สัมประสิทธิ์การพันขดลวดเป็น 0.45 แต่ในการปรับขนาดแกนเหล็ก

มาตรฐานนั้นเพียงพอตรวจสอบให้ลวดทั้งหมดลงในช่องว่างแกนเหล็กได้เท่านั้น และโปรแกรมได้ตรวจสอบสัมประสิทธิ์การพันขดลวดมีค่า 0.47 ด้วยเหตุผลนี้ที่ทำให้แกนเหล็กของการอพติ ตาราง 5.16 เปรียบเทียบข้อมูลของหม้อแปลง Min Loss 450VA, 220/110 โวลต์,  $B_{MAX}=1.4$  เทสลา

หม้อแปลงไฟฟ้าแบบความสูญเสียทางไฟฟ้ารวมน้อย			
พิลัด 450 VA 220/110 โวลต์ $B_{MAX}=1.4$ เทสลา			
	การอพติไมต์	ปรับขนาดแกนมาตรฐาน	พันหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ
$A_c$ (ซ.ม.)	23.23	23.23	23.18
2E (ซ.ม.)	3.84	3.80	3.80
D (ซ.ม.)	6.05	6.11	6.10
รอบด้านปฐมภูมิ (รอบ)	310	310	310
รอบด้านทุติยภูมิ (รอบ)	155	155	155
ลวดด้านปฐมภูมิ (S.W.G.)	#19	#19	#19
ลวดด้านทุติยภูมิ (S.W.G.)	#17	#17	#17
โวลต์ต่อรอบ (โวลต์)	0.708	0.708	0.708
น.น.แกนเหล็ก (ก.ก.)	4.15	4.10	4.1
น.น.ขดลวด (ก.ก.)	1.14	1.15	1.15
น้ำหนักรวม (ก.ก.)	5.29	5.25	5.25
ราคาแกนเหล็กEI (บาท)	207.00	205.00	205.00
ราคาลวดทองแดง (บาท)	171.00	172.00	172.00
ราคารวม (บาท)	379.00	377.00	377.00
W-core (วัตต์)	17.42	16.09	17.50
W-cu (วัตต์)	15.04	15.09	15.50
W-total (วัตต์)	32.46	31.99	33.00

$A_c$ : พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก, 2E: ขนาดจากกลางแกนเหล็ก, D: ความหนาแกนเหล็ก

W-core: กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แกนเหล็ก, W-cu: กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวด, W-total: กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวม

แกนเหล็ก EI เกรด RM23 หนา 0.05 ม.ม., กระสวยรองขดลวดหนา 3.00 ม.ม.

สัมประสิทธิ์การอัดแกนเหล็ก 0.98, สัมประสิทธิ์การพันขดลวด 0.45

อุณหภูมิปกติ 35° เซลเซียส, อุณหภูมิการทำงาน 75° เซลเซียส

ไมซ์มีขนาด  $2E$  ที่โตกว่าและน้ำหนักมากกว่าทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แกนเหล็กมากกว่า ซึ่งเป็นส่วนที่มีผลอย่างมากเพราะกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวดแตกต่างกันไม่มาก ดังนั้นค่ากำลังไฟฟ้าต่ำสุดจากการออกแบบไมซ์จึงสูงกว่า

#### 5.2.5.2 เปรียบเทียบข้อมูล จากการปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐาน กับ หม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ

จากข้อมูลที่ใช้พันหม้อแปลงไฟฟ้า(ตาราง 5.16)มีขนาด  $2E = 3.80$  ซม. และแกนเหล็กหนา 6.11 ซม. โดยจำนวนรอบปฐมภูมิและทุติยภูมิเป็น 310/155 รอบ แต่ขนาดแกนเหล็กที่หม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบมีขนาด  $2E = 3.80$  ซม. และแกนเหล็กหนา 6.10 ซม. จากข้อมูลในส่วนนี้จะพบว่าข้อมูลที่ออกแบบไว้กับข้อมูลที่พันหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นค่าที่ได้ออกมาจะมีค่าใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้ เมื่อดูที่น้ำหนักแกนเหล็ก น้ำหนักขดลวด น้ำหนักรวม และราคาแกนเหล็ก ราคาขดลวด ราคารวม ซึ่งข้อมูลทั้งหมดจากที่ออกแบบไว้กับข้อมูลที่ได้จากการพันจริงมีค่าใกล้เคียงกันมากแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้ยังไม่ได้พิจารณาที่กำลังไฟฟ้าสูญเสีย ต่อจากนั้นลองพิจารณาค่าของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กดูว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร เมื่อแกนเหล็ก  $A_c$  นั้นลดลงจาก 23.23 ตร.ซม. เป็น 23.18 ตร.ซม. แล้ว เมื่อคำนวณหา  $B_{MAX}$  แล้วจากสมการ(5-15) โวลต์ต่อรอบ 
$$\frac{V}{N} = 4.44 f B_{max} (s.f.) A_c$$
 ถ้าตัวแปรในสมการตัวอื่นคงที่และค่าโวลต์ต่อรอบเท่ากับ 0.708 โวลต์ ทำให้ได้ค่า  $B_{MAX} = 1.404$  เทสลา และหากพิจารณาที่ค่าสัมประสิทธิ์การพันแกนเหล็ก(Stacking Factor ; S.f.)ให้มีค่าต่ำสุดคือ 0.96 (จากที่ออกแบบไว้ 0.98) จะเห็นว่าค่า  $B_{MAX} = 1.43$  เทสลา ค่า  $B_{MAX}$  นั้นเปลี่ยนแปลงไม่มากแต่ถ้าพิจารณาถึงคุณสมบัติของแกนเหล็กจากกราฟความสัมพันธ์ของวัตต์ต่อกิโลกรัม กับ  $B_{MAX}$  แล้ว กราฟช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก (เนื่องจากเป็นกราฟล็อกที่สเกล(Scale)ด้านหลังจะเป็นค่าแต่ละช่วงเป็น 10 เท่า ตัว คูภาคผนวก ก.2 ) ดังนั้นเพียง  $B_{MAX}$  เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจึงทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียต่อกิโลกรัมเปลี่ยนแปลงและทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากแกนเหล็กของข้อมูลจากหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบที่ได้จากการทดสอบแบบเปิดวงจรนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นมาก มากกว่า 1 วัตต์

#### 5.2.5.6 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำหนักรวมน้อย พิกัด 450 VA 220/110 โวลต์ $B_{MAX} = 1.4$ เทสลา

##### 5.2.6.1 เปรียบเทียบค่าจากการออกแบบไมซ์ กับ การปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐาน

จากค่าพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า โปรแกรมได้ออกแบบให้แกนเหล็กมีขนาด  $2E > D$  ผลจากโปรแกรมได้ค่าขนาดขากลางแกนเหล็ก  $2E = 5.08$  ซม. และได้ความหนาแกนเหล็ก  $D = 2.82$  ซม.

ดูได้จากตาราง 5.17 ผลลัพธ์ที่ได้นี้จะได้หม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งมีความหนาแกนเหล็กบางเมื่อเทียบกับค่า  $2E$  โดยค่าที่ได้จากการออกแบบมีค่า  $2E = 4.89$  ซม. และความหนาแกนเหล็ก  $D = 2.93$  ซม. แต่เมื่อมีการปรับค่าขนาดแกนเหล็กมาตรฐานแล้วได้ค่าขนาดขากลางแกนเหล็ก  $2E = 5.08$  ซม. ด้วยเหตุผลนี้เองที่ค่าปริมาตรของแกนเหล็กที่หาได้จากสมการ(5-12)  $V_{CORE} = 24DE^2$  เมื่อปรับ

ตาราง 5.17 เปรียบเทียบข้อมูลของหม้อแปลง Min Weight 450VA, 220/110 โวลต์,  $B_{MAX}=1.4$  เทสลา

หม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำหนักรวมน้อย			
พิลต์ 450 VA 220/110 โวลต์ $B_{MAX}=1.4$ เทสลา			
	การออกแบบ	ปรับขนาดมาตรฐาน	พื่นหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ
A <sub>c</sub> (ซ.ม.)	14.33	14.33	14.63
2E (ซ.ม.)	4.89	5.08	5.08
D (ซ.ม.)	2.93	2.82	2.88
รอบด้านปฐมภูมิ (รอบ)	504	504	504
รอบด้านทุติยภูมิ (รอบ)	252	252	252
ลวดด้านปฐมภูมิ (S.W.G.)	#19	#19	#19
ลวดด้านทุติยภูมิ (S.W.G.)	#17	#17	#17
โวลต์ต่อรอบ (โวลต์)	0.437	0.437	0.437
น.น.แกนเหล็ก (ก.ก.)	3.26	3.38	3.46
น.น.ขดลวด (ก.ก.)	1.63	1.62	1.66
น้ำหนักรวม (ก.ก.)	4.88	5.01	5.12
ราคาแกนเหล็กEI (บาท)	163.00	169.00	173.00
ราคาลวดทองแดง (บาท)	244.00	244.00	249.00
ราคารวม (บาท)	407.00	413.00	422.00
W-core (วัตต์)	13.68	13.93	12.30
W-cu (วัตต์)	21.38	21.38	22.20
W-total (วัตต์)	35.07	35.31	34.50

A<sub>c</sub>: พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก, 2E: ขนาดขากลางแกนเหล็ก, D: ความหนาแกนเหล็ก

W-core: กำลัง ไฟฟ้าสูญเสียที่แกนเหล็ก, W-cu: กำลัง ไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวด, W-total: กำลัง ไฟฟ้าสูญเสียรวม

แกนเหล็ก EI เกรด RM23 หนา 0.05 ม.ม., กระจาวยรองขดลวดหนา 3.00 ม.ม.

สัมประสิทธิ์การอัดแกนเหล็ก 0.98, สัมประสิทธิ์การพันขดลวด 0.45

อุณหภูมิปรกติ 35° เซลเซียส, อุณหภูมิการทำงาน 75° เซลเซียส

ขนาดแกนเป็นแกนมาตรฐานแล้วได้ค่าปริมาตรของแกนเหล็กมากกว่าปริมาตรของขนาดเหล็กที่ได้จากการการอพติไมซ์ และน้ำหนักของแกนเหล็กมีค่าตามปริมาตรแกนเหล็ก ซึ่งหลักการปรับขนาดแกนมาตรฐานนั้นต้องทำให้ขดลวดสามารถลงในช่องว่างแกนเหล็กได้พอดี เนื่องจากการปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐานที่มีขนาดเพิ่มขึ้นคือ จากขนาด 4.89 ซม. เป็นขนาด 5.08 ซม. จากปริมาตรของแกนเหล็กที่เพิ่มขึ้นทำให้น้ำหนักของแกนเหล็กเพิ่มขึ้น และผลที่ตามมาคือความยาวโดยเฉลี่ยของขดลวดตามความยาวรอบรอบพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กนั้นสั้นลงมากกว่าที่ออกแบบไว้ ทำให้น้ำหนักของขดลวดน้อยกว่าค่าที่ได้จากการการอพติไมซ์ โดยจำนวนรอบด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิคือ 504/252 รอบ จากการปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐานค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าขึ้นอยู่กับน้ำหนักของแกนเหล็กและขดลวดทองแดง การสูญเสียจากแกนเหล็กจะมีค่าเพิ่มขึ้นเพราะน้ำหนักแกนเหล็กจากการปรับขนาดแกนมาตรฐานแตกต่างจากค่าการอพติไมซ์มาก ส่วนการสูญเสียที่ขดลวดนั้นมีค่าเท่ากัน เพราะความยาวที่เพิ่มขึ้นนั้นน้ำหนักของขดลวดไม่แตกต่างกันมาก

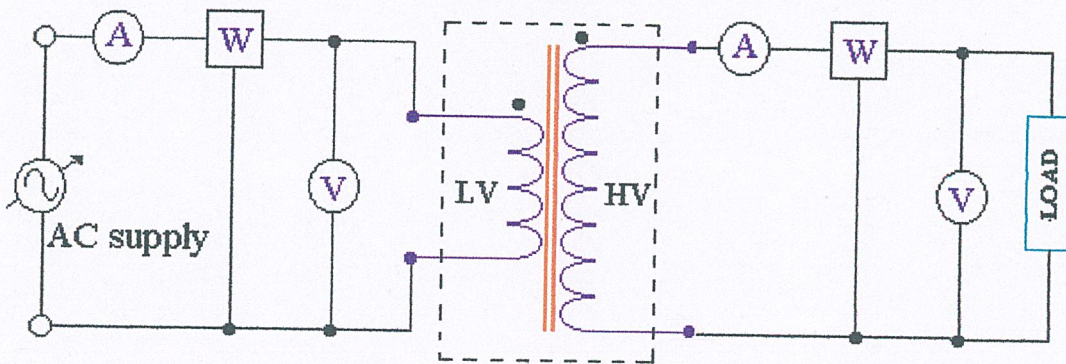
### 5.2.6.2 เปรียบเทียบค่า จากการปรับขนาดแกนมาตรฐาน กับ ข้อมูลจากหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ

จากข้อมูลในตาราง 5.17 ในสคมภ์แรกและสคมภ์ที่สองได้จากโปรแกรม ขนาดแกนเหล็กมาตรฐานของหม้อแปลงไฟฟ้ามีขนาดแกนเหล็กขนาด  $2E = 5.08$  ซม. และแกนเหล็กหนาเท่ากับ 2.8 ซม. โดยขดลวดที่ออกแบบและพันจริงนั้นมีจำนวนรอบด้านปฐมภูมิ 504 รอบ และด้านทุติยภูมิ 252 รอบ แต่หม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบนั้นเมื่ออัดแกนเหล็กหม้อแปลงแล้วได้ความหนา  $D = 2.88$  ซม. ซึ่งส่วนนี้เองที่ทำให้แกนเหล็กมีน้ำหนักหนักกว่าที่ได้จากการออกแบบไว้ และการเพิ่มขึ้นของความหนาแกนเหล็กทำให้ความยาวเฉลี่ยต่อรอบของขดลวดเพิ่มขึ้น น้ำหนักของขดลวดทองแดงจึงหนักกว่าที่ได้ออกแบบไว้เพราะพันด้วยจำนวนรอบที่มาก ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับ การสร้างกระสวยรองขดลวดในตอนแรกซึ่งเป็นความคลาดเคลื่อนของขนาดกระสวยรองขดลวด (เมื่อขนาดกระสวยรองขดลวดที่ใหญ่ขึ้นต้องอัดแกนเหล็กให้แน่นพอดี เพราะหากเหล็กไม่ถูกบีบให้แน่นจะเกิดการสั่นและทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียขึ้นอีกเป็นจำนวนมาก) โดยราคาของแกนเหล็กและขดลวดทองแดงนั้นจะขึ้นอยู่กับน้ำหนัก หากพิจารณาที่กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แกนเหล็กจะพิจารณาจากขนาดพื้นที่หน้าตัด จาก  $A_c$  ที่เพิ่มขึ้นและหม้อแปลงต้นแบบตัวนี้ใช้จำนวนรอบเท่าเดิม ดังนั้น ค่าโวลต์ต่อรอบเท่าเดิม จากสมการ(5-15) โวลต์ต่อรอบคือ  $\frac{V}{N} = 4.44 f B_{max} (s.f.) A_c$  จากสมการที่ค่าความหนาของเส้นแรงแม่เหล็กลดลงพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กลดลงและตัวแปรอื่นคงที่ได้ค่า  $B_{MAX}$  เพิ่มจากเดิมคือได้  $B_{MAX} = 1.37$  เทสลา จากค่าที่ออกแบบไว้ 1.4 เทสลา ทำให้การสูญเสียทางไฟฟ้าต่อกิโลกรัมลดลง ดังนั้นแกนเหล็กมีการสูญเสียทางไฟฟ้าที่แกนเหล็กที่ได้จากการทดสอบแบบเปิดวงจรนั้นมีค่าน้อยกว่าที่ออกแบบคือ 12.30 วัตต์ แต่ค่าการสูญเสียที่ขดลวดทองแดง

จะเพิ่มขึ้นจากที่ออกแบบไว้ เพราะความต้านทานของขดลวดเพิ่มตามน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นการสูญเสียที่ขดลวดจากหม้อแปลงที่พันจริงที่ได้จากการทดสอบแบบเปิดวงจรจึงได้ค่าที่มากกว่าค่าที่ออกแบบไว้

### 5.3 การทดสอบการจ่ายกระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ

การทดสอบจ่ายภาระทางไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบนี้ก็เพื่อต้องการดูว่าหม้อแปลงไฟฟ้าตัวที่ทดสอบนี้มี โวลต์เตจเรกูเรชันเป็นอย่างไร และเมื่อนำค่า โวลต์เตจเรกูเรชันนี้มา



รูป 5.8 วงจรการต่อทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบจ่ายภาระไฟฟ้า

เปรียบเทียบกับค่าโวลต์เตจเรกูเรชันที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้วงจรสมมุติที่ได้จากการทดสอบแบบเปิดวงจรและการทดสอบแบบลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้านั้นมีค่าใกล้เคียงกันหรือไม่ ถ้ามีค่าใกล้เคียงกันก็แสดงว่าวงจรสมมุติที่ได้จากการทดสอบแบบเปิดวงจรและการทดสอบแบบลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้านี้มีค่าค่อนข้างถูกต้อง และต้องการจะดูว่าเมื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้าจะมีกำลังสูญเสียทางไฟฟ้าเป็นอย่างไรหรือสามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่พิกัดได้จริงหรือเปล่านั้นเอง

#### อุปกรณ์การทดลอง

วัตต์มิเตอร์กระแสสลับ

แอมป์มิเตอร์กระแสสลับ 5A 10A

โวลต์มิเตอร์ 0-380 V

ภาระทางไฟฟ้า

- หลอดไส้ 100วัตต์ และ 50วัตต์
- บัลลาสต์ 20วัตต์ และ 40วัตต์
- แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับปรับค่าได้(Variable AC Voltage)

การทดลอง

ต่อวงจรไฟฟ้าตามรูปเพื่อทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าตัวตันแบบโดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าทางด้านสัปดาห์ไฟฟ้าค่าของหม้อแปลงไฟฟ้าและด้านจ่ายไฟออกคือทางด้านสัปดาห์ไฟฟ้าสูงเพราะภาระไฟฟ้าที่ใช้มีพิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 220 โวลต์ การทดลองนั้นทำได้โดยการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าด้านจ่ายภาระไฟฟ้าให้ได้ 220 โวลต์คงที่โดยการปรับที่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับด้านรับไฟ ซึ่งภาระทางไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองนี้จะมีขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าเท่ากับพิกัดกำลังไฟฟ้าเต็มพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าตัวตันแบบที่ทำการทดสอบ จากนั้นจะบันทึกค่าต่างๆตามตารางบันทึกผลการทดลอง

