



การออกแบบหม้อแปลงออโตไฟเฟิล

DESIGN OF SINGLE PHASE AUTO TRANSFORMER



นายทศพร อุปคำ รหัส 51364316
นายอภิรักษ์ บรรจง รหัส 51364552

คณะวิศวกรรมศาสตร์
จัดพิมพ์ ๕ 4 S.ค. 2555
เลขทะเบียน 16067864
เลขเรียกยืม ๗/๖
มหาวิทยาลัยนเรศวร ๗ ๒๓๗ ๙

2654

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2554



ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ การออกแบบหม้อแปลงออโต 1 เฟส
ผู้ดำเนินโครงการ นายทศพร อุปคำ รหัส 51364316
นายอภิรักษ์ บรรจง รหัส 51364552
ที่ปรึกษาโครงการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพรเรื่องสินชัยวานิช
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา 2554

.....
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

.....ที่ปรึกษาโครงการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพรเรื่องสินชัยวานิช)

.....กรรมการ
(ดร. อัครพันธ์ วงศ์กังแห)

.....กรรมการ
(ดร. พิสุทธิ์ อภิขยกุล)

ชื่อหัวข้อโครงการ การออกแบบหม้อแปลงอัตโนมัติ 1 เฟส
ผู้ดำเนินโครงการ นายทศพร อุปคำ รหัส 51364316
 นายอภิรักษ์ บรรจง รหัส 51364552
ที่ปรึกษาโครงการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพร เรืองสินชัยวานิช
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา 2554

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอโครงการเกี่ยวกับการสร้างและออกแบบหม้อแปลงอัตโนมัติ เพื่อทดสอบเปรียบเทียบกับหม้อแปลงแบบแยกขดลวดและสามารถนำมาใช้ในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้จริง โดยการทดสอบจะทำการปรับเปลี่ยนจำนวนแผ่นเหล็กหรือปรับเปลี่ยนขนาดของขดลวด เพื่อทดสอบหาค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลง โดยขอบเขตของการวิเคราะห์ คือ การทดสอบหม้อแปลงด้วยวิธีเปิดวงจร ซึ่งจะให้ได้ค่าการสูญเสียที่แกนเหล็ก และการทดสอบหม้อแปลงด้วยวิธีปิดวงจร ซึ่งจะให้ได้ค่าการสูญเสียที่ขดลวด และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบ คือ ค่ากำลังไฟฟ้า ค่าความต้านทานภายในขดลวด ค่าอิมพีแดนซ์ และค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลง ตามทฤษฎีต่างๆ

Project title Design Of Single Phase Auto Transformer
Name Mr. Tossaporn Auppakham ID. 51364316
Mr. Apinan Banjong ID. 51364552
Project advisor Assistant Professor Somporn Ruangsinchaiwanich, Ph.D.
Major Electrical Engineering
Department Electrical and Computer Engineering
Academic year 2011

Abstract

This thesis is to present the project pertaining construction and design of an auto transformer to compare with separate windings transformer and can apply for transmission power by actually. Regarding the test is to adjust in number of iron plates or change size of coils for measuring the efficient value of transformer by focusing the scope of analysis in test of a transformer by approach of open circuit test which can acquire the lost value at core and test of a transformer by approach of short circuit test which can acquire the lost value at coils and any values from parameters based on tests such as value of electric power, Resistance value of coils, Impedance value, and efficiency value of a transformer according theories.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพร เรืองสินชัยวานิช ซึ่งเป็นที่ปรึกษาโครงการที่ให้ความกรุณาในเอาใจใส่ในรายละเอียดของชิ้นงานและการตรวจทานปริญาานิพนธ์ คณะผู้ดำเนินโครงการขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงและขอระลึกถึงความกรุณาของท่านไว้ตลอดไป

ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้กับคณะผู้ดำเนินงาน

ขอขอบพระคุณพี่เกรียงศักดิ์ ไกรกิจราษฎร์, พี่สิทธิพงษ์ เฟื่องประเดิม, พี่เดือนแรม แพ่งเกี่ยว ที่ให้คำปรึกษาในเรื่องการทำชิ้นงาน และการต่อวงจรในการทดสอบหม้อแปลง และทั้งนี้ต้องขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ที่ให้มีอุปกรณ์และใช้ห้องปฏิบัติการ จนทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

เหนือสิ่งอื่นใด คณะผู้ดำเนินโครงการขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ ผู้มอบความรักความเมตตา สติปัญญา เป็นที่ปรึกษาปัญหาในทุกๆเรื่อง รวมทั้งเป็นผู้ให้ทุกสิ่งทุกอย่างตั้งแต่วัยเยาว์จวบจนถึงปัจจุบัน คอยเป็นกำลังใจทำให้ได้รับความสำเร็จอย่างทุกวันนี้และขอขอบคุณทุกคนในครอบครัวของคณะผู้ดำเนินโครงการที่ไม่ได้กล่าวไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นายทศพร อุปลำ

นายอภิรักษ์ บรรจง

สารบัญ

หน้า

ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract.....	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 แนวทางการดำเนินงาน.....	2
1.4 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ	2
1.6 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน	3
1.7 งบประมาณ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการทํางาน	4
2.1 หลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส	4
2.1.1 โครงสร้างหม้อแปลง.....	5
2.1.2 หม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ.....	6
2.1.3 การทดสอบหม้อแปลง.....	8
2.1.4 การสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า (Losses in Transformer)	12
2.1.5 โวลต์เตจเรกกูเลชัน (Voltage Regulation).....	16
2.1.6 ประสิทธิภาพของหม้อแปลง (Efficiency of Transformer).....	18
2.2 หลักการของหม้อแปลงออโต (Auto Transformer)	19
2.2.1 พิกัดแรงดันไฟฟ้า	20
2.2.2 พิกัดกระแสไฟฟ้า	22
2.2.3 อิมพีแดนซ์.....	22

2.2.4	พิกัดกำลังไฟฟ้า	22
2.3	บทบทวน โครงการงาน	23
บทที่ 3	ขั้นตอนการดำเนินโครงการงาน	30
3.1	วัสดุและอุปกรณ์	31
3.2	การทดสอบหม้อแปลง.....	32
3.2.1	การทดสอบโดยการเปิดวงจร (Open Circuit Test)	32
3.2.2	การทดสอบโดยการลัดวงจร (Short Circuit Test).....	33
3.3	การออกแบบหม้อแปลงอัตโนมัติ	34
3.3.1	แสดงการคำนวณหม้อแปลงอัตโนมัติ.....	34
3.3.2	แสดงขั้นตอนในการพันหม้อแปลงอัตโนมัติ	39
บทที่ 4	ผลการทดสอบ	44
4.1	ผลการทดสอบการใช้แกนเหล็ก 100 เปอร์เซ็นต์	44
4.2	ผลการทดสอบการใช้แกนเหล็ก 75 เปอร์เซ็นต์	59
4.3	ผลการทดสอบการใช้แกนเหล็ก 50 เปอร์เซ็นต์	68
บทที่ 5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ	81
5.1	สรุปผลการดำเนินโครงการงาน.....	81
5.2	ปัญหาและแนวทางแก้ไข.....	81
5.3	แนวทางการพัฒนาต่อไป.....	82
เอกสารอ้างอิง.....		83
ภาคผนวก ก	ตารางแสดงมาตรฐานขดลวดทองแดง	84
ภาคผนวก ข	ตารางเทียบขนาดขดลวดทองแดง	87
ประวัติผู้ดำเนินโครงการงาน.....		82

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลการทดสอบหาอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลง.....	26
2.2 การทดสอบหาค่าการสูญเสียของหม้อแปลง.....	27
2.3 การทดสอบ Autotransformer แบบ Step Up.....	28
2.4 การทดสอบ Autotransformer แบบ Step Down.....	29
ที่แกนเหล็ก 100 เฟอร์เซ็นต์	44
4.1 ตารางความต้านทานหม้อแปลง ก.....	44
4.2 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบเปิดวงจรหม้อแปลง ก.....	45
4.3 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบลัดวงจรหม้อแปลง ก.....	45
4.4 ตารางค่าพารามิเตอร์หม้อแปลง ก.....	46
4.5 ตารางความต้านทานหม้อแปลง ข.....	47
4.6 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบเปิดวงจรหม้อแปลง ข.....	48
4.7 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบลัดวงจรหม้อแปลง ข.....	48
4.8 ตารางค่าพารามิเตอร์หม้อแปลง ข.....	49
4.9 ตารางความต้านทานหม้อแปลง ค.....	50
4.10 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบเปิดวงจรหม้อแปลง ค.....	51
4.11 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบลัดวงจรหม้อแปลง ค.....	51
4.12 ตารางค่าพารามิเตอร์หม้อแปลง ค.....	52
4.13 ตารางความต้านทานหม้อแปลง ง.....	53
4.14 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบเปิดวงจรหม้อแปลง ง.....	54
4.15 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบลัดวงจรหม้อแปลง ง.....	54
4.16 ตารางค่าพารามิเตอร์หม้อแปลง ง.....	55
4.17 ตารางความต้านทานหม้อแปลง จ.....	56
4.18 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบเปิดวงจรหม้อแปลง จ.....	57
4.19 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบลัดวงจรหม้อแปลง จ.....	57
4.20 ตารางค่าพารามิเตอร์หม้อแปลง จ.....	58
ที่แกนเหล็ก 75 เฟอร์เซ็นต์	59
4.21 ตารางความต้านทานหม้อแปลง ค.....	59
4.22 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบเปิดวงจรหม้อแปลง ค.....	60
4.23 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบลัดวงจรหม้อแปลง ค.....	60

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

4.24 ตารางค่าพารามิเตอร์หม้อแปลง ก.....	61
4.25 ตารางความต้านทานหม้อแปลง ง.....	62
4.26 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบเปิดวงจรหม้อแปลง ง.....	63
4.27 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบลัดวงจรหม้อแปลง ง.....	63
4.28 ตารางค่าพารามิเตอร์หม้อแปลง ง.....	64
4.29 ตารางความต้านทานหม้อแปลง จ.....	65
4.30 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบเปิดวงจรหม้อแปลง จ.....	66
4.31 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบลัดวงจรหม้อแปลง จ.....	66
4.32 ตารางค่าพารามิเตอร์หม้อแปลง จ.....	67
ที่แกนเหล็ก 50 เปอร์เซ็นต์.....	68
4.33 ตารางความต้านทานหม้อแปลง ค.....	68
4.34 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบเปิดวงจรหม้อแปลง ค.....	69
4.35 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบลัดวงจรหม้อแปลง ค.....	69
4.36 ตารางค่าพารามิเตอร์หม้อแปลง ค.....	70
4.37 ตารางความต้านทานหม้อแปลง ง.....	71
4.38 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบเปิดวงจรหม้อแปลง ง.....	72
4.39 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบลัดวงจรหม้อแปลง ง.....	72
4.40 ตารางค่าพารามิเตอร์หม้อแปลง ง.....	73
4.41 ตารางความต้านทานหม้อแปลง จ.....	74
4.42 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบเปิดวงจรหม้อแปลง จ.....	75
4.43 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบลัดวงจรหม้อแปลง จ.....	75
4.44 ตารางค่าพารามิเตอร์หม้อแปลง จ.....	76
4.45 ตารางรวมค่าพารามิเตอร์ของแกนเหล็ก 100 เปอร์เซ็นต์.....	77
4.46 ตารางรวมค่าพารามิเตอร์ของแกนเหล็ก 75 และ 50 เปอร์เซ็นต์.....	78

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 หม้อแปลงไฟฟ้า.....	4
2.2 ขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ.....	5
2.3 ลักษณะแกนเหล็กแบบต่าง ๆ.....	6
2.4 แกนเหล็กลักษณะแบบ EI.....	6
2.5 หม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ.....	7
2.6 เวกเตอร์ไออะแกรมของหม้อแปลงในอุดมคติ.....	8
2.7 วงจรการทดสอบหม้อแปลงขณะลัดวงจร (Short Circuit Test)	9
2.8 วงจรการทดสอบหม้อแปลงขณะเปิดวงจร (Open Circuit Test)	11
2.9 วงจรสมมูลหม้อแปลงไฟฟ้า.....	11
2.10 กราฟบีเอช (BH Cruve).....	13
2.11 แสดงการจัดเรียง โมเมนต์ของวัสดุแม่เหล็กก่อนและหลังมีสนามแม่เหล็กพาดผ่าน.....	14
2.12 กระแสไหลวน (Eddy Current).....	15
2.13 วงจรของหม้อแปลงขณะไม่มีโหลด	17
2.14 วงจรของหม้อแปลงขณะมีโหลด	17
2.15 วงจรของหม้อแปลงแบบออโต	19
2.16 ทิศทางกระแสที่ไหลในขดลวดหม้อแปลงแบบออโต.....	20
2.17 วงจรหม้อแปลงออโต้แบบลดแรงดัน	21
2.18 วงจรวัดความต้านทานไฟฟ้า.....	24
2.19 วงจรวัดแรงดันไฟฟ้าด้าน Secondary ของแต่ละ Tab	24
2.20 ทดสอบหาขั้วของหม้อแปลง ก. (Polarity Test).....	25
2.21 ทดสอบหาขั้วของหม้อแปลง ข. (Polarity Test).....	25
2.22 วงจรหาอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลง (Transformation Ration)	26
2.23 วงจรการทดสอบหาค่าการสูญเสียของหม้อแปลง	26
2.24 วงจรการทดสอบ Autotransformer แบบ Step Up	27
2.25 วงจรการทดสอบ Autotransformer แบบ Step Down	28
3.1 วงจรการทดสอบในสภาวะเปิดวงจร	32
3.2 รูปการทดสอบหม้อแปลงในสภาวะเปิดวงจรในห้องปฏิบัติการ	32
3.3 วงจรการทดสอบในสภาวะลัดวงจร.....	33
3.4 รูปการทดสอบหม้อแปลงในสภาวะเปิดวงจรในห้องปฏิบัติการ	33

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

3.5 วัดขนาดแกนเหล็ก (Bobbin).....	34
3.6 วัดขนาดความกว้างของขาแกนเหล็กตัว E	35
3.7 หาความหนาของแผ่นเหล็ก.....	36
3.8 หาความหนาของแผ่นเหล็ก.....	37
3.9 ความหนาของแผ่นเหล็กที่อัดเข้าด้วยกันและความหนาของแผ่นเหล็กแต่ละแผ่น	39
3.10 แผ่นเหล็กรูป EI	39
3.11 พันกระดาษฉนวนรอบแกนเหล็ก (Bobbin)	40
3.12 การพันขดลวดด้านต่ำ	40
3.13 พันกระดาษฉนวนรอบขดลวดด้านแรงต่ำ	41
3.14 การพันขดลวดด้านสูง	41
3.15 พันกระดาษฉนวนรอบขดลวดด้านแรงสูง	42
3.16 การสวมแผ่นเหล็ก.....	42
3.17 หม้อแปลงที่ทำสำเร็จ	43
4.1 ขนาดของแกนเหล็กของหม้อแปลง ก.....	44
4.2 ขนาดของแกนเหล็กของหม้อแปลง ข.....	47
4.3 ขนาดของแกนเหล็กของหม้อแปลง ค.....	50
4.4 ขนาดของแกนเหล็กของหม้อแปลง ง	53
4.5 ขนาดของแกนเหล็กของหม้อแปลง จ.....	56
4.6 ขนาดของแกนเหล็กของหม้อแปลง ค.....	59
4.7 ขนาดของแกนเหล็กของหม้อแปลง ง	62
4.8 ขนาดของแกนเหล็กของหม้อแปลง จ.....	65
4.9 ขนาดของแกนเหล็กของหม้อแปลง ค.....	68
4.10 ขนาดของแกนเหล็กของหม้อแปลง ง	71
4.11 ขนาดของแกนเหล็กของหม้อแปลง จ.....	74
4.12 แสดงประสิทธิภาพของหม้อแปลงที่แกนเหล็ก 100 เปอร์เซ็นต์	79
4.13 แสดงประสิทธิภาพของหม้อแปลงที่แกนเหล็ก 75 เปอร์เซ็นต์	79
4.14 แสดงประสิทธิภาพของหม้อแปลงที่แกนเหล็ก 50 เปอร์เซ็นต์	80

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สำคัญ สำหรับระบบส่งจ่ายไฟฟ้า จากสถานีไฟฟ้าย่อยต่าง ๆ ไปยังผู้บริโภค ไม่ว่าจะเป็นบริษัทหรือตามบ้านเรือน โดยหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้า ในประเทศไทยการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงอาจแบ่งได้ เช่น 500 kV, 230 kV หรือ 115 kV เป็นต้น ดังนั้นการแปลงระดับแรงดันให้มีขนาดแรงดันที่เหมาะสมต่อสภาพการใช้งาน จึงเป็นส่วนที่สำคัญ โดยมีเป้าหมายการลดการสูญเสียในสายที่ต้องใช้ในการจ่ายไฟฟ้าเป็นระยะทางไกล ๆ และเมื่อต้องการจ่ายไฟฟ้าให้แก่ บ้านเรือนและโรงงานอุตสาหกรรม จำเป็นต้องใช้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสม ซึ่งถูกเรียกว่าระบบจำหน่าย อาจใช้แรงดันไฟฟ้า เช่น 12 kV, 22 kV หรือ 33 kV เป็นต้น เพื่อลดอันตรายที่อาจเกิดขึ้นแก่ผู้ใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยหม้อแปลงไฟฟ้าจะเป็นอุปกรณ์หลักที่ทำหน้าที่การเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าตามที่ผู้ใช้อยู่ต้องการ

โครงการนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับหม้อแปลงออโต 1 เฟส ซึ่งเป็นหม้อแปลงชนิดหนึ่งที่มีขดลวดเพียงขดเดียว โดยขดลวดขดเดียวนี้อาจทำหน้าที่เป็นทั้งด้านรับและจ่ายไฟฟ้าให้ประหยัดในการใช้ขดขดลวด หากมีการออกแบบสร้างหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับที่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เพียงพอต่อการทดสอบอุปกรณ์ต่างๆ ทางด้านไฟฟ้า ก็จะทำให้ประหยัดงบประมาณในการสั่งซื้อ โดยในการออกแบบนั้นหม้อแปลงออโต 1 เฟสจะมีความเหมาะสมในการใช้งาน เพราะมีพิกักการจ่ายกำลังไฟฟ้าสูง ใช้งานง่าย ต้นทุนสร้างต่ำกว่าหม้อแปลงแกนเหล็กแบบพันด้วยขดลวด 2 ขดแยกกัน ในการใช้งานมักใช้เกี่ยวกับการแปลงระดับแรงเคลื่อนที่มีอัตราส่วนแปลงแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาการทำงานของหม้อแปลงอโต 1 เฟส
2. สร้างและออกแบบหม้อแปลงอโต 1 เฟส
3. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างหม้อแปลงอโต 1 เฟส กับหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส แบบ 2 ขดลวดทั่วไป

1.3 แนวทางการดำเนินงาน

1. หาข้อมูลของหม้อแปลงอโต 1 เฟส และหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไป
2. ศึกษาการทำงานของหม้อแปลงอโต 1 เฟส และหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไป
3. ทำการออกแบบและสร้างหม้อแปลงอโต 1 เฟส
4. ทดสอบการทำงานของหม้อแปลงอโต 1 เฟส
5. ทำการเก็บผลการทดสอบการทำงานของหม้อแปลงอโต 1 เฟส กับหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไปเพื่อนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพ

1.4 ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษาด้านการออกแบบของหม้อแปลงอโตที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด
2. สร้างหม้อแปลงอโต 1 เฟส
3. นำผลการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างหม้อแปลงอโตกับหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไป

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

1. เข้าใจหลักการทำงานของหม้อแปลงอโต 1 เฟส
2. สามารถออกแบบและสร้างหม้อแปลงอโต 1 เฟส ได้
3. นำความรู้เกี่ยวกับหม้อแปลงอโต 1 เฟส ไปสู่การประยุกต์ใช้ต่อไป

1.6 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน

กิจกรรม	ปี 2554							ปี 2555		
	มี.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1.หาหัวข้อโครงการที่สนใจ	■	■								
2.ศึกษาการทำงานของหม้อแปลงออโต 1 เฟส และหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไป			■	■	■					
3.ทำการออกแบบและสร้างหม้อแปลงออโต 1 เฟส						■	■			
4.ทดสอบการทำงานและทำการเก็บผลการทดสอบการทำงานของหม้อแปลงออโต 1 เฟส กับหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไป								■	■	
5.จัดทำรายงาน										■

1.7 งบประมาณ

ค่าอุปกรณ์หม้อแปลง	1,500	บาท
ค่าจัดทำรายงาน	500	บาท
รวมเป็นเงินทั้งสิ้น (สามพันบาทถ้วน)	2,000	บาท
หมายเหตุ : ถัวเฉลี่ยทุกรายการ		

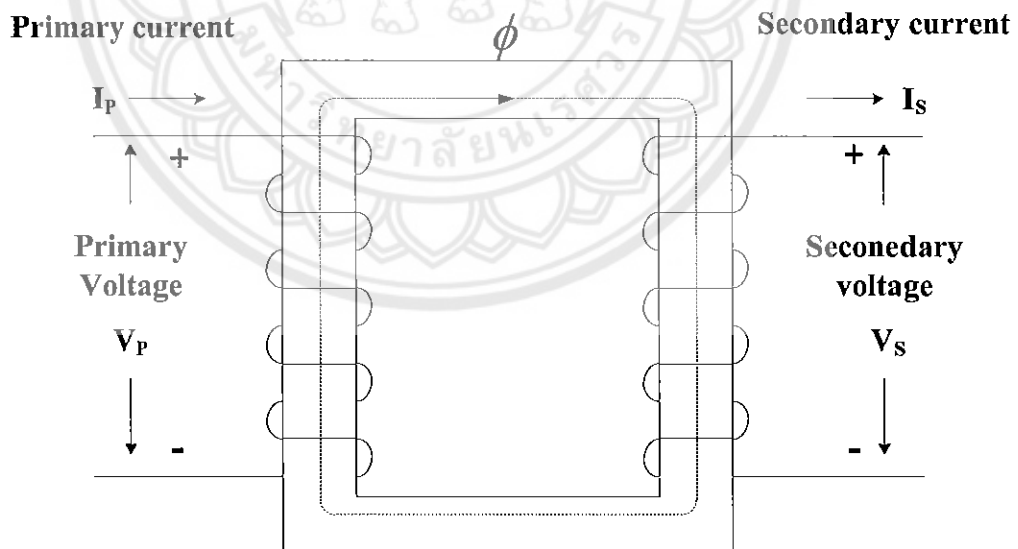
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการทำงาน

ในส่วนการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 2 ขด และหม้อแปลงออโต ได้อาศัยหลักการและทฤษฎีต่างๆ ในการอธิบายได้ดังนี้

2.1 หลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส

หม้อแปลงเป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่ใช้ถ่ายโอน (Transfer) พลังงานไฟฟ้ากระแสสลับจากวงจรหนึ่งไปยังอีกวงจรหนึ่ง โดยความถี่ไม่เปลี่ยนแปลง แต่เป็นการแปลงแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นหรือต่ำลงตามต้องการ โดยหม้อแปลงที่มีแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ (Primary) สูงกว่าด้านทุติยภูมิ (Secondary) เรียกว่า หม้อแปลงลดแรงดัน (Step-down Transformer) ถ้าแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ (Primary) ต่ำกว่าด้านทุติยภูมิ (Secondary) หม้อแปลงเพิ่มแรงดัน (Step-up Transformer) และหม้อแปลงที่มีแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ (Primary) เท่ากันกับด้านทุติยภูมิ (Secondary) เรียกว่า หม้อแปลงหนึ่งต่อหนึ่ง (One to one transformer) [1]



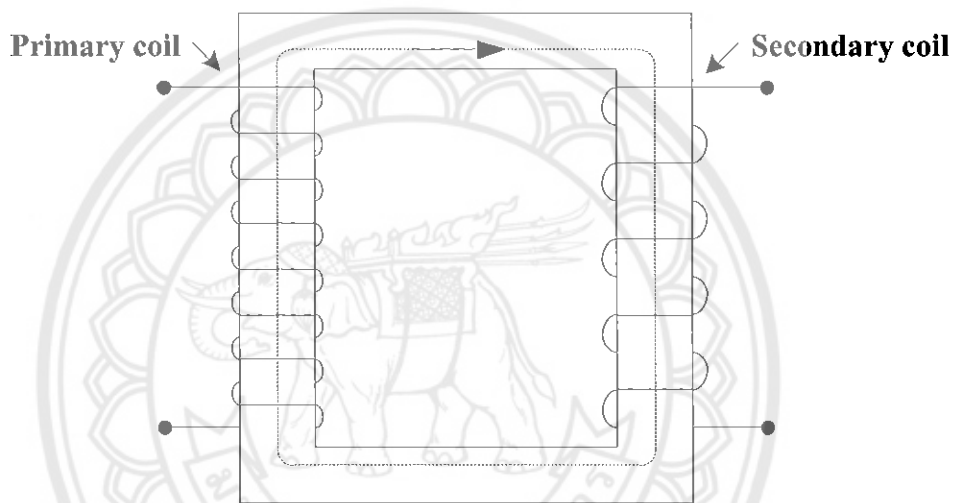
รูปที่ 2.1 หม้อแปลงไฟฟ้า

2.1.1 โครงสร้างหม้อแปลง

หม้อแปลงไฟฟ้ามีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน คือ

2.1.1.1 ขดลวด (Winding)