การทดลองจะแบ่งภาระทางไฟฟ้าเป็นสองลักษณะคือภาระทางไฟฟ้าที่เป็นความต้านทานอย่างเดียวโดยใช้หลอดไส้ (Incandescent Lamp) และภาระทางไฟฟ้าที่เป็นความต้านทานและความเหนี่ยวนำโดยใช้หลอดไส้กับบัลลาสต์รวมกัน

ตัวอย่างการคำนวณหาโวลต์เตจเรกูเลชันของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำหนัและความสูญเสียทางไฟฟ้าน้อย พิกัด 250VA, 220/110 โวลต์,  $B_{MAX}=1.4$  เทสลา

ตาราง 5.18 ผลการทดลองการรับภาระไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าคั่นแบบ Multi 450VA, 220/110V,  $B_{MAX}=1.4$  เทสลา

		$V_1$	$I_1$	$P_{in}$	$V_2$	$I_2$	$P_{out}$
MUTI DESIGN 250VA 220/110V $B_{MAX}=1.4T$							
R LOAD	ทดลอง	114.1	4.376	482.5	220	2.083	445
	คำนวณ	114	4.536	478.12			
RL LOAD	ทดลอง	113.8	4.22	457	220	1.98	419
	คำนวณ	113.71	4.356	449.33			

จากผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าโดยจ่ายไฟให้กับภาระไฟฟ้าความต้านทานอย่างเดียว (Resistance Load) และจ่ายไฟให้กับภาระไฟฟ้าความต้านทานและความต้านทานเหนี่ยวนำ (Resistance and Inductance Load) จากตารางที่ 15.18 พิจารณาเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายภาระให้กับภาระไฟฟ้าความต้านทานจากการทดลองกำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมด ( $P_{loss}$ ) ที่เกิดขึ้น

$$\begin{aligned} P_{loss} &= P_{in} - P_{out} \\ &= (482.5 - 445) = 37.5 \text{ วัตต์} \end{aligned}$$

หาค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้านำจ่ายภาระ ( $PF_{out}$ ) และค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้านำรับไฟเข้า ( $PF_{in}$ ) ได้จาก

$$\begin{aligned} PF_{in} &= \frac{P_{in}}{(V_1 I_1)} \\ PF_{out} &= \frac{P_{out}}{(V_2 I_2)} \\ PF_{in} &= \frac{482.5}{(114.1 \times 4.376)} = 0.967 \\ PF_{out} &= \frac{445}{(220 \times 2.083)} = 0.971 \end{aligned}$$

จะเห็นว่าค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้านำรับไฟเข้าน้อยกว่าด้านจ่ายไฟออกทั้งที่เป็นภาระไฟฟ้าความต้านทานทั้งนี้เนื่องจากเนื่องจากว่าภายในหม้อแปลงไฟฟ้าก็มีค่าความต้านทานและความต้านทานเหนี่ยวนำอยู่พิจารณาได้จากวงจรเสมือนสมมูลย์ของหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสแบบสองขดลวด โดย  $R_{eq}$  และ  $X_{eq}$  เป็นความต้านทานสมมูลย์และความต้านทานเหนี่ยวนำสมมูลย์ของขดลวดทั้งสองขดซึ่งจะมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่ส่วนนี้ทำให้แรงดันไฟฟ้าขาเข้าและแรงดันไฟฟ้านำออกไม่เป็นไปตามอัตราส่วนหม้อแปลงไฟฟ้าที่เป็น 2:1 (220/110)

คำนวณหาโวลต์เตจเรกูเลชัน (Voltage Regulation) ของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายภาระไฟฟ้าความต้านทานอย่างเดียวหาได้จาก

$$\begin{aligned} \%R_{eg} &= \frac{V_{in} - V_{rated}}{V_{in}} \times 100\% \\ \text{ที่ด้านจ่ายไฟเข้า} \quad \%R_{eg} &= \frac{114.1 - 110}{114.1} \times 100\% = 3.768\% \end{aligned}$$

ในการทดสอบเปิดวงจรและลัดวงจรเพื่อเป็นการหาวงจรเสมือนสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าตัวนี้ จากนั้นจะเป็นการนำเอาค่าวงจรเสมือนนำมาคิดเพื่อหาแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า ด้านจ่ายไฟเข้าจากตัวอย่างการคำนวณต่อไปนี้ โดยใช้  $V_2'$  เป็นตัวเริ่มต้นและย้ายค่าต่างๆมาคำนวณ ด้านแรงดันต่ำ

$$V_2' = \frac{V_2}{a} \angle 0^\circ = 110 \angle 0^\circ \quad ; a = 2$$

$$I_2' = aI_2 \angle \theta_2 = 4.166 \angle 15.369^\circ$$

$$V_1 = V_2' + I_2'(Z_{eq}) = 110 \angle 0^\circ + (4.166 \angle 15.369^\circ \times 0.98775 \angle 19.26^\circ)$$

$$= 114.1 \angle 0.19^\circ$$

$$I_\phi = \frac{V_1}{R_c} + \frac{V_1}{jX_m} = \frac{114.1 \angle 0.19^\circ}{747.010} + \frac{114.1 \angle 0.19^\circ}{j158.373}$$

$$= 0.736 \angle -77.84^\circ$$

$$I_1 = I_2' + I_\phi = 4.536 \angle -22.2^\circ$$

$$PF_{in} = \cos(22.2 + 0.19) = 0.967$$

นำมาเขียนเป็นตารางสำหรับการทดสอบภาระไฟฟ้าของหม้อแปลงทั้งหมดได้คือ

ตาราง 5.19 ผลการทดสอบการรับภาระไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ Multi 450VA, 220/110 โวลต์,  $B_{MAX}=1.4$  เทสลา

		$V_1$	$I_1$	$P_{in}$	$PF_{IN}$	$V_2$	$I_2$	$P_{out}$	$PF_{OUT}$	%Reg
MUTI DESIGN 450VA 220/110V $B_{MAX}=1.4T$										
R LOAD	ทดลอง	114.1	4.376	482.5	0.967	220	2.083	445	0.971	3.768
	คำนวณ	114	4.536	478.12	0.924					3.68
RL LOAD	ทดลอง	113.8	4.22	457	0.95	220	1.98	419	0.96	3.51
	คำนวณ	113.71	4.356	449.33	0.924					3.43

ตาราง 5.20 ผลการทดสอบการรับภาระไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ Min Weight 450VA, 220/110 โวลต์,  $B_{MAX}=1.4$  เทสลา

		$V_1$	$I_1$	$P_{in}$	$PF_{IN}$	$V_2$	$I_2$	$P_{out}$	$PF_{OUT}$	%Reg
MINIMUM WEIGHT 450VA 220/110V, $B_{MAX}=1.4T$										
R LOAD	ทดลอง	113.8	4.38	480.25	0.963	220	2.083	445	0.971	5.53
	คำนวณ	113.39	4.37	470	0.948					5.19
RL LOAD	ทดลอง	113.3	4.225	455	0.95	220	1.98	419	0.96	5.12
	คำนวณ	113.27	4.176	442.54	0.936					5.094

ตาราง 5.21 ผลการทดสอบการรับภาระไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ Min Loss 450VA, 220/110 โวลต์,  $B_{MAX}=1.4$  เทสลา

		$V_1$	$I_1$	$P_{in}$	$PF_{IN}$	$V_2$	$I_2$	$P_{out}$	$PF_{OUT}$	%Reg
MINIMUM LOSS 450VA 220/110V $B_{MAX}=1.4T$										
R LOAD	ทดลอง	112.2	4.49	480.5	0.953	220	2.083	445	0.971	3.74
	คำนวณ	111.96	4.527	473.48	0.94					3.53
RL LOAD	ทดลอง	112	4.25	452	0.949	220	1.98	419	0.96	3.57
	คำนวณ	111.85	4.25	443.11	0.92					3.44

ตาราง 5.22 ผลการทดสอบการรับภาระไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ Multi 450VA, 220/110 โวลต์,  $B_{MAX}=0.8$  เทสลา

		$V_1$	$I_1$	$P_{in}$	$PF_{IN}$	$V_2$	$I_2$	$P_{out}$	$PF_{OUT}$	%Reg
MUTI DESIGN 450VA 220/110V $B_{MAX}=0.8T$										
R LOAD	ทดลอง	113.9	4.41	483	0.961	220	2.083	445	0.971	4.91
	คำนวณ	113.709	4.3	471.37	0.964					4.75
RL LOAD	ทดลอง	113.5	4.21	445	0.9522	220	1.98	419	0.96	4.58
	คำนวณ	113.6	4.098	443.37	0.952					4.66

ตาราง 5.23 ผลการทดสอบการรับภาระไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ Multi 450VA, 220/110 โวลต์,  $B_{MAX}=1.0$  เทสลา

		$V_1$	$I_1$	$P_{in}$	$PF_{IN}$	$V_2$	$I_2$	$P_{out}$	$PF_{OUT}$	%Reg
MUTI DESIGN 450VA 220/110V $B_{MAX}=1.0T$										
R LOAD	ทดลอง	112.8	4.39	481.5	0.972	220	2.083	445	0.971	4.25
	คำนวณ	112.45	4.35	469.06	0.958					3.95
RL LOAD	ทดลอง	112.5	4.25	457	0.955	220	1.98	419	0.96	4
	คำนวณ	112.33	4.15	441.25	0.956					3.85

ตาราง 5.24 ผลการทดสอบการรับภาระไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ Multi 450VA, 220/110 โวลต์,  $B_{MAX}=1.4$  เทสลา

		$V_1$	$I_1$	$P_{in}$	$PF_{IN}$	$V_2$	$I_2$	$P_{out}$	$PF_{OUT}$	%Reg
MUTI DESIGN 250VA 220/110V $B_{MAX}=1.4T$										
R LOAD	ทดลอง	113.5	2.53	275	0.957	220	1.168	247	0.961	4.4
	คำนวณ	113.62	2.608	271.35	0.915					4.5
RL LOAD	ทดลอง	113.2	2.34	247.5	0.934	220	1.06	220	0.943	4.15
	คำนวณ	113.08	2.37	236.55	0.9046					4.05

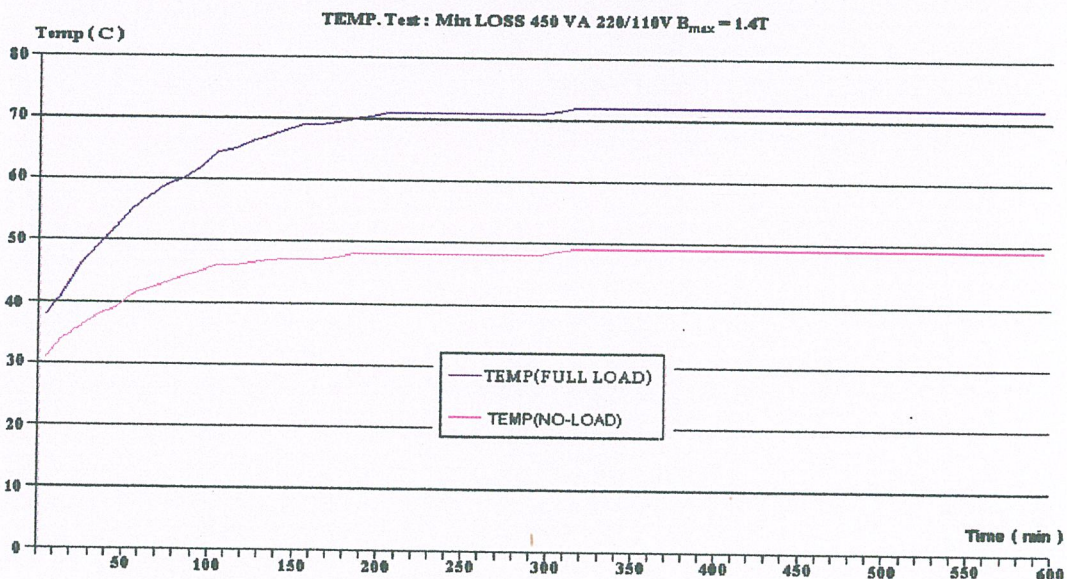
### สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดสอบของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบทั้ง 6 ตัวในตารางที่ 5.19 ถึงตารางที่ 5.24 จะเห็นว่าค่าโวลต์เตจเรกูชั่นของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบทั้ง 6 ตัวนั้นมีค่าอยู่ในย่านที่ปกติสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กโดยทั่วไป ซึ่งค่าโวลต์เตจเรกูชั่นที่มากที่สุดก็คือ 5.53% ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำหนักรวมน้อย 450VA, 220/110 โวลต์,  $B_{MAX}=1.4$  เทสลา เมื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบความต้านทานไฟฟ้าในตารางที่ 5.20 นั้นเอง สำหรับค่าโวลต์เตจเรกูชั่นที่ได้จากการคำนวณและจากค่าที่ได้จากการทดลองนั้นเมื่อนำมาเปรียบเทียบกันแล้ว จะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกันมากซึ่งแตกต่างกันประมาณไม่ถึงหนึ่งเปอร์เซ็นต์เท่านั้นเอง และเมื่อมาดูค่าประกอบกำลังด้านไฟเข้าที่ได้จากการคำนวณกับที่ได้จากการทดลองก็จะเห็นว่าใกล้เคียงกันมากเช่นกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าวงจร

สมมุติของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบทั้งหกตัวนี้ที่ได้มาจากการทดสอบแบบเปิดวงจรและการทดสอบแบบลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นวงจรสมมุติที่ค่อนข้างถูกต้อง และเมื่อมาพิจารณากำลังไฟฟ้าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละตัวจะเห็นได้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบทุกตัวนั้นมีค่าการสูญเสียทางไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองนี้มากกว่าค่าการสูญเสียทางไฟฟ้ารวมที่ได้จากการทดสอบแบบเปิดวงจรและการทดสอบแบบลัดวงจรหรือมากกว่าที่ได้จากการคำนวณ ที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องจากการทดลองจ่ายภาระทางไฟฟ้านี้ต้องจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ด้านรับไฟเกินพิกัด 110V เพื่อจะได้ไปชดเชยแรงดันที่จะไปตกคร่อมที่อิมพีแดนซ์อนุกรมของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าด้านภาระทางไฟฟ้าให้ได้คงที่ 220 โวลต์นั่นเอง ดังนั้นกระแสกระตุ้นขณะทดสอบจ่ายภาระทางไฟฟ้านี้จึงมากกว่ากระแสกระตุ้นในขณะทดสอบแบบเปิดวงจร และเมื่อกระแสกระตุ้นมีค่ามากขึ้นจึงทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กมากขึ้นด้วย และทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทดสอบจ่ายภาระทางไฟฟ้านี้มากกว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยรวมที่ได้จากการทดสอบแบบเปิดวงจรและการทดสอบแบบลัดวงจร

#### 5.4 การทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า

การทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อพิจารณาว่าหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบที่ทำการทดสอบนั้น เมื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้าเต็มพิกัดแล้ว อุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบที่ทำการ

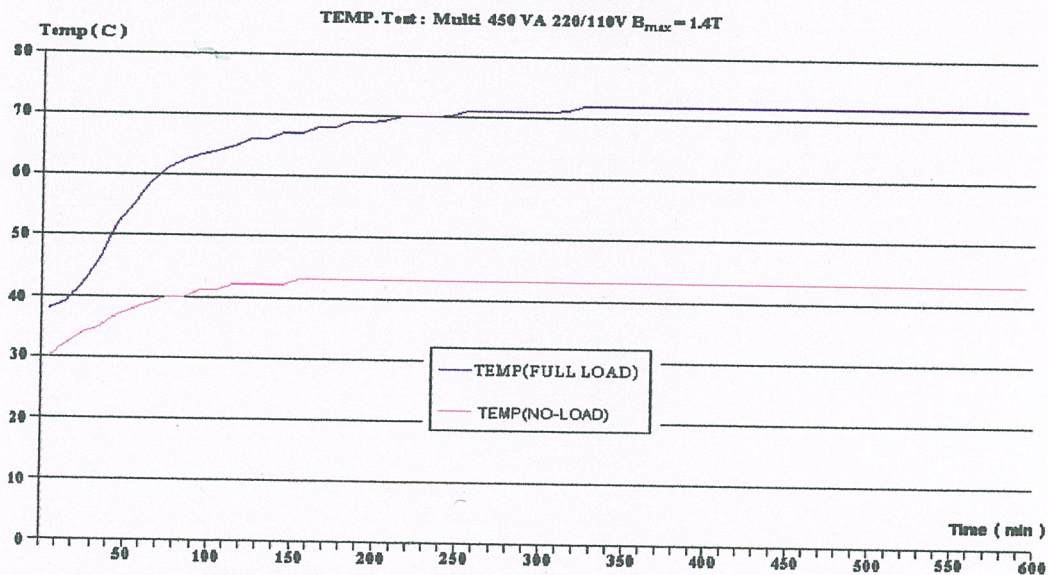


รูป 5.9 กราฟการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ หม้อแปลงไฟฟ้า Min Loss 450VA, 220/110 โวลต์,

$$B_{MAX} = 1.4 \text{ เทสลา}$$

ทดสอบมีอุณหภูมิสูงเกินกว่าที่ฉนวนของขดลวดทองแดงจะทนได้หรือไม่ เพราะถ้าความร้อนเกินกว่าที่คำนวณทนได้อาจทำให้ฉนวนไม่คงความเป็นฉนวนไว้ขดลวดอาจเกิดการลัดวงจรและไหม้ได้ แต่ถ้าหากว่าหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงที่ออกแบบไว้ แสดงว่าในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าได้เลือกใช้ค่าความหนาแน่นกระแส ( $J_{MAX}$  : Current density) ได้อย่างถูกต้องจึงทำให้อุณหภูมิไม่เกินที่ออกแบบไว้