หม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยขดลวดสองขด คือ ขดลวดที่ทำหน้าที่รับแรงดันไฟฟ้าเข้ามา เรียกขดนี้ว่า ขดปฐมภูมิหรือขดอินพุต (Primary Winding or Input Winding) ส่วนขดลวดอีกขดหนึ่ง คือ ขดลวดที่ทำหน้าที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าออกไปให้กับโหลด เรียกขดลวดนี้ว่า ขดทุติยภูมิหรือขดเอาต์พุต (Secondary Winding or Output Winding) [2]

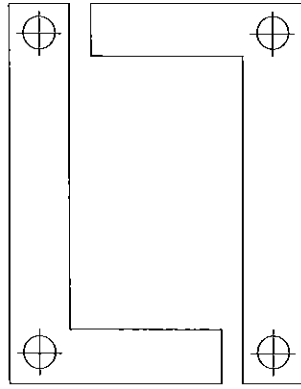


รูปที่ 2.2 ขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ

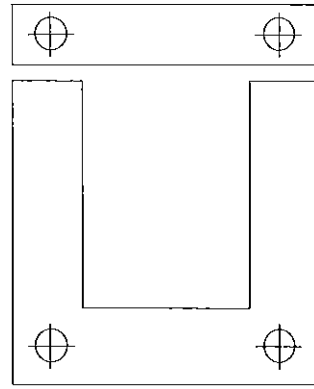
2.1.1.2 แกนเหล็ก (Core)

แกนเหล็กที่ใช้ทำหม้อแปลงไฟฟ้ามีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ และเป็นแผ่นเหล็กที่มีส่วนผสมของซิลิกอน แกนเหล็กอาจจะทำเป็นแผ่นยาวรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือรูปตัว L มาเรียงเข้าด้วยกัน แกนเหล็กที่เป็นแผ่นยาวสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะขดเป็นวงรอบขดลวด แกนเหล็กนี้จะมีความต้านทานแม่เหล็กต่ำ ซึ่งแกนเหล็กหม้อแปลงไฟฟ้าที่นิยมใช้กันทุกๆ ไป มี 3 แบบ [2]

ก. แบบคอร์ (Core Type) แกนเหล็กแบบนี้จะมีลักษณะเป็นรูปตัว L สองตัวประกบเข้าหากัน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ก) นอกจากแกนเหล็กจะถูกออกแบบเป็นรูปตัว L แล้วยังสามารถถูกออกแบบเป็นรูปตัว U และ I ดังแสดงในรูป 2.3 (ข)



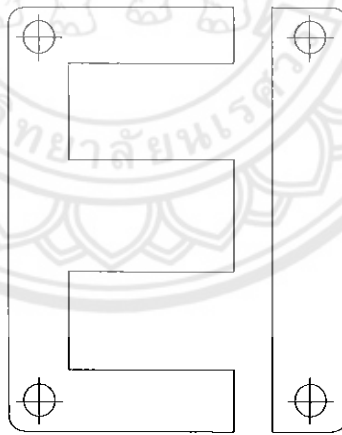
ก. แกนเหล็กลักษณะแบบ LL



ข. แกนเหล็กลักษณะแบบ UI

รูปที่ 2.3 ลักษณะแกนเหล็กแบบต่าง ๆ

ข. แบบเชลล์ (Shell Type) แกนเหล็กแบบนี้มักมีลักษณะเป็นรูปตัว E กับ I ดังนั้นจึงนิยมเรียกแกนเหล็กแบบนี้ว่า แกนเหล็กแบบ EI โดยแกนเหล็กแบบนี้จะพันขดลวดไว้ที่ขากลางของแกนเหล็ก ซึ่งขากลางของแกนเหล็กนี้จะมีขนาดเป็น 2 เท่าของขาริมทั้ง 2 ด้าน ลักษณะแกนเหล็กแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



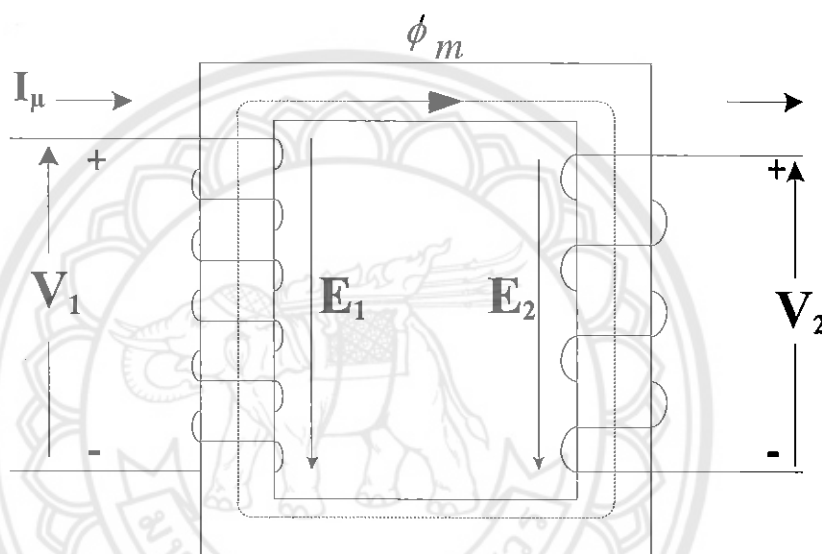
รูปที่ 2.4 แกนเหล็กลักษณะแบบ EI

2.1.2 หม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด เพราะว่ามี การสูญเสีย น้อยที่สุด คือการสูญเสียในแกนเหล็กและในลวดทองแดงเท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้เกิดความเข้าใจได้ง่ายขึ้น

จึงสมมุติให้หม้อแปลงไฟฟ้าไม่มีการสูญเสียใดๆ และหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดนี้เรียกหม้อแปลงในอุดมคติหรือหม้อแปลงในความคิด

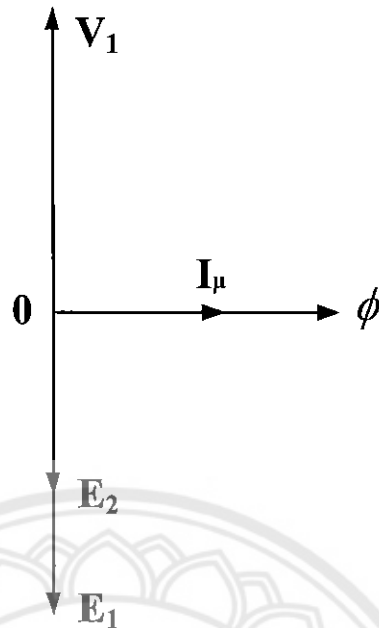
หม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคตินั้นไม่คำนึงถึงการสูญเสียใดๆ ทั้งสิ้น แม้กระทั่งความสูญเสียในแกนเหล็กและเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล ดังนั้นเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดปฐมภูมิจะทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในขดปฐมภูมิ กระแสที่ไหลนั้นเป็นกระแสที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นมา เรียกว่า กระแสกระตุ้น (Exciting Current or Magnetizing Current) เขียนแทนด้วย I_{μ} ดังแสดงในรูปที่ 2.5 [2]



รูปที่ 2.5 หม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ

I_{μ} จะล้าหลังแรงดันที่จ่ายให้กับขดปฐมภูมิอยู่ 90 องศา โดย I_{μ} นี้จะสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ_m) ขึ้นมา และเส้นแรงแม่เหล็กจะเชื่อมโยงระหว่างขดปฐมภูมิกับขดทุติยภูมิเข้าด้วยกัน ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นที่ขดปฐมภูมิและทุติยภูมิ โดยที่แรงดันนี้มีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดปฐมภูมิ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นล้าหลังเส้นแม่เหล็ก (ϕ_m) เป็นมุม 90 องศา ซึ่งสามารถเขียนไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.6

$$\begin{aligned}
 V_1 &= \text{แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดปฐมภูมิ} \\
 E_1, E_2 &= \text{แรงดันไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดทั้งสอง} \\
 I_{\mu} &= \text{กระแสที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็ก} \\
 \phi_m &= \text{เส้นแรงแม่เหล็ก}
 \end{aligned}$$



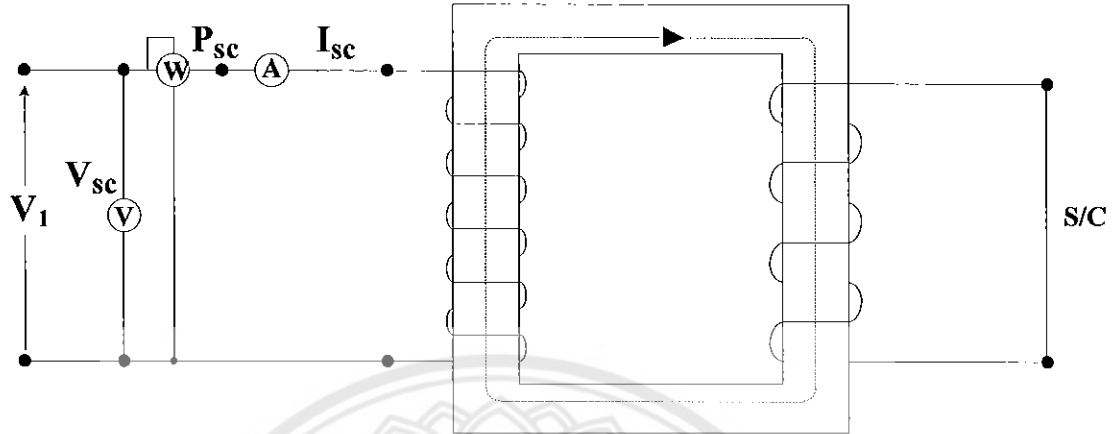
รูปที่ 2.6 เวกเตอร์ไออะแกรมของหม้อแปลงในอุดมคติ

2.1.3 การทดสอบหม้อแปลง

2.1.3.1 การทดสอบหม้อแปลงด้วยวิธีลัดวงจร (Short Circuit Test)

การทดสอบหม้อแปลงขณะลัดวงจร บางครั้งอาจเรียกว่าการทดสอบเพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance Test) หรือการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังสูญเสียในขดลวดทองแดง (Copper Loss Test) เพราะว่าการทดสอบนี้จะทำให้หาค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของหม้อแปลงได้ นอกจากจะหาค่าอิมพีแดนซ์สมมูลได้แล้วยังสามารถหาค่าความต้านทานสมมูลและค่าลี้กเกจรีเอกแตนซ์สมมูลได้อีก ซึ่งค่าต่างๆ เหล่านี้เป็นค่าคงที่ของหม้อแปลงและยังสามารถหาค่ากำลังสูญเสียในขดลวดทองแดงขณะมีโหลดเต็มที่ได้ด้วย การทดสอบขณะลัดวงจรกระทำดังที่แสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งจะเห็นว่าเป็นการจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ขดแรงดันไฟฟ้าสูงและลัดวงจรขดแรงดันไฟฟ้าต่ำไว้ซึ่งอาจจะลัดวงจรเข้ากันโดยตรง โดยแอมมิเตอร์ทำหน้าที่วัดกระแสที่ไหลในหม้อแปลงในขณะที่ทำการทดสอบลัดวงจร โดยกระแสที่ไหลนี้มีค่าเท่ากับกระแสขณะที่มีโหลดเต็มที (Full Load Current) วัดมิเตอร์ทำหน้าที่วัดกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทั้งหมด ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่วัดได้นี้เป็นกำลังสูญเสียในขดลวดทองแดงทั้งหมด ค่ากำลังสูญเสียในขดลวดทองแดงนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงตามสภาพของกระแสที่ไหลในหม้อแปลง คือ กระแสไหลมากกำลังสูญเสียมาก กระแสไหลน้อยกำลังสูญเสียน้อย การสูญเสียในขดลวดทองแดงจะเกิดขึ้นในสภาวะหม้อแปลงมีโหลด ซึ่งการที่กระแสไหลมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับ

กับโหลดนั่นเอง ถ้าโหลดมากกระแสก็จะไหลมาก โหลดน้อยกระแสก็จะไหลน้อย อาจกล่าวได้ว่า กำลังสูญเสียในลวดทองแดงนั้นขึ้นอยู่กับโหลด [2]



รูปที่ 2.7 วงจรการทดสอบห้อแปลงขณะลัดวงจร (Short Circuit Test)

ถ้าให้ P_{sc} = ค่าที่อ่านได้จากวัตต์มิเตอร์เป็นกำลังสูญเสียในลวดทองแดงทั้งหมด
 I_{sc} = ค่าที่อ่านได้จากแอมมิเตอร์เป็นกระแสที่ไหลในห้อแปลงในขณะที่ลัดวงจร
 V_{sc} = ค่าที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบขณะลัดวงจร
 ดังนั้น $Z_{sc} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}}$ (2.1)

เมื่อ Z_{sc} = อิมพีแดนซ์สมมูลที่หาได้จากการทดสอบขณะลัดวงจร
 $Z_{sc} = Z_{01}$ เมื่อการทดสอบนั้นเราจ่ายไฟเข้าที่ขดปฐมภูมิ
 $Z_{sc} = Z_{02}$ เมื่อการทดสอบนั้นเราจ่ายไฟเข้าที่ขดทุติยภูมิ

จากกำลังสูญเสียในลวดทองแดง $= I^2 R$ (2.2)

ดังนั้น $P_{sc} = (I_{sc})^2 \times R_{sc}$ (2.3)

นั่นคือ $R_{sc} = \frac{W_{sc}}{(I_{sc})^2}$ (2.4)

เมื่อ R_{sc} = ความต้านทานสมมูลที่หาได้จากการทดสอบขณะลัดวงจร
 $R_{sc} = R_{01}$ เมื่อการทดสอบนั้นเราจ่ายไฟเข้าที่ขดปฐมภูมิ
 $R_{sc} = R_{02}$ เมื่อการทดสอบนั้นเราจ่ายไฟเข้าที่ขดทุติยภูมิ

$$\text{จาก } R = \sqrt{Z^2 - X_{sc}^2} \quad (2.5)$$

$$\text{ดังนั้น } X_{sc} = \sqrt{(Z_{sc})^2 - (R_{sc})^2} \quad (2.6)$$

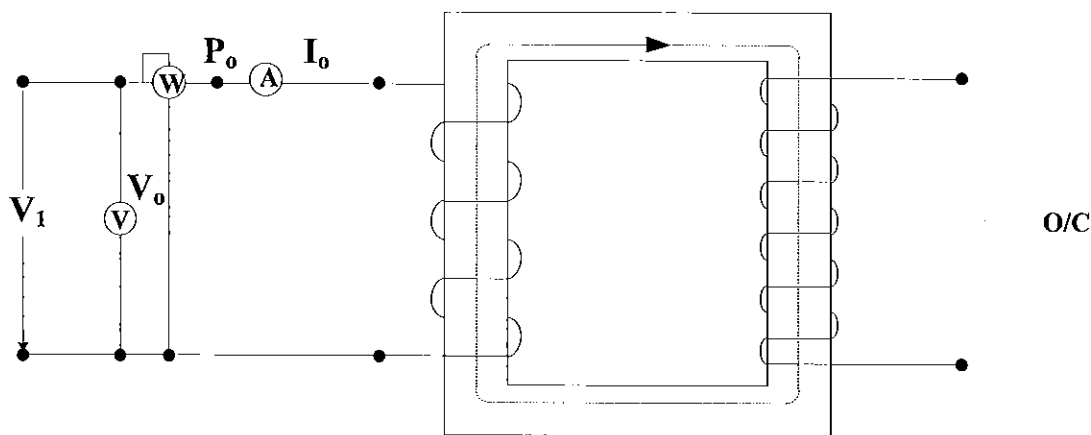
เมื่อ X_{sc} = ลิกเกจรีแอกแตนซ์สมมูลที่หาค่าได้จากการทดสอบ ขณะลัดวงจร

$X_{sc} = X_{01}$ การทดสอบนั้นเราจ่ายไฟเข้าที่ขดปฐมภูมิ

$X_{sc} = X_{02}$ การทดสอบนั้นเราจ่ายไฟเข้าที่ขดปฐมภูมิ

2.1.3.2 การทดสอบห้อมือแปลงด้วยวิธีเปิดวงจร (Open Circuit Test)

การทดสอบขณะวงจรเปิด หรือบางครั้งอาจเรียกว่า การทดสอบเพื่อหาค่าการสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss or Iron Loss Test) เพราะการทดสอบนี้จะทำให้หาค่าการสูญเสียในแกนเหล็กได้ การทดสอบขณะวงจรเปิดกระทำได้ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งจะเห็นว่าเป็นการจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ขดลวดแรงดันไฟฟ้าต่ำ ในการทดสอบแบบวงจรเปิดจะนิยมจ่ายไฟเข้าทางด้านขดลวดแรงดันไฟฟ้าต่ำ เพราะสะดวกต่อการหาเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า โดยเฉพาะวัตต์มิเตอร์ ดังนั้นเราจะต้องทำการตรวจสอบห้อมือแปลงเสียก่อนว่าขดปฐมภูมิหรือขดทุติยภูมิเป็นขดลวดแรงดันไฟฟ้าต่ำด้วยการใช้โอห์มมิเตอร์จากรูปที่ 2.8 ด้านขดลวดแรงดันไฟฟ้าต่ำจะมีเครื่องมือทางไฟฟ้าต่ออยู่คือ โวลต์มิเตอร์ แอมมิเตอร์ และวัตต์มิเตอร์ ส่วนทางด้านขดลวดแรงดันไฟฟ้าสูงนั้นเปิดปลายไว้โดยโวลต์มิเตอร์ทำหน้าที่วัดแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ แอมมิเตอร์ทำหน้าที่วัดกระแสที่ไหลในห้อมือแปลงในขณะที่ไม่มีโหลดซึ่งแทนด้วย I_0 วัตต์มิเตอร์นั้นทำหน้าที่วัดกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทั้งหมด ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่วัดได้นี้เป็นกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมดแทนด้วย P_0 และค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กนี้จะมีค่าคงที่ไม่ว่าห้อมือแปลงนั้นจะมีโหลดหรือไม่มีโหลดก็ตาม [2]



รูปที่ 2.8 วงจรการทดสอบหม้อแปลงขณะเปิดวงจร (Open Circuit Test)

ถ้าให้ P_0 = ค่าที่อ่านได้จากวัตต์มิเตอร์

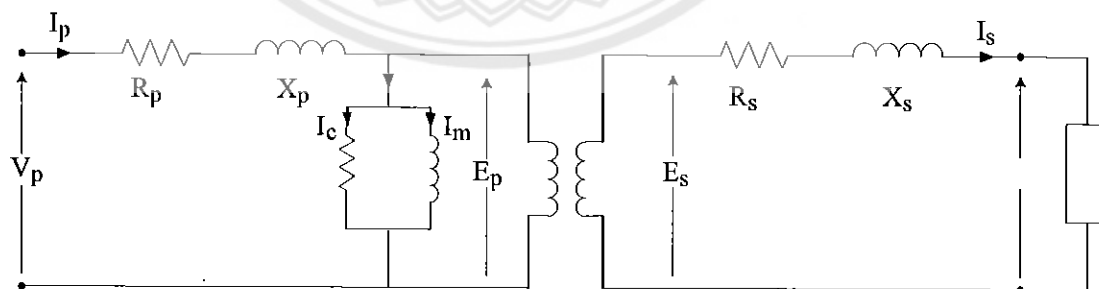
V_1 = แรงดันที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์

I_0 = กระแสขณะไม่มีโหลดที่อ่านได้จากแอมมิเตอร์

ดังนั้น $P_0 = V_1 I_0 \cos \theta_0$ (2.7)

เมื่อ $\cos \theta_0$ = เพาเวอร์แฟกเตอร์ของหม้อแปลงในขณะไม่มีโหลด

ดังนั้น $\cos \theta_0 = \frac{P_0}{V_1 I_0}$ (2.8)



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลหม้อแปลงไฟฟ้า

ถ้า V_p, V_s = แรงดันด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ

I_p, I_s = กระแสด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ

E_p, E_s = แรงดันไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ

R_{01}, R_{02} = ความต้านทานของขดลวดด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ

X_{01}, X_{02} = ลีแกนจรีแอกแตนซ์ของขดลวดด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ

I_m = Magnetizing Current เป็นค่ากระแสที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็ก

I_C = Core loss Current เป็นค่ากระแสที่ทำให้เกิดค่าสูญเสียในแกนเหล็ก

2.1.4 การสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า (Losses in Transformer)

หม้อแปลงไฟฟ้านับได้ว่าเป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่มีการสูญเสียน้อยที่สุดเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับเครื่องกลไฟฟ้าชนิดอื่น เช่น มอเตอร์หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพราะว่าหม้อแปลงไฟฟ้าไม่มีส่วนประกอบใดๆที่เคลื่อนที่ได้ ดังนั้นจึงไม่มีการสูญเสียเนื่องจากความเสียดและแรงต้านจากลม (Friction and Windage Losses) ดังนั้นจึงมีการสูญเสียเพียง 2 ส่วนเท่านั้นคือ [2]

2.1.4.1 การสูญเสียในแกนเหล็ก (Iron Loss or Core Loss)

การสูญเสียในแกนเหล็กจะประกอบด้วยการสูญเสีย 2 ชนิด คือการสูญเสียเนื่องจาก ฮิสเตอร์ีซิส (Hysteresis Loss) และการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy Current Loss) ในแกนเหล็ก ทั้งนี้เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กรวม (Mutual Flux) มีค่าคงที่ตลอดเวลาทุกสภาวะโหลด ดังนั้นการสูญเสียชนิดนี้มีค่าคงที่แม้ว่าโหลดจะมีการเปลี่ยนแปลง การสูญเสียในแกนเหล็กหาได้จากสมการดังต่อไปนี้ [2]

$$P_C = P_{hys} + P_{eddy} \quad (2.9)$$

P_C = การสูญเสียในแกนเหล็ก (Iron Loss or Core Loss)

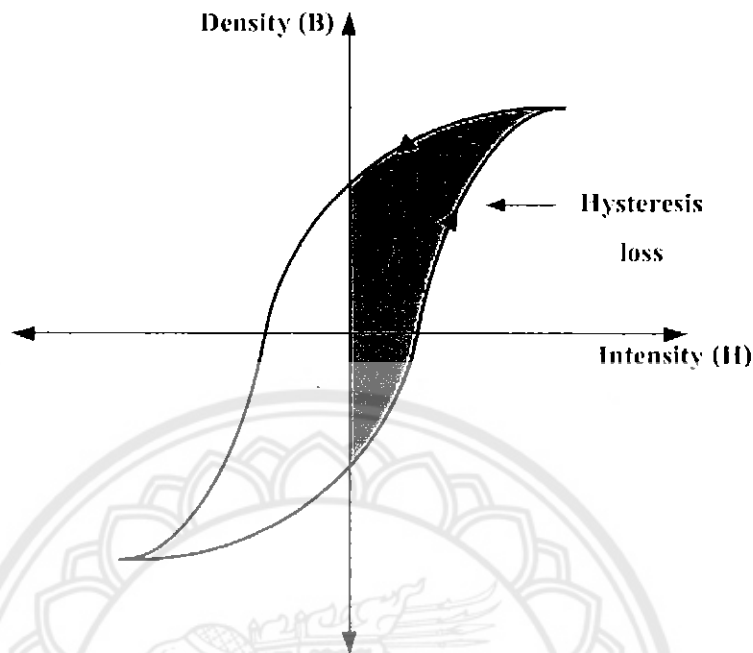
P_{hys} = การสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์ีซิส (Hysteresis Loss)

P_{eddy} = การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy Current Loss)

ก. การสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์ีซิส (Hysteresis Loss)

เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้าสลับมีการเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทาง การเคลื่อนที่ที่อยู่ตลอดเวลา ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจึงมีการเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางตลอดเวลาด้วยอัตราเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กจึงกลับขั้วไปมาอยู่ตลอดเวลา การกลับทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะต้องใช้พลังงานส่วนหนึ่งเพื่อเอาชนะ

ความผิดของโมเลกุล พลังงานที่ใช้ไปก็คือพลังงานสูญเสียไปในรูปของพลังงานความร้อน จึงเรียก การสูญเสียนี้ว่า ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis)



รูปที่ 2.10 กราฟบีเอช (BH Curve)

จากเส้นโค้งอ้อมตัวของวัสดุแม่เหล็กหรือกราฟบีเอช (BH Curve) จะพบว่า วงรอบปิดที่เกิดขึ้นจากการกลับทิศทางของสนามแม่เหล็กเรียกว่า วงรอบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Loop) พื้นที่ที่อยู่ภายในวงรอบฮิสเทอรีซิสนี้ก็คือนำพลังงานที่สูญเสียไปในรูปของฮิสเทอรีซิสนั่นเอง ซึ่งวงรอบฮิสเทอรีซิสนี้จะเกิดขึ้นเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไปที่ขดลวด จะทำให้เกิดวงรอบปิดนี้ขึ้นทุกๆ รอบการทำงาน โดยขนาดของวงรอบฮิสเทอรีซิสนี้จะขึ้นอยู่กับความถี่ของไฟที่ป้อนนั่นเอง ถ้าใช้ไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงจะทำให้เกิดการสูญเสียฮิสเทอรีซิสซึ่งสูงกว่าความถี่ต่ำ ดังรูปที่ 2.10 นำพลังงานสูญเสียนี้ประมาณได้จากสมการต่อไปนี้ [6]

$$P_{hys} = k_h f B_m^{1.6} \quad (2.10)$$

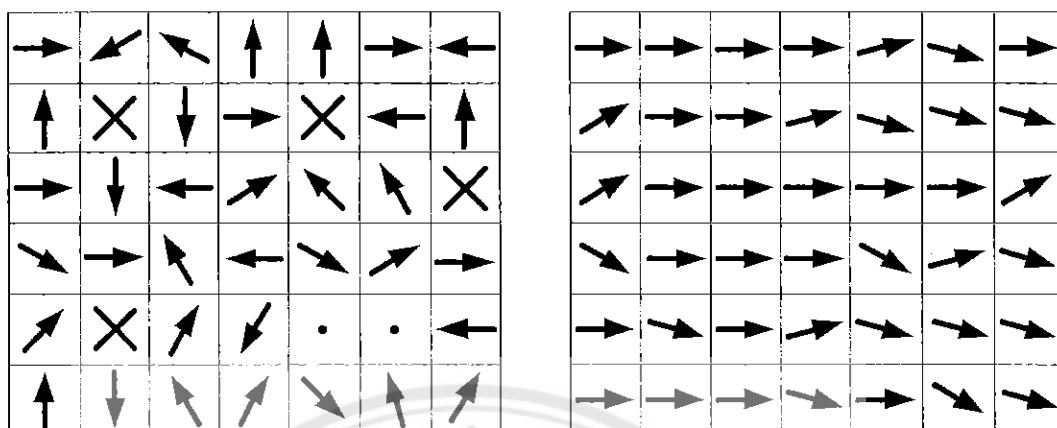
P_{hys} = การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Loss) (W)

k_h = ค่าคงที่ขึ้นกับความนำไฟฟ้าของวัสดุแม่เหล็ก

B_m = ความหนาแน่นของฟลักซ์สูงสุด (Tesla)

เมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกที่กระทำกับวัสดุแม่เหล็กเกิดการกลับทิศทาง อาจจะมีการลดค่าลงจนกลายเป็นศูนย์ วัสดุแม่เหล็กจะยังคงมีฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง (Residual flux: Φ_{res}) อยู่ภายใน เนื่องจากการจัดเรียงตัวกันของโมเลกุลของวัสดุแม่เหล็กดังกล่าว ไม่มีความเป็นระเบียบ

และคงอำนาจแม่เหล็กอ่อนๆ เอาไว้ได้ดังรูปที่ 2.11 แสดงการจัดเรียง โมเลกุลของวัสดุแม่เหล็กก่อน และหลังมีสนามแม่เหล็กพาดผ่าน [6]



รูปที่ 2.11 แสดงการจัดเรียง โมเลกุลของวัสดุแม่เหล็กก่อน และหลังมีสนามแม่เหล็กพาดผ่าน

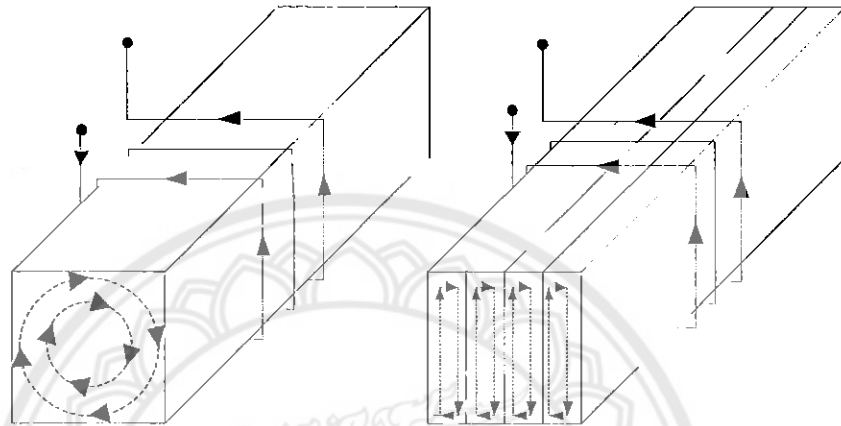
ฟลักซ์ตกค้างถือเป็นกำลังงานสูญเสียรูปแบบหนึ่ง แต่ก็มีประโยชน์เช่นกัน เช่น การสร้างแม่เหล็กถาวรก็อาศัยการป้อนสนามแม่เหล็กความเข้มสูงใหญ่กับวัสดุแม่เหล็กการสร้าง ลำโพงการเดินเครื่องจักรกล ไฟฟ้าชนิดกระตุ้นตัวเองแบบขนาน เป็นต้น

ข. การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy Current Loss)

เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้าสลับมีการเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจึงมีการเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางการเคลื่อนที่ตลอดเวลาด้วย การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กดังกล่าวจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของแรงเคลื่อนไฟฟ้าตามกฎของ “ไมเคิล ฟาราเดย์” เนื่องจากแกนเหล็กนั้นเป็นตัวนำชนิดหนึ่ง และในแกนเหล็กนั้นจะเป็นกระแสไฟฟ้าก้ำกั๊งสองและความต้านทานของแกนเหล็ก (I^2R) จะแสดงผลในรูปของความร้อน การสูญเสียจะสามารถทำให้ลดลงได้โดยการใช้แผ่นเหล็กบางๆ การสูญเสียในแกนเหล็กจะสามารถหาได้โดยการทดสอบสภาวะเปิดวงจร (Open Circuit Test)

ในกรณีของขดลวดที่พันอยู่บนแกนเหล็กเมื่อมีสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา พาดผ่านจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (EMF) ครอบคลุมขดลวดขึ้น และในขณะเดียวกัน สนามแม่เหล็กดังกล่าวก็จะเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าคร่อมแกนเหล็กด้วยเช่นกัน และแกนเหล็กก็ถือเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีทำให้เกิดกระแสไหลในแกนเหล็กอันเนื่องมาจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้น กระแสเหนี่ยวนำนี้จะเกิดขึ้นในลักษณะไหลวนในแกนเหล็กล้อมรอบสนามแม่เหล็กที่เหนี่ยวนำขึ้นมา กระแสไหลวนนี้เรียกว่า Eddy Current ดังแสดงในรูปที่ 2.12 กำลังงานสูญเสียในรูปของกระแสไหลวนนี้ทำให้ลดลงได้โดยการลดขนาดของกระแสไหลวนที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้น โดยการสร้างแกนเหล็กด้วยแผ่นวัสดุแม่เหล็กซ้อนกันเป็นชั้นๆ (Lamination) ทำให้กระแสไหลวนที่เกิดขึ้นถูกจำกัดอยู่ในชั้นย่อยๆ นั้นๆ ช่วยลดกำลังงานสูญเสียดังกล่าวได้ [6]



รูปที่ 2.12 กระแสไหลวน (Eddy Current)

กำลังงานสูญเสียนี้อาจจะประมาณได้จากสมการนี้

$$P_{eddy} = k_e B_m^2 f^2 t^2 \quad (2.11)$$

P_{eddy} = การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy Current Losses) (W)

k_e = ค่าคงที่ขึ้นกับความนำไฟฟ้าของวัสดุแม่เหล็ก

f = ความถี่ทำงาน (Hz)

B_m^2 = ค่ายอดของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

t = ความหนาของแผ่นลามิเนต

2.1.4.2 การสูญเสียในขดลวดตัวนำ (Copper Loss)

การสูญเสียในขดลวดตัวนำหรือขดลวดทองแดง เกิดขึ้นเนื่องจากความต้านทานของขดลวดทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง ขณะที่หม้อแปลงทำงานภาวะไม่มีโหลดจะมีกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดปฐมภูมิเพียงเล็กน้อย ดังนั้นการสูญเสียที่เกิดขึ้นก็จะมีปริมาณเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อต่อโหลดกับขดลวดทุติยภูมิจะมีกระแสไหลผ่านโหลดและกระแสไหลขดลวดปฐม

ภูมิจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น ดังนั้นการสูญเสียจึงมีค่ามากขึ้น ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าการสูญเสียในขดลวดตัวนำของหม้อแปลงจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่ากระแสไฟฟ้าของโหลดหรือขนาดของโหลด และสูญเสียไปในรูปของความร้อน การสูญเสียในขดลวดตัวนำจะสามารถหาได้โดยการทดสอบสภาวะลัดวงจร (Short Circuit Test) การสูญเสียในขดลวดตัวนำหาได้จากสมการดังต่อไปนี้ [2]

$$P_{CU} = I_p^2 R_p + I_s^2 R_s \quad (2.12)$$

P_{CU} = การสูญเสียที่ขดลวดทองแดง (Copper Loss) (W)

I_p = กระแสด้านปฐมภูมิ

R_p = ความต้านทานด้านปฐมภูมิ

I_s = กระแสด้านทุติยภูมิ

R_s = ความต้านทานด้านทุติยภูมิ

2.1.5 โวลต์เตจเรกกูเลชัน (Voltage Regulation)

เนื่องจากแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อมีโหลดกับไม่มีโหลดนั้น จะต่างกันมากบ้างน้อยบ้าง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับหลายสิ่งด้วยกัน เช่น ขึ้นอยู่กับแกนเหล็ก การอัดแกนเหล็ก การพันขดลวด เป็นต้น นอกจากนี้การออกแบบที่ดีก็ช่วยได้มากเหมือนกัน ถ้าแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อไม่มีโหลดกับเมื่อมีโหลดต่างกันมาก หม้อแปลงไฟฟ้าตัวนั้นก็ไม่ได้ดี แต่ถ้าแรงดันขณะไม่มีโหลดกับขณะที่มีโหลดแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย หรือออกแบบให้ไม่แตกต่างกันเลยแสดงว่าการควบคุมแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ดี [3]

สิ่งที่จะบอกอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของขดลวดทางด้านทุติยภูมิเรียกว่าโวลต์เตจเรกกูเลชัน (Voltage Regulation)

ให้ E_2 = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นทางด้านขดลวดทุติยภูมิ

= แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วทางด้านทุติยภูมิขณะไม่มีโหลด

V_2 = แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วทางด้านทุติยภูมิขณะมีโหลด

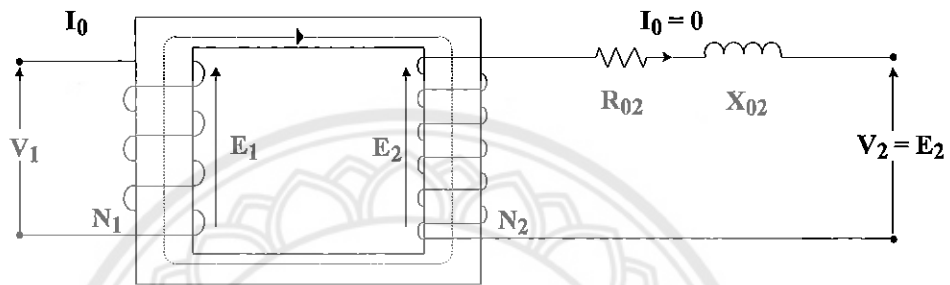
โวลต์เตจเรกกูเลชัน (Voltage Regulation) หมายถึงอัตราส่วนของความแตกต่างระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้านทุติยภูมิกับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วด้านทุติยภูมิ และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้านทุติยภูมิ โดยทั่วไปในการหาค่าโวลต์เตจเรกกูเลชันจะพิจารณาทางด้านทุติยภูมิ ดังนั้น

$$\text{โวลต์เตจเรกกูเลชัน} = \frac{(E_2 - V_2)}{V_2} \times 100 \quad (\text{เมื่อเป็น Regulation Up}) \quad (2.13)$$

$$\text{โวลต์เตจเรกกูเลชั่น} = \frac{(E_2 - V_2)}{E_2} \times 100 \quad (\text{เมื่อเป็น Regulation Down}) \quad (2.14)$$

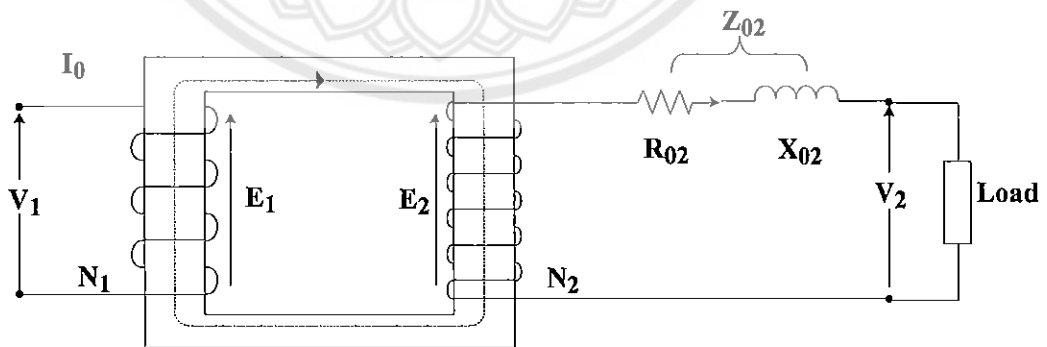
เมื่อ E_2 = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นทางด้านขดลวดทุติยภูมิ

V_2 = แรงดันไฟฟ้าขั้วทางด้านทุติยภูมิขณะมีโหลด



รูปที่ 2.13 วงจรของหม้อแปลงขณะไม่มีโหลด

รูปที่ 2.13 เป็นวงจรการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าในขณะไม่มีโหลด กระแสไฟฟ้า $I_2 = 0$ ดังนั้นจึงไม่แรงดันตกคร่อมที่ R_{02} และ X_{02} จึงกล่าวได้ว่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว V_2 ขณะนี้แรงดันที่ขั้ว ขณะไม่มีโหลดซึ่งจะมีค่าเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ E_2 หรือ $V_2 = E_2$



รูปที่ 2.14 วงจรของหม้อแปลงขณะมีโหลด

จากรูปที่ 2.14 เมื่อมีโหลดเข้าที่ขั้วขดลวดทางด้านทุติยภูมิ กระแสไฟฟ้า I_2 จะไม่เท่ากับ ศูนย์ และไหลผ่าน R_{02} และ X_{02} ดังนั้นจึงมีแรงดันตกคร่อมที่ R_{02} และ X_{02} เป็นเหตุให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (V_2) ของหม้อแปลงลดลง ทำให้แรงดันที่ขั้วน้อยกว่า E_2

ให้แรงดันที่ขั้ว V_2 เป็นแรงดันขณะที่มีโหลดเต็มพิกัดทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง ดังนั้นผลต่างระหว่าง E_2 และ V_2 คือค่าแรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์ $I_2 Z_{02}$ (แรงดันตกคร่อม Z_{02} ซึ่งจะเท่ากับผลรวมทางเวกเตอร์ระหว่างแรงดันตกคร่อม R_{02} และ X_{02})

2.1.6 ประสิทธิภาพของหม้อแปลง (Efficiency of Transformer)

ประสิทธิภาพของหม้อแปลงคืออัตราส่วนระหว่างกำลังเอาต์พุต (Power Output) ต่อ กำลังอินพุต (Power Input) ซึ่งจะต้องมีหน่วยเดียวกัน อาจเป็นวัตต์ (Watt) หรือกิโลวัตต์ (Kilowatt) ก็ได้ จะเป็นสมการดังนี้คือ [1]

ประสิทธิภาพ (Efficiency) = กำลังเอาต์พุต/กำลังอินพุต

$$\text{หรือ } \eta = \frac{P_{\text{output}}}{P_{\text{input}}} \quad (2.15)$$

ดังที่ได้กล่าวมา หม้อแปลงเป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง มีการสูญเสียน้อยมาก ดังนั้นการวัดค่าของกำลังอินพุตและกำลังเอาต์พุตจึงได้ค่าที่ใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นการหาค่าการสูญเสียทั้งหมดในหม้อแปลง แล้วนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพจากสมการดังนี้คือ

ประสิทธิภาพ (Efficiency) = กำลังเอาต์พุต/กำลังเอาต์พุต + การสูญเสียทั้งหมด

$$\text{หรือ } \eta = \frac{P_{\text{output}}}{P_{\text{output}} + P_{\text{losses}}} \quad (2.16)$$

$$\text{หรือ } \eta = \frac{P_{\text{output}}}{P_{\text{output}} + P_{\text{Cu loss}} + P_{\text{Core loss}}} \quad (2.17)$$

นอกจากนั้น ยังสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพของหม้อแปลงได้จากสมการดังต่อไปนี้

ประสิทธิภาพ (Efficiency) = กำลังอินพุต-การสูญเสียทั้งหมด/กำลังอินพุต

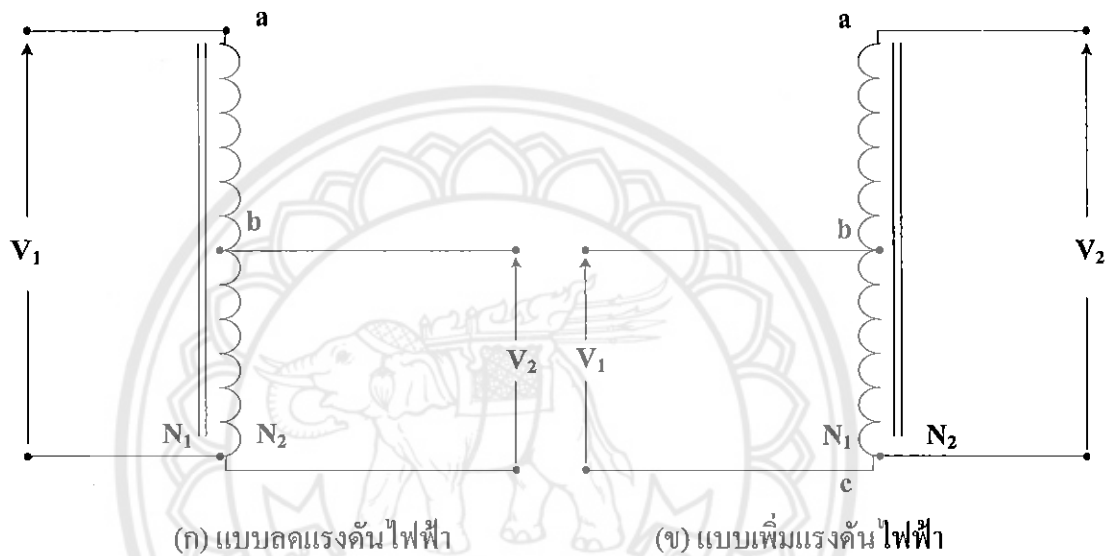
$$\text{หรือ } \eta = \frac{P_{\text{input}} - P_{\text{losses}}}{P_{\text{input}}} \quad (2.18)$$

$$\text{หรือ } \eta = \frac{P_{\text{input}} - P_{\text{Cu loss}} - P_{\text{Core loss}}}{P_{\text{input}}} \quad (2.19)$$

$$\text{หรือ } \eta = 1 - \frac{P_{\text{losses}}}{P_{\text{input}}} \quad (2.20)$$

2.2 หลักการของหม้อแปลงออโต (Auto Transformer)

จากที่กล่าวมาในหัวข้อ 2.1 เป็นหม้อแปลงแบบขดลวดสองชุด คือ ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิพันแยกแแกนกัน คือ หม้อแปลงแบบคอร์ (Core Type) หรือขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิพันอยู่บนแกนเดียวกัน คือ หม้อแปลงแบบเชลล์ (Shell Type) แต่หม้อแปลงแบบออโต (Auto Transformer) มีขดลวดเพียงชุดเดียวเท่านั้น ซึ่งทำหน้าที่เป็นทั้งขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ มีหลักการทำงานเหมือนกับหม้อแปลงขดลวดสองชุดทุกประการ แต่เนื่องจากใช้ขดลวดเพียงชุดเดียว จึงประหยัดลวดทองแดง [5]



รูปที่ 2.15 วงจรของหม้อแปลงแบบออโต

ในรูปที่ 2.15 เป็นวงจรของหม้อแปลงแบบออโตซึ่งมีขดลวดเพียงชุดเดียวคือ ac แต่มีจุดแยก (Tap) ตรงจุด b เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้า V_1 เข้าที่ขั้ว ac แล้วนำแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว bc ไปจ่ายให้โหลด จะได้หม้อแปลงออโตแบบลดแรงดัน รูปที่ 2.15 (ก)

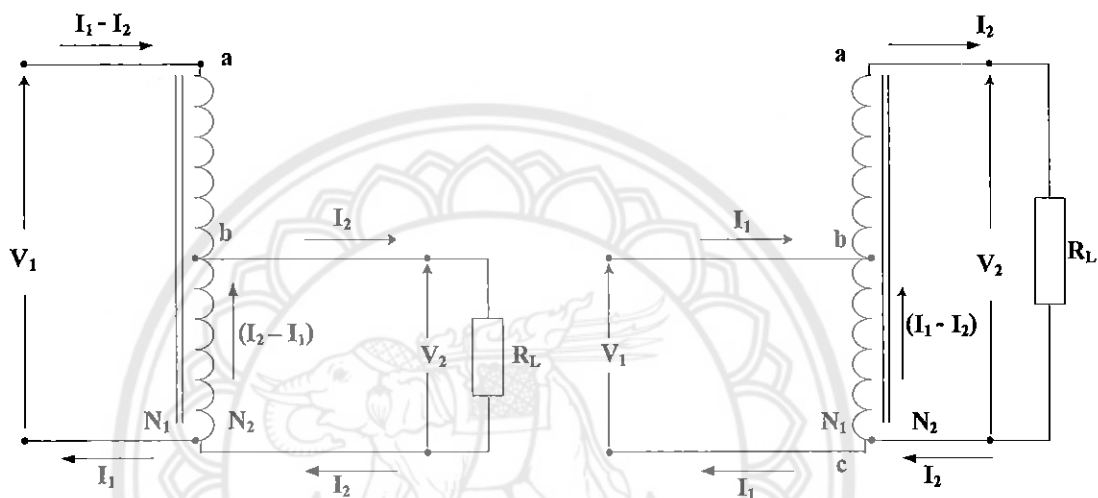
ในทางตรงข้าม ถ้าจ่ายแรงดันไฟฟ้า V_1 เข้าที่ขั้ว bc แล้วนำแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว ac ไปจ่ายให้โหลดดังรูปที่ 2.15 (ข) จะได้หม้อแปลงออโตแบบเพิ่มแรงดัน

ให้ขดลวดในช่วง ac ในรูปที่ 2.15 (ก) ทำหน้าที่เป็นขดลวดปฐมภูมิ มีจำนวนรอบเป็น N_1 และขดลวดในช่วง bc ทำหน้าที่เป็นขดลวดทุติยภูมิ มีจำนวนรอบเป็น N_2 ดังนั้นวงจรในรูปที่ 2.15 (ก) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและจำนวนรอบของขดลวดดังนี้

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} = K \quad (2.21)$$

ถ้าเปรียบเทียบหม้อแปลงแบบออโตกับหม้อแปลงแบบขดลวดสองชุดจะพบว่า หม้อแปลงแบบออโตมีประสิทธิภาพสูงกว่าและมีขนาดเล็กกว่า จึงมีการสูญเสียในแกนเหล็กและการสูญเสียในขดลวดทองแดงน้อยกว่า ดังนั้นถ้าไม่คำนึงถึงกระแสแมกเนไทซ์และค่าของลิกเกจรีแอคแตนซ์ จึงอาจจะสมมติได้ว่ากำลังอินพุตเท่ากับกำลังเอาต์พุต

วงจรในรูปที่ 2.16 แสดงทิศทางกระแสที่ไหลในขดลวดหม้อแปลงแบบออโตจะสังเกตเห็นว่ากระแสที่ไหลในขดลวดช่วง bc จะเป็นผลต่างของกระแส I_2 และ I_1 โดยกระแส I_2 มีค่ามากกว่า I_1 ดังรูปที่ 2.16 (ก) กระแส I_1 มีค่ามากกว่า I_2 ดังรูปที่ 2.16 (ข)

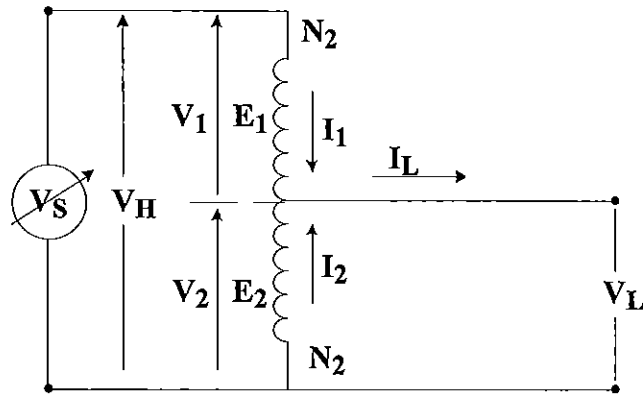


ก. กระแสในขดลวดช่วง bc = $(I_2 - I_1)$ ข. กระแสในขดลวดช่วง bc = $(I_1 - I_2)$

รูปที่ 2.16 ทิศทางกระแสที่ไหลในขดลวดหม้อแปลงแบบออโต

2.2.1 พิกัดแรงดันไฟฟ้า

เมื่อป้อนด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเข้าทางด้านขั้วแรงดันสูง V_H และ ต่อโหลดเข้าทางด้านแรงดันต่ำ V_L ซึ่งเป็นการนำหม้อแปลงออโต้ไปใช้งานเพื่อเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า ในการนำหม้อแปลงออโต้ไปต่อใช้งานจำเป็นต้องศึกษาและทำความเข้าใจถึงพิกัดแรงดันไฟฟ้าทั้งทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิเสียก่อน [5]



รูปที่ 2.17 วงจรหม้อแปลงออโต้แบบลดแรงดัน

จากรูปที่ 2.17 แรงดันไฟฟ้าด้านแรงสูง V_H มีค่าเท่ากับผลรวมทางเวกเตอร์ของแรงดันไฟฟ้า V_1 และ V_2 และแรงดันไฟฟ้าด้านแรงต่ำ V_L จะมีค่าเท่ากับ V_2 ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$V_L = V_2 \quad (2.22)$$

$$V_H = V_1 + V_2 \quad (2.23)$$

แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว V_1 และ V_2 จะมีค่าไม่เท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องเกี่ยวขดลวดที่ 1 และขดลวดที่ 2 มีค่าเท่ากับ E_1 และ E_2 ตามลำดับ โดยความแตกต่างเกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กรั่วและมีค่าความต้านทานของขดลวดทั้งสอง ในกรณีที่เป็นหม้อแปลงออโต้ในอุดมคติค่าสนามแม่เหล็กรั่ว จะมีค่าน้อยมาก และไม่มีค่าความต้านทานของขดลวดเลย และกระแสกระตุ้นมีค่าน้อยมาก มีผลทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับจำนวนรอบของขดลวด เป็นดังนี้