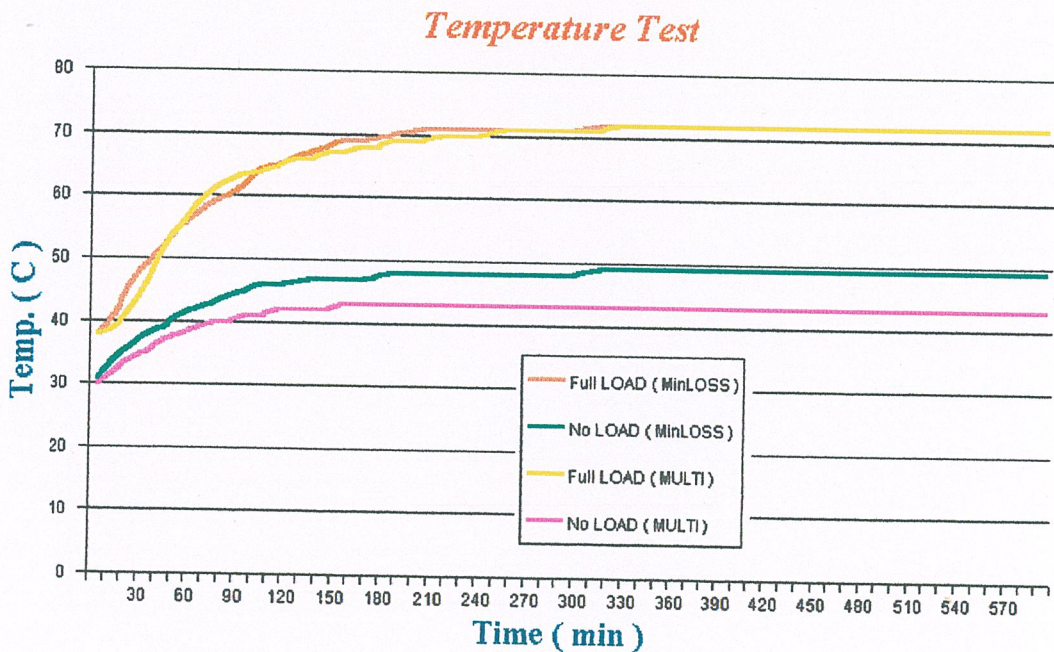
การทดลองนั้นทำได้โดยการจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่พิกัดแล้ววัดอุณหภูมิว่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร โดยใช้เวลาในการทดสอบทั้งหมดเป็นเวลา 600 นาที เพื่อให้แน่ใจว่าอุณหภูมิจะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นนั่นเองจากผลการทดลองนำมาสร้างกราฟได้ดังรูป 5.9 และรูป 5.10



รูป 5.10 กราฟการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ หม้อแปลงไฟฟ้า Multi 450VA, 220/110โวลต์,  
 $B_{MAX}=1.4$  เทสลา

จากรูปที่ 5.9 และรูป 5.10 จะเห็นว่าอุณหภูมิจนขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าและขณะไร้ภาระทางไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองตัวนี้มีค่าใกล้เคียงกันมาก และขณะที่จ่ายภาระทางไฟฟ้านั้นอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองตัวนี้ก็ไม่เกินอุณหภูมิที่ฉนวนของขดลวดทองแดงจะทนได้ จะเห็นได้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าแบบการสูญเสียน้อยขณะไร้ภาระมีอุณหภูมิสูงสุดมีเพียง  $43^{\circ}\text{C}$  แต่สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำหนักรวมและการสูญเสียรวมน้อยขณะไร้ภาระมีอุณหภูมิสูงสุด  $49^{\circ}\text{C}$  ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเมื่อถึงจุดทำงานนั้นเกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดเมื่อจ่ายภาระไม่ได้

เกิดจากการอิมตัวของแกนเหล็ก และจะเห็นได้ว่าเมื่อไร้ภาระอุณหภูมิจของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบการสูญเสียรวมน้อยจะมีค่าสูงกว่าหม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำหนักและการสูญเสียรวมน้อย เนื่องจากเมื่อขณะที่ไร้ภาระนั้นความร้อนจะเกิดจากการสูญเสียที่แกนเหล็กและหม้อแปลงไฟฟ้าแบบการสูญเสียรวมน้อยนั้นจะมีค่าการสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็กมากกว่าหม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำหนักและการสูญเสียรวมน้อยนั่นเอง ส่วนขณะที่จ่ายภาระทางไฟฟ้าอุณหภูมิจของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบการสูญเสียรวมน้อยมีอุณหภูมิจสูงกว่าแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำหนักและการสูญเสียรวมน้อยที่สุด เพราะความร้อนที่เกิดขึ้นขณะที่จ่ายภาระนั้นเกิดจากการสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งหมดซึ่งจากตารางที่ 5.15 และตารางที่ 5.16 จะเห็นว่า การสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบการสูญเสียรวมน้อยจะมากกว่าหม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำหนักและการสูญเสียรวมน้อยดังนั้นขณะที่ทำงานอุณหภูมิจจะสูงกว่านั่นเอง



รูป 5.11 เปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจของหม้อแปลงแบบ Min loss 450VA และ Multi 450VA

## บทที่ 6

## สรุปและวิจารณ์ผล

เนื่องจากในโครงการที่แล้วนั้นได้สร้างโปรแกรมเพื่อออกแบบให้สามารถออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าตามจุดประสงค์ต่างๆได้อย่างหนึ่งเช่น หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีน้ำหนักรวมน้อย, หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการสูญเสียรวมน้อยและหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีราคาต่ำ ในโครงการนี้จึงได้สร้างโปรแกรมเพื่อออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีจุดประสงค์ใช้งานสองอย่างพร้อมกันคือมีทั้งน้ำหนักและการสูญเสียน้อยมารวมเข้าด้วยกันและเรียกการออกแบบนี้ว่า “การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำหนักและการสูญเสียรวมน้อย (Multi Design)” ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบโดยการออกแบบแบบนี้เมื่อโปรแกรมคำนวณออกมาแล้วสามารถนำมาสร้างตัวต้นแบบได้จริงที่ทุกพิกัดจากบทที่ 5 ได้มีการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าตัวต้นแบบขนาดพิกัดกำลัง 250VA และ 450VA โดยมีพิกัดแรงดันไฟฟ้า 220/110 V และจากผลการทดสอบต่างๆจะเห็นว่าผลที่ได้จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับที่โปรแกรมคำนวณไว้มาก ซึ่งนี่ก็คือเครื่องยืนยันว่าหม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบโดยโปรแกรมชนิดนี้สามารถนำไปสร้างได้จริง

ในบทที่ 4 ได้วิเคราะห์หลักการออกแบบของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 4 แบบไว้ ซึ่งพอจะสรุปคร่าวๆได้ดังนี้ เนื่องจาก ในหม้อแปลงไฟฟ้านั้นจะประกอบไปด้วยสองส่วนคือส่วนของขดลวดทองแดงและส่วนของแกนเหล็กและในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 4 แบบนี้ก็มีจุดประสงค์ที่แตกต่างกัน และในแต่ละจุดประสงค์ก็จะให้ความสำคัญของขดลวดทองแดงและแกนเหล็กต่างกัน เช่นในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำหนักรวมน้ำหนักนั้นจะให้ความสำคัญของแกนเหล็กมากกว่าเนื่องจากน้ำหนักส่วนใหญ่ของหม้อแปลงไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักของแกนเหล็กมากกว่าน้ำหนักของขดลวดทองแดง , การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบการสูญเสียน้อยเนื่องจากการสูญเสียส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับที่ขดลวดทองแดงมากกว่าการสูญเสียที่แกนเหล็ก การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบราคาต่ำ ให้ความสำคัญของขดลวดทองแดงมากกว่าเพราะปกติราคาของขดลวดทองแดงจะมีราคาสูงกว่าราคาของแกนเหล็กซึ่งในการออกแบบแต่ละอย่างก็ถือว่าจุดประสงค์ของการออกแบบแต่ละแบบนี้ให้ความสำคัญกับขดลวดทองแดงหรือแกนเหล็กอย่างใดมากกว่ากันถ้าขดลวดทองแดงมีผลมากกว่าแกนเหล็กโปรแกรมก็จะออกแบบให้ค่า โวลต์ต่อรอบ  $V/N$  มีค่าสูงเพื่อที่จะให้ใช้จำนวนรอบและขดลวดทองแดงน้อยลง เมื่อค่า  $V/N$  มีค่าสูงจึงทำให้พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กมากด้วย เนื่องจากสมการ(5-15)  $\frac{V}{N} = 4.44 f B_{\max}(s.f.) A_c$  เมื่อให้ ความถี่ไฟฟ้า  $f$ ,

ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก  $B_{MAX}$  และค่าสัมประสิทธิ์การอัดแกนเหล็ก  $s.f.$  ทั้งหมดนั้นให้คงที่ จึงทำให้พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก ( $A_C$ ) มีค่ามากเมื่อ  $V/N$  มีค่าสูงนั่นเอง การให้ความสำคัญในลักษณะนี้พบในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบการสูญเสียรวมน้อย โดยการออกแบบจะใช้ขดลวดทองแดงน้อยก็จะออกแบบให้ขนาดแกนกลาง  $2E$  น้อยกว่าขนาดความหนา  $D$  ของหม้อแปลงไฟฟ้าเพราะต้องการช่องใส่ขดลวดน้อย ดังนั้นหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดนี้จะมีลักษณะตัวเล็กแต่หนา และถ้าหากแกนเหล็กมีผลมากกว่า โปรแกรมก็จะออกแบบให้ใช้ปริมาณของเหล็กน้อยๆ โดยออกแบบให้พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กมีค่าน้อยนั่นเองซึ่งมีผลให้ค่า  $V/N$  มีค่าน้อยด้วย ทำให้ต้องใช้ขดลวดทองแดงมากขึ้น เช่นการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำหนักรวมน้อย เมื่อต้องการขดลวดทองแดงให้มีจำนวนรอบมากๆ ก็ต้องออกแบบให้ขนาดของแกนกลาง  $2E$  มากกว่าขนาดความหนา  $D$  (ในขนาดพื้นที่หน้าตัด  $A_C$  ที่ถูกเลือกใช้งานอยู่แล้ว) ของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อที่จะสามารถใส่ขดลวดทองแดงให้พอดีกับพื้นที่ช่องว่างของการลงขดลวด ดังนั้นหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดนี้จะมีลักษณะตัวใหญ่แต่บาง จากที่กล่าวมาทั้งหมดซึ่งจะเห็นว่าถ้าต้องการใช้ขดลวดทองแดงน้อยก็จะทำให้ต้องใช้แกนเหล็กมาก แต่ถ้าต้องการให้ใช้แกนเหล็กน้อยจะทำให้ต้องใช้ขดลวดทองแดงมากซึ่งตรงข้ามกันอยู่

เนื่องจากการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้านั้น ผู้ใช้โปรแกรมจะต้องกำหนดค่าของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก เพื่อที่จะให้โปรแกรมออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ผู้ใช้โปรแกรมต้องการ ซึ่งเมื่อค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนไป จากการวิเคราะห์ผลของการเปลี่ยนค่าของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในบทที่ 4 นั้นจะเห็นได้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 4 แบบ เมื่อกำหนดค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าและแฟกเตอร์ต่างๆเท่ากัน และใช้แกนเหล็กชนิดเดียวกันนั้น ถ้าค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กต่อหน้าหนักของแกนเหล็กเพิ่มขึ้น ส่วนน้ำหนักและราคาโดยรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าจะลดลงไม่ว่าจะเป็นการออกแบบแบบใดก็ตาม ส่วนค่าการกำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยรวมจะมีค่าน้อยที่สุดที่ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กค่าใดค่าหนึ่ง ดังนั้นถ้าต้องการหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีน้ำหนักเบาหรือราคาต่ำก็ควรจะใช้ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่มีค่าสูงๆ แต่ก็จะทำให้หม้อแปลงไฟฟ้ามีปัญหาในกรณีที่มีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้หม้อแปลงไฟฟ้าเกินพิกัด ซึ่งจะมีผลทำให้ค่าของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นอาจจะมีผลทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าเกิดการอิมตัวของสนามแม่เหล็กและเสียหายได้ในที่สุด ดังนั้นในการเลือกใช้ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงๆก็ต้องคำนึงถึงเรื่องนี้ด้วย ส่วนหม้อแปลงไฟฟ้าที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยรวมน้อยนั้น โปรแกรมจะออกแบบและหาค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ทำให้การกำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยรวมน้อยที่สุดตามเงื่อนไขนั่นเอง

ในบทที่ 4 นั้นเป็นการวิเคราะห์การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละแบบ และการวิเคราะห์ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ผลที่ได้จากโปรแกรม และจะเห็นว่าเมื่อเลือกใช้ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงก็จะทำให้ค่าการสูญเสียโดยรวมมีค่าต่างกัน ไม่นักเมื่อเทียบกับการเลือกใช้ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ต่ำ ทั้งที่ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนักของแกนเหล็กแตกต่างกันมากดังนั้นจึงได้สร้างหม้อแปลงไฟฟ้าตัวต้นแบบเพื่อพิสูจน์ว่าที่ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กใดๆที่ได้จากการออกแบบจากโปรแกรมต่างๆก็สามารถสร้างได้จริงและได้นำหม้อแปลงไฟฟ้าตัวต้นแบบนี้มาทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์และคุณสมบัติต่างๆของหม้อแปลงไฟฟ้าว่าได้ผลตรงกับที่ได้ออกแบบไว้จากโปรแกรมหรือเปล่าซึ่งได้ผลการทดสอบต่างๆในบทที่ 5 ในตาราง 5.12, ตาราง 5.13, ตาราง 5.14, ตาราง 5.15, ตาราง 5.16 และตาราง 5.17 จะเห็นได้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากการพันจริงกับที่ได้ออกแบบไว้นั้นมีค่าต่างๆใกล้เคียงกันมากซึ่งค่าที่ผิดพลาดไปมากที่สุดมีค่าเพียง 8.7% ซึ่งเป็นค่าการสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบการสูญเสียรวมน้อยที่สุดที่คิด 450VA, 220/110 V และที่ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเท่ากับ 1.4 เทสลาแต่เมื่อมาพิจารณาที่การสูญเสียโดยรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าตัวนี้จะเห็นว่าแตกต่างกันเพียง 3.15% และเมื่อคุณภาพโดยรวมของค่าความผิดพลาดต่างๆของค่าที่ได้จากการออกแบบกับที่พันจริงนั้นจะเห็นได้ว่า โดยส่วนมากค่าความผิดพลาดจะอยู่ที่ 2% เท่านั้นเองซึ่งค่าความผิดพลาดต่างๆที่เกิน 5% นั้นมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเองซึ่งมักเกิดจากค่าการสูญเสียที่แกนเหล็กและเหตุผลที่เกิดความผิดพลาดนั้นก็เนื่องจากเหตุผลต่างๆที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 5 ในหัวข้อการเปรียบเทียบข้อมูลจากการปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐานกับหม้อแปลงไฟฟ้าตัวต้นแบบนั่นเอง

สำหรับการทดสอบการจ่ายภาระทางไฟฟ้านั้นเมื่อดูข้อมูลต่างๆที่ได้จากการทดสอบและจากการคำนวณ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรสมมูลย์ที่ได้จากการทดสอบการเปิดวงจรและการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าตัวต้นแบบทั้งหมดตัวนั้นจะเห็นได้ว่า

- ค่าการสูญเสียทางไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบการจ่ายภาระทางไฟฟ้าจะมีค่ามากกว่าค่าการสูญเสียทางไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณและจากการทดสอบเปิดวงจรและปิดวงจร ซึ่งเป็นผลมาจากเมื่อทดสอบการจ่ายภาระทางไฟฟ้าจะจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าเกินพิกัด ส่วนการทดสอบเปิดวงจรและปิดวงจรจะทดสอบที่แรงดันไฟฟ้าเต็มพิกัดดังนั้นค่าการสูญเสียทางไฟฟ้าขณะจ่ายภาระจึงมากกว่าที่พิกัดนั่นเองซึ่งเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ามากกว่าพิกัดก็จะทำให้ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นจากสมการของฟาราเดย์เมื่อค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นก็จะทำให้ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนักของแกนเหล็ก เพิ่มขึ้นด้วยเมื่อน้ำหนักของหม้อแปลงไฟฟ้าเท่าเดิมแต่

ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนักของแกนเหล็ก เพิ่มขึ้นดังนั้นค่าการสูญเสียในแกนเหล็กทั้งหมดจึงเพิ่มขึ้นนั่นเองทำให้การสูญเสียโดยรวมเพิ่มขึ้นด้วย

- ค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า ( $I_1$ ) นั้นมีความแตกต่างกันน้อยมากสำหรับค่าที่ได้จากการทดสอบและจากที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งแตกต่างกันไม่เกิน 4 % เท่านั้นเอง
- สำหรับค่า Voltage Regulation นั้นก็เช่นเดียวกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 5.19 ถึงตารางที่ 5.24 ก็จะเห็นได้ว่า ค่า Voltage Regulation ที่ได้จากการทดสอบและจากการคำนวณ นั้นมีความแตกต่างกันไม่เกิน 0.5 % เท่านั้น

จากรูปที่ 5.9 ซึ่งเป็นกราฟที่ได้จากการทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจะเห็นได้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบจากโปรแกรมนี้สามารถทำงานที่พิกัดได้โดยที่อุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าไม่สูงเกินกว่าที่ฉนวนของขดลวดทองแดงจะทนได้หรือไม่ทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าเสียหายได้นั่นเอง

### วิจารณ์ผล

- 1 เครื่องมือที่ทำการวัดค่อนข้างเก่าและมีความละเอียดน้อย ซึ่งอาจทำให้เกิดความผิดพลาดจากการอ่านค่าทำให้ผลการวัดเกิดการคลาดเคลื่อนได้
- 2 ในการทดลองที่แตกต่างกันเช่นการทดสอบการเปิดวงจรและการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้ากับการทดสอบการจ่ายภาระทางไฟฟ้านั้น ใช้อ่านการวัดของเครื่องมือวัดที่แตกต่างกันดังนั้นเมื่อนำผลมาเปรียบเทียบกันจึงเกิดความผิดพลาดไปบ้าง

ภาคผนวก

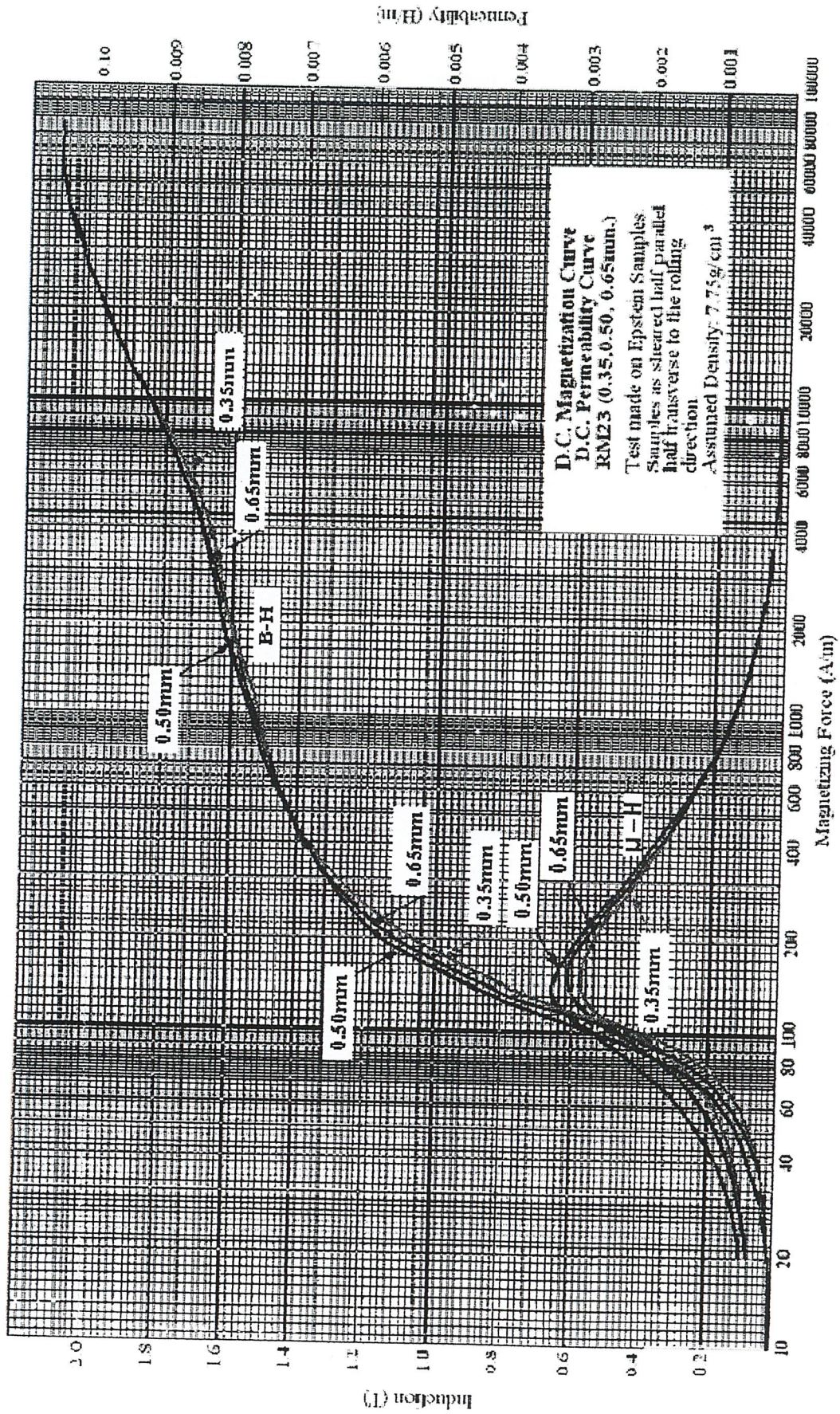
## ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก.1 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก  $B_{MAX}$  กับ ความเข้มสนามแม่เหล็ก H (B-H Curve) และแสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นกราฟของแกนเหล็กตามมาตรฐาน JIS เกรด RM23

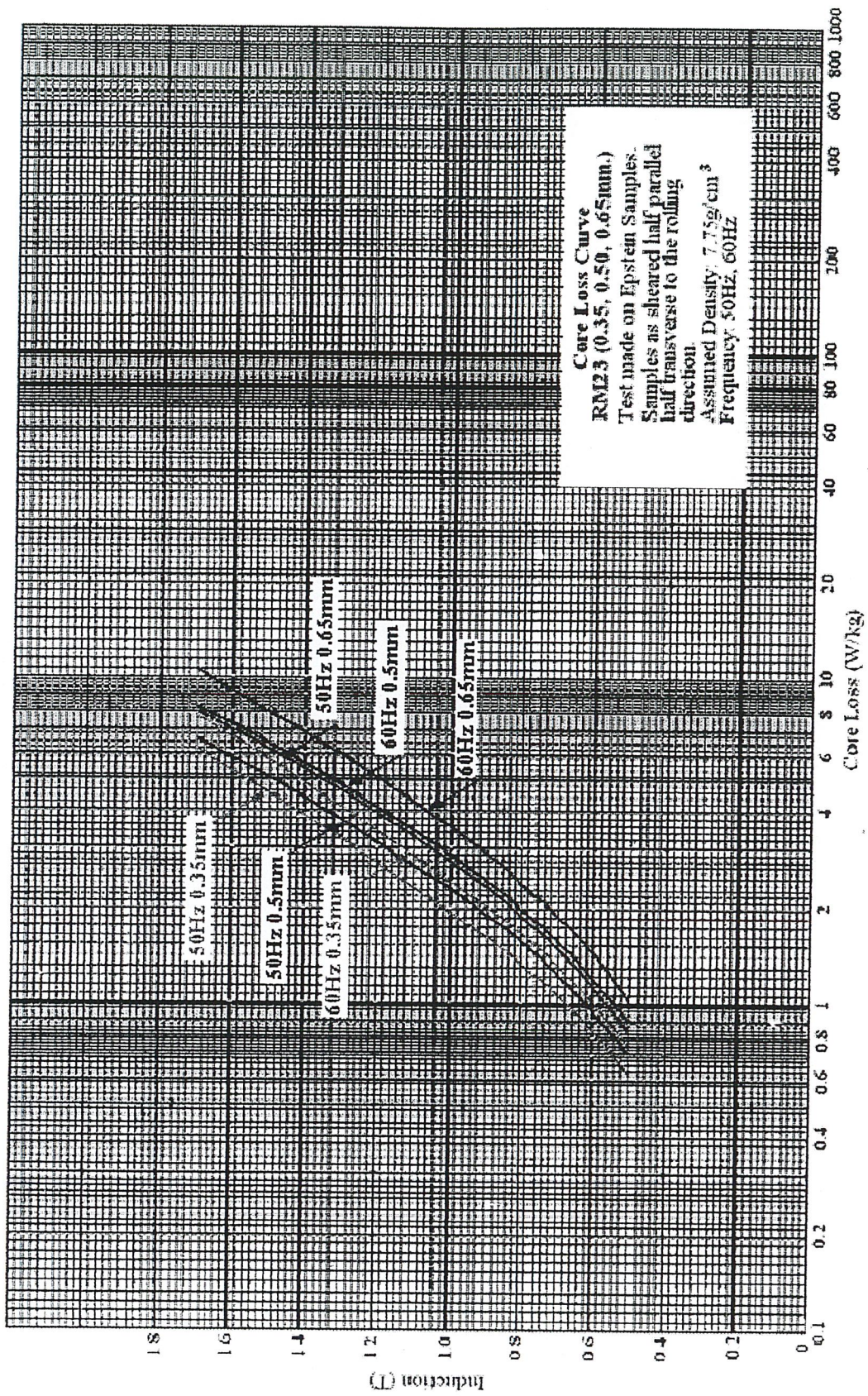
ภาคผนวก ก.2 เป็นกราฟแสดงการสูญเสียในแกนเหล็กที่แปรตามความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก โดยมีหน่วยเป็นวัตต์ต่อกิโลกรัม ซึ่งจะเป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นที่แกนเหล็กต่อน้ำหนักของแกนเหล็ก

ภาคผนวก ก.3 กราฟแสดง RMS Exciting Force (A/m) ซึ่งเป็นกราฟของการทดสอบด้วย A.C. Excitation ที่ความถี่ 50 Hz

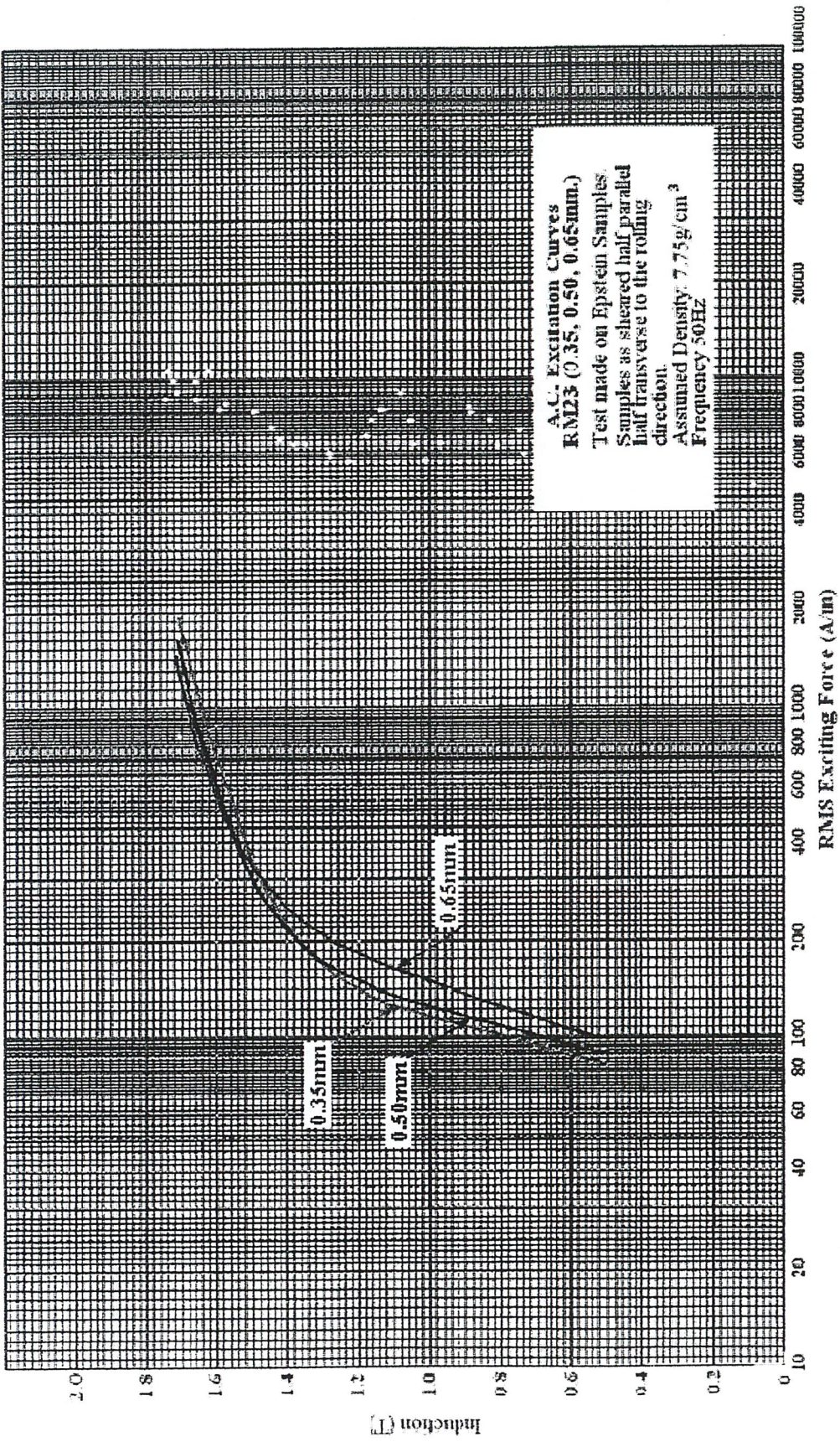
ภาคผนวก ก.4 กราฟของ Exciting Power เพื่อใช้หาค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในขณะที่แกนเหล็กถูกกระตุ้น ซึ่งเป็นการทดสอบที่แกนเหล็ก RM23 หนา 0.50 มม. ที่ความถี่ไฟฟ้า 50 Hz และ 60 Hz



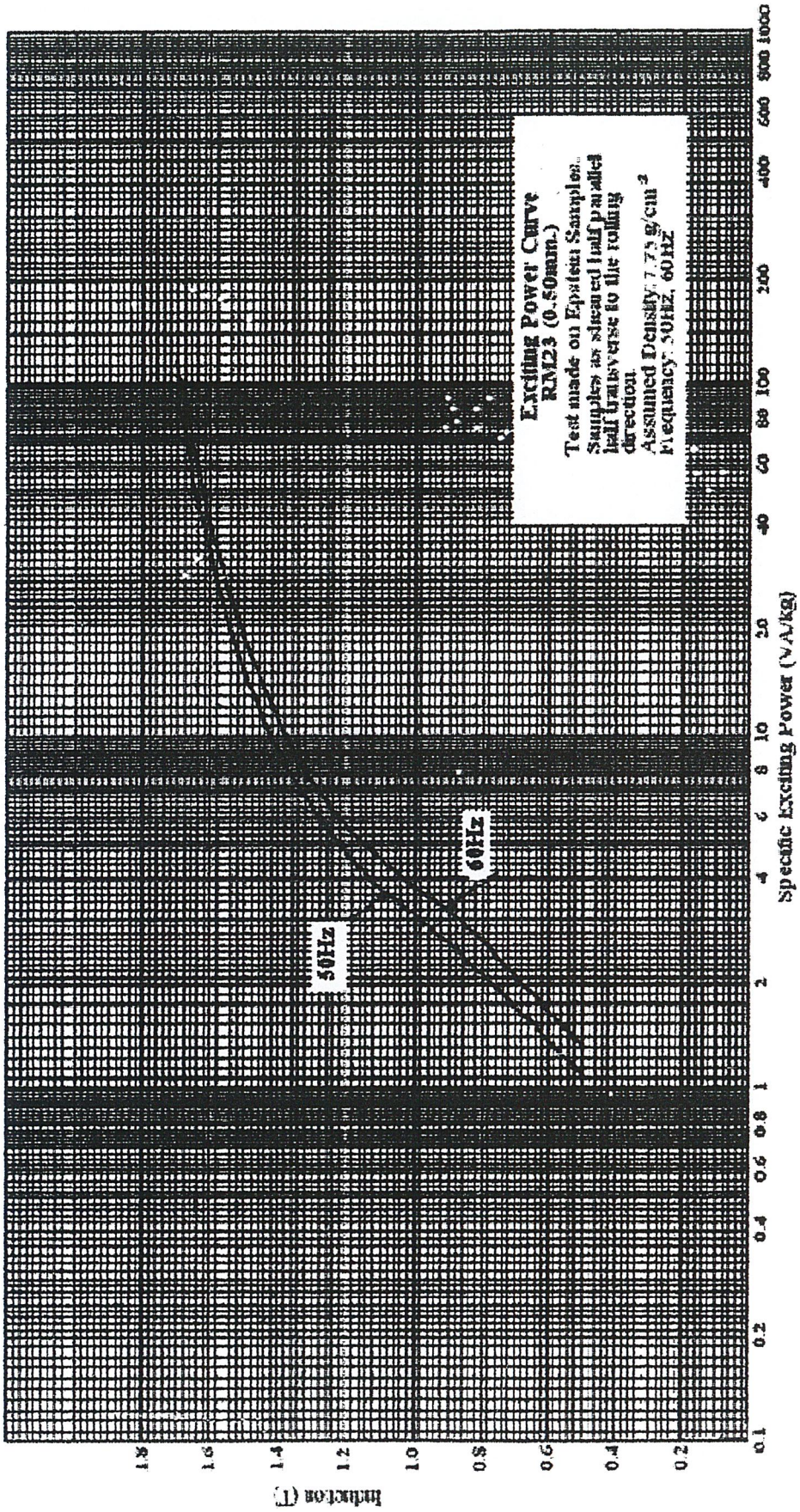
รูปภาคผนวก ก.1 B-H curve



รูปภาคผนวก ก.2 Core loss curve

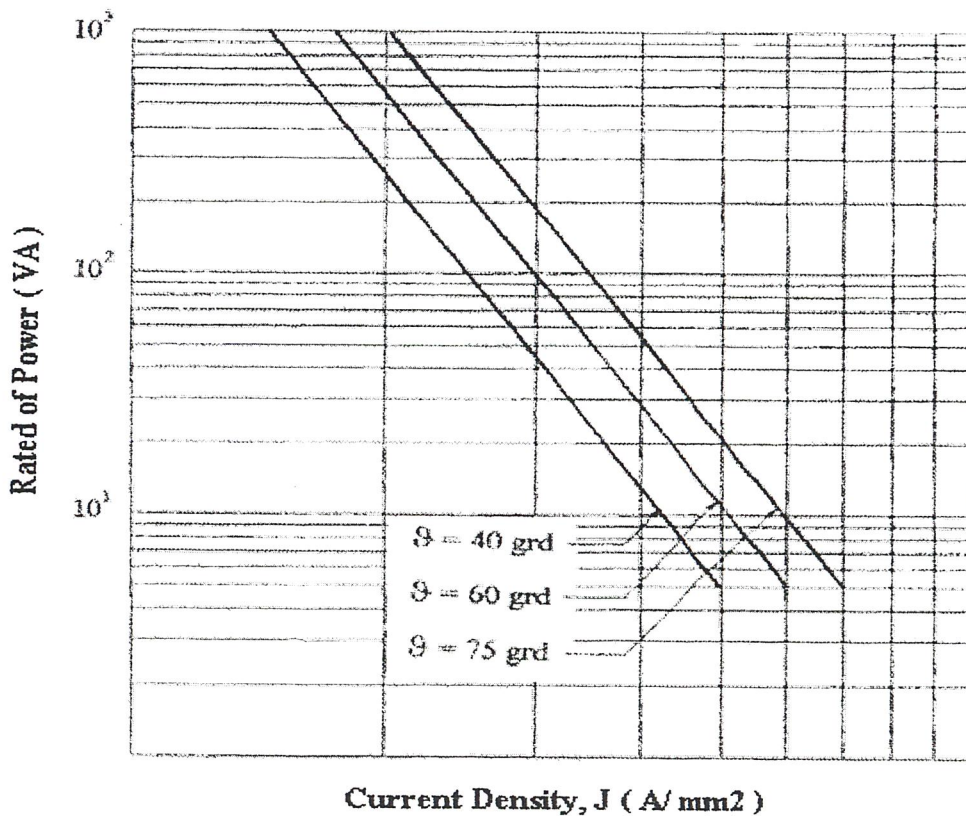
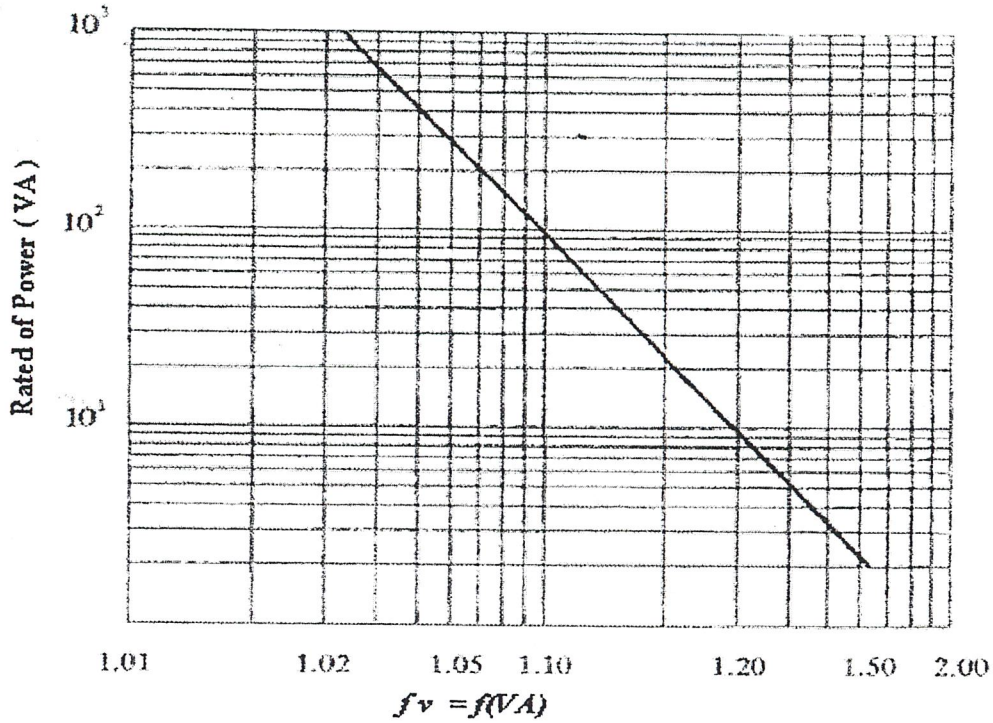


รูปภาคผนวก ก.3 A.C. Excitation curve



รูปภาคผนวก ก.4 Exciting Power curve

ภาคผนวก ก.5 แสดงกราฟในการเลือกใช้ค่าตัวประกอบการสูญเสียในการหาขนาดพื้นที่หน้าตัดลวดตัวนำที่สัมพันธ์กับพิกัดกำลังไฟฟ้า และแสดงกราฟในการเลือกใช้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในลวดทองแดงที่สัมพันธ์กับพิกัดกำลังไฟฟ้า



ภาคผนวก ข.