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.24)$$

และจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน V_H กับ V_L เป็น

$$\frac{V_H}{V_L} = \frac{E_1 + E_2}{E_2} = \frac{N_1 + N_2}{N_2} = a \quad (2.25)$$

เมื่อ a คืออัตราส่วนระหว่างจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิต่อจำนวนขดลวดทุติยภูมิ หรือแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิต่อแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ (Transformer Ratio)

2.2.2 พิกัดกระแสไฟฟ้า

ด้านความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดกระแสไฟฟ้าด้านแรงดันสูง I_H และกระแสไฟฟ้าทางด้านแรงดันต่ำ I_L ดังนั้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [5]

$$I_H = I_1 \quad (2.26)$$

$$I_L = I_1 + I_2 \quad (2.27)$$

เนื่องจากว่าเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติกระแสที่ไหลในขดลวด 1 และ 2 จะเป็นอัตราส่วนกับจำนวนรอบของขดลวด

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.28)$$

ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง I_H กับ I_L จะได้เป็น

$$\frac{I_H}{I_L} = \frac{I_1}{I_1 + I_2} = \frac{1}{1 + \frac{N_1}{N_2}} = \frac{N_2}{N_1 + N_2} = \frac{1}{a} \quad (2.29)$$

2.2.3 อิมพีแดนซ์

ทางด้านอิมพีแดนซ์ สามารถวิเคราะห์ได้จากการนำโหนดมาต่อเข้าทางด้าน V_L และหาค่าอิมพีแดนซ์ ที่ปรากฏทางด้านแรงสูง V_H จะได้เป็น [5]

$$Z_H = \frac{V_H}{I_H} = a^2 \cdot \frac{V_L}{I_L} \quad (2.30)$$

$$Z_H = a^2 Z_L \quad (2.31)$$

2.2.4 พิกัดกำลังไฟฟ้า

เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าแบบออโต้ เหมือนกับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสองขดลวด ในการหาค่ากำลังไฟฟ้าจึงใช้วิธีเปรียบเทียบหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองตัว [5]

พิกัดกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ (Apparent Power: S) ภายใต้เงื่อนไขว่าให้คิดในอุดมคติ จะได้กำลังไฟฟ้าที่ปรากฏด้านเข้าเป็น

$$S_m = V_H I_H \quad (2.32)$$

กำลังไฟฟ้าที่ปรากฏด้านออก จะได้

$$S_{out} = V_L I_L \quad (2.33)$$

จากสมการ (2.21) และ (2.25) จะได้กำลังไฟฟ้าที่ปรากฏด้านเข้าเท่ากับกำลังไฟฟ้าด้านออก

$$S_{in} = S_{out} = S_{I/O} \quad (2.34)$$

กำลังไฟฟ้าที่ปรากฏจ่ายให้กับโหลดจะได้เป็น

$$S = V_L I_L + V_L (I_2 - I_1) \quad (2.35)$$

จากสมการ (2.31) สามารถพิจารณาได้เป็น 2 ส่วน คือ

$$V_L I_L = S_2 = \text{กำลังไฟฟ้าในขดลวด } N_2 \quad (2.36)$$

$$V_L (I_2 - I_1) = S_1 = \text{กำลังไฟฟ้าในขดลวด } N_1 \quad (2.37)$$

ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าในขดลวดแต่ละขดเป็นดังนี้

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{a} \quad (2.36)$$

และ
$$\frac{S_1}{S} = \frac{I_2 - I_1}{I_2} = \frac{a - 1}{a} \quad (2.37)$$

2.3 บทบาททวนโรงงาน

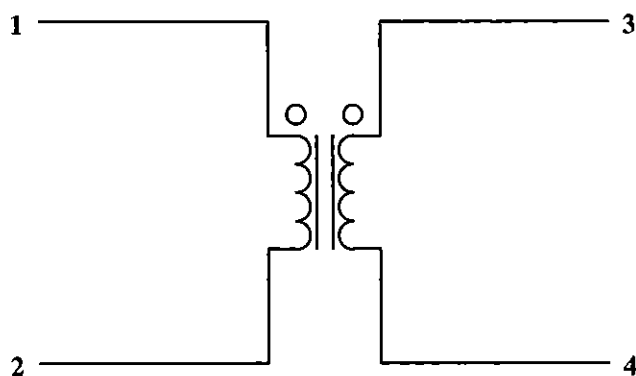
จากการที่ได้ทำโครงการการออกแบบหม้อแปลงออโต 1 เฟส ได้ทำการค้นคว้าเพิ่มเติมใน ส่วนของผลการทดสอบของผู้เชี่ยวชาญ โรงงานเกี่ยวกับเรื่องหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 220/110 V โดยแบ่งขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. Insulation Tester วัดความต้านทานไฟฟ้า

$$R_{13} = > 2000 \text{ M}\Omega$$

$$R_{1\text{-core}} = > 2000 \text{ M}\Omega$$

$$R_{3\text{-core}} = > 2000 \text{ M}\Omega$$

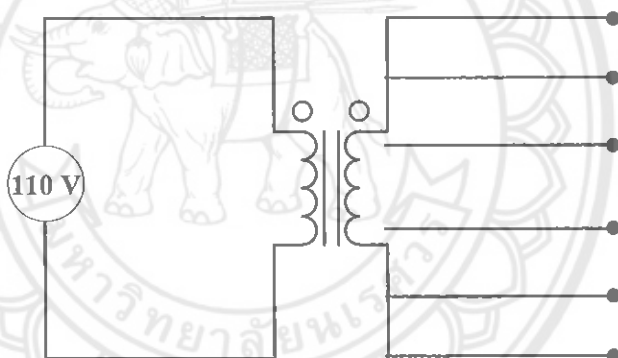


รูปที่ 2.18 วงจรวัดความต้านทานไฟฟ้า

2. วัดแรงดันไฟฟ้าด้าน Secondary ของแต่ละ Tab

Input Voltage 110 V

แรงดันไฟฟ้าฝั่ง Secondary ที่ Tab ต่างๆ = 8.9, 12.15, 24.12, 98.1, 109.7 V



รูปที่ 2.19 วงจรวัดแรงดันไฟฟ้าด้าน Secondary ของแต่ละ Tab

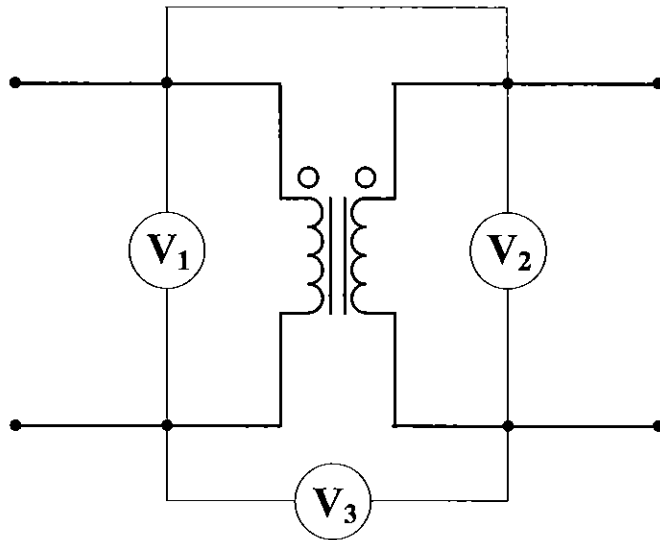
3. ทดสอบหาขั้วของหม้อแปลง (Polarity Test)

$$V_1 = 110 \text{ V}$$

$$V_2 = 109.6 \text{ V}$$

$$V_3 = 0.5 \text{ V}$$

สรุปได้ว่าการต่อลักษณะนี้จะเป็นการต่อที่หักล้างกัน



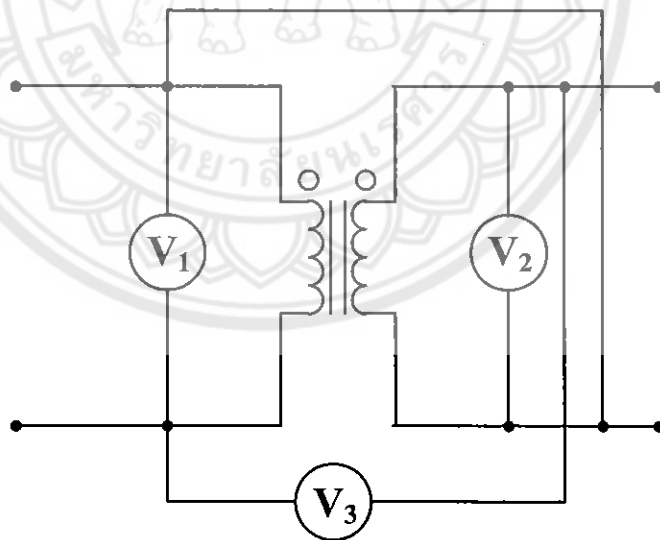
รูปที่ 2.20 ทดสอบหาขั้วของหม้อแปลง ก. (Polarity Test)

$$V_1 = 110.2 \text{ V}$$

$$V_2 = 109.7 \text{ V}$$

$$V_3 = 220.1 \text{ V}$$

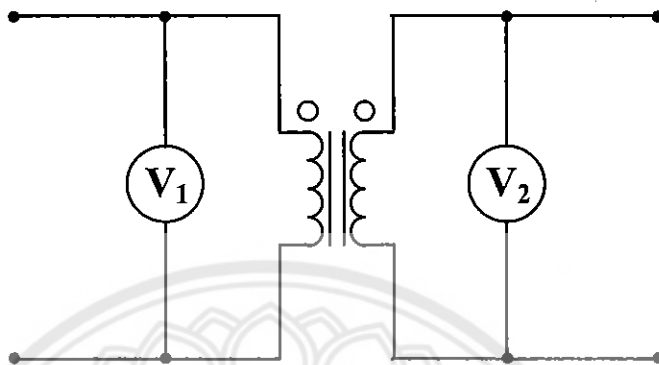
จากการทดลองทั้ง 2 วงจรข้างต้นทำให้สรุปได้ว่าขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้านี้อยู่เยื้องกัน



รูปที่ 2.21 ทดสอบหาขั้วของหม้อแปลง ข. (Polarity Test)

4. การทดลองหาอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลง (Transformation Ratio)

ป้อน Input voltage (V_1) = 0, 20, 40, 60, 80, 100, 120 V ตามลำดับ จากนั้นวัดค่า V_2 แล้วนำมาคำนวณอัตราขยายแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้าจากสูตร $a = \frac{V_1}{V_2}$

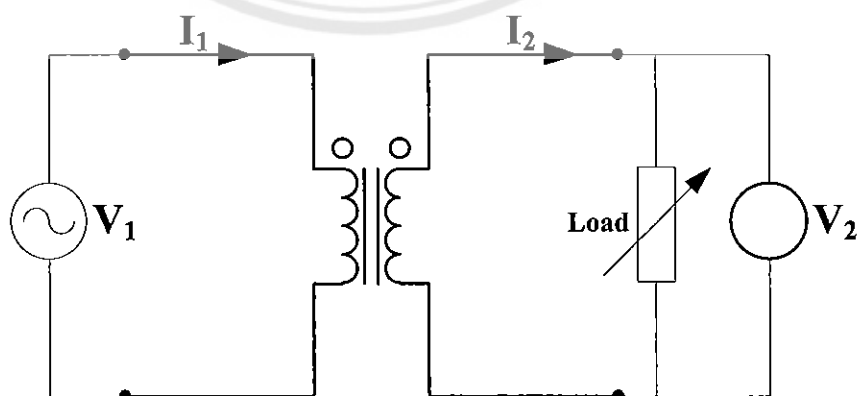


รูปที่ 2.22 วงจรหาอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลง (Transformation Ratio)

ตารางที่ 2.1 ผลการทดสอบหาอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลง

V_1	0	20	40	60	80	100	120
V_2	0	20.05	40.07	59.8	79.7	99.5	119.5
a	1	0.997	0.998	1.003	1.003	1.005	1.004

5. การทดสอบหาค่าการสูญเสียของหม้อแปลง



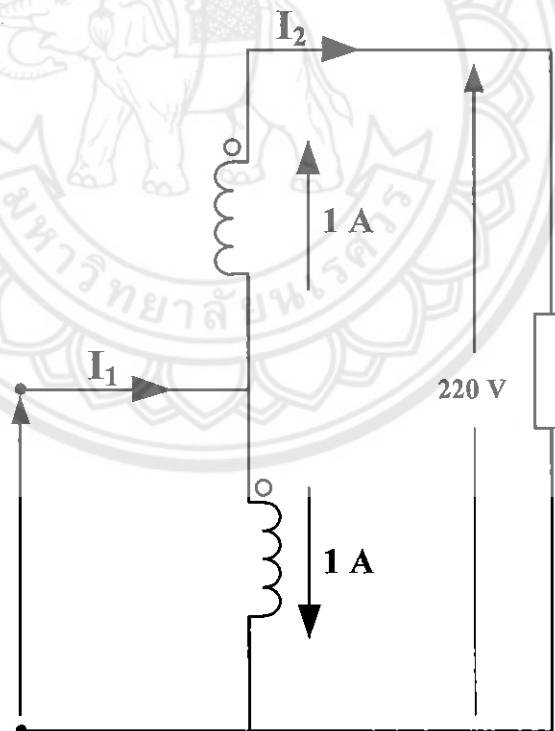
รูปที่ 2.23 วงจรการทดสอบหาค่าการสูญเสียของหม้อแปลง

หมายเหตุ เพิ่มค่า I_1 เรื่อยๆ แต่ห้ามเกิน 1 A

ตารางที่ 2.2 การทดสอบหาค่าการสูญเสียของหม้อแปลง

$V_1(V)$	110	110	110	110	110
$V_2(V)$	109.9	106.8	104.5	102.3	101.3
$I_1(A)$	0.175	0.406	0.668	0.94	1.047
$I_2(A)$	0.002	0.305	0.582	0.872	0.979
$P_1(W)$	8.6	41.7	70.6	102.6	114.2
$P_2(W)$	0	32.5	59.9	88.7	98.2
Loss	8.6	9.2	10.7	13.9	16.0

6. การทดสอบ Autotransformer แบบ Step Up



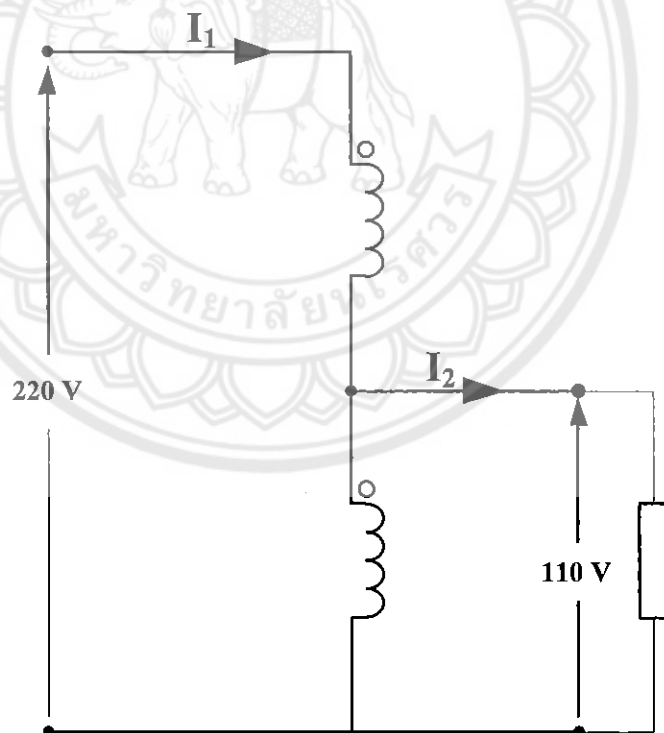
รูปที่ 2.24 วงจรการทดสอบ Autotransformer แบบ Step Up

หมายเหตุ I_2 ห้ามเกิน 1 A

ตารางที่ 2.3 การทดสอบ Autotransformer แบบ Step Up

$V_1(V)$	110	110	110	110
$V_2(V)$	219.7	216.1	212.5	210.5
$I_1(A)$	0.170	0.976	1.781	2.10
$I_2(A)$	0.002	0.445	0.862	1.020
$P_1(W)$	8.7	106.6	196.0	230.0
$P_2(W)$	0	96.2	181.0	213.5
Loss	8.7	10.4	15.0	26.5

7. การทดสอบ Autotransformer แบบ Step Down

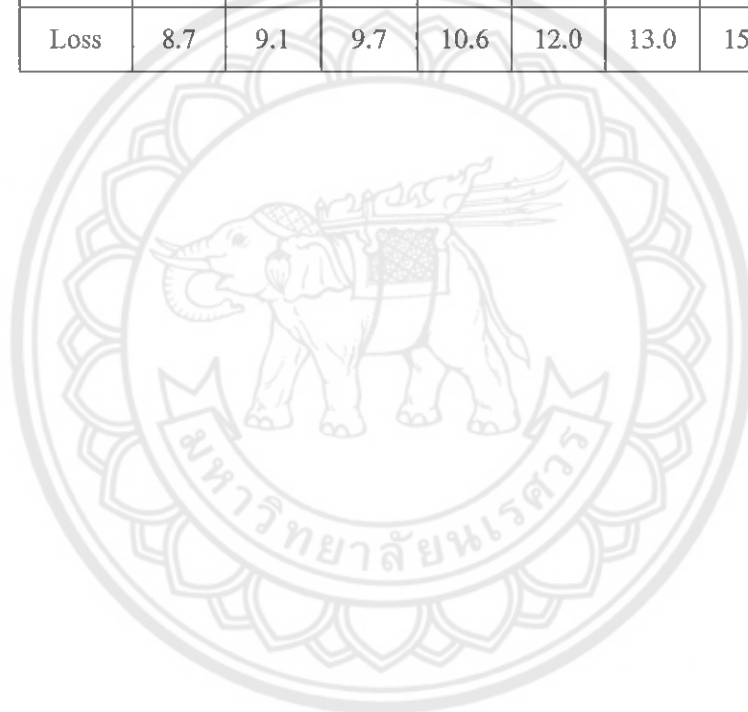


รูปที่ 2.25 วงจรการทดสอบ Autotransformer แบบ Step Down

หมายเหตุ I_2 ห้ามเกิน 1 A

ตารางที่ 2.4 การทดสอบ Autotransformer แบบ Step Down

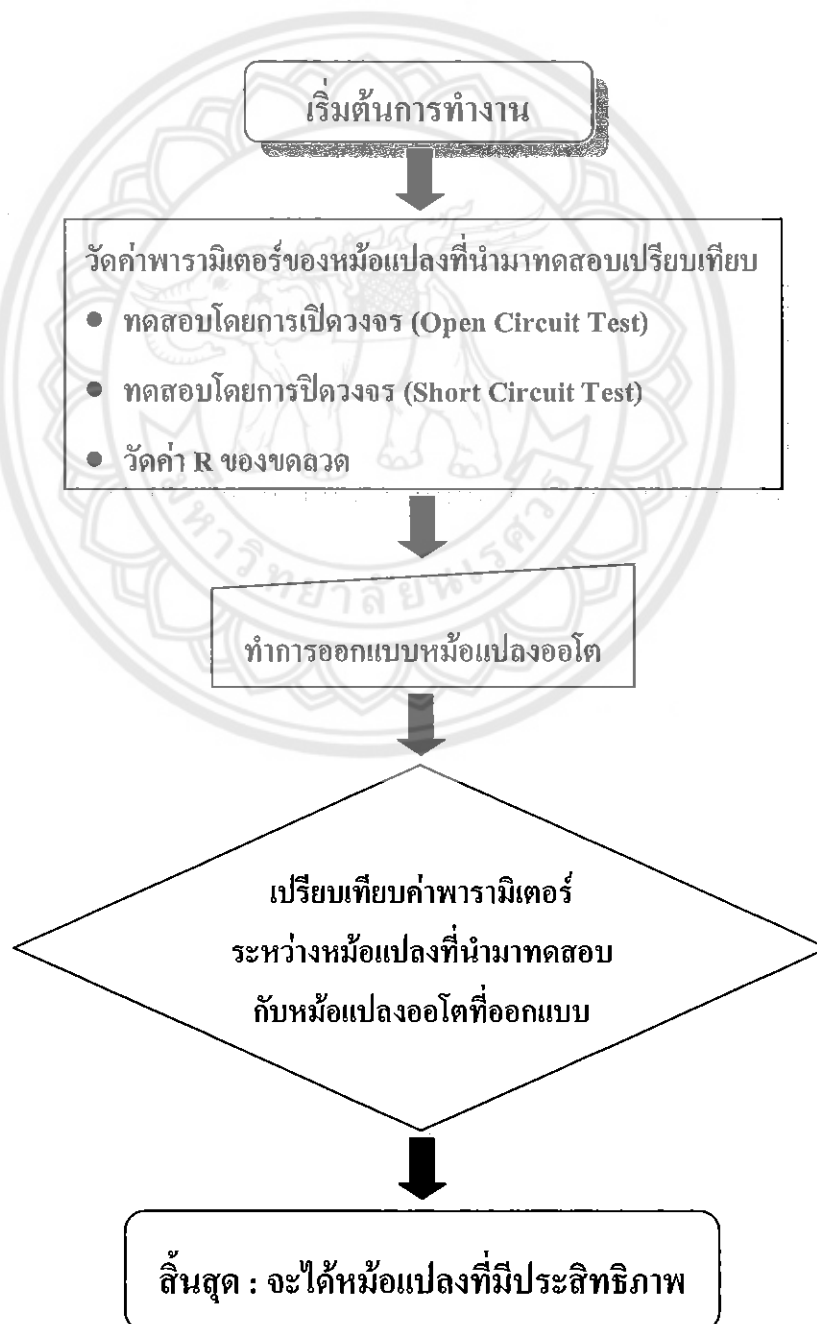
$V_1(V)$	220	220	220	220	220	220	220	220
$V_2(V)$	109.9	109.5	109.0	108.2	108.0	107.1	106.6	106.1
$I_1(A)$	0.087	0.210	0.347	0.498	0.635	0.777	0.916	1.028
$I_2(A)$	0.002	0.309	0.594	0.888	1.274	1.462	1.752	1.975
$P_1(W)$	8.7	42.9	74.3	105.8	139.2	167.7	202.0	225.7
$P_2(W)$	0	33.8	64.6	95.2	127.2	154.7	186.2	208.6
Loss	8.7	9.1	9.7	10.6	12.0	13.0	15.8	17.1



บทที่ 3

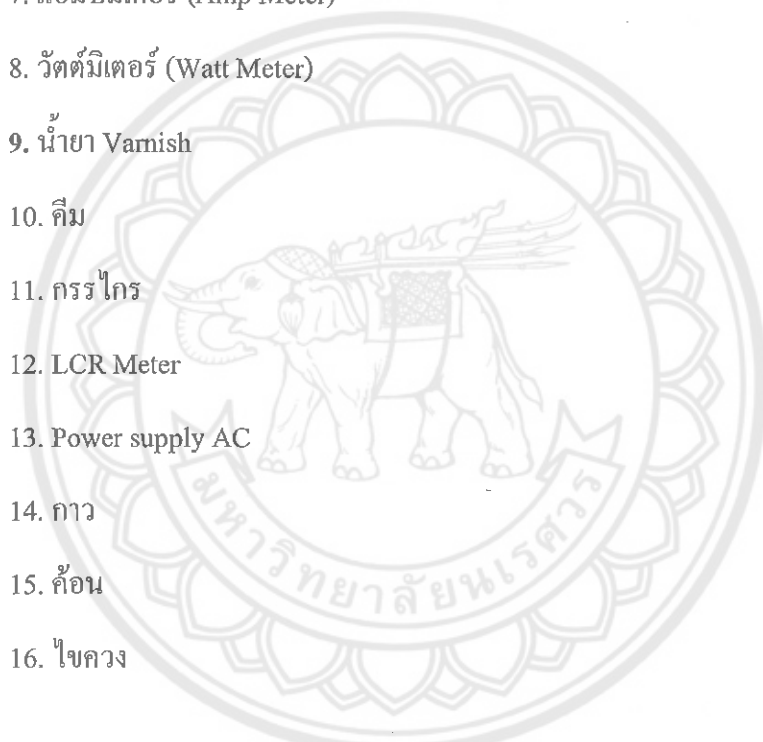
ขั้นตอนการดำเนินโครงการ

ในการออกแบบหม้อแปลงออโต 1 เฟส เป็นการออกแบบหม้อแปลงออโตเพื่อทำการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์และค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นรวมถึงประสิทธิภาพของหม้อแปลงออโตเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับหม้อแปลงที่นำมาทดสอบ ซึ่งมีวัสดุอุปกรณ์และขั้นตอนการดำเนินโครงการดังนี้



3.1 วัสดุและอุปกรณ์

1. หม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไป
2. ปลอกแกน (Bobbin)
3. ลวดทองแดง
4. แกนเหล็กแบบ EI
5. กระดาษสำหรับพันเป็นฉนวนฉนวน
6. โวลต์มิเตอร์ (Volt Meter)
7. แอมป์มิเตอร์ (Amp Meter)
8. วัตต์มิเตอร์ (Watt Meter)
9. น้ำมัน Varnish
10. คีม
11. กรรไกร
12. LCR Meter
13. Power supply AC
14. กาว
15. ค้อน
16. ไชควง



3.2 การทดสอบหม้อแปลง

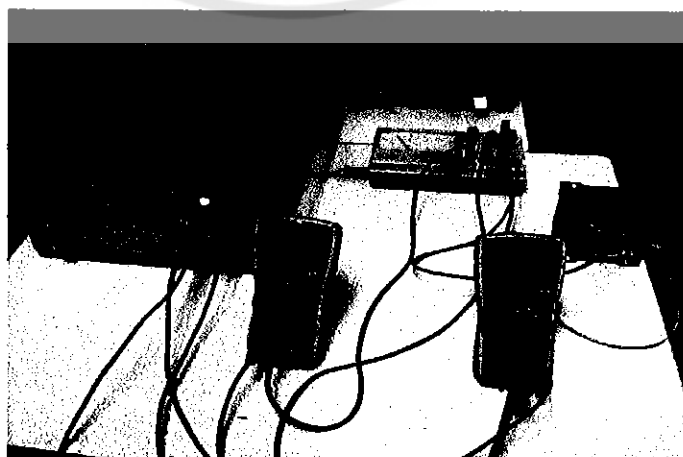
การทดสอบหม้อแปลงเพื่อหาค่าพารามิเตอร์และค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การทดสอบโดยการเปิดวงจร (Open Circuit Test) และการทดสอบโดยการลัดวงจร (Short Circuit Test)

3.2.1 การทดสอบโดยการเปิดวงจร (Open Circuit Test)

การทดสอบนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อหาค่าสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss) การทดสอบดังกล่าวจะกระทำการเปิดวงจรทางด้านทุติยภูมิแล้วเอาวัตต์มิเตอร์ โวลต์มิเตอร์ และแอมป์มิเตอร์ ต่อวัดค่าพารามิเตอร์ ตามรูปที่ 3.1



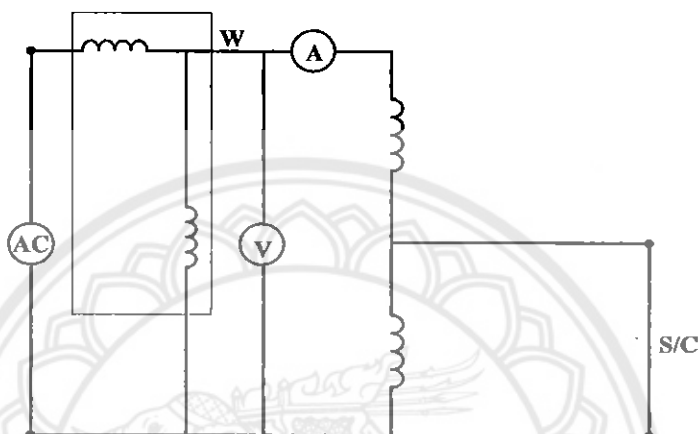
รูปที่ 3.1 วงจรการทดสอบในสถานะเปิดวงจร



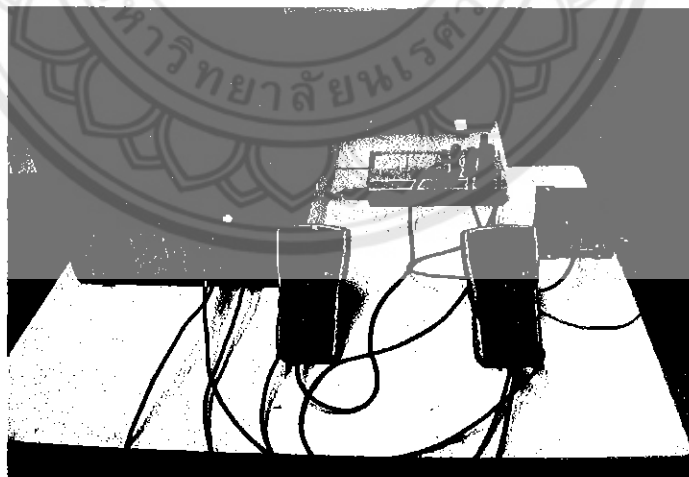
รูปที่ 3.2 รูปการทดสอบหม้อแปลงในสถานะเปิดวงจรในห้องปฏิบัติการ

3.2.2 การทดสอบโดยการลัดวงจร (Short Circuit Test)

การทดสอบนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อหาค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นขณะต่อโหลด (No Load Test) หรือหาค่าสูญเสียในขดลวดทองแดง (Copper Loss) การทดสอบดังกล่าวจะกระทำการต่อโหลดหรือลัดวงจรทางด้านทุติยภูมิแล้วเอาวัตต์มิเตอร์ โวลต์มิเตอร์ และแอมป์มิเตอร์ ต่อวัดค่าพารามิเตอร์ตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.3 วงจรการทดสอบในสภาวะลัดวงจร



รูปที่ 3.4 รูปการทดสอบหม้อแปลงในสภาวะเปิดวงจรในห้องปฏิบัติการ

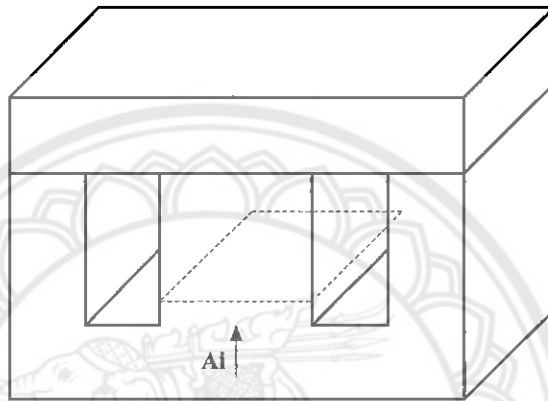
3.3 การออกแบบหม้อแปลงออโต

ในส่วนนี้จะเป็นการแสดงการออกแบบหม้อแปลงออโตขนาด 150 VA, 220/24 V

3.3.1 แสดงการคำนวณหม้อแปลงออโต

โดยใช้แกนเหล็กที่มีความหนา 0.55 mm.

ขั้นตอนที่ 1 หาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (Bobbin)



รูปที่ 3.5 วัดขนาดแกนเหล็ก (Bobbin)

ในการหาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก เพื่อให้ได้ความเหมาะสมกับพิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงหาได้โดย

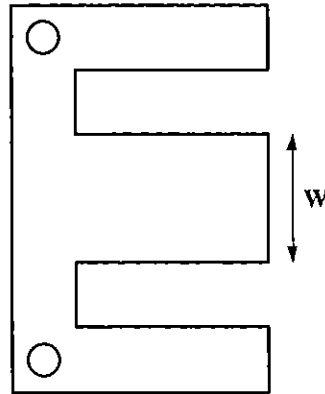
$$A_i = \frac{\sqrt{VA}}{5.58} \quad (\text{in}^2) \quad \text{หรือ} \quad A_i = 1.156\sqrt{VA} \quad (\text{cm}^2)$$

เมื่อ A_i คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

VA คือ พิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลง

$$\begin{aligned} A_i &= \frac{\sqrt{150}}{5.58} = 2.194 \quad \text{in}^2 \\ &= 2.194 \times 645.16 \quad \text{in}^2 \\ &= 1415.48 \quad \text{mm}^2 \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 2 หาขนาดของแกนเหล็ก โดยการหาขนาดความกว้างของขาแกนเหล็กตัว E



รูปที่ 3.6 วัดขนาดความกว้างของขาแกนเหล็กตัว E

$$A_f = WT \quad (\text{cm})$$

เมื่อ

A_f คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

W คือ ความกว้างของขากลางแกนเหล็กตัว E

T คือ ความหนาของแผ่นเหล็กที่อัดเข้าด้วยกัน

ซึ่งค่า T จะกำหนดให้มากกว่า W ประมาณ 1-1.5 เท่า เพื่อรักษาค่าทั้งสองไม่ให้แตกต่างกันมากจนเกินไป เพราะทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับที่พื้นลื่นแกนออกมา กำหนดให้ m เป็นจำนวนเท่าที่ค่า T มากกว่า W

$$T = mW \quad (\text{cm})$$

จะได้ $A_f = mW^2$

จาก $A_f = 1.156\sqrt{VA}$ จะได้ $mW^2 = 1.156\sqrt{VA} \quad (\text{cm})$

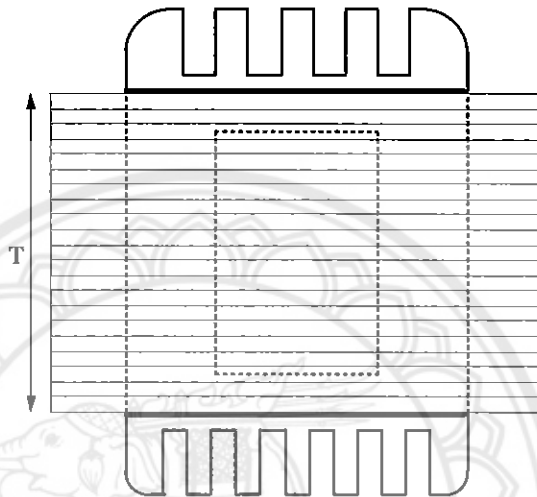
$$\diamond W = \sqrt{1.156 \times \sqrt{VA} \times \sqrt{m^{-1}}}$$

กำหนดให้ m มีค่าประมาณ 1.25

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } W &= 0.961\sqrt[4]{VA} \\ &= 0.961\sqrt[4]{150} \\ &= 3.36 \text{ cm} \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 3 หาความหนาของแผ่นเหล็กที่อัดเข้ากัน

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{A_i}{W} \\
 &= \frac{14.15}{3.36} \\
 &= 4.211 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

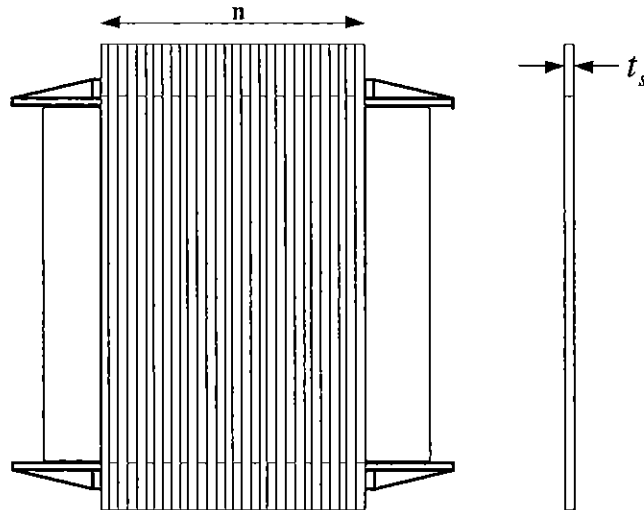


รูปที่ 3.7 หาความหนาของแผ่นเหล็ก

ขั้นตอนที่ 4 หาจำนวนแผ่นของแกนเหล็ก

$$n = \frac{T}{t_s}$$

- เมื่อ
- n คือ จำนวนของแกนเหล็ก
 - T คือ ความหนาของแผ่นเหล็กที่อัดเข้าด้วยกัน
 - t_s คือ ความหนาของแผ่นเหล็กแต่ละแผ่น (0.055 cm.)



รูปที่ 3.8 ความหนาของแผ่นเหล็กที่อัดเข้าด้วยกัน
และความหนาของแผ่นเหล็กแต่ละแผ่น

$$\begin{aligned}
 n &= \frac{4.211}{0.055} \\
 &= 76.56 \\
 &\approx 77 \text{ แผ่น}
 \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 5 หาจำนวนรอบของขดลวดตัวนำ

จากสมการพื้นฐานของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

$$E = 4.44 f N B_m A_i$$

ด้านแรงดันสูงของหม้อแปลง

$$N_H = \frac{E_H}{4.44 f B_m A_i}$$

เมื่อ E_H คือ แรงดันไฟฟ้าด้านสูง

f คือ ความถี่ไฟฟ้า

B_m คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็กที่ยังไม่อิ่มตัว (0.9329T)

N_H คือ จำนวนรอบด้านแรงดันสูง

$$\begin{aligned}
 N_H &= \frac{220}{4.44 \times 50 \times 0.9329 \times 1415.48 \times 10^{-6}} \\
 &= 757.77 \\
 &\approx 758 \text{ รอบ}
 \end{aligned}$$

ด้านแรงต่ำของหม้อแปลง

$$N_L = \frac{E_L}{4.44 f B_m A_i}$$

เมื่อ E_L คือ แรงดันไฟฟ้าด้านต่ำ

N_L คือ จำนวนรอบด้านแรงดันต่ำ

$$\begin{aligned} N_L &= \frac{24}{4.44 \times 50 \times 0.9239 \times 1415.48 \times 10^{-6}} \\ &= 82.66 \\ &\approx 83 \text{ รอบ} \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 6 หาขนาดของขดลวดตัวนำ

หากระแสที่ไหลผ่านขดลวดตัวนำจากสมการ

$$I = \frac{VA}{E}$$

หาขนาดพื้นที่หน้าตัดของขดลวดตัวนำ โดยเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้ากับพื้นที่หน้าตัด

เป็นเซอร์กัลลามิต โดยเลือกค่า 450 เซอร์กัลลามิต /แอมแปร์

$$\begin{aligned} I_H &= \frac{150}{220} \\ &= 0.681 \text{ A} \end{aligned}$$

เมื่อเลือกใช้ค่า 450 เซอร์กัลลามิต /แอมแปร์ จะได้พื้นที่หน้าตัดขดลวด

$$\begin{aligned} &= 0.681 \times 450 \\ &= 306.45 \text{ เซอร์กัลลามิต} \end{aligned}$$

ซึ่งเป็นขดลวดเบอร์ 26 ตามมาตรฐาน SWG

$$I_L = \frac{150}{24} = 6.25 \text{ A}$$

แต่กระแสที่ไหลในขดลวดด้านแรงดันต่ำ I_L คือ $I_L - I_H = 6.25 - 0.681 = 5.569 \text{ A}$

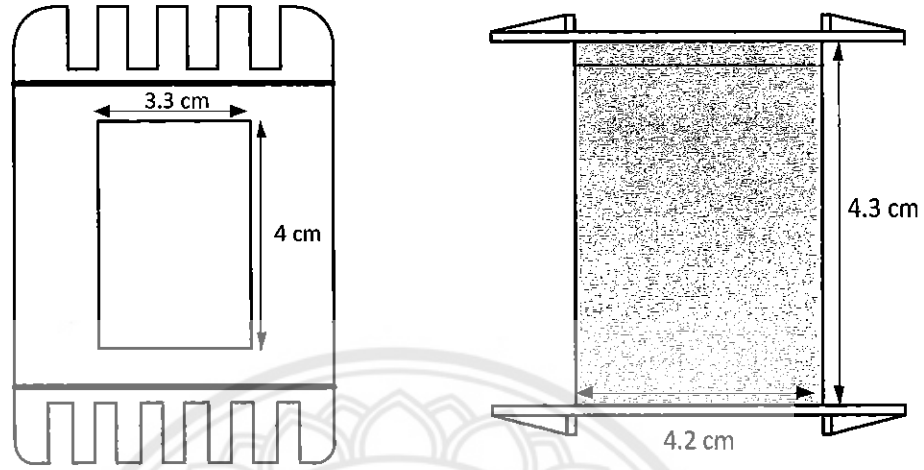
เมื่อเลือกใช้ค่า 450 เซอร์กัลลามิต /แอมแปร์ จะได้พื้นที่หน้าตัดขดลวด

$$\begin{aligned} &= 5.569 \times 450 \\ &= 2506.05 \text{ เซอร์กัลลามิต} \end{aligned}$$

ซึ่งเป็นขดลวดเบอร์ 17 ตามมาตรฐาน SWG

3.3.2 แสดงขั้นตอนในการพันหม้อแปลงอโต

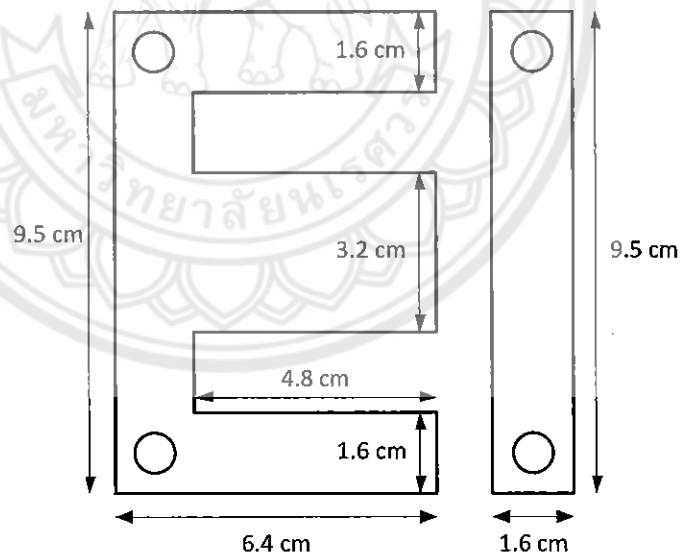
ขั้นตอนที่ 1 วัดขนาดแกนเหล็ก (Bobbin) และขนาดแผ่นเหล็ก



ก. แกนเหล็ก Bobbin ด้านบน

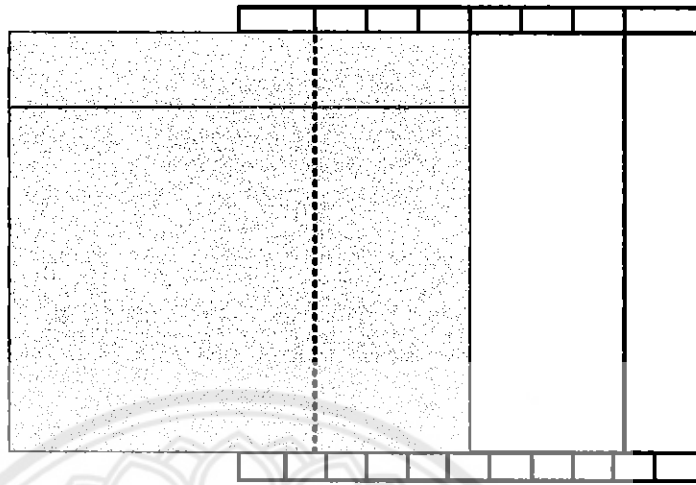
ข. แกนเหล็ก Bobbin ด้านข้าง

รูปที่ 3.9 ขนาดแกนเหล็ก (Bobbin)



รูปที่ 3.10 แผ่นเหล็กรูป EI

ขั้นตอนที่ 2 ใช้กระดาษฉนวนพันแกน Bobbin



รูปที่ 3.11 พันกระดาษฉนวนรอบแกนเหล็ก (Bobbin)

ขั้นตอนที่ 3 พันขลวดด้านแรงต่ำ

จากที่ได้คำนวณขลวด ใช้ขลวดเบอร์ 17 ตามมาตรฐาน SWG จำนวน 83 รอบ



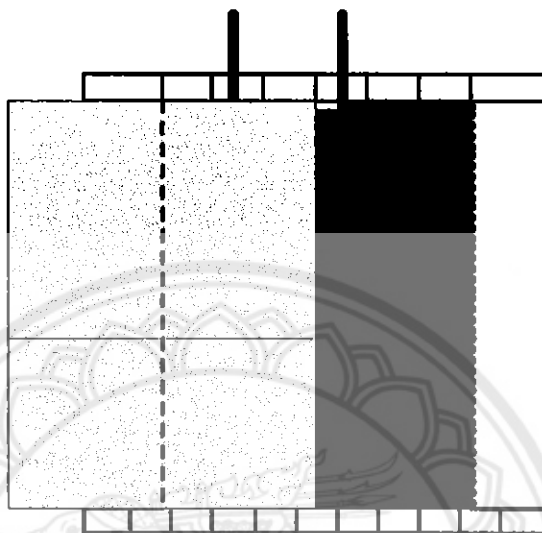
ก. ขณะเริ่มพันขลวดด้านแรงต่ำ

ข. พันขลวดด้านแรงต่ำจนครบจำนวนรอบ

รูปที่ 3.12 การพันขลวดด้านต่ำ

ขั้นตอนที่ 4 ใช้ฉนวนพันทับ

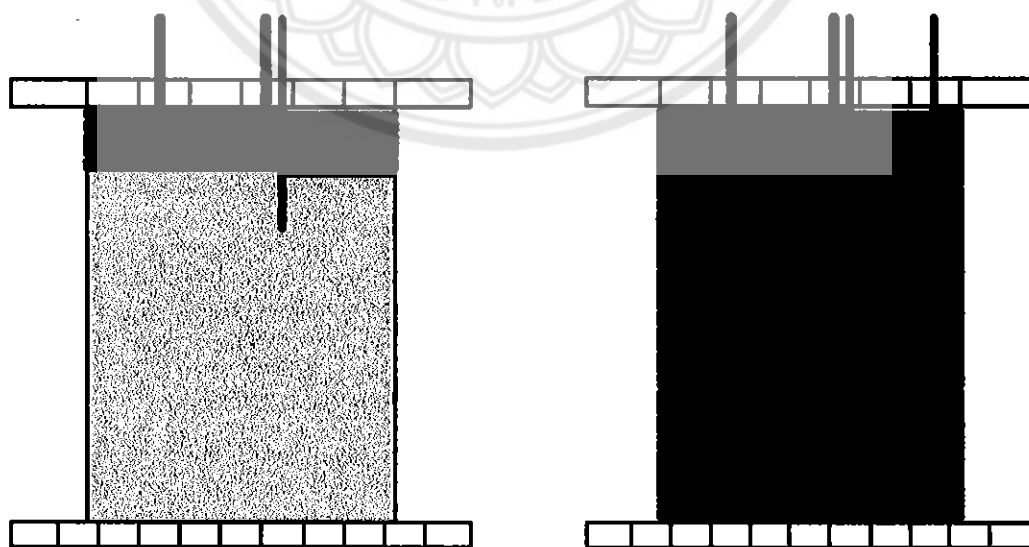
ก่อนที่จะพันขดลวดด้านแรงดันสูงใช้ฉนวนพันทับก่อน เพื่อป้องกันการลัดวงจรของขดลวดที่เกิดจากการหักหรืองอของขดลวด



รูปที่ 3.13 พันกระดาษฉนวนรอบขดลวดด้านแรงต่ำ

ขั้นตอนที่ 5 พันขดลวดด้านแรงดันสูง

จากที่ได้คำนวณขนาดขดลวด ใช้ขดลวดเบอร์ 26 ตามมาตรฐาน SWG จำนวน 758 รอบ

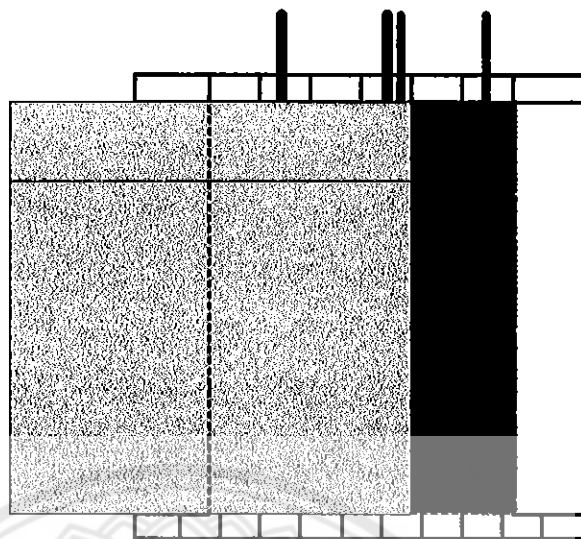


ก. ขณะเริ่มพันขดลวดด้านแรงสูง

ข. พันขดลวดด้านแรงสูงจนครบจำนวนรอบ

รูปที่ 3.14 การพันขดลวดด้านสูง

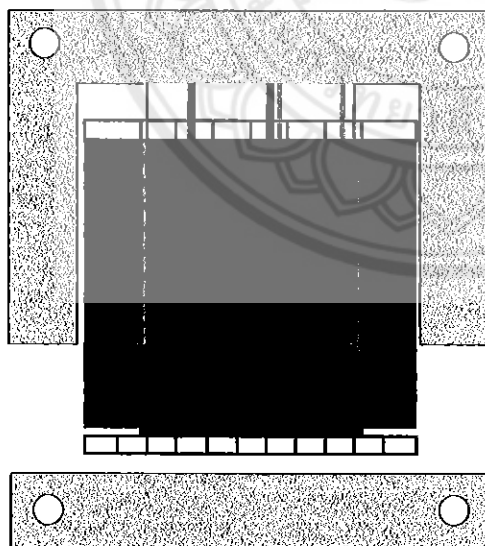
ขั้นตอนที่ 6 ใช้ฉนวนพันทับรอบสุดท้าย



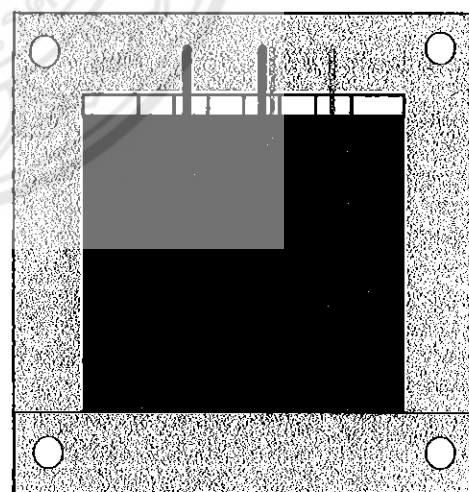
รูปที่ 3.15 พันกระดาษฉนวนรอบชุดลวดค้ำแรงสูง