WIRE GAUGES TABLE

ตารางที่ ข-1. S.W.G. Standard

Gauge S.W.G.	Diameter (mm)	Sectional area (mm <sup>2</sup> )
7/0	12.700	126.7
6/0	11.786	109.1
5/0	10.973	94.56
4/0	10.160	81.07
3/0	9.440	70.12
2/0	8.839	61.36
0	8.230	53.19
1	7.629	45.60
2	7.010	39.60
3	6.401	32.18
4	5.893	27.27
5	5.385	22.77
6	4.877	18.68
7	4.470	15.70
8	4.064	12.97
9	3.685	10.52
10	3.251	8.302
11	2.946	6.818
12	2.642	5.481
13	2.337	4.289
14	2.032	3.243
15	1.829	2.627
16	1.626	2.075
17	1.422	1.589
18	1.219	1.1670
19	1.016	0.8107
20	0.9144	0.6576

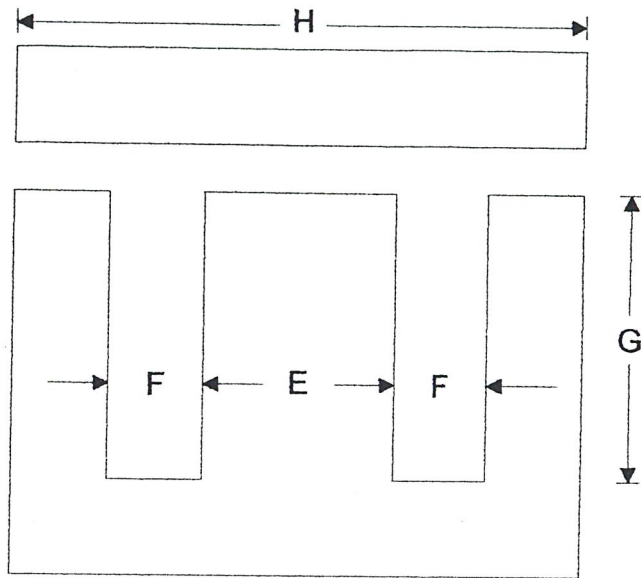
Gauge S.W.G.	Diameter (mm)	Sectional area (mm <sup>2</sup> )
21	0.8128	0.5189
22	0.7112	0.3973
23	0.6096	0.2919
24	0.5583	0.2452
25	0.5080	0.2027
26	0.4572	0.1642
27	0.4166	0.1313
28	0.3759	0.1110
29	0.3454	0.09372
30	0.3150	0.07791
31	0.2946	0.06818
32	0.2743	0.05913
33	0.2540	0.05067
34	0.2337	0.04289
35	0.2134	0.03575
36	0.1930	0.02927
37	0.1727	0.02343
38	0.1524	0.01824
39	0.1321	0.01370
40	0.1219	0.01167
41	0.1180	0.009810
42	0.1016	0.008127
43	0.09114	0.006567
44	0.08138	0.005819
45	0.07113	0.003973
46	0.0696	0.002929
47	0.05080	0.002027
48	0.04064	0.001297
49	0.03048	0.0007297
50	0.02540	0.0005067

ตารางที่ ข-2. A.W.G. Standard

Gauge A. W. G.	Diameter (mm)	Sectional area (mm <sup>2</sup> )
4/0	11.684	107.2
3/0	10.404	85.03
2/0	9.266	67.42
0	8.250	53.49
1	7.348	42.41
2	6.544	33.63
3	5.827	26.66
4	5.189	21.15
5	4.621	16.77
6	4.115	13.30
7	3.665	10.55
8	3.264	8.368
9	2.906	6.632
10	2.588	5.262
11	2.305	4.172
12	2.053	3.309
13	1.828	2.624
14	1.628	2.081
15	1.450	1.650
16	1.291	1.309
17	1.150	1.037
18	1.024	0.8226
19	0.9116	0.6529
20	0.8118	0.5174
21	0.7229	0.4105
22	0.6438	0.3256
23	0.5733	0.2581
24	0.5106	0.2047
25	0.4547	0.1623
26	0.4049	0.1288

Gauge A.W.G.	Diameter (mm)	Sectional area (mm <sup>2</sup> )
27	0.606	0.1021
28	0.3211	0.08097
29	0.2859	0.06425
30	0.2546	0.05097
31	0.2238	0.04039
32	0.2019	0.03203
33	0.1798	0.02540
34	0.1601	0.02014
35	0.1426	0.01597
36	0.1270	0.01267
37	0.1131	0.01005
38	0.1007	0.007968
39	0.08969	0.006319
40	0.07987	0.005012
41	0.07113	0.003973
42	0.06334	0.003151
43	0.05641	0.002495
44	0.05023	0.001982
45	0.04473	0.001572
46	0.03984	0.001246
47	0.03547	0.0009384
48	0.03159	0.0007838
49	0.02813	0.0006216
50	0.02505	0.0004929

TABLE OF DIMENSION OF EI - CORE



ตารางที่ ข-3 Dimension of EI - core

EI number	F (mm)	E (mm)	G (mm)	H (mm)
14	3.5	3.5	10	14
16	4	4	10	16
19	4	5	10	19
24	6	6	12	24
28	6	8	17	28
35	7.2	9.6	19.5	35
40	7.45	12.7	20	40
41	8	13	21	41
48	8	16	24	48
54	9	18	27	54
57	9.5	19	28.5	57
60	10	20	30	60
66	11	22	33	66
76.2	12.7	25.4	38.1	76.2
85.8	14.3	28.6	42.9	85.5
95	15	30	47	95

El number	F (mm)	E (mm)	G (mm)	H (mm)
96	16	32	48	96
105	17.5	35	52.5	105
114	19	38	57	114
133.2	22.2	44.4	66.6	133.2
152	25.4	50.8	76.2	152.4
190	31.95	63.75	95.3	190.5
225	38.1	76	114.65	228.6
245	44.5	88.9	134.05	247.5
300	50.75	101.4	152.6	304.8

Stacking factor [13]

Lamination Thickness (mm)	Stacking Factor
0.0127	0.50
0.0254	0.75
0.0508	0.85
0.1-0.25	0.90
0.27-0.36	0.95

#### ภาคผนวก ก

ในส่วนนี้เป็นข้อมูลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าจากโปรแกรมทั้ง 4 วัตถุประสงค์การออกแบบ คือ น้ำหนักรวมเบา ราคารวมต่ำ ความสูญเสียทางไฟฟ้าน้อย น้ำหนักและกำลังไฟฟ้าโดยรวมน้อย ซึ่งเป็นตารางการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กตั้งแต่ 0.5 เทสลา ถึง 1.7 เทสลา โดยมีพิกัดแรงดัน 220/110 โวลต์ พิกัดแรงดัน 400 VA และ 1000 VA ส่วนของตารางได้แบ่งผลที่ได้จากการอพติไมซ์และผลจากการปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐานแยกตารางไว้ โดยมีข้อมูลการออกแบบที่เหมือนกันคือ ใช้แกนเหล็กเกรด RM23 หนา 0.50 มม. มีความหนาแน่นของแกนเหล็ก 7750 กรัม/ม.<sup>3</sup> ใช้ลวดทองแดงที่มีความหนาแน่น 8900 กรัม/ม.<sup>3</sup> มาตรฐาน S.W.G. ใช้ bobbin ที่มีความหนา 3.00 มม. ออกแบบอุณหภูมิแวดล้อมและอุณหภูมิทำงานไว้ 35 องศาเซลเซียส และ 75 องศาเซลเซียส ข้อมูลราคาของแกนเหล็กและราคาของลวดทองแดงเป็น 50 บาท/ก.ก. และ 150 บาท/ก.ก. ตามลำดับ โดยในตารางมีตัวแปรแทนความหมายต่างกันคือ ขนาดขากลางแกนเหล็ก $2E$  (EI), ความหนาแกนเหล็กหม้อแปลง(D), พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก(Ac), จำนวนรอบด้านปฐมภูมิ (PRI), จำนวนรอบด้านทุติยภูมิ(SEC), โดยในส่วนที่บอกถึงเรื่องน้ำหนักใช้ตัวแปร W ถ้าเป็นเรื่องราคาใช้ตัวแปร C และตัวแปร L แทนกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ซึ่งมี sub script ที่อยู่กับตัวแปรต่างๆ ดังนี้ CORE แทนแกนเหล็ก, CU แทนลวดทองแดง, TOTAL แทนรวมทั้งแกนเหล็กและทองแดง

ตาราง ภาพผนวก ค.1.1 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่า  $B_{MAX}$  ของ Minimum Weight 400 VA 220/110 V (#19/#17 S.W.G.)

ข้อมูล Optimize Value (Standard EI-core dimension)

$B_{MAX}$	EI	D	$A_c$	PRI	SEC	$W_{PRI}$	$W_{SEC}$	VIN	$W_{CORE}$	$W_{CU}$	$W_{TOTAL}$	$C_{CORE}$	$C_{CU}$	$C_{TOTAL}$	$L_{CORE}$	$L_{CU}$	$L_{TOTAL}$
0.50	6.02	4.40	26.51	762	381	1.57	2.07	0.289	7.27	3.65	10.92	364.00	547.00	911.00	5.09	43.63	48.72
0.60	5.34	5.25	28.05	600	300	1.23	1.58	0.366	6.83	2.81	9.64	342.00	421.00	763.00	6.47	33.60	40.07
0.70	5.59	3.95	22.05	655	327	1.25	1.65	0.336	5.61	2.90	8.51	281.00	435.00	716.00	7.02	34.69	41.71
0.80	5.44	3.74	20.32	622	311	1.15	1.52	0.354	5.04	2.67	7.71	252.00	401.00	653.00	7.87	31.96	39.83
0.90	5.32	3.54	18.86	595	298	1.07	1.42	0.370	4.57	2.49	7.07	229.00	374.00	602.00	8.58	29.79	38.36
1.00	5.21	3.40	17.71	571	285	1.00	1.33	0.385	4.21	2.33	6.54	210.00	350.00	560.00	9.38	27.88	37.26
1.10	4.93	3.65	17.98	511	255	0.89	1.16	0.431	4.04	2.05	6.09	202.00	307.00	509.00	10.56	24.52	35.08
1.20	4.82	3.59	17.28	487	244	0.83	1.09	0.451	3.79	1.92	5.71	190.00	288.00	478.00	11.37	22.95	34.32
1.30	4.82	3.31	15.95	487	244	0.81	1.07	0.451	3.50	1.88	5.38	175.00	282.00	457.00	12.69	22.49	35.18
1.40	4.75	3.20	15.22	474	237	0.78	1.02	0.464	3.29	1.80	5.09	165.00	270.00	435.00	13.95	21.52	35.47
1.50	4.74	3.02	14.30	471	236	0.76	1.00	0.467	3.09	1.76	4.85	154.00	264.00	418.00	14.88	21.05	35.93
1.60	4.78	2.75	13.14	481	240	0.76	1.01	0.458	2.86	1.77	4.63	143.00	265.00	409.00	15.99	21.16	37.15
1.70	4.57	2.97	13.57	438	219	0.69	0.91	0.502	2.82	1.59	4.42	141.00	239.00	380.00	18.07	19.04	37.11

ตาราง ภาคผนวก ก.1.2 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่า  $B_{MAX}$  ของ Minimum Weight 400 VA 220/110 V (#19/#17 S.W.G.)  
ข้อมูล Commercial Value (Standardization EI-core size)

$B_{MAX}$	EI	D	$A_c$	PRI	SEC	$W_{PRI}$	$W_{SEC}$	V/N	$W_{CORE}$	$W_{CU}$	$W_{TOTAL}$	$C_{CORE}$	$C_{CU}$	$C_{TOTAL}$	$L_{CORE}$	$L_{CU}$	$L_{TOTAL}$
0.50	6.04	4.39	26.51	762	381	1.57	2.07	0.289	7.30	3.64	10.94	365.00	547.00	912.00	5.11	43.61	48.72
0.60	5.08	5.52	28.05	600	300	1.24	1.61	0.366	6.49	2.85	9.34	325.00	427.00	752.00	6.15	34.07	40.22
0.70	6.04	3.65	22.05	655	327	1.25	1.62	0.336	6.07	2.87	8.94	303.00	430.00	734.00	7.59	34.30	41.89
0.80	6.04	3.36	20.32	622	311	1.15	1.49	0.354	5.59	2.64	8.23	280.00	396.00	676.00	8.74	31.53	40.27
0.90	5.08	3.71	18.86	595	298	1.07	1.44	0.370	4.37	2.51	6.88	218.00	377.00	595.00	8.19	30.04	38.23
1.00	5.08	3.49	17.71	571	285	1.00	1.34	0.385	4.10	2.34	6.44	205.00	351.00	556.00	9.15	28.01	37.15
1.10	5.08	3.54	17.98	511	255	0.89	1.15	0.431	4.16	2.04	6.20	208.00	306.00	514.00	10.88	24.39	35.28
1.20	5.08	3.40	17.28	487	244	0.83	1.07	0.451	4.00	1.90	5.90	200.00	286.00	485.00	12.00	22.75	34.75
1.30	5.08	3.14	15.95	487	244	0.81	1.06	0.451	3.69	1.87	5.56	185.00	280.00	465.00	13.38	22.31	35.70
1.40	5.08	3.00	15.22	474	237	0.78	1.01	0.464	3.52	1.78	5.31	176.00	267.00	444.00	14.92	21.32	36.24
1.50	5.08	2.81	14.30	471	236	0.76	0.99	0.467	3.31	1.75	5.06	165.00	262.00	427.00	15.96	20.86	36.83
1.60	5.08	2.59	13.14	481	240	0.76	1.00	0.458	3.04	1.76	4.80	152.00	264.00	416.00	16.99	21.02	38.00
1.70	4.44	3.06	13.57	438	219	0.69	0.91	0.502	2.75	1.60	4.34	137.00	240.00	377.00	17.57	19.13	36.70

ตาราง ภาพผนวก ค.2.1 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่า  $B_{MAX}$  ของ Minimum Cost 400 VA 220/110 V (#19/#17 S.W.G.)

ข้อมูล Optimize Value (Standard EI-core dimension)

$B_{MAX}$	EI	D	$A_C$	PRI	SEC	$W_{PRI}$	$W_{SEC}$	V/N	$W_{CORE}$	$W_{CU}$	$W_{TOTAL}$	$C_{CORE}$	$C_{CU}$	$C_{TOTAL}$	$L_{CORE}$	$L_{CU}$	$L_{TOTAL}$
0.50	4.83	8.54	41.28	490	245	1.19	1.44	0.449	9.09	2.63	11.72	454.00	394.00	848.00	6.36	31.36	37.72
0.60	4.87	6.99	34.05	495	247	1.09	1.35	0.445	7.55	2.44	9.99	378.00	366.00	743.00	7.15	29.15	36.30
0.70	4.49	7.56	34.00	425	212	0.94	1.14	0.518	6.96	2.08	9.05	348.00	313.00	661.00	8.70	24.92	33.62
0.80	4.77	5.73	27.28	463	232	0.92	1.16	0.475	5.92	2.08	8.01	296.00	312.00	609.00	9.26	24.86	34.12
0.90	4.28	7.01	29.99	374	187	0.78	0.95	0.588	5.84	1.73	7.57	292.00	259.00	551.00	10.96	20.65	31.61
1.00	4.06	7.35	29.83	339	169	0.71	0.85	0.649	5.52	1.56	7.08	276.00	234.00	510.00	12.31	18.65	30.96
1.10	4.07	6.58	26.78	343	172	0.68	0.83	0.641	4.97	1.51	6.48	249.00	227.00	475.00	13.00	18.03	31.03
1.20	3.88	6.86	26.61	317	158	0.63	0.76	0.695	4.70	1.39	6.10	235.00	209.00	444.00	14.11	16.62	30.74
1.30	3.85	6.47	24.94	312	156	0.60	0.73	0.706	4.38	1.33	5.71	219.00	200.00	419.00	15.88	15.91	31.78
1.40	3.71	6.72	24.94	289	145	0.56	0.68	0.760	4.22	1.24	5.45	211.00	185.00	396.00	17.86	14.76	32.62
1.50	3.64	6.62	24.13	279	140	0.53	0.64	0.788	4.01	1.18	5.18	200.00	176.00	377.00	19.33	14.04	33.37
1.60	3.58	6.57	23.51	269	134	0.51	0.61	0.819	3.83	1.12	4.95	192.00	167.00	359.00	21.40	13.35	34.75
1.70	3.62	5.94	21.53	276	138	0.50	0.61	0.797	3.56	1.10	4.66	178.00	166.00	344.00	22.76	13.20	35.96

ตาราง ภาคผนวก ก.2.2 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่า  $B_{MAX}$  ของ Minimum Cost 400 VA 220/110 V (#19/#17 S.W.G.)