ขั้นตอนที่ 7 นำแผ่นเหล็กมาใส่

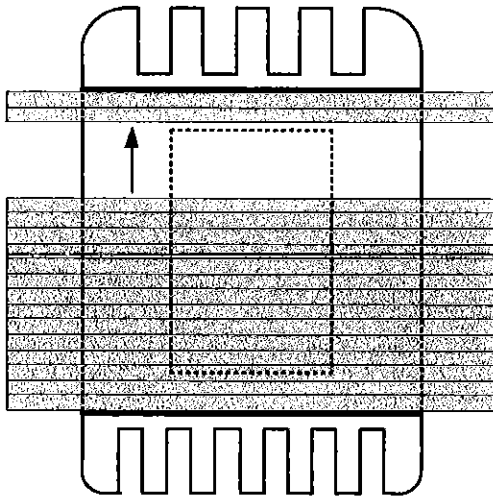
นำแผ่นเหล็กมาใส่ตามจำนวนที่คำนวณไว้



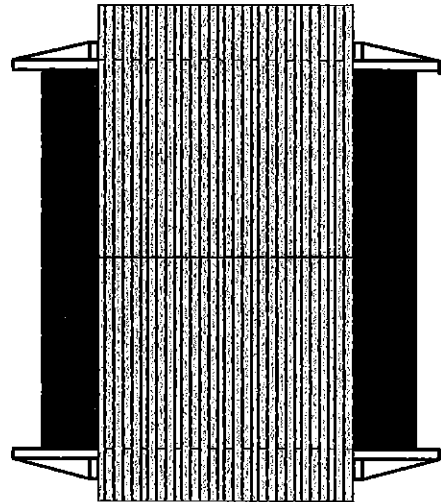
ก. ขณะเริ่มสวมแผ่นเหล็กด้านหน้า



ข. สวมแผ่นเหล็กด้านหน้า

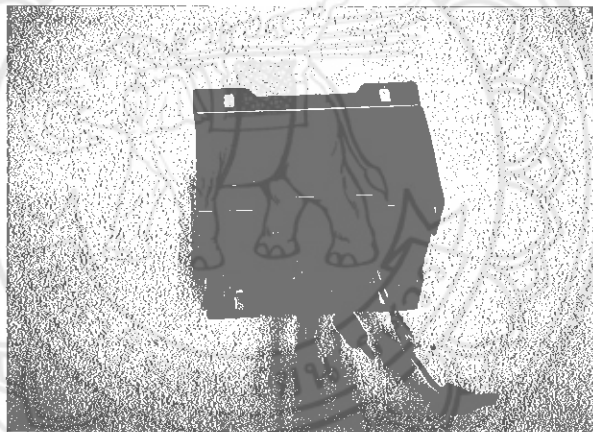


ค. สวมแผ่นเหล็กด้านบน



ง. สวมแผ่นเหล็กด้านข้าง

รูปที่ 3.16 การสวมแผ่นเหล็ก



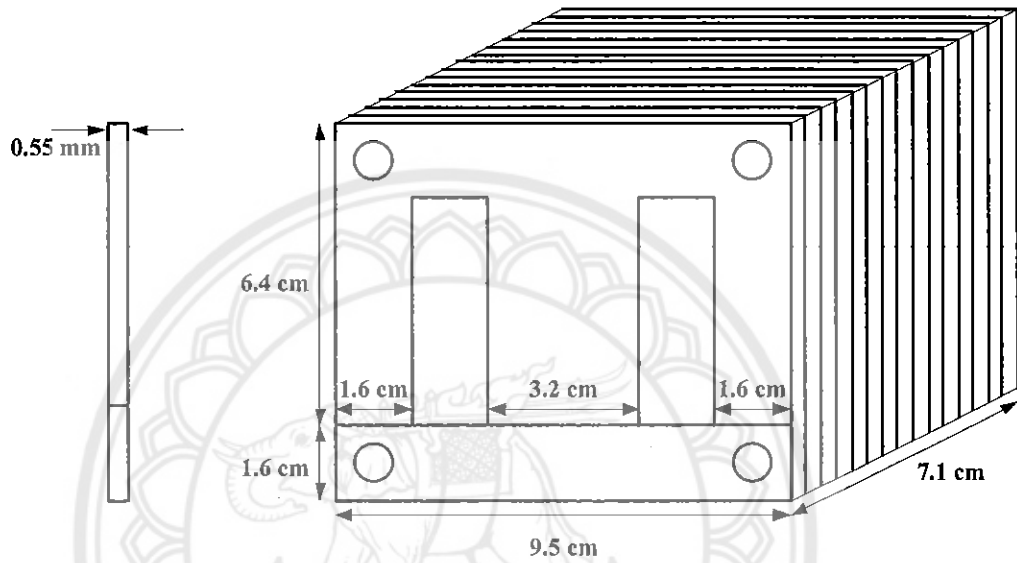
รูปที่ 3.17 หม้อแปลงที่ทำสำเร็จ

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

4.1 ผลการทดสอบการใช้แกนเหล็ก 100 เปอร์เซ็นต์

4.1.1 หม้อแปลง ก.



รูปที่ 4.1 ขนาดของแกนเหล็กของหม้อแปลง ก.

$N_p = 654$ $N_s = 86$ จำนวนแผ่นเหล็ก = 142

เบอร์ขดลวด Primary = 23 Secondary = 18

ตารางที่ 4.1 ตารางความต้านทานหม้อแปลง ก.

ความต้านทาน (Ω)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ
	12.4	0.6	12.5	0.6	12.5	0.6

การทดสอบโดยการเปิดวงจร (Open Circuit Test)

ตารางที่ 4.2 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบเปิดวงจรหม้อแปลง ก.

แรงดัน (V)	V_{oc} (V)									
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ
220	220.2	24.18	220.3	24.17	220.1	24.17	220.4	24.19	220.2	24.18
แรงดัน (V)	I_{oc} (A)									
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
220	0.038	0.038	0.038	0.037	0.038	0.037	0.038	0.038	0.037	0.037
แรงดัน (V)	P_c (W)									
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
220	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6

การทดสอบโดยการลัดวงจร (Short Circuit Test)

ตารางที่ 4.3 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบลัดวงจรหม้อแปลง ก.

กระแส (A)	V_{sc} (V)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
0.7	34.22	34.23	34.23	34.25	34.25
กระแส (A)	I_{sc} (V)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
0.7	0.685	0.685	0.685	0.685	0.686
กระแส (A)	P_{cu} (W)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
0.7	23	23	23	23	23

ทดสอบ Open Circuit ($P_{OC} = P_{CORE} = 6 \text{ W}$, $V_{OC} = 220.24 \text{ V}$, $I_{OC} = 0.0376 \text{ A}$)

$$\theta_{OC} = \cos^{-1}\left(\frac{P_{OC}}{I_{OC}V_{OC}}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{6}{0.0376 \times 220.24}\right) = 43.568$$

$$I_c = I_{OC} \cos \theta_{OC} = 0.0376 \cos(43.568) = 0.0272 \text{ A}$$

$$I_m = I_{OC} \sin \theta_{OC} = 0.0376 \sin(43.568) = 0.0259 \text{ A}$$

$$R_c = \frac{V_{OC}}{I_c} = \frac{220.24}{0.0272} = 8097.058 \Omega$$

$$X_m = \frac{V_{OC}}{I_m} = \frac{220.24}{0.0259} = 8503.474 \Omega$$

ทดสอบ Short Circuit ($P_{SC} = P_{CU} = 23 \text{ W}$, $V_{SC} = 34.236 \text{ V}$, $I_{SC} = 0.6854 \text{ A}$)

$$R_{01} = \frac{P_{SC}}{I_{SC}^2} = \frac{23}{0.6854^2} = 33.557 \Omega$$

$$Z_{01} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} = \frac{34.236}{0.6854} = 72.877 \Omega$$

$$X_{01} = \sqrt{Z_{01}^2 - R_{01}^2} = \sqrt{72.877^2 - 33.557^2} = 64.691 \Omega$$

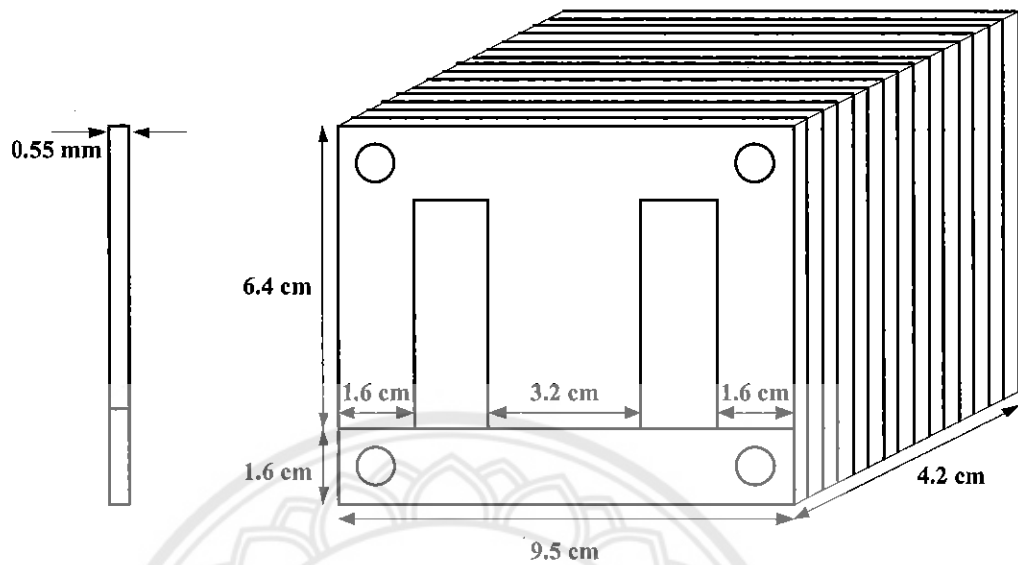
ประสิทธิภาพของหม้อแปลง ($P_{IN} = 150 \text{ VA}$, $P_{CORE} = 6 \text{ W}$, $P_{CU} = 23 \text{ W}$)

$$\eta = \frac{P_{OUTPUT}}{P_{IN}} = \frac{P_{IN} - (P_{CORE} + P_{CU})}{P_{IN}} = \frac{150 - (23 + 6)}{150} = 80.66\%$$

ตารางที่ 4.4 ตารางค่าพารามิเตอร์หม้อแปลง ก.

$R_H (\Omega)$	12.46	$P_{CU} (W)$	23
$R_L (\Omega)$	0.6	$R_C (\Omega)$	8097.05
$V_{OC} (V)$	220.24	$X_m (\Omega)$	8503.47
$I_{OC} (A)$	0.0376	$R_{01} (\Omega)$	33.557
$P_C (W)$	6	$X_{01} (\Omega)$	64.691
$V_{SC} (V)$	34.236	$Z_{01} (\Omega)$	72.88
$I_{SC} (A)$	0.7	$\eta (\%)$	80.66

4.1.2 หม้อแปลง ข.



รูปที่ 4.2 ขนาดของแกนเหล็กของหม้อแปลง ข.

 $N_p = 711$ รอบ $N_s = 88$ รอบ

จำนวนแผ่นเหล็ก = 81 แผ่น

เบอร์ขดลวด Primary = 16

Secondary = 27

ตารางที่ 4.5 ตารางความต้านทาน

ความต้านทาน (Ω)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ
	18.6	0.2	18.7	0.2	18.7	0.3

การทดสอบโดยการเปิดวงจร (Open Circuit Test)

ตารางที่ 4.6 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบเปิดวงจร

แรงดัน (V)	V_{oc} (V)									
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ
220	220.2	24.16	220.2	24.17	220.0	24.17	220.0	24.15	220.2	24.16
แรงดัน (V)	I_{oc} (A)									
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
220	0.051	0.051	0.051	0.050	0.052	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050
แรงดัน (V)	P_c (W)									
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
220	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

การทดสอบโดยการลัดวงจร (Short Circuit Test)

ตารางที่ 4.7 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบลัดวงจร

กระแส (A)	V_{sc} (V)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
0.7	22.41	22.41	22.42	22.41	22.42
กระแส (A)	I_{sc} (A)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
0.7	0.68	0.685	0.685	0.685	0.684
กระแส (A)	P_{cu} (W)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
0.7	15	15	15	15	15

ทดสอบ Open Circuit ($P_{OC} = P_{CORE} = 5 \text{ W}$, $V_{OC} = 220.16 \text{ V}$, $I_{OC} = 0.0508 \text{ A}$)

$$\theta_{OC} = \cos^{-1}\left(\frac{P_{OC}}{I_{OC}V_{OC}}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{5}{0.0508 \times 220.16}\right) = 63.445$$

$$I_c = I_{OC} \cos \theta_{OC} = 0.0508 \cos(63.445) = 0.0227 \text{ A}$$

$$I_m = I_{OC} \sin \theta_{OC} = 0.0508 \sin(63.445) = 0.0454 \text{ A}$$

$$R_c = \frac{V_{OC}}{I_c} = \frac{220.16}{0.0227} = 9698.682 \Omega$$

$$X_m = \frac{V_{OC}}{I_m} = \frac{220.16}{0.0454} = 4849.343 \Omega$$

ทดสอบ Short Circuit ($P_{SC} = P_{CU} = 15 \text{ W}$, $V_{SC} = 22.414 \text{ V}$, $I_{SC} = 0.6838 \text{ A}$)

$$R_{01} = \frac{P_{SC}}{I_{SC}^2} = \frac{15}{0.6838^2} = 21.936 \Omega$$

$$Z_{01} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} = \frac{22.414}{0.6838} = 32.778 \Omega$$

$$X_{01} = \sqrt{Z_{01}^2 - R_{01}^2} = \sqrt{32.778^2 - 21.936^2} = 24.356 \Omega$$

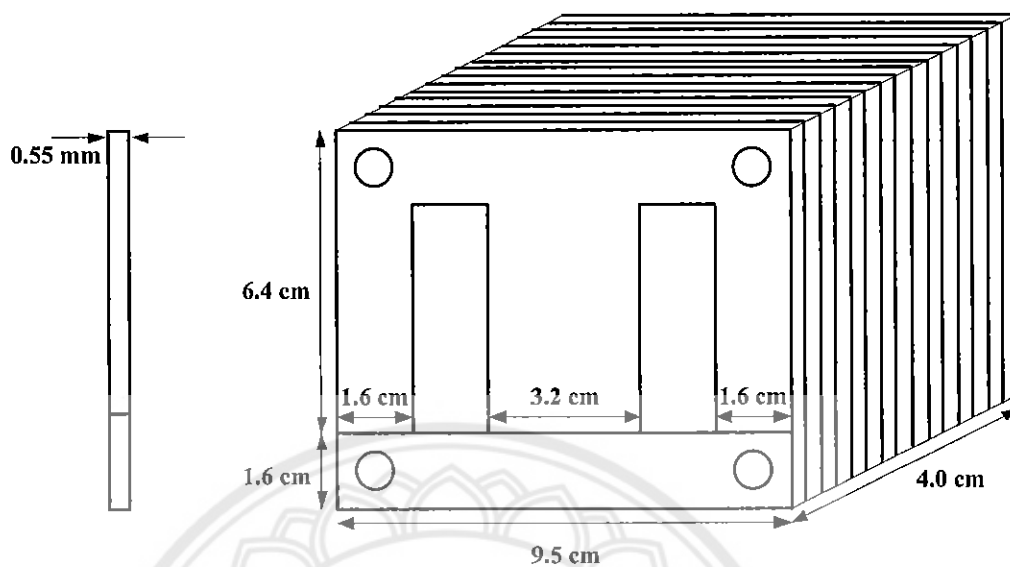
ประสิทธิภาพของหม้อแปลง ($P_{IN} = 150 \text{ VA}$, $P_{CORE} = 5 \text{ W}$, $P_{CU} = 15 \text{ W}$)

$$\eta = \frac{P_{OUTPUT}}{P_{IN}} = \frac{P_{IN} - (P_{CORE} + P_{CU})}{P_{IN}} = \frac{150 - (5 + 15)}{150} = 86.66\%$$

ตารางที่ 4.8 ตารางค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลง ข.

$R_H (\Omega)$	18.66	$P_{CU} (W)$	15
$R_L (\Omega)$	0.23	$R_c (\Omega)$	9698.68
$V_{OC} (V)$	220.16	$X_m (\Omega)$	4849.34
$I_{OC} (A)$	0.0508	$R_{01} (\Omega)$	21.936
$P_c (W)$	5	$X_{01} (\Omega)$	24.356
$V_{SC} (V)$	22.414	$Z_{01} (\Omega)$	32.778
$I_{SC} (A)$	0.6838	$\eta (\%)$	86.66

4.1.3 หม้อแปลง ค.



รูปที่ 4.3 ขนาดของแกนเหล็กของหม้อแปลง ค.

 $N_p = 758$ รอบ $N_s = 83$ รอบ

จำนวนแผ่นเหล็ก = 79 แผ่น

เบอร์ขดลวด Primary = 16

Secondary = 27

ตารางที่ 4.9 ตารางความต้านทาน

ความต้านทาน (Ω)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ
	21.2	0.2	21.2	0.2	21.1	0.3

การทดสอบโดยการเปิดวงจร (Open Circuit Test)

ตารางที่ 4.10 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบเปิดวงจร

แรงดัน (V)	V_{oc} (V)									
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ
220	220.2	20.27	220.2	20.27	220.1	20.28	220.2	20.27	220.1	20.28
แรงดัน (V)	I_{oc} (A)									
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
220	0.042	0.042	0.042	0.042	0.043	0.043	0.042	0.042	0.043	0.043
แรงดัน (V)	P_c (W)									
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
220	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

การทดสอบโดยการลัดวงจร (Short Circuit Test)

ตารางที่ 4.11 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบลัดวงจร

กระแส (A)	V_{sc} (V)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
0.7	24.56	24.56	24.58	24.56	24.57
กระแส (A)	I_{sc} (A)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
0.7	0.680	0.681	0.681	0.680	0.681
กระแส (A)	P_{cu} (W)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
0.7	17	17	17	17	17

ทดสอบ Open Circuit ($P_{OC} = P_{CORE} = 5 \text{ W}$, $V_{OC} = 220.16 \text{ V}$, $I_{OC} = 0.0424 \text{ A}$)

$$\theta_{OC} = \cos^{-1}\left(\frac{P_{OC}}{I_{OC}V_{OC}}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{5}{0.0424 \times 220.16}\right) = 57.613$$

$$I_c = I_{OC} \cos \theta_{OC} = 0.0424 \cos(57.613) = 0.0227 \text{ A}$$

$$I_m = I_{OC} \sin \theta_{OC} = 0.0424 \sin(57.613) = 0.0358 \text{ A}$$

$$R_c = \frac{V_{OC}}{I_c} = \frac{220.16}{0.0227} = 9698.674 \Omega$$

$$X_m = \frac{V_{OC}}{I_m} = \frac{220.16}{0.0358} = 6149.721 \Omega$$

ทดสอบ Short Circuit ($P_{SC} = P_{CU} = 17 \text{ W}$, $V_{SC} = 24.566 \text{ V}$, $I_{SC} = 0.6806 \text{ A}$)

$$R_{01} = \frac{P_{SC}}{I_{SC}^2} = \frac{17}{0.6806^2} = 24.978 \Omega$$

$$Z_{01} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} = \frac{24.566}{0.6806} = 36.094 \Omega$$

$$X_{01} = \sqrt{Z_{01}^2 - R_{01}^2} = \sqrt{36.094^2 - 24.978^2} = 26.055 \Omega$$

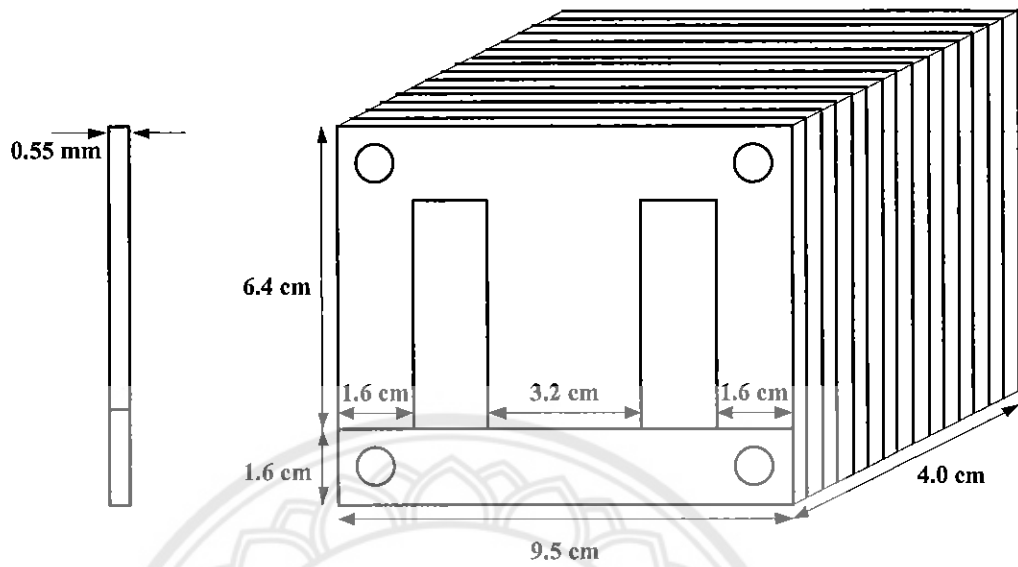
ประสิทธิภาพของหม้อแปลง ($P_{IN} = 150 \text{ VA}$, $P_{CORE} = 5 \text{ W}$, $P_{CU} = 17 \text{ W}$)

$$\eta = \frac{P_{OUTPUT}}{P_{IN}} = \frac{P_{IN} - (P_{CORE} + P_{CU})}{P_{IN}} = \frac{150 - (5 + 17)}{150} = 85.33\%$$

ตารางที่ 4.12 ตารางค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลง ค.

$R_H (\Omega)$	21.16	$P_{CU} (\text{W})$	17
$R_L (\Omega)$	0.23	$R_C (\Omega)$	9698.67
$V_{OC} (\text{V})$	220.16	$X_m (\Omega)$	6149.72
$I_{OC} (\text{A})$	0.0424	$R_{01} (\Omega)$	24.978
$P_C (\text{W})$	5	$X_{01} (\Omega)$	26.055
$V_{SC} (\text{V})$	24.566	$Z_{01} (\Omega)$	36.094
$I_{SC} (\text{A})$	0.6806	$\eta (\%)$	85.33

4.1.4 หม้อแปลง ง.



รูปที่ 4.4 ขนาดของแกนเหล็กของหม้อแปลง ง.

 $N_p = 711$ รอบ $N_s = 88$ รอบ

จำนวนแผ่นเหล็ก = 79 แผ่น

เบอร์ขดลวด Primary = 16

Secondary = 27

ตารางที่ 4.13 ตารางความต้านทาน

ความต้านทาน (Ω)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ
	20.1	0.3	20.2	0.2	20.1	0.3

การทดสอบโดยการเปิดวงจร (Open Circuit Test)

ตารางที่ 4.14 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบเปิดวงจร

แรงดัน (V)	V_{oc} (V)									
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ
220	220.3	23.82	220.3	23.82	220.2	23.82	220.3	23.83	220.1	23.83
แรงดัน (V)	I_{oc} (A)									
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
220	0.054	0.054	0.054	0.054	0.056	0.056	0.056	0.056	0.054	0.054
แรงดัน (V)	P_c (W)									
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
220	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5

การทดสอบโดยการลัดวงจร (Short Circuit Test)

ตารางที่ 4.15 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบลัดวงจร

กระแส (A)	V_{sc} (V)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
0.7	21.31	21.31	21.34	21.31	21.34
กระแส (A)	I_{sc} (A)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
0.7	0.684	0.684	0.685	0.685	0.684
กระแส (A)	P_{cu} (W)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
0.7	15	15	15	15	15

ทดสอบ Open Circuit ($P_{OC} = P_{CORE} = 5.5 \text{ W}$, $V_{OC} = 220.24 \text{ V}$, $I_{OC} = 0.0548 \text{ A}$)

$$\theta_{OC} = \cos^{-1}\left(\frac{P_{OC}}{I_{OC}V_{OC}}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{5.5}{0.0548 \times 220.24}\right) = 62.889$$

$$I_c = I_{OC} \cos \theta_{OC} = 0.0548 \cos(62.889) = 0.0249 \text{ A}$$

$$I_m = I_{OC} \sin \theta_{OC} = 0.0548 \sin(62.889) = 0.0488 \text{ A}$$

$$R_c = \frac{V_{OC}}{I_c} = \frac{220.24}{0.0249} = 8844.985 \Omega$$

$$X_m = \frac{V_{OC}}{I_m} = \frac{220.24}{0.0488} = 4513.126 \Omega$$

ทดสอบ Short Circuit ($P_{SC} = P_{CU} = 15 \text{ W}$, $V_{SC} = 21.322 \text{ V}$, $I_{SC} = 0.6844 \text{ A}$)

$$R_{01} = \frac{P_{SC}}{I_{SC}^2} = \frac{15}{0.6844^2} = 21.917 \Omega$$

$$Z_{01} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} = \frac{21.322}{0.6844} = 45.520 \Omega$$

$$X_{01} = \sqrt{Z_{01}^2 - R_{01}^2} = \sqrt{45.520^2 - 21.917^2} = 39.896 \Omega$$

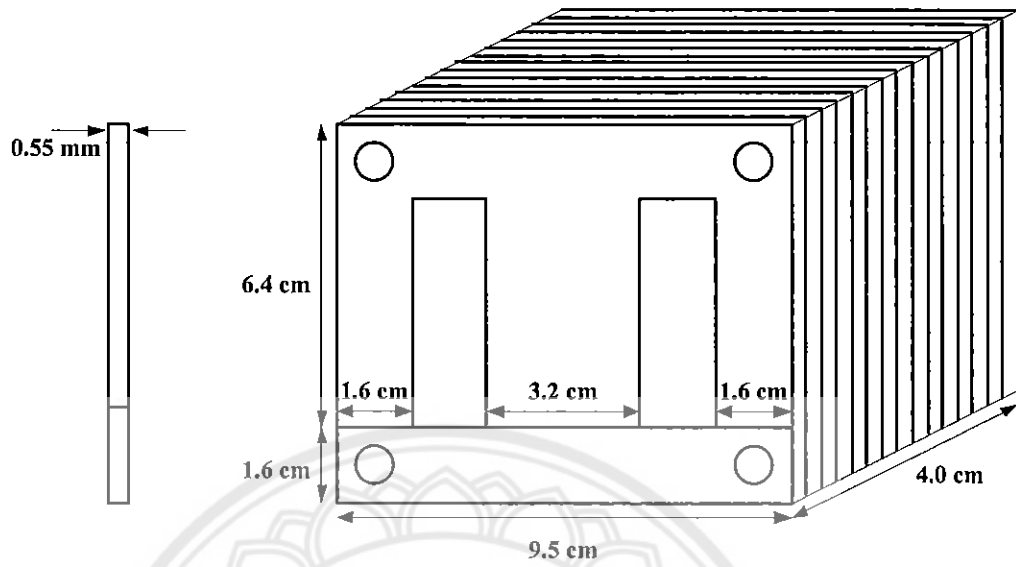
ประสิทธิภาพของหม้อแปลง ($P_{IN} = 150 \text{ VA}$, $P_{CORE} = 5.5 \text{ W}$, $P_{CU} = 15 \text{ W}$)

$$\eta = \frac{P_{OUTPUT}}{P_{IN}} = \frac{P_{IN} - (P_{CORE} + P_{CU})}{P_{IN}} = \frac{150 - (5.5 + 15)}{150} = 86.33\%$$

ตารางที่ 4.16 ตารางค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลง ง.