ข้อมูล Commercial Value (Standardization EI-core size)

$B_{MAX}$	EI	D	$A_c$	PRI	SEC	$W_{PRI}$	$W_{SEC}$	V/N	$W_{CORE}$	$W_{CU}$	$W_{TOTAL}$	$C_{CORE}$	$C_{CU}$	$C_{TOTAL}$	$L_{CORE}$	$L_{CU}$	$L_{TOTAL}$
0.50	5.08	8.13	41.28	490	245	1.17	1.41	0.449	9.56	2.58	12.13	478.00	387.00	864.00	6.69	30.77	37.46
0.60	5.08	6.70	34.05	495	247	1.08	1.32	0.445	7.88	2.40	10.29	394.00	361.00	755.00	7.46	28.74	36.21
0.70	4.44	7.66	34.00	425	212	0.94	1.15	0.518	6.88	2.09	8.97	344.00	314.00	658.00	8.60	25.04	33.63
0.80	5.08	5.37	27.28	463	232	0.91	1.13	0.475	6.32	2.05	8.36	316.00	307.00	623.00	9.87	24.43	34.31
0.90	4.44	6.76	29.99	374	187	0.77	0.93	0.588	6.07	1.70	7.77	303.00	256.00	559.00	11.38	20.37	31.75
1.00	4.44	6.72	29.83	339	169	0.69	0.82	0.649	6.04	1.51	7.55	302.00	226.00	528.00	13.47	18.05	31.51
1.10	4.44	6.03	26.78	343	172	0.66	0.80	0.641	5.42	1.47	6.89	271.00	220.00	491.00	14.17	17.51	31.69
1.20	3.80	7.00	26.61	317	158	0.63	0.77	0.695	4.61	1.40	6.01	230.00	210.00	441.00	13.82	16.76	30.59
1.30	3.80	6.56	24.94	312	156	0.60	0.74	0.706	4.32	1.34	5.66	216.00	201.00	417.00	15.66	15.99	31.65
1.40	3.80	6.56	24.94	289	145	0.55	0.67	0.760	4.32	1.22	5.54	216.00	184.00	400.00	18.29	14.63	32.92
1.50	3.80	6.35	24.13	279	140	0.52	0.63	0.788	4.18	1.16	5.34	209.00	174.00	383.00	20.16	13.81	33.97
1.60	3.80	6.19	23.51	269	134	0.50	0.59	0.819	4.07	1.09	5.16	204.00	164.00	367.00	22.73	13.05	35.78
1.70	3.80	5.67	21.53	276	138	0.49	0.60	0.797	3.73	1.09	4.81	186.00	163.00	349.00	23.86	12.99	36.85

ตาราง ภาคผนวก ก.3.1 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่า  $B_{MAX}$  ของ Minimum Loss 400 VA 220/110 V (#19/#17 S.W.G.)

ข้อมูล Optimize Value (Standard EI-core dimension)

$B_{MAX}$	EI	D	$A_c$	PRI	SEC	$W_{PRI}$	$W_{SEC}$	V/N	$W_{CORE}$	$W_{CU}$	$W_{TOTAL}$	$C_{CORE}$	$C_{CU}$	$C_{TOTAL}$	$L_{CORE}$	$L_{CU}$	$L_{TOTAL}$
0.50	4.45	11.62	51.76	390	195	1.08	1.25	0.563	10.51	2.33	12.84	525.00	350.00	875.00	7.36	27.90	35.26
0.60	4.02	12.81	51.52	327	163	0.94	1.07	0.673	9.44	2.00	11.44	472.00	300.00	772.00	8.94	23.95	32.88
0.70	3.86	12.40	47.84	302	151	0.84	0.96	0.729	8.41	1.79	10.20	420.00	269.00	689.00	10.51	21.40	31.91
0.80	3.74	11.55	43.26	292	146	0.77	0.88	0.753	7.38	1.65	9.04	369.00	248.00	617.00	11.54	19.73	31.27
0.90	3.65	11.15	40.64	276	138	0.71	0.81	0.796	6.75	1.52	8.27	338.00	227.00	565.00	12.66	18.12	30.78
1.00	3.67	9.91	36.39	278	139	0.66	0.77	0.792	6.09	1.43	7.52	304.00	215.00	519.00	13.58	17.07	30.65
1.10	3.73	8.46	31.56	291	146	0.64	0.76	0.756	5.36	1.39	6.75	268.00	209.00	477.00	14.02	16.60	30.62
1.20	3.68	8.05	29.61	284	142	0.60	0.71	0.774	4.96	1.32	6.28	248.00	197.00	445.00	14.89	15.74	30.63
1.30	3.69	7.38	27.22	286	143	0.58	0.69	0.770	4.58	1.27	5.85	229.00	191.00	420.00	16.59	15.17	31.76
1.40	3.72	6.69	24.85	290	145	0.56	0.68	0.757	4.21	1.24	5.45	210.00	185.00	396.00	17.83	14.79	32.62
1.50	3.55	7.35	26.09	258	129	0.51	0.61	0.852	4.22	1.12	5.34	211.00	168.00	379.00	20.36	13.41	33.77
1.60	3.77	5.62	21.17	298	149	0.53	0.65	0.738	3.64	1.19	4.82	182.00	178.00	360.00	20.29	14.20	34.49
1.70	4.02	4.38	17.59	338	169	0.56	0.71	0.651	3.22	1.27	4.49	161.00	190.00	351.00	20.61	15.16	35.78

ตาราง ภาคผนวก ก.3.2 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลค่า  $B_{MAX}$  ของ Minimum Loss 400 VA 220/110 V (#19/#17 S.W.G.)

ข้อมูล Commercial Value (Standardization EI-core size)

$B_{MAX}$	EI	D	$A_C$	PRI	SEC	$W_{PRI}$	$W_{SEC}$	V/N	$W_{CORE}$	$W_{CU}$	$W_{TOTAL}$	$C_{CORE}$	$C_{CU}$	$C_{TOTAL}$	$L_{CORE}$	$L_{CU}$	$L_{TOTAL}$
0.50	4.44	11.66	51.76	390	195	1.08	1.25	0.563	10.47	2.34	12.81	524.00	351.00	874.00	7.33	27.95	35.28
0.60	4.44	11.60	51.52	327	163	0.89	1.01	0.673	10.42	1.90	12.33	521.00	285.00	806.00	9.87	22.74	32.61
0.70	3.80	12.59	47.84	302	151	0.84	0.96	0.729	8.28	1.81	10.09	414.00	271.00	685.00	10.35	21.58	31.93
0.80	3.80	11.38	43.26	292	146	0.76	0.88	0.753	7.49	1.64	9.13	375.00	246.00	621.00	11.71	19.58	31.29
0.90	3.80	10.69	40.64	276	138	0.69	0.79	0.796	7.04	1.48	8.52	352.00	222.00	574.00	13.20	17.73	30.92
1.00	3.80	9.58	36.39	278	139	0.65	0.75	0.792	6.30	1.41	7.71	315.00	211.00	526.00	14.06	16.78	30.84
1.10	3.80	8.30	31.56	291	146	0.63	0.75	0.756	5.46	1.38	6.84	273.00	207.00	480.00	14.29	16.46	30.75
1.20	3.80	7.79	29.61	284	142	0.59	0.70	0.774	5.13	1.30	6.42	256.00	195.00	451.00	15.38	15.51	30.90
1.30	3.80	7.16	27.22	286	143	0.57	0.68	0.770	4.71	1.26	5.97	236.00	188.00	424.00	17.09	14.98	32.07
1.40	3.80	6.54	24.85	290	145	0.56	0.67	0.757	4.30	1.23	5.53	215.00	184.00	399.00	18.23	14.66	32.89
1.50	3.80	6.87	26.09	258	129	0.50	0.59	0.852	4.52	1.09	5.61	226.00	164.00	390.00	21.79	13.04	34.84
1.60	3.80	5.57	21.17	298	149	0.53	0.65	0.738	3.67	1.18	4.85	183.00	178.00	361.00	20.47	14.16	34.63
1.70	4.44	3.96	17.59	338	169	0.55	0.69	0.651	3.56	1.24	4.80	178.00	186.00	364.00	22.77	14.82	37.60

ตาราง ภาพผนวก ค.4.1 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่า  $B_{MAX}$  ของ Multi Design 400 VA 220/110 V (#19/#17 S.W.G.)  
 ข้อมูล Optimize Value (Standard EI-core dimension)

$B_{MAX}$	EI	D	$A_c$	PRI	SEC	$W_{PRI}$	$W_{SEC}$	V/N	$W_{CORE}$	$W_{CU}$	$W_{TOTAL}$	$C_{CORE}$	$C_{CU}$	$C_{TOTAL}$	$L_{CORE}$	$L_{CU}$	$L_{TOTAL}$
0.50	5.64	5.73	32.32	625	313	1.35	1.71	0.352	8.30	3.06	11.36	415.00	459.00	874.00	5.81	36.55	42.36
0.60	4.74	8.01	37.97	444	222	1.03	1.24	0.496	8.20	2.26	10.47	410.00	340.00	750.00	7.77	27.02	34.79
0.70	4.17	9.47	39.49	366	183	0.89	1.05	0.602	7.51	1.94	9.44	375.00	290.00	666.00	9.38	23.10	32.48
0.80	4.09	9.24	37.78	334	167	0.79	0.93	0.658	7.04	1.72	8.76	352.00	257.00	609.00	11.01	20.51	31.52
0.90	3.97	8.55	33.98	330	165	0.74	0.88	0.666	6.15	1.62	7.78	308.00	244.00	551.00	11.54	19.43	30.97
1.00	3.97	7.76	30.82	328	164	0.70	0.84	0.671	5.58	1.54	7.12	279.00	231.00	510.00	12.44	18.37	30.82
1.10	3.78	8.08	30.57	301	150	0.65	0.76	0.732	5.27	1.41	6.68	264.00	212.00	475.00	13.78	16.85	30.64
1.20	3.76	7.71	29.02	290	145	0.60	0.72	0.758	4.97	1.32	6.30	249.00	198.00	447.00	14.92	15.80	30.72
1.30	3.85	6.48	24.96	311	156	0.60	0.73	0.706	4.38	1.33	5.71	219.00	200.00	419.00	15.88	15.89	31.78
1.40	4.17	4.87	20.33	355	177	0.52	0.78	0.620	3.86	1.40	5.27	193.00	211.00	404.00	16.36	16.76	33.13
1.50	3.93	5.30	20.82	324	162	0.57	0.71	0.680	3.72	1.29	5.01	186.00	193.00	379.00	17.97	15.37	33.34
1.60	4.04	4.57	18.44	343	172	0.58	0.73	0.642	3.39	1.31	4.70	170.00	196.00	366.00	18.95	15.64	34.59
1.70	3.85	4.94	19.04	312	156	0.53	0.66	0.704	3.34	1.20	4.54	167.00	179.00	347.00	21.40	14.31	35.71

ตาราง ภาคผนวก ค.4.2 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่า  $B_{Max}$  ของ Multi Design 400 VA 220/110 V (#19/#17 S.W.G.)

ข้อมูล Commercial Value (Standardization EI-core size)

$B_{Max}$	EI	D	$A_c$	PRI	SEC	$W_{PRI}$	$W_{SEC}$	V/N	$W_{CORE}$	$W_{CU}$	$W_{TOTAL}$	$C_{CORE}$	$C_{CU}$	$C_{TOTAL}$	$L_{CORE}$	$L_{CU}$	$L_{TOTAL}$
0.50	6.04	5.35	32.32	625	313	1.34	1.67	0.352	8.90	3.01	11.91	445.00	452.00	897.00	6.23	36.00	42.22
0.60	4.44	8.55	37.97	444	222	1.05	1.28	0.496	7.68	2.33	10.01	384.00	349.00	733.00	7.28	27.75	35.03
0.70	4.44	8.89	39.49	366	183	0.87	1.02	0.602	7.99	1.88	9.87	400.00	283.00	682.00	9.99	22.47	32.46
0.80	4.44	8.51	37.78	334	167	0.76	0.89	0.658	7.64	1.66	9.30	382.00	248.00	631.00	11.95	19.80	31.75
0.90	4.44	7.65	33.98	330	165	0.71	0.84	0.666	6.88	1.55	8.43	344.00	233.00	577.00	12.89	18.57	31.46
1.00	4.44	6.94	30.82	328	164	0.68	0.80	0.671	6.24	1.48	7.71	312.00	221.00	533.00	13.91	17.61	31.53
1.10	3.80	8.04	30.57	301	150	0.54	0.76	0.732	5.29	1.41	6.70	265.00	211.00	476.00	13.84	16.82	30.66
1.20	3.80	7.64	29.02	290	145	0.60	0.71	0.758	5.02	1.32	6.34	251.00	197.00	449.00	15.07	15.74	30.81
1.30	3.80	6.57	24.96	311	156	0.60	0.74	0.706	4.32	1.34	5.66	216.00	201.00	417.00	15.67	15.98	31.64
1.40	4.44	4.58	20.33	355	177	0.62	0.77	0.620	4.11	1.38	5.49	206.00	207.00	413.00	17.42	16.50	33.91
1.50	4.44	4.69	20.82	324	162	0.56	0.68	0.680	4.21	1.25	5.46	211.00	187.00	397.00	20.32	14.86	35.18
1.60	4.44	4.15	18.44	343	172	0.57	0.71	0.642	3.73	1.28	5.01	187.00	192.00	378.00	20.83	15.29	36.12
1.70	3.80	5.01	19.04	312	156	0.53	0.67	0.704	3.30	1.20	4.50	165.00	180.00	345.00	21.10	14.37	35.47

ตาราง ภาพผนวก ก.5.1 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่า  $B_{MAX}$  ของ Minimum Weight 1000 VA 220/110 V (#15/#13 S.W.G.)

ข้อมูล Optimize Value (Standard EI-core dimension)

$B_{MAX}$	EI	D	$A_C$	PRI	SEC	$W_{PRI}$	$W_{SEC}$	VIN	$W_{CORE}$	$W_{CU}$	$W_{TOTAL}$	$C_{CORE}$	$C_{CU}$	$C_{TOTAL}$	$L_{CORE}$	$L_{CU}$	$L_{TOTAL}$
0.50	8.34	4.93	41.12	492	246	4.23	4.72	0.448	15.63	8.95	24.58	782.00	1342.0	2124.0	10.94	78.57	89.52
0.60	7.80	5.03	39.24	429	215	3.55	3.94	0.513	13.94	7.49	21.43	697.00	1124.0	1821.0	13.20	65.75	78.95
0.70	7.38	5.08	37.51	385	192	3.09	3.39	0.572	12.61	6.48	19.09	630.00	972.00	1602.0	15.76	56.95	72.71
0.80	6.81	5.66	38.53	328	164	2.59	2.81	0.671	11.95	5.41	17.36	598.00	811.00	1409.0	18.68	47.37	66.05
0.90	7.00	4.64	32.44	346	173	2.61	2.89	0.636	10.34	5.50	15.84	517.00	825.00	1342.0	19.39	48.31	67.70
1.00	6.76	4.63	31.31	323	161	2.39	2.62	0.682	9.65	5.01	14.65	482.00	751.00	1233.0	21.52	43.99	65.51
1.10	6.54	4.65	30.41	302	151	2.19	2.40	0.728	9.06	4.59	13.65	453.00	689.00	1142.0	23.69	40.32	64.01
1.20	6.58	4.18	27.52	306	153	2.16	2.39	0.719	8.25	4.55	12.80	412.00	683.00	1095.0	24.75	39.99	64.73
1.30	6.39	4.22	26.95	288	144	2.00	2.21	0.763	7.85	4.21	12.05	392.00	631.00	1024.0	28.45	37.00	65.45
1.40	6.20	4.29	26.60	271	136	1.86	2.05	0.811	7.51	3.91	11.42	376.00	586.00	962.00	31.82	34.26	66.08
1.50	6.03	4.34	26.18	257	129	1.74	1.91	0.855	7.20	3.65	10.85	360.00	548.00	908.00	34.73	32.01	66.74
1.60	5.97	4.20	25.07	252	126	1.68	1.84	0.873	6.82	3.52	10.34	341.00	528.00	869.00	38.08	30.88	68.96
1.70	5.96	3.97	23.68	251	126	1.64	1.82	0.876	6.43	3.46	9.89	322.00	519.00	841.00	41.16	30.33	71.49

ตาราง ภาคผนวก ค.5.2 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่า  $B_{MAX}$  ของ Minimum Weight 1000 VA 220/110 V (#15/#13 S.W.G.)

ข้อมูล Commercial Value (Standardization EI-core size)

$B_{MAX}$	EI	D	$A_C$	PRI	SEC	$W_{PRI}$	$W_{SEC}$	V/N	$W_{CORE}$	$W_{CU}$	$W_{TOTAL}$	$C_{CORE}$	$C_{CU}$	$C_{TOTAL}$	$L_{CORE}$	$L_{CU}$	$L_{TOTAL}$
0.50	7.82	5.26	41.12	492	246	4.24	4.81	0.448	14.65	9.05	23.70	733.00	1357.0	2090.0	10.26	79.60	89.86
0.60	7.82	5.02	39.24	429	215	3.55	3.94	0.513	13.98	7.49	21.47	699.00	1123.0	1822.0	13.24	65.71	78.96
0.70	7.82	4.80	37.51	385	192	3.08	3.34	0.572	13.37	6.42	19.79	668.00	964.00	1632.0	16.71	56.38	73.08
0.80	7.82	4.93	38.53	328	164	2.58	2.71	0.671	13.73	5.29	19.02	686.00	794.00	1480.0	21.46	46.22	67.68
0.90	7.82	4.15	32.44	346	173	2.62	2.81	0.636	11.56	5.43	16.99	578.00	814.00	1392.0	21.67	47.56	69.23
1.00	7.82	4.00	31.31	323	161	2.39	2.54	0.682	11.16	4.93	16.09	558.00	739.00	1297.0	24.89	43.16	68.05
1.10	6.04	5.04	30.41	302	151	2.21	2.47	0.728	8.37	4.67	13.04	419.00	701.00	1119.0	21.89	41.09	62.98
1.20	6.04	4.56	27.52	306	153	2.17	2.46	0.719	7.57	4.63	12.20	379.00	694.00	1073.0	22.72	40.74	63.47
1.30	6.04	4.46	26.95	288	144	2.01	2.24	0.763	7.42	4.25	11.67	371.00	638.00	1009.0	26.89	37.44	64.34
1.40	6.04	4.40	26.60	271	136	1.86	2.06	0.811	7.32	3.93	11.25	366.00	589.00	955.00	31.01	34.45	65.45
1.50	6.04	4.34	26.18	257	129	1.74	1.91	0.855	7.21	3.65	10.86	360.00	548.00	908.00	34.77	32.01	66.77
1.60	6.04	4.15	25.07	252	126	1.68	1.83	0.873	6.90	3.51	10.41	345.00	527.00	872.00	38.52	30.81	69.33
1.70	6.04	3.92	23.68	251	126	1.64	1.81	0.876	6.52	3.45	9.97	326.00	518.00	844.00	41.71	30.26	71.96

ตาราง ภาพผนวก ก.6.1 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่า  $B_{MAX}$  ของ Minimum Cost 1000 VA 220/110 V (#15/#13 S.W.G.)

ข้อมูล Optimize Value (Standard EI-core dimension)

$B_{MAX}$	EI	D	$A_c$	PRI	SEC	$W_{PRI}$	$W_{SEC}$	V/N	$W_{CORE}$	$W_{CU}$	$W_{TOTAL}$	$C_{CORE}$	$C_{CU}$	$C_{TOTAL}$	$L_{CORE}$	$L_{CU}$	$L_{TOTAL}$
0.50	8.39	5.18	43.48	465	232	4.01	4.39	0.473	16.62	8.41	25.03	831.00	1261.0	2092.0	11.64	73.84	85.48
0.60	6.05	10.79	65.25	258	129	2.53	2.55	0.852	17.99	5.08	23.06	899.00	761.00	1661.0	17.03	44.19	61.22
0.70	5.91	9.98	58.95	245	122	2.28	2.30	0.898	15.87	4.58	20.45	793.00	688.00	1481.0	19.83	39.98	59.82
0.80	5.93	8.60	51.00	248	124	2.16	2.22	0.888	13.78	4.37	18.15	689.00	656.00	1345.0	21.54	38.09	59.63
0.90	5.49	9.62	52.80	213	106	1.89	1.90	1.035	13.21	3.79	17.00	661.00	569.00	1229.0	24.77	33.01	57.78
1.00	5.41	9.07	49.03	206	103	1.76	1.79	1.067	12.08	3.55	15.63	604.00	533.00	1137.0	26.95	30.94	57.88
1.10	5.50	7.84	43.13	213	106	1.71	1.76	1.033	10.81	3.47	14.28	541.00	521.00	1061.0	28.27	30.33	58.60
1.20	5.23	8.34	43.62	193	97	1.56	1.60	1.140	10.39	3.17	13.56	520.00	475.00	994.00	31.17	27.52	58.69
1.30	5.76	5.98	34.43	226	113	1.65	1.74	0.975	9.04	3.39	12.43	452.00	509.00	961.00	32.77	29.64	62.41
1.40	5.04	8.00	40.27	179	90	1.40	1.43	1.227	9.24	2.83	12.07	462.00	425.00	887.00	39.14	24.63	63.77
1.50	5.79	5.23	30.29	222	111	1.54	1.64	0.989	7.99	3.18	11.17	400.00	477.00	877.00	38.55	27.87	66.42
1.60	5.65	5.27	29.73	212	106	1.46	1.54	1.036	7.65	3.00	10.65	382.00	450.00	833.00	42.71	26.30	69.01
1.70	5.44	5.56	30.29	196	98	1.35	1.41	1.121	7.52	2.76	10.28	376.00	414.00	790.00	48.10	24.17	72.27

ตาราง ภาคผนวก ค.6.2 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่า  $B_{MAX}$  ของ Minimum Cost 400 VA 220/110 V (#15/#13 S.W.G.)

ข้อมูล Commercial Value (Standardization EI-core size)

$B_{MAX}$	EI	D	$A_c$	PRI	SEC	$W_{PRI}$	$W_{SEC}$	V/N	$W_{CORE}$	$W_{CU}$	$W_{TOTAL}$	$C_{CORE}$	$C_{CU}$	$C_{TOTAL}$	$L_{CORE}$	$L_{CU}$	$L_{TOTAL}$
0.50	7.82	5.56	43.48	465	232	4.03	4.48	0.473	15.49	8.51	24.00	775.00	1276.0	2051.0	10.85	74.86	85.70
0.60	6.04	10.80	65.25	258	129	2.53	2.55	0.852	17.96	5.08	23.04	898.00	762.00	1660.0	17.01	44.22	61.23
0.70	6.04	9.76	58.95	245	122	2.27	2.28	0.898	16.22	4.55	20.77	811.00	682.00	1493.0	20.28	39.63	59.91
0.80	6.04	8.44	51.00	248	124	2.14	2.20	0.888	14.04	4.35	18.38	702.00	652.00	1354.0	21.94	37.84	59.78
0.90	5.08	10.39	52.80	213	106	1.95	1.97	1.035	12.22	3.92	16.14	611.00	588.00	1199.0	22.92	34.17	57.09
1.00	5.08	9.65	49.03	206	103	1.80	1.84	1.067	11.35	3.64	14.99	567.00	547.00	1114.0	25.32	31.77	57.09
1.10	6.04	7.14	43.13	213	106	1.68	1.69	1.033	11.87	3.37	15.24	594.00	506.00	1099.0	31.04	29.43	60.48
1.20	5.08	8.59	43.62	193	97	1.58	1.62	1.140	10.10	3.20	13.30	505.00	480.00	985.00	30.29	27.84	58.13
1.30	6.04	5.70	34.43	226	113	1.64	1.72	0.975	9.48	3.36	12.83	474.00	503.00	977.00	34.36	29.28	63.64
1.40	5.08	7.93	40.27	179	90	1.39	1.43	1.227	9.32	2.82	12.14	466.00	423.00	889.00	39.48	24.55	64.03
1.50	6.04	5.01	30.29	222	111	1.54	1.62	0.989	8.34	3.15	11.49	417.00	473.00	890.00	40.21	27.62	67.83
1.60	5.08	5.85	29.73	212	106	1.49	1.60	1.036	6.88	3.09	9.97	344.00	463.00	807.00	38.42	27.12	65.55
1.70	5.08	5.96	30.29	196	98	1.37	1.45	1.121	7.01	2.82	9.83	351.00	422.00	773.00	44.88	24.66	69.54

ตาราง ภาพผนวก ก.7.1 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่า  $B_{MAX}$  ของ Minimum Loss 1000 VA 220/110 V (#15/#13 S.W.G.)

ข้อมูล Optimize Value (Standard EI-core dimension)

$B_{MAX}$	Ei	D	$A_c$	PRI	SEC	$W_{PRI}$	$W_{SEC}$	V/N	$W_{CORE}$	$W_{CU}$	$W_{TOTAL}$	$C_{CORE}$	$C_{CU}$	$C_{TOTAL}$	$L_{CORE}$	$L_{CU}$	$L_{TOTAL}$
0.50	5.46	18.81	102.63	197	98	2.58	2.41	1.117	25.52	4.98	30.50	1276.0	748.00	2024.0	17.86	43.15	61.02
0.60	5.29	16.78	88.76	190	95	2.29	2.17	1.159	21.40	4.46	25.86	1070.0	669.00	1739.0	20.26	38.54	58.80
0.70	5.20	14.67	76.30	189	95	2.08	2.02	1.163	18.09	4.10	22.19	904.00	616.00	1520.0	22.61	35.49	58.10
0.80	5.11	13.42	68.59	184	92	1.91	1.86	1.195	15.97	3.77	19.74	799.00	565.00	1364.0	24.96	32.71	57.67
0.90	5.14	11.69	60.08	187	93	1.80	1.76	1.177	14.07	3.56	17.63	704.00	533.00	1237.0	26.39	30.94	57.33
1.00	6.10	6.74	41.12	246	123	1.93	2.02	0.895	11.43	3.95	15.38	572.00	593.00	1164.0	25.50	34.46	59.97
1.10	5.65	7.40	41.81	220	110	1.74	1.80	1.001	10.77	3.54	14.31	538.00	531.00	1070.0	28.15	30.88	59.03
1.20	5.69	6.61	37.56	224	112	1.70	1.78	0.981	9.73	3.47	13.21	487.00	521.00	1008.0	29.20	30.37	59.56
1.30	5.77	5.72	33.02	235	118	1.70	1.82	0.935	8.68	3.52	12.21	434.00	528.00	963.00	31.48	30.81	62.29
1.40	5.42	6.48	35.15	205	103	1.51	1.58	1.071	8.69	3.09	11.78	434.00	463.00	898.00	36.80	26.95	63.75
1.50	5.35	6.22	33.29	202	101	1.45	1.52	1.087	8.12	2.98	11.10	406.00	447.00	853.00	39.17	26.06	65.23
1.60	5.67	4.90	27.79	227	114	1.54	1.67	0.968	7.19	3.21	10.39	359.00	481.00	841.00	40.12	28.09	68.20
1.70	5.85	4.19	24.53	242	121	1.59	1.74	0.908	6.54	3.33	9.88	327.00	500.00	827.00	41.87	29.30	71.17

ตาราง ภาพผนวก ก.7.2 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่า  $B_{MAX}$  ของ Minimum Loss 1000 VA 220/110 V (#15/#13 S.W.G.)

ข้อมูล Commercial Value (Standardization EI-core size)

$B_{MAX}$	EI	D	$A_c$	PRI	SEC	$W_{PRI}$	$W_{SEC}$	V/N	$W_{CORE}$	$W_{CU}$	$W_{TOTAL}$	$C_{CORE}$	$C_{CU}$	$C_{TOTAL}$	$L_{CORE}$	$L_{CU}$	$L_{TOTAL}$
0.50	5.08	20.20	102.63	197	98	2.69	2.52	1.117	23.76	5.20	28.96	1188.0	781.00	1968.0	16.63	45.07	61.70
0.60	5.08	17.47	88.76	190	95	2.34	2.23	1.159	20.55	4.57	25.11	1027.0	685.00	1712.0	19.46	39.45	58.91
0.70	5.08	15.02	76.30	189	95	2.11	2.05	1.163	17.66	4.16	21.82	883.00	623.00	1507.0	22.08	35.96	58.03
0.80	5.08	13.50	68.59	184	92	1.92	1.86	1.195	15.88	3.78	19.66	794.00	567.00	1361.0	24.82	32.81	57.63
0.90	5.08	11.83	60.08	187	93	1.81	1.77	1.177	13.91	3.58	17.48	695.00	537.00	1232.0	26.08	31.12	57.20
1.00	6.04	6.81	41.12	246	123	1.94	2.02	0.895	11.32	3.96	15.28	566.00	594.00	1160.0	25.25	34.57	59.81
1.10	6.04	6.92	41.81	220	110	1.72	1.76	1.001	11.51	3.47	14.98	575.00	521.00	1097.0	30.09	30.25	60.34
1.20	6.04	6.22	37.56	224	112	1.68	1.74	0.981	10.34	3.42	13.76	517.00	513.00	1030.0	31.01	29.86	60.87
1.30	6.04	5.47	33.02	235	118	1.69	1.79	0.935	9.09	3.48	12.57	454.00	523.00	977.00	32.95	30.45	63.40
1.40	5.08	6.92	35.15	205	103	1.53	1.62	1.071	8.14	3.15	11.29	407.00	473.00	880.00	34.46	27.56	62.02
1.50	5.08	6.55	33.29	202	101	1.47	1.56	1.087	7.71	3.03	10.73	385.00	454.00	839.00	37.17	26.51	63.68
1.60	6.04	4.60	27.79	227	114	1.53	1.64	0.968	7.65	3.17	10.82	382.00	476.00	858.00	42.70	27.71	70.41
1.70	6.04	4.06	24.53	242	121	1.59	1.73	0.908	6.75	3.32	10.07	338.00	498.00	835.00	43.21	29.13	72.33

ตาราง ภาพผนวก ก.8.1 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่า  $B_{MAX}$  ของ Multi Design 1000 VA 220/110 V (#15/#13 S.W.G.)

ข้อมูล Optimize Value (Standard EI-core dimension)

$B_{MAX}$	EI	D	$A_c$	PRI	SEC	$W_{PRI}$	$W_{SEC}$	VIN	$W_{CORE}$	$W_{CU}$	$W_{TOTAL}$	$C_{CORE}$	$C_{CU}$	$C_{TOTAL}$	$L_{CORE}$	$L_{CU}$	$L_{TOTAL}$
0.50	5.78	14.81	85.59	236	118	2.71	2.64	0.932	22.54	5.35	27.90	1127.0	803.00	1930.0	15.78	46.46	62.24
0.60	5.60	13.63	76.28	221	111	2.39	2.33	0.996	19.46	4.72	24.18	973.00	708.00	1681.0	18.43	40.99	59.42
0.70	5.51	12.21	67.29	215	108	2.17	2.13	1.025	16.89	4.31	21.20	845.00	646.00	1491.0	21.12	37.41	58.53
0.80	5.45	11.06	60.27	210	105	2.00	1.99	1.050	14.96	3.99	18.95	748.00	599.00	1347.0	23.39	34.63	58.01
0.90	5.53	9.82	54.25	207	104	1.85	1.85	1.063	13.66	3.70	17.36	683.00	555.00	1238.0	25.62	32.24	57.86
1.00	5.45	8.83	48.18	210	105	1.78	1.81	1.049	11.98	3.59	15.57	599.00	539.00	1138.0	26.72	31.27	57.99
1.10	5.20	9.28	48.25	190	95	1.62	1.63	1.155	11.43	3.25	14.68	571.00	487.00	1059.0	29.88	28.32	58.21
1.20	5.35	7.79	41.66	202	101	1.60	1.65	1.088	10.15	3.25	13.40	508.00	487.00	995.00	30.45	28.33	58.78
1.30	5.39	7.05	37.95	205	103	1.56	1.61	1.074	9.32	3.17	12.48	466.00	475.00	941.00	33.77	27.70	61.47
1.40	6.00	4.75	28.50	253	127	1.75	1.91	0.868	7.79	3.67	11.46	389.00	550.00	939.00	32.99	32.11	65.10
1.50	5.65	5.29	29.90	225	113	1.57	1.68	0.976	7.70	3.25	10.95	385.00	487.00	872.00	37.14	28.41	65.55
1.60	5.76	4.68	26.96	234	117	1.58	1.71	0.939	7.07	3.29	10.36	354.00	493.00	847.00	39.49	28.85	68.34
1.70	5.73	4.48	25.66	232	116	1.54	1.67	0.950	6.70	3.21	9.91	335.00	482.00	817.00	42.87	28.11	70.98

ตาราง ภาคผนวก ค.8.2 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่า  $B_{MAX}$  ของ Multi Design 1000 VA 220/110 V (#15/#13 S.W.G.)

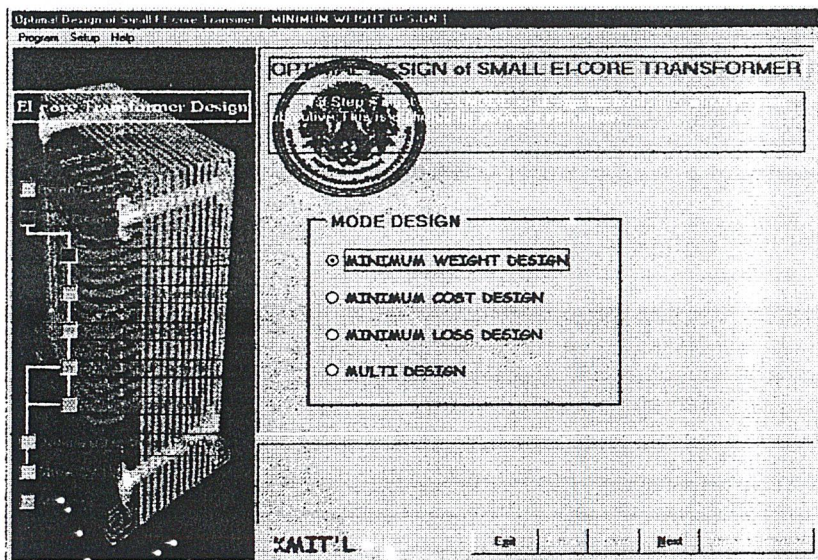
ข้อมูล Commercial Value (Standardization EI-core size)

$B_{MAX}$	EI	D	$A_c$	PRI	SEC	$W_{PRI}$	$W_{SEC}$	V/N	$W_{CORE}$	$W_{CU}$	$W_{TOTAL}$	$C_{CORE}$	$C_{CU}$	$C_{TOTAL}$	$L_{CORE}$	$L_{CU}$	$L_{TOTAL}$
0.50	6.04	14.17	85.59	236	118	2.66	2.58	0.932	23.56	5.24	28.80	1178.0	786.00	1964.0	16.49	45.44	61.94
0.60	6.04	12.63	76.28	221	110	2.32	2.24	0.996	20.99	4.55	25.55	1050.0	683.00	1733.0	19.88	39.54	59.42
0.70	6.04	11.14	67.29	215	107	2.10	2.04	1.025	18.52	4.14	22.66	926.00	621.00	1547.0	23.15	35.92	59.07
0.80	5.08	11.86	60.27	210	105	2.06	2.07	1.050	13.95	4.12	18.08	698.00	619.00	1316.0	21.81	35.80	57.61
0.90	5.08	10.68	54.25	207	103	1.91	1.92	1.063	12.56	3.84	16.39	628.00	575.00	1203.0	23.55	33.46	57.01
1.00	5.08	9.48	48.18	210	105	1.83	1.87	1.049	11.15	3.70	14.85	558.00	555.00	1113.0	24.88	32.22	57.10
1.10	5.08	9.50	48.25	190	95	1.63	1.65	1.155	11.17	3.28	14.45	559.00	492.00	1050.0	29.21	28.60	57.81
1.20	5.08	8.20	41.66	202	101	1.63	1.68	1.088	9.64	3.31	12.95	482.00	496.00	979.00	28.93	28.89	57.82
1.30	5.08	7.47	37.95	205	102	1.58	1.65	1.074	8.79	3.23	12.02	439.00	485.00	924.00	31.85	28.29	60.14
1.40	6.04	4.72	28.50	253	127	1.75	1.91	0.868	7.84	3.66	11.50	392.00	549.00	941.00	33.22	32.06	65.28
1.50	6.04	4.95	29.90	225	113	1.55	1.65	0.976	8.23	3.20	11.43	411.00	480.00	892.00	39.70	27.98	67.67
1.60	6.04	4.46	26.96	234	117	1.57	1.69	0.939	7.42	3.26	10.68	371.00	489.00	860.00	41.44	28.56	70.00
1.70	6.04	4.25	25.66	232	116	1.53	1.65	0.950	7.06	3.18	10.24	353.00	477.00	830.00	45.20	27.82	73.02

## ภาคผนวก ง

### คู่มือการใช้งานโปรแกรม

โปรแกรมการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก ด้วยแกน EI ที่เหมาะสม เป็นโปรแกรมที่สามารถออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีพิกัดแรงดันไม่เกิน 2000 VA และมีพิกัดแรงดันไม่เกิน 1000 โวลต์ โปรแกรมเมื่อเริ่มทำงาน ที่หน้าแรกโปรแกรมจะให้เลือกโหมดของการทำงานของโปรแกรม ซึ่งสามารถเลือกได้ดังนี้คือ Minimum Weight Design, Minimum Cost Design, Minimum Loss Design, Multidesign ดังรูปที่ ง.1