$R_H (\Omega)$	20.13	$P_{CU} (W)$	15
$R_L (\Omega)$	0.26	$R_C (\Omega)$	8844.98
$V_{OC} (V)$	220.24	$X_m (\Omega)$	4513.12
$I_{OC} (A)$	0.0548	$R_{01} (\Omega)$	21.917
$P_C (W)$	5.5	$X_{01} (\Omega)$	39.896
$V_{SC} (V)$	21.322	$Z_{01} (\Omega)$	45.520
$I_{SC} (A)$	0.6844	$\eta (\%)$	86.33

4.1.5 หม้อแปลง จ.



รูปที่ 4.5 ขนาดของแกนเหล็กของหม้อแปลง จ.

 $N_p = 753$ รอบ $N_s = 83$ รอบ

จำนวนแผ่นเหล็ก = 79 แผ่น

เบอร์ขดลวด Primary = 17

Secondary = 26

ตารางที่ 4.17 ตารางความต้านทาน

ความต้านทาน (Ω)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ
	17.2	0.3	17.2	0.2	17.3	0.3

การทดสอบโดยการเปิดวงจร (Open Circuit Test)

ตารางที่ 4.18 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบเปิดวงจร

แรงดัน (V)	V_{oc} (V)									
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ
220	220.4	20.76	220.2	20.76	220.2	20.74	220.3	20.76	220.2	20.74
แรงดัน (V)	I_{oc} (A)									
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
220	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.037	0.037	0.037	0.037	0.037
แรงดัน (V)	P_c (W)									
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
220	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

การทดสอบโดยการลัดวงจร (Short Circuit Test)

ตารางที่ 4.19 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบลัดวงจร

กระแส (A)	V_{sc} (V)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
0.7	23.31	23.34	23.36	23.36	23.37
กระแส (A)	I_{sc} (A)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
0.7	0.686	0.683	0.685	0.685	0.684
กระแส (A)	P_{cu} (W)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
0.7	18	18	18	18	18

ทดสอบ Open Circuit ($P_{OC} = P_{CORE} = 5 \text{ W}$, $V_{OC} = 220.26 \text{ V}$, $I_{OC} = 0.0364 \text{ A}$)

$$\theta_{OC} = \cos^{-1}\left(\frac{P_{OC}}{I_{OC}V_{OC}}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{5}{0.0364 \times 220.26}\right) = 51.417$$

$$I_c = I_{OC} \cos \theta_{OC} = 0.0364 \cos(51.417) = 0.0227 \text{ A}$$

$$I_m = I_{OC} \sin \theta_{OC} = 0.0364 \sin(51.417) = 0.0284 \text{ A}$$

$$R_c = \frac{V_{OC}}{I_c} = \frac{220.26}{0.0227} = 9703.083 \Omega$$

$$X_m = \frac{V_{OC}}{I_m} = \frac{220.26}{0.0284} = 7755.633 \Omega$$

ทดสอบ Short Circuit ($P_{SC} = P_{CU} = 18 \text{ W}$, $V_{SC} = 23.348 \text{ V}$, $I_{SC} = 0.6846 \text{ A}$)

$$R_{01} = \frac{P_{SC}}{I_{SC}^2} = \frac{18}{0.6846^2} = 26.292 \Omega$$

$$Z_{01} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} = \frac{23.348}{0.6846} = 49.817 \Omega$$

$$X_{01} = \sqrt{Z_{01}^2 - R_{01}^2} = \sqrt{49.817^2 - 26.292^2} = 42.314 \Omega$$

ประสิทธิภาพของหม้อแปลง ($P_{IN} = 150 \text{ VA}$, $P_{CORE} = 5 \text{ W}$, $P_{CU} = 18 \text{ W}$)

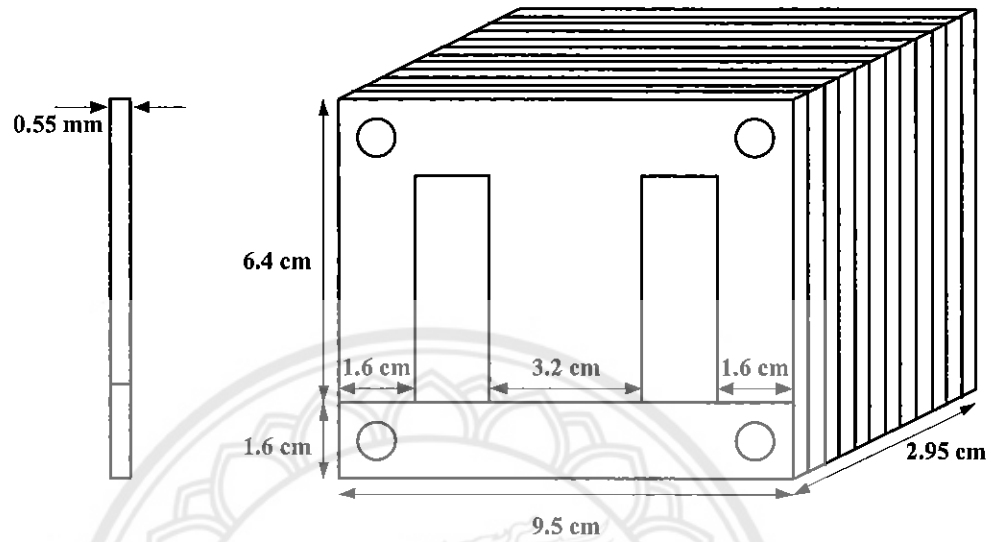
$$\eta = \frac{P_{OUTPUT}}{P_{IN}} = \frac{P_{IN} - (P_{CORE} + P_{CU})}{P_{IN}} = \frac{150 - (18 + 5)}{150} = 84.66\%$$

ตารางที่ 4.20 ตารางค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลง จ.

$R_H (\Omega)$	17.23	$P_{CU} (W)$	18
$R_L (\Omega)$	0.26	$R_C (\Omega)$	9703.083
$V_{OC} (V)$	220.26	$X_m (\Omega)$	7755.633
$I_{OC} (A)$	0.0364	$R_{01} (\Omega)$	26.292
$P_C (W)$	5	$X_{01} (\Omega)$	42.314
$V_{SC} (V)$	23.348	$Z_{01} (\Omega)$	49.817
$I_{SC} (A)$	0.6846	$\eta (\%)$	84.66

4.2 ผลการทดสอบการใช้แกนเหล็ก 75 เปอร์เซ็นต์

4.2.1 หม้อแปลง ก.



รูปที่ 4.6 ขนาดของแกนเหล็กของหม้อแปลง ก.

$N_p = 758$ รอบ

$N_s = 83$ รอบ

จำนวนแผ่นเหล็ก = 60 แผ่น

เบอร์ขดลวด Primary = 16

Secondary = 27

ตารางที่ 4.21 ตารางความต้านทาน

ความต้านทาน (Ω)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ
	21.2	0.2	21.2	0.2	21.1	0.3

การทดสอบโดยการเปิดวงจร (Open Circuit Test)

ตารางที่ 4.22 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบเปิดวงจร

แรงดัน (V)	V_{oc} (A)									
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ
220	220.4	20.28	220.2	20.28	220.2	20.27	220.4	20.27	220.3	20.28
แรงดัน (V)	I_{oc} (V)									
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	
220	0.077	0.076	0.076	0.076	0.077	0.076	0.077	0.076	0.076	
แรงดัน (V)	P_c (W)									
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	
220	7	7	7	7	7	7	7	7	7	

การทดสอบโดยการลัดวงจร (Short Circuit Test)

ตารางที่ 4.23 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบลัดวงจร

กระแส (A)	V_{sc} (V)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
0.7	24.53	24.52	24.54	24.53	24.53
กระแส (A)	I_{sc} (V)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
0.7	0.681	0.682	0.681	0.681	0.682
กระแส (A)	P_{cu} (W)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
0.7	17	17	17	17	17

ทดสอบ Open Circuit ($P_{OC} = P_{CORE} = 7 \text{ W}$, $V_{OC} = 220.3 \text{ V}$, $I_{OC} = 0.0764 \text{ A}$)

$$\theta_{OC} = \cos^{-1}\left(\frac{P_{OC}}{I_{OC}V_{OC}}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{7}{0.0764 \times 220.3}\right) = 65.423$$

$$I_c = I_{OC} \cos \theta_{OC} = 0.0764 \cos(65.423) = 0.0317 \text{ A}$$

$$I_m = I_{OC} \sin \theta_{OC} = 0.0764 \sin(65.423) = 0.0694 \text{ A}$$

$$R_c = \frac{V_{OC}}{I_c} = \frac{220.3}{0.0317} = 6949.526 \Omega$$

$$X_m = \frac{V_{OC}}{I_m} = \frac{220.3}{0.0694} = 3174.351 \Omega$$

ทดสอบ Short Circuit ($P_{SC} = P_{CU} = 17 \text{ W}$, $V_{SC} = 24.53 \text{ V}$, $I_{SC} = 0.6814 \text{ A}$)

$$R_{01} = \frac{P_{SC}}{I_{SC}^2} = \frac{17}{0.6814^2} = 24.948 \Omega$$

$$Z_{01} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} = \frac{24.53}{0.6814} = 52.831 \Omega$$

$$X_{01} = \sqrt{Z_{01}^2 - R_{01}^2} = \sqrt{52.831^2 - 24.948^2} = 46.569 \Omega$$

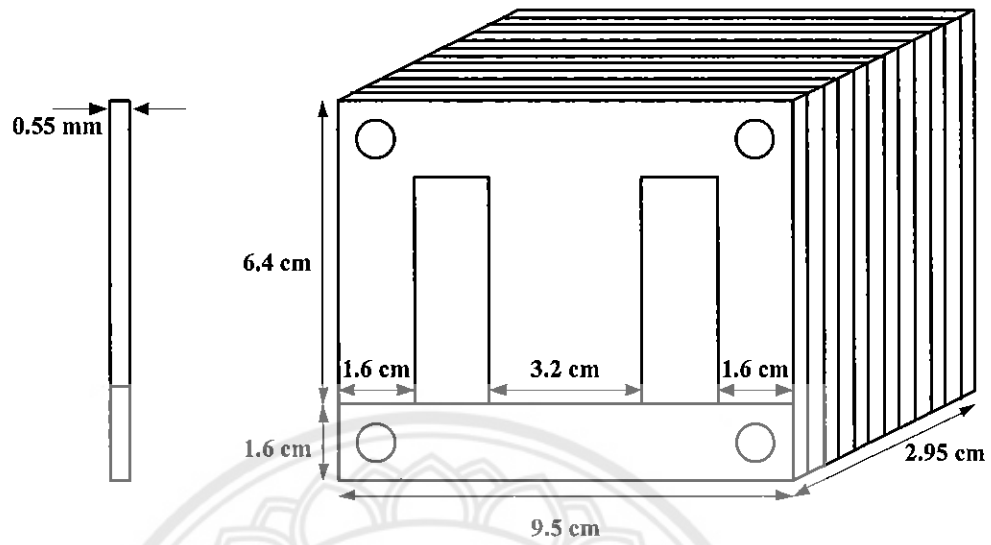
ประสิทธิภาพของหม้อแปลง ($P_{IN} = 150 \text{ VA}$, $P_{CORE} = 7 \text{ W}$, $P_{CU} = 17 \text{ W}$)

$$\eta = \frac{P_{OUTPUT}}{P_{IN}} = \frac{P_{IN} - (P_{CORE} + P_{CU})}{P_{IN}} = \frac{150 - (7 + 17)}{150} = 84\%$$

ตารางที่ 4.24 ตารางค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลง ค.

$R_H (\Omega)$	21.16	$P_{CU} (W)$	17
$R_L (\Omega)$	0.23	$R_C (\Omega)$	6949.52
$V_{OC} (V)$	220.30	$X_m (\Omega)$	3174.35
$I_{OC} (A)$	0.0764	$R_{01} (\Omega)$	24.569
$P_C (W)$	7	$X_{01} (\Omega)$	46.569
$V_{SC} (V)$	24.53	$Z_{01} (\Omega)$	52.831
$I_{SC} (A)$	0.6814	$\eta (\%)$	84

4.2.2 หม้อแปลง ง.



รูปที่ 4.7 ขนาดของแกนเหล็กของหม้อแปลง ง.

 $N_p = 711$ รอบ $N_s = 88$ รอบ

จำนวนแผ่นเหล็ก = 60 แผ่น

เบอร์ขดลวด Primary = 16

Secondary = 27

ตารางที่ 4.25 ตารางความต้านทาน

ความต้านทาน (Ω)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ
	20.1	0.3	20.2	0.2	20.1	0.3

การทดสอบโดยการเปิดวงจร (Open Circuit Test)

ตารางที่ 4.26 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบเปิดวงจร

แรงดัน (V)	V_{oc} (V)									
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ
220	220.2	23.80	220.3	23.82	220.4	23.82	220.3	23.81	220.4	23.82
แรงดัน (V)	I_{oc} (V)									
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
220	0.085	0.087	0.085	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084
แรงดัน (V)	P_c (W)									
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
220	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8

การทดสอบโดยการลัดวงจร (Short Circuit Test)

ตารางที่ 4.27 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบลัดวงจร

กระแส (A)	V_{sc} (V)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
0.7	21.45	21.47	21.47	21.45	21.45
กระแส (A)	I_{sc} (V)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
0.7	0.681	0.681	0.680	0.679	0.681
กระแส (A)	P_{cu} (W)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
0.7	15	15	15	15	15

ทดสอบ Open Circuit ($P_{OC} = P_{CORE} = 8 \text{ W}$, $V_{OC} = 220.32 \text{ V}$, $I_{OC} = 0.085 \text{ A}$)

$$\theta_{OC} = \cos^{-1}\left(\frac{P_{OC}}{I_{OC}V_{OC}}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{8}{0.085 \times 220.32}\right) = 64.710$$

$$I_c = I_{OC} \cos \theta_{OC} = 0.085 \cos(64.710) = 0.0363 \text{ A}$$

$$I_m = I_{OC} \sin \theta_{OC} = 0.085 \sin(64.710) = 0.0768 \text{ A}$$

$$R_c = \frac{V_{OC}}{I_c} = \frac{220.32}{0.0363} = 6069.427 \Omega$$

$$X_m = \frac{V_{OC}}{I_m} = \frac{220.32}{0.0768} = 2868.755 \Omega$$

ทดสอบ Short Circuit ($P_{SC} = P_{CU} = 15 \text{ W}$, $V_{SC} = 21.458 \text{ V}$, $I_{SC} = 0.6804 \text{ A}$)

$$R_{01} = \frac{P_{SC}}{I_{SC}^2} = \frac{15}{0.6804^2} = 22.045 \Omega$$

$$Z_{01} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} = \frac{21.458}{0.6804} = 46.351 \Omega$$

$$X_{01} = \sqrt{Z_{01}^2 - R_{01}^2} = \sqrt{46.351^2 - 22.045^2} = 40.772 \Omega$$

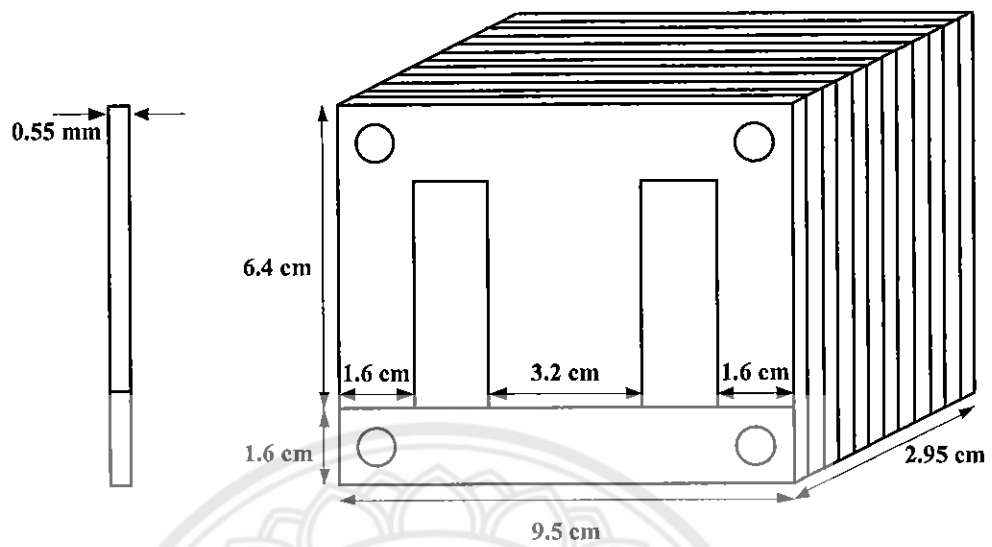
ประสิทธิภาพของหม้อแปลง ($P_{IN} = 150 \text{ VA}$, $P_{CORE} = 8 \text{ W}$, $P_{CU} = 15 \text{ W}$)

$$\eta = \frac{P_{OUTPUT}}{P_{IN}} = \frac{P_{IN} - (P_{CORE} + P_{CU})}{P_{IN}} = \frac{150 - (8 + 15)}{150} = 84.66\%$$

ตารางที่ 4.28 ตารางค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลง ง.

$R_H (\Omega)$	20.13	$P_{CU} (W)$	15
$R_L (\Omega)$	0.26	$R_c (\Omega)$	6069.42
$V_{OC} (V)$	220.32	$X_m (\Omega)$	2868.75
$I_{OC} (A)$	0.085	$R_{01} (\Omega)$	22.045
$P_c (W)$	8	$X_{01} (\Omega)$	40.772
$V_{SC} (V)$	21.45	$Z_{01} (\Omega)$	46.351
$I_{SC} (A)$	0.6804	$\eta (\%)$	84.66

4.2.3 หม้อแปลง จ.



รูปที่ 4.8 ขนาดของแกนเหล็กของหม้อแปลง จ.

$N_p = 758$ รอบ $N_s = 83$ รอบ จำนวนแผ่นเหล็ก = 60 แผ่น
 เบอร์ขดลวด Primary = 17 Secondary = 26

ตารางที่ 4.29 ตารางความต้านทาน

ความ ต้านทาน (Ω)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ
	17.2	0.3	17.2	0.2	17.3	0.3

การทดสอบโดยการเปิดวงจร (Open Circuit Test)

ตารางที่ 4.30 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบเปิดวงจร

แรงดัน (V)	V_{oc} (A)									
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ
220	220.1	20.72	220.3	20.72	220.1	20.72	220.1	20.71	220.2	20.71
แรงดัน (V)	I_{oc} (V)									
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
220	0.082	0.079	0.079	0.079	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080
แรงดัน (V)	P_c (W)									
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
220	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6

การทดสอบโดยการลัดวงจร (Short Circuit Test)

ตารางที่ 4.31 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบลัดวงจร

กระแส (A)	V_{sc} (V)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
0.7	24.28	24.38	24.46	24.40	24.46
กระแส (A)	I_{sc} (V)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
0.7	0.686	0.686	0.687	0.684	0.684
กระแส (A)	P_{cu} (W)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
0.7	18	18	18	18	18

ทดสอบ Open Circuit ($P_{OC} = P_{CORE} = 6 \text{ W}$, $V_{OC} = 220.16 \text{ V}$, $I_{OC} = 0.080 \text{ A}$)

$$\theta_{OC} = \cos^{-1}\left(\frac{P_{OC}}{I_{OC}V_{OC}}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{6}{0.080 \times 220.16}\right) = 70.082$$

$$I_c = I_{OC} \cos \theta_{OC} = 0.080 \cos(70.082) = 0.0272 \text{ A}$$

$$I_m = I_{OC} \sin \theta_{OC} = 0.080 \sin(70.082) = 0.0752 \text{ A}$$

$$R_c = \frac{V_{OC}}{I_c} = \frac{220.16}{0.0272} = 8094.117 \Omega$$

$$X_m = \frac{V_{OC}}{I_m} = \frac{220.16}{0.0752} = 2927.659 \Omega$$

ทดสอบ Short Circuit ($P_{SC} = P_{CU} = 18 \text{ W}$, $V_{SC} = 24.396 \text{ V}$, $I_{SC} = 0.6854 \text{ A}$)

$$R_{01} = \frac{P_{SC}}{I_{SC}^2} = \frac{18}{0.6854^2} = 26.262 \Omega$$

$$Z_{01} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} = \frac{24.396}{0.6854} = 51.931 \Omega$$

$$X_{01} = \sqrt{Z_{01}^2 - R_{01}^2} = \sqrt{51.931^2 - 26.262^2} = 44.801 \Omega$$

ประสิทธิภาพของหม้อแปลง ($P_{IN} = 150 \text{ VA}$, $P_{CORE} = 6 \text{ W}$, $P_{CU} = 18 \text{ W}$)

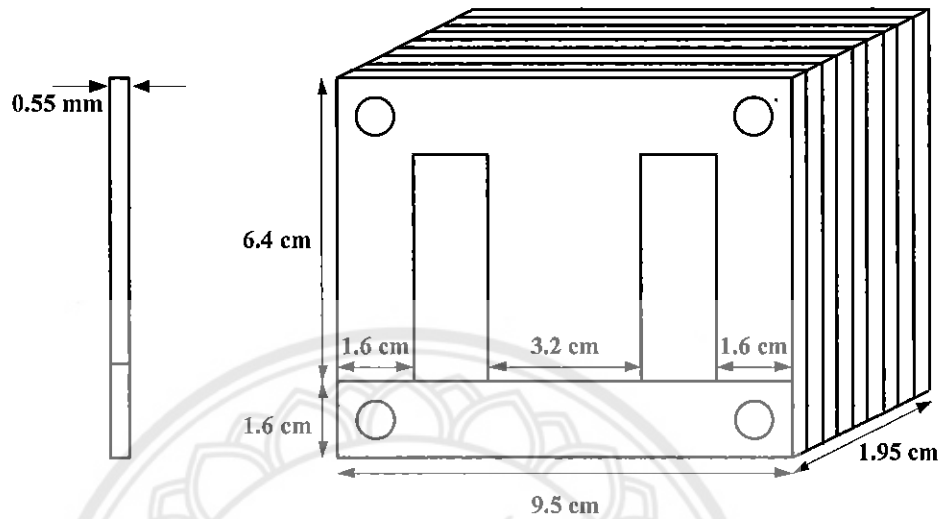
$$\eta = \frac{P_{OUTPUT}}{P_{IN}} = \frac{P_{IN} - (P_{CORE} + P_{CU})}{P_{IN}} = \frac{150 - (18 + 6)}{150} = 84\%$$

ตารางที่ 4.32 ตารางค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลง จ.

$R_H (\Omega)$	17.23	$P_{CU} (\text{W})$	18
$R_L (\Omega)$	0.26	$R_C (\Omega)$	8094.117
$V_{OC} (\text{V})$	220.16	$X_m (\Omega)$	2927.659
$I_{OC} (\text{A})$	0.080	$R_{01} (\Omega)$	26.262
$P_C (\text{W})$	6	$X_{01} (\Omega)$	44.801
$V_{SC} (\text{V})$	24.396	$Z_{01} (\Omega)$	51.931
$I_{SC} (\text{A})$	0.6854	$\eta (\%)$	84

4.3 ผลการทดสอบการใช้แกนเหล็ก 50 เปอร์เซนต์

4.3.1 หม้อแปลง ค.



รูปที่ 4.9 ขนาดของแกนเหล็กของหม้อแปลง ค.