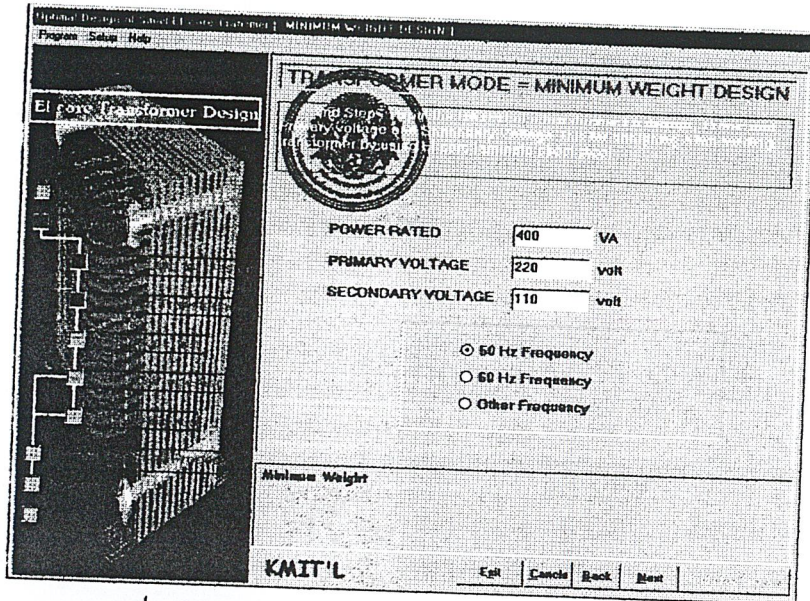


รูป ง.1 เลือก MODE การทำงานของโปรแกรม

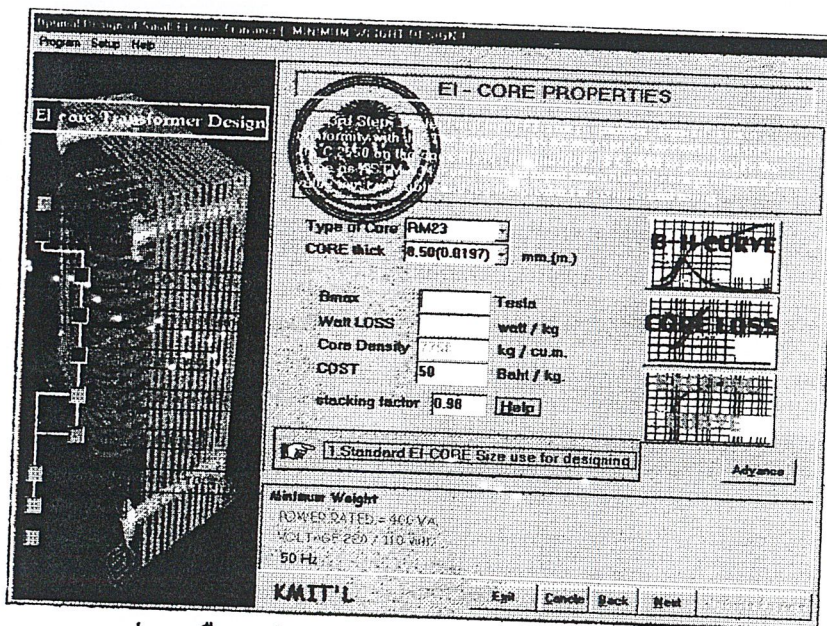
เมื่อคลิกที่ปุ่ม Next เพื่อเลื่อนการทำงานในขั้นต่อไป ซึ่งจะเป็นขั้นตอนของการป้อนข้อมูล Rated ของหม้อแปลงที่จะออกแบบ สิ่งที่ต้องป้อนก็คือ Power, Primary Voltage, Secondary Voltage และความถี่ ซึ่ง โปรแกรมเลือกออกแบบความถี่ไว้ให้ที่ 50 Hz การที่จะออกแบบให้ใช้หม้อแปลงที่ความถี่เท่าไรนั้นต้องดูคุณสมบัติของแกนเหล็กด้วย เพราะแกนเหล็กที่มีอยู่ใน DATA ของโปรแกรมจะใช้งานที่ 50 Hz และ 60 Hz เท่านั้น รูปแสดงการทำงานในขั้นตอนนี้ดังรูป ง.2

เมื่อป้อน Rated เสร็จแล้ว คลิกที่ปุ่ม Next จะเข้าสู่ขั้นตอนการเลือกใช้งานแกนเหล็ก ดังรูป ง.3 ซึ่งสิ่งที่จะต้องเลือกก็คือ เกรดของแกนเหล็กซึ่งเป็นเบอร์มาตรฐานของ JIS และมีการทดสอบคุณสมบัติของแกนเหล็กแล้วตามมาตรฐานการทดสอบ JIS C 2550 ( ASTM A34 ) โดยใน DataBase

ของโปรแกรมมีแกนเหล็กอยู่ 4 เกรดคือ RM14, RM23, RM50, RM60 และความหนาของแกนเหล็กที่เลือกใช้ควรเป็นความหนา 0.50 มม. เพราะเป็นความหนาเดียวที่มีขายมากในประเทศไทย



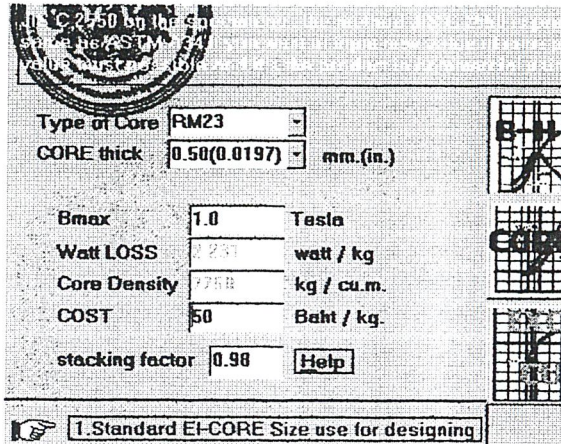
รูป ๓.2 RATED input (Power, Voltage, Frequency)



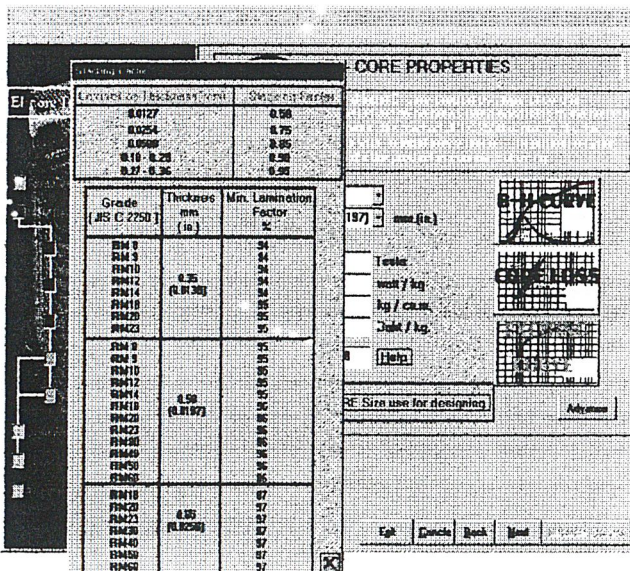
รูป ๓.3 เลือกชนิดของแกนเหล็ก และค่า Flux Density

เมื่อเลือกชนิดของแกนเหล็กโปรแกรมจะเลือก Core Density ให้ตามชนิดแกนเหล็กนั้นๆ และต่อจากนั้นก็เลือกค่า Flux Density:  $B_{MAX}$  เมื่อเลือก  $B_{MAX}$  แล้วค่า Core Loss( W/kg) จะถูกเลือกเองโดยโปรแกรม และ

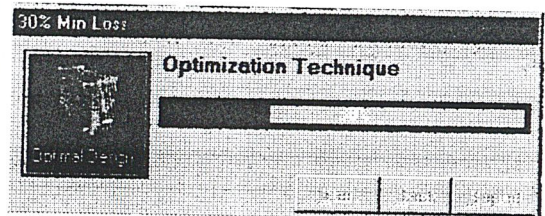
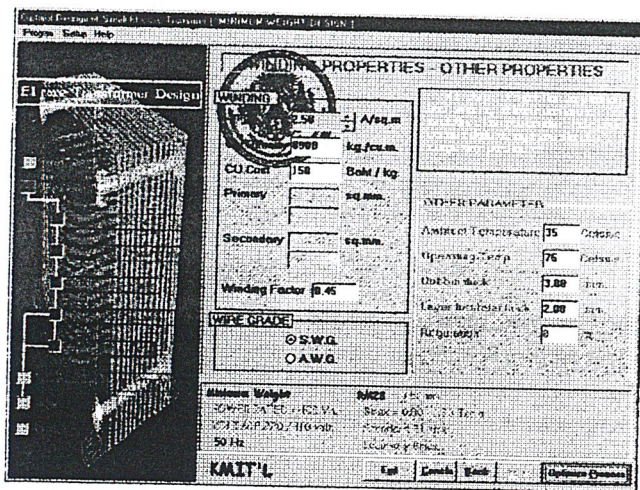
หากว่าไม่ต้องการหรือเห็นว่าค่านี้ไม่เหมาะสมก็สามารถเปลี่ยนค่าได้โดยต้อง DbClick ที่ค่าที่เขียนว่า "Watt Loss" ก่อน จากนั้นก็ใส่ค่าลงไป แต่ค่าที่โปรแกรมกำหนดให้เป็นค่าที่ได้จากการ Sampling ในการอ่านกราฟ Core loss curve โดยละเอียด



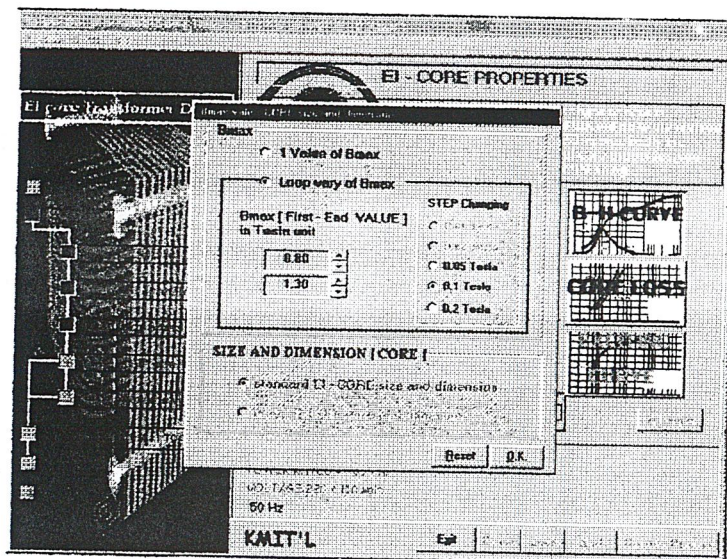
สำหรับค่า stacking factor สมควรที่จะเลือกเท่าไรดี ก็สามารถดูรายละเอียดโดยการ คลิกที่ Help ข้างหลังช่อง หากจะดูและเลือกเอาจากกราฟก็สามารถคลิกที่รูปของกราฟแต่ละแบบ คือ B-H curve, Core loss curve, Exciting curve ดังในรูป ง.4



เมื่อ click ที่ปุ่ม Next ซึ่งจะไปยัง Form ของการป้อนค่าคุณสมบัติของขดลวดและข้อจำกัดอื่นๆ สำหรับการได้ขนาดของเบอร์ลวดนั้นจะอยู่ที่การกำหนดค่า Current Density,  $J_{max}$  ในขดลวด โดยค่าที่โปรแกรมกำหนดเป็นค่าที่เหมาะสมและไม่ทำให้ขดลวดเสียหายเมื่อมีการจ่ายโหลดแบบ Continuous โดยการเลือกค่า  $J_{max}$  นี้จะแปรตามพิสัยกำลังของหม้อแปลงไฟฟ้า จากนั้นก็กำหนดค่าของ Winding factor ซึ่งปกติกำหนดไว้ไม่เกิน 0.45 และจากนั้นจะเป็นการกำหนดข้อจำกัดของการออกแบบ เช่น อุณหภูมิแวดล้อม อุณหภูมิการทำงาน ความหนาแน่นของขดลวด และความหนาของ bobbin หลังจากนั้นจะเป็นขั้นตอนการ Optimization Processing



รูป ๓.5 winding properties และ Form ของ Optimization Processing

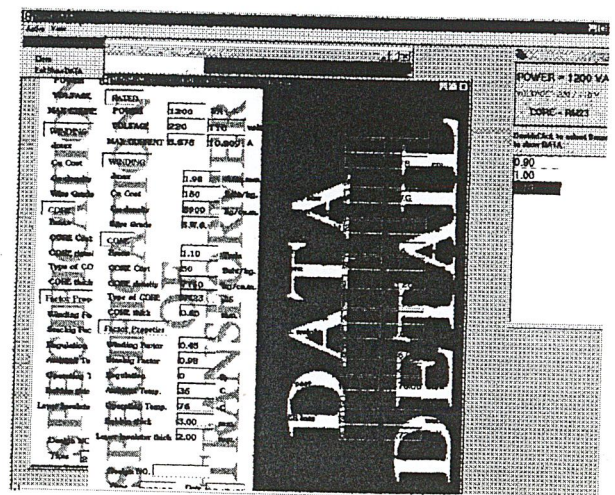
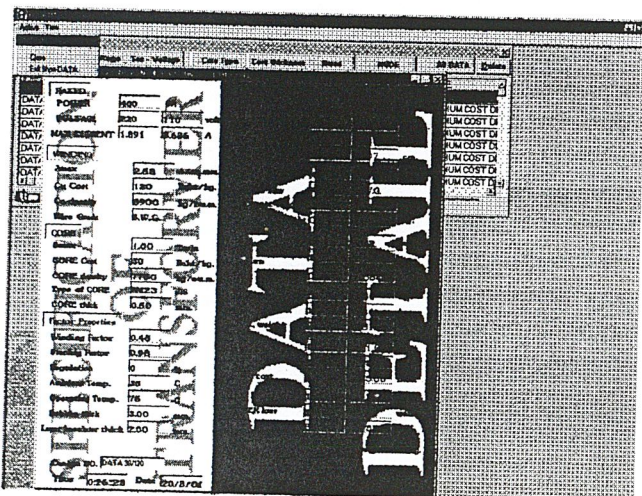
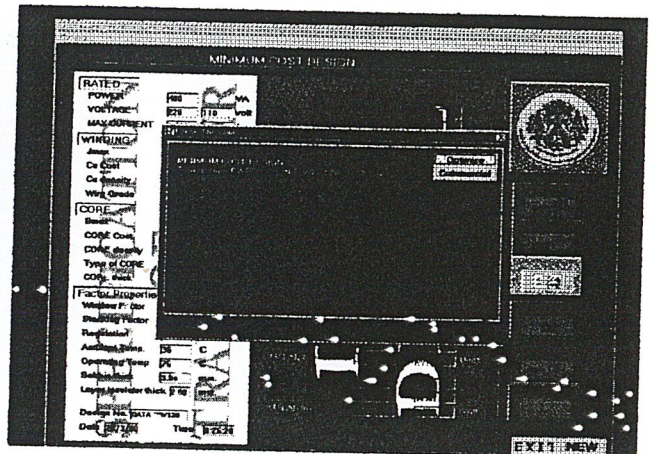
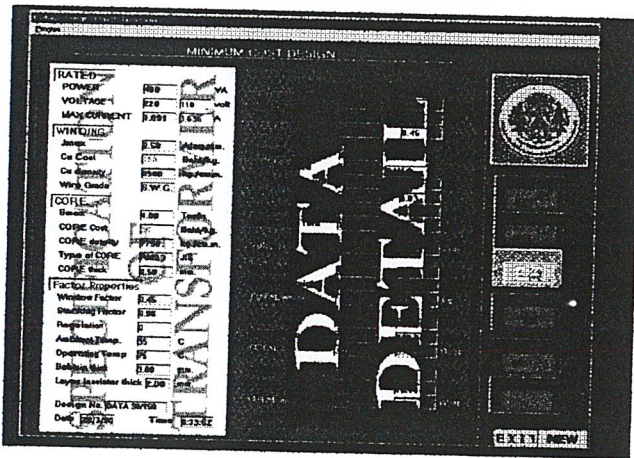


รูป ๓.6 ขณะเลือกการทำงานแบบ เลือกค่า Bmax โดยโปรแกรม สามารถให้โปรแกรมหาค่า Bmax ที่เหมาะสมได้

หลังกระบวนการทำ Optimize เสร็จแล้ว Click ที่ Report จะแสดง DATA Output ซึ่งเป็นค่าจากการ Optimize และค่าจากการปรับขนาดแกนเหล็กมาตรฐานจากค่าแกนเหล็กที่ได้จาก Optimize หากต้องการดูว่าค่าพื้นที่ของขดลวดมีค่าเป็นกี่เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ช่องว่างแกนเหล็ก โดยสามารถ Check ดูได้โดย click ที่ตราสัญลักษณ์สถาบัน

เมื่อ Form ของ Output แสดงค่าแล้วจะมี Command Button อยู่ 6 ตัวดังนี้

1. Report แสดงค่าข้อมูลในการออกแบบ คือ Specification data และ Detail data
2. Show Model แสดงรูปองค์ประกอบของหม้อแปลง
3. Print สำหรับพิมพ์ข้อมูลที่ได้จาก โปรแกรม
4. Show All เมื่อโหมดการทำงานเป็นนวนรูปหาค่า Bmax ที่เหมาะสมสามารถดูค่าต่างๆ ที่ได้ Process แล้วขณะ Optimization
5. Open DATA เปิดข้อมูลที่เคยเก็บไว้
6. Keep DATA เก็บข้อมูล ซึ่งมีหน้าต่างของ Form ดังนี้



## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณหลายท่าน คณะผู้จัดทำโครงการขอขอบคุณ ผศ.ดร. ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย, อาจารย์ วีรศักดิ์ วงศ์วิวัฒน์ และคุณนพรัตน์ มิชยยา เป็นอย่างสูงที่สละเวลา ให้คำแนะนำและคำปรึกษารวมทั้งให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้าน ซึ่งทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย, “ เอกสารประกอบการสอน วิชา Fundamental of Electrical Machines” , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง .
- [2] พิษิต ถ้ายอง , “ เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1” , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ,2537 .
- [3] A.E. Fitzgerald, Charles, Jr. Stephen D. umans , “ Electric Machinery” Fifth Edition , McGrawHill , Inc. 1990 .
- [4] ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย , “ เอกสารประกอบการสอน วิชา Electrical Engineering Materials” , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง .
- [5] Colonel Wm.T. Melyman, “Transformer and Inductor Handbook”, Marcel Dekker, Inc. 1990.
- [6] Acton , Forman S , “Numerical Method That Work” , Harper and Row , Inc. 1970.
- [7] Brent , Richard P. , “Algorithms for Minimization without derivatives” ,Englewood Cliffs, N.J. :Prentice-Hall ,Inc. 1973.
- [8] Jacobs , David A.H. , “The State of the Art in Numerical Analysis”, Academic Press. London , 1977.