$N_p = 758$ รอบ

$N_s = 83$ รอบ

จำนวนแผ่นเหล็ก = 40 แผ่น

เบอร์ขดลวด Primary = 16

Secondary = 27

ตารางที่ 4.33 ตารางความต้านทาน

ความ ต้านทาน (Ω)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ
	21.2	0.2	21.2	0.2	21.1	0.3

การทดสอบโดยการเปิดวงจร (Open-Circuit Test)

ตารางที่ 4.34 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบเปิดวงจร

แรงดัน (V)	V_{oc} (V)									
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ
220	220.3	20.14	220.2	20.15	220.3	20.14	220.2	20.14	220.2	20.14
แรงดัน (V)	I_{oc} (A)									
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
220	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.45	0.45	0.45	0.45
แรงดัน (V)	P_c (W)									
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
220	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14

การทดสอบโดยการลัดวงจร (Short Circuit Test)

ตารางที่ 4.35 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบลัดวงจร

กระแส (A)	V_{sc} (V)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
0.7	25.27	25.27	25.27	25.28	25.27
กระแส (A)	I_{sc} (A)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
0.7	0.685	0.687	0.686	0.685	0.685
กระแส (A)	P_{cu} (W)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
0.7	17	17	17	17	17

ทดสอบ Open Circuit ($P_{OC} = P_{CORE} = 14 \text{ W}$, $V_{OC} = 220.24 \text{ V}$, $I_{OC} = 0.444 \text{ A}$)

$$\theta_{OC} = \cos^{-1}\left(\frac{P_{OC}}{I_{OC}V_{OC}}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{14}{0.444 \times 220.24}\right) = 81.768$$

$$I_c = I_{OC} \cos \theta_{OC} = 0.444 \cos(81.768) = 0.0635 \text{ A}$$

$$I_m = I_{OC} \sin \theta_{OC} = 0.444 \sin(81.768) = 0.439 \text{ A}$$

$$R_c = \frac{V_{OC}}{I_c} = \frac{220.24}{0.0635} = 3468.346 \Omega$$

$$X_m = \frac{V_{OC}}{I_m} = \frac{220.24}{0.439} = 501.685 \Omega$$

ทดสอบ Short Circuit ($P_{SC} = P_{CU} = 17 \text{ W}$, $V_{SC} = 25.272 \text{ V}$, $I_{SC} = 0.6856 \text{ A}$)

$$R_{01} = \frac{P_{SC}}{I_{SC}^2} = \frac{17}{0.6856^2} = 31.967 \Omega$$

$$Z_{01} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} = \frac{25.272}{0.6856} = 53.764 \Omega$$

$$X_{01} = \sqrt{Z_{01}^2 - R_{01}^2} = \sqrt{53.764^2 - 31.967^2} = 43.228 \Omega$$

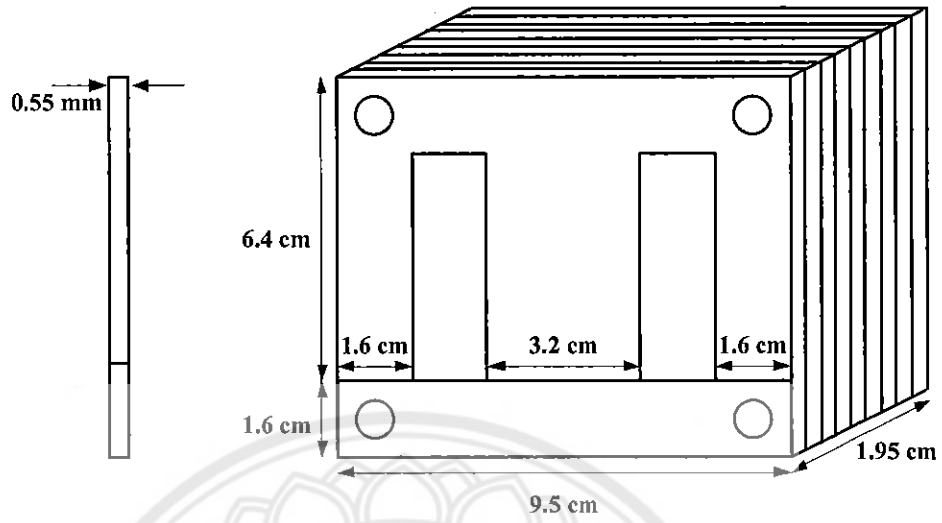
ประสิทธิภาพของหม้อแปลง ($P_{IN} = 150 \text{ VA}$, $P_{CORE} = 14 \text{ W}$, $P_{CU} = 17 \text{ W}$)

$$\eta = \frac{P_{OUTPUT}}{P_{IN}} = \frac{P_{IN} - (P_{CORE} + P_{CU})}{P_{IN}} = \frac{150 - (14 + 17)}{150} = 79.33\%$$

ตารางที่ 4.36 ตารางค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลง ค.

$R_H (\Omega)$	21.16	$P_{CU} (W)$	17
$R_L (\Omega)$	0.23	$R_C (\Omega)$	3468.34
$V_{OC} (V)$	220.24	$X_m (\Omega)$	501.68
$I_{OC} (A)$	0.444	$R_{01} (\Omega)$	31.967
$P_C (W)$	14	$X_{01} (\Omega)$	43.228
$V_{SC} (V)$	25.272	$Z_{01} (\Omega)$	53.764
$I_{SC} (A)$	0.6856	$\eta (\%)$	79.33

4.3.2 หม้อแปลง ง.



รูปที่ 4.10 ขนาดของแกนเหล็กของหม้อแปลง ง.

$N_p = 711$ รอบ $N_s = 88$ รอบ จำนวนแผ่นเหล็ก = 40 แผ่น
 เบอร์ขดลวด Primary = 16 Secondary = 27

ตารางที่ 4.37 ตารางความต้านทาน

ความต้านทาน (Ω)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ
	20.1	0.3	20.2	0.2	20.1	0.3

การทดสอบโดยการเปิดวงจร (Open Circuit Test)

ตารางที่ 4.38 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบเปิดวงจร

แรงดัน (V)	V_{oc} (V)									
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ
220	220.4	23.53	220.2	23.53	220.4	23.53	220.3	23.54	220.3	23.54
แรงดัน (V)	I_{oc} (A)									
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
220	0.684	0.684	0.684	0.684	0.685	0.685	0.684	0.684	0.685	0.685
แรงดัน (V)	P_c (W)									
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
220	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22

การทดสอบโดยการลัดวงจร (Short Circuit Test)

ตารางที่ 4.39 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบลัดวงจร

กระแส (A)	V_{sc} (V)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
0.7	21.95	22.04	22.04	22.01	22.01
กระแส (A)	I_{sc} (V)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
0.7	0.685	0.685	0.684	0.685	0.685
กระแส (A)	P_{cu} (W)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
0.7	15	15	15	15	15

ทดสอบ Open Circuit ($P_{OC} = P_{CORE} = 22 \text{ W}$, $V_{OC} = 220.32 \text{ V}$, $I_{OC} = 0.6844 \text{ A}$)

$$\theta_{OC} = \cos^{-1}\left(\frac{P_{OC}}{I_{OC}V_{OC}}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{22}{0.6844 \times 220.32}\right) = 81.610$$

$$I_c = I_{OC} \cos \theta_{OC} = 0.6844 \cos(81.610) = 0.0998 \text{ A}$$

$$I_m = I_{OC} \sin \theta_{OC} = 0.6844 \sin(81.610) = 0.677 \text{ A}$$

$$R_c = \frac{V_{OC}}{I_c} = \frac{220.32}{0.0998} = 2207.615 \Omega$$

$$X_m = \frac{V_{OC}}{I_m} = \frac{220.32}{0.677} = 325.435 \Omega$$

ทดสอบ Short Circuit ($P_{SC} = P_{CU} = 15 \text{ W}$, $V_{SC} = 22.01 \text{ V}$, $I_{SC} = 0.684 \text{ A}$)

$$R_{01} = \frac{P_{SC}}{I_{SC}^2} = \frac{15}{0.684^2} = 21.929 \Omega$$

$$Z_{01} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} = \frac{22.01}{0.684} = 47.044 \Omega$$

$$X_{01} = \sqrt{Z_{01}^2 - R_{01}^2} = \sqrt{47.044^2 - 21.929^2} = 41.620 \Omega$$

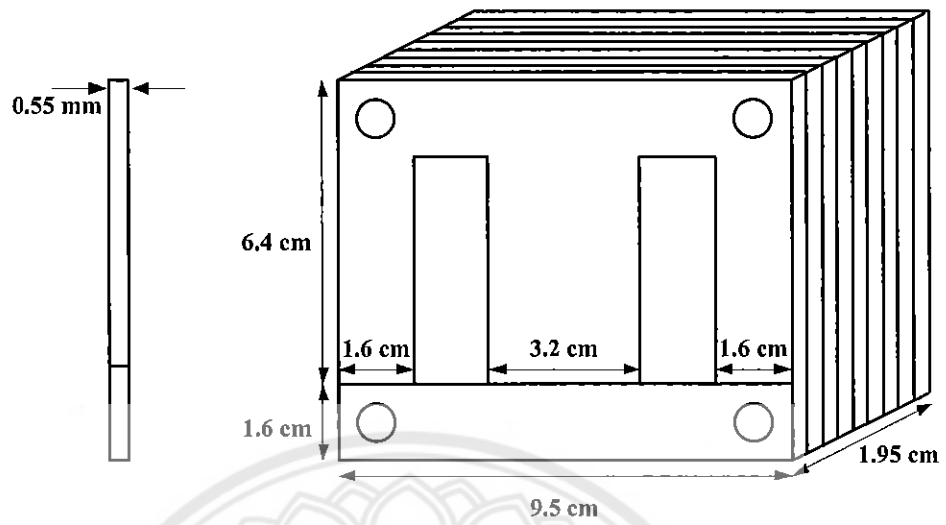
ประสิทธิภาพของหม้อแปลง ($P_{IN} = 150 \text{ VA}$, $P_{CORE} = 22 \text{ W}$, $P_{CU} = 15 \text{ W}$)

$$\eta = \frac{P_{OUTPUT}}{P_{IN}} = \frac{P_{IN} - (P_{CORE} + P_{CU})}{P_{IN}} = \frac{150 - (22 + 15)}{150} = 75.33\%$$

ตารางที่ 4.40 ตารางค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลง ง.

$R_H (\Omega)$	20.13	$P_{CU} (W)$	15
$R_L (\Omega)$	0.26	$R_c (\Omega)$	2207.61
$V_{OC} (V)$	220.32	$X_m (\Omega)$	325.43
$I_{OC} (A)$	0.684	$R_{01} (\Omega)$	21.929
$P_c (W)$	22	$X_{01} (\Omega)$	41.620
$V_{SC} (V)$	22.01	$Z_{01} (\Omega)$	47.044
$I_{SC} (A)$	0.684	$\eta (\%)$	75.33

4.3.3 หม้อแปลง จ.



รูปที่ 4.11 ขนาดของแกนเหล็กของหม้อแปลง ค.

 $N_p = 758$ รอบ $N_s = 83$ รอบ

จำนวนแผ่นเหล็ก = 40 แผ่น

เบอร์ขดลวด Primary = 17

Secondary = 26

ตารางที่ 4.41 ตารางความต้านทาน

ความต้านทาน (Ω)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ
	17.2	0.3	17.2	0.2	17.3	0.3

การทดสอบโดยการเปิดวงจร (Open Circuit Test)

ตารางที่ 4.42 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบเปิดวงจร

แรงดัน (V)	V_{oc} (V)									
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ
220	220.0	20.55	220.2	20.53	220.0	20.55	220.2	20.53	220.2	20.55
แรงดัน (V)	I_{oc} (A)									
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
220	0.630	0.636	0.635	0.635	0.635	0.635	0.635	0.635	0.635	0.635
แรงดัน (V)	P_c (W)									
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
220	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20

การทดสอบโดยการลัดวงจร (Short Circuit Test)

ตารางที่ 4.43 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบลัดวงจร

กระแส (A)	V_{sc} (V)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
0.7	23.999	24.45	24.44	24.45	24.45
กระแส (A)	I_{sc} (A)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
0.7	0.681	0.685	0.685	0.686	0.685
กระแส (A)	P_{cu} (W)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
0.7	18	18	18	18	18

ทดสอบ Open Circuit ($P_{OC} = P_{CORE} = 20 \text{ W}$, $V_{OC} = 220.12 \text{ V}$, $I_{OC} = 0.6342 \text{ A}$)

$$\theta_{OC} = \cos^{-1}\left(\frac{P_{OC}}{I_{OC}V_{OC}}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{20}{0.6342 \times 220.12}\right) = 81.763$$

$$I_c = I_{OC} \cos \theta_{OC} = 0.6342 \cos(81.763) = 0.090 \text{ A}$$

$$I_m = I_{OC} \sin \theta_{OC} = 0.6342 \sin(81.768) = 0.6276 \text{ A}$$

$$R_c = \frac{V_{OC}}{I_c} = \frac{220.12}{0.090} = 2445.77 \Omega$$

$$X_m = \frac{V_{OC}}{I_m} = \frac{220.12}{0.6276} = 350.732 \Omega$$

ทดสอบ Short Circuit ($P_{SC} = P_{CU} = 18 \text{ W}$, $V_{SC} = 24.356 \text{ V}$, $I_{SC} = 0.6844 \text{ A}$)

$$R_{01} = \frac{P_{SC}}{I_{SC}^2} = \frac{18}{0.6844^2} = 26.300 \Omega$$

$$Z_{01} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} = \frac{24.356}{0.6844} = 51.997 \Omega$$

$$X_{01} = \sqrt{Z_{01}^2 - R_{01}^2} = \sqrt{51.997^2 - 26.300^2} = 44.855 \Omega$$

ประสิทธิภาพของหม้อแปลง ($P_{IN} = 150 \text{ VA}$, $P_{CORE} = 20 \text{ W}$, $P_{CU} = 18 \text{ W}$)

$$\eta = \frac{P_{OUTPUT}}{P_{IN}} = \frac{P_{IN} - (P_{CORE} + P_{CU})}{P_{IN}} = \frac{150 - (20 + 18)}{150} = 74.66\%$$

ตารางที่ 4.44 ตารางค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลง จ.

$R_H (\Omega)$	17.23	$P_{CU} (W)$	18
$R_L (\Omega)$	0.26	$R_C (\Omega)$	2445.77
$V_{OC} (V)$	220.12	$X_m (\Omega)$	350.732
$I_{OC} (A)$	0.6342	$R_{01} (\Omega)$	26.300
$P_C (W)$	20	$X_{01} (\Omega)$	44.855
$V_{SC} (V)$	24.356	$Z_{01} (\Omega)$	51.997
$I_{SC} (A)$	0.6844	$\eta (\%)$	74.66

หาค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลง

ตารางที่ 4.45 ตารางรวมค่าพารามิเตอร์

	แกนเหล็ก 100 %				
	ก.	ข.	ค.	ง.	จ.
$R_H (\Omega)$	12.46	18.66	21.16	20.13	17.23
$R_L (\Omega)$	0.6	0.23	0.23	0.26	0.26
$V_{OC} (V)$	220.24	220.16	220.16	220.24	220.26
$I_{OC} (A)$	0.0376	0.0508	0.0424	0.0548	0.0364
$P_C (W)$	6	5	5	5.5	5
$V_{SC} (V)$	34.236	22.414	24.566	21.322	23.348
$I_{SC} (A)$	0.6854	0.6838	0.6806	0.6844	0.6846
$P_{CU} (W)$	23	15	17	15	18
$R_C (\Omega)$	8097.1	9698.6	9698.6	8844.9	9703.1
$X_m (\Omega)$	8503.4	4849.3	6149.7	4513.1	7755.6
$R_{01} (\Omega)$	33.557	21.936	24.978	21.917	26.292
$X_{01} (\Omega)$	64.691	24.356	26.055	39.896	42.314
$Z_{01} (\Omega)$	72.887	32.778	36.094	45.520	49.817
$\eta (\%)$	80.66	86.66	85.33	86.33	84.66

หมายเหตุ***

ก. = หม้อแปลงแยกขดลวด (ของอาจารย์)

ข. = หม้อแปลงออดิโอที่ซื้อมาทดสอบ

ค. = หม้อแปลงทำเองตัวที่ 1

ง. = หม้อแปลงทำเองตัวที่ 2

จ. = หม้อแปลงทำเองตัวที่ 3

ตารางที่ 4.46 ตารางรวมค่าพารามิเตอร์

	แกนหลัก 75 %			แกนหลัก 50 %		
	ก.	ง.	จ.	ก.	ง.	จ.
$R_H (\Omega)$	21.16	20.13	17.23	21.16	20.13	17.23
$R_L (\Omega)$	0.23	0.26	0.26	0.23	0.26	0.26
$V_{oc} (V)$	220.30	220.32	220.1	220.24	220.32	220.1
$I_{oc} (A)$	0.0764	0.085	0.080	0.444	0.684	0.634
$P_C (W)$	7	8	6	14	22	20
$V_{sc} (V)$	24.53	21.458	24.39	25.272	22.01	24.35
$I_{sc} (A)$	0.6814	0.6804	0.685	0.6856	0.684	0.684
$P_{cu} (W)$	17	15	18	17	15	18
$R_C (\Omega)$	6949.5	6069.4	8094.1	3468.3	2207.6	2445.7
$X_m (\Omega)$	3174.3	2868.7	2927.2	501.68	325.43	350.7
$R_{01} (\Omega)$	24.948	22.045	26.26	31.967	21.929	26.30
$X_{01} (\Omega)$	46.569	40.772	44.80	43.228	41.620	44.85
$Z_{01} (\Omega)$	52.831	46.351	51.93	53.764	47.044	51.99
$\eta (\%)$	84	84.66	84	79.33	75.33	74.66

หมายเหตุ***

ก. = หม้อแปลงแยกขดลวด (ของอาจารย์)

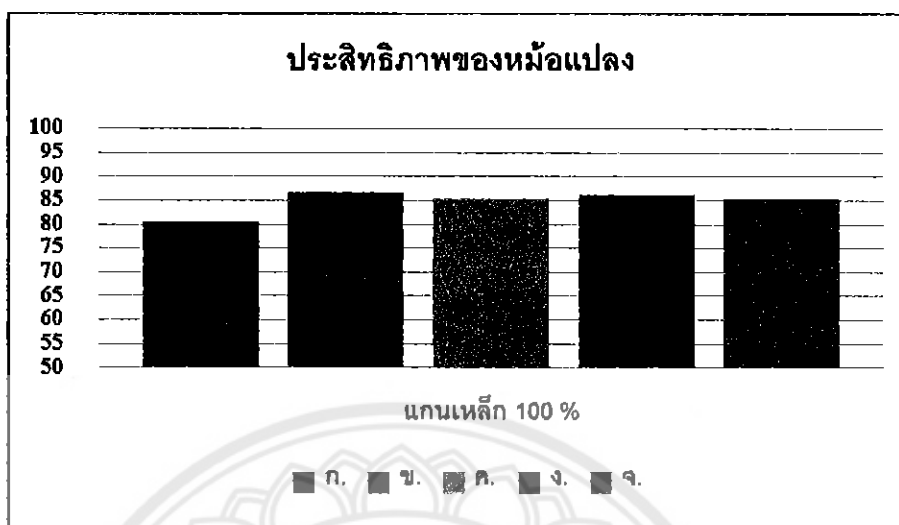
ข. = หม้อแปลงออดิโอที่ซื้อมาทดสอบ

ค. = หม้อแปลงทำเองตัวที่ 1

ง. = หม้อแปลงทำเองตัวที่ 2

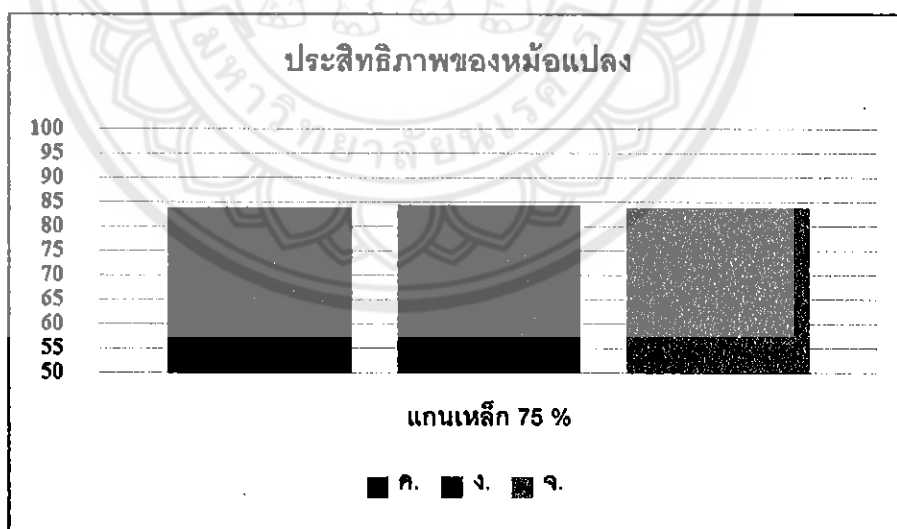
จ. = หม้อแปลงทำเองตัวที่ 3

กราฟประสิทธิภาพที่ใช้แกนเหล็ก 100 เปอร์เซ็นต์



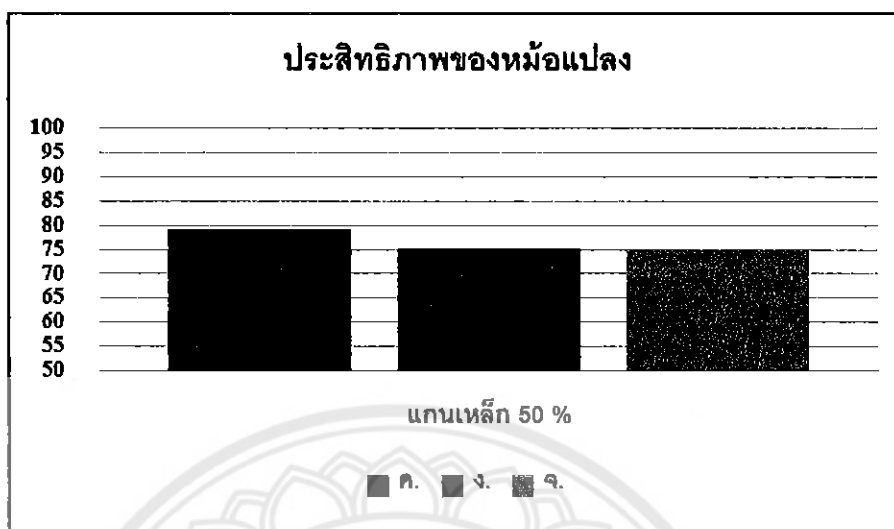
รูปที่ 4.12 แสดงประสิทธิภาพของหม้อแปลงที่แกนเหล็ก 100 เปอร์เซ็นต์

กราฟประสิทธิภาพที่ใช้แกนเหล็ก 75 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.13 แสดงประสิทธิภาพของหม้อแปลงที่แกนเหล็ก 75 เปอร์เซ็นต์

กราฟประสิทธิภาพที่ใช้แกนเหล็ก 50 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.14 แสดงประสิทธิภาพของหม้อแปลงที่แกนเหล็ก 50 เปอร์เซ็นต์

หมายเหตุ***

ก. = หม้อแปลงแกนเหล็ก (ของอาจารย์)

ข. = หม้อแปลงออดี้ที่ซื้อมาทดสอบ

ค. = หม้อแปลงทำเองตัวที่ 1

ง. = หม้อแปลงทำเองตัวที่ 2

จ. = หม้อแปลงทำเองตัวที่ 3

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ

จากการสร้างและออกแบบหม้อแปลงอัตโนมัติเพื่อทดสอบหาค่ากำลังสูญเสีย ค่าพารามิเตอร์ รวมถึงค่าประสิทธิภาพเพื่อเปรียบเทียบกับหม้อแปลงแบบแยกขดลวด ปรากฏว่า หม้อแปลงอัตโนมัติที่ได้ทำการสร้างและออกแบบมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าหม้อแปลงแบบแยกขดลวด และใช้ลวดทองแดงในปริมาณที่น้อยกว่าจึงทำให้ประหยัดลวดทองแดงได้มากกว่า จากนั้นได้ทำการปรับเปลี่ยนจำนวนแกนเหล็กและขนาดของขดลวด ซึ่งได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.45 และตารางที่ 4.46 ในการทดสอบปรับเปลี่ยนจำนวนแกนเหล็ก จะเห็นว่าเมื่อลดจำนวนแกนเหล็กส่งผลให้ประสิทธิภาพของหม้อแปลงลดลงด้วย ดังนั้นผู้ใช้งานควรเลือกใช้งานให้เหมาะสมกับงานในกรณีงานที่ไม่ต้องการประสิทธิภาพสูงมากนักก็สามารถปรับลดแกนเหล็กให้เหมาะสมกับงานได้เพราะจะช่วยทำให้ประหยัดแกนเหล็กลงไปได้

5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

การพันหม้อแปลงมีความยากในการพันเป็นอย่างมาก เนื่องจากต้องมีความประณีตและความอดทนในการพัน ซึ่งปัญหาจะเกิดในการพันขดลวดด้านแรงต่ำซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ใหญ่กว่าขดลวดด้านแรงสูง เพราะขดลวดด้านแรงต่ำเมื่องอหรือคดแล้ว จะกั้นด้วยยากส่งผลให้การเรียงตัวของขดลวดทองแดงเกิดช่องอากาศขึ้น และทำให้ฉนวนที่เคลือบแกนเหล็กหลุดออกมาอีกด้วย ขาดอุปกรณ์ที่ใช้ช่วยในการพันขดลวดทองแดง จึงทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอในการพันขดลวดทองแดง ขาดอุปกรณ์การวัดที่มีความละเอียดสูง ซึ่งส่งผลทำให้ค่าที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนตามไปด้วย และประสบการณ์ของผู้ทำโครงการมีไม่มากพอ จึงทำให้ผลการทดลองและชิ้นงานที่ได้ไม่ตรงกับผลที่คาดหวังไว้

5.3 แนวทางการพัฒนาต่อไป

1. ควรเลือกใช้เครื่องมือการวัดที่ได้คุณภาพ และเป็นมาตรฐานเดียวกัน เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความถูกต้อง และเป็นไปในทิศทางเดียวกัน
2. ในการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า ควรทำการทดสอบหลายๆ ครั้งที่การใช้งานเดียวกัน แล้วนำข้อมูลโดยเฉลี่ยมาใช้ในการวิเคราะห์
3. ในการพันหม้อแปลงควรใช้รอก 2-3 ตัว ในการช่วยรีดเส้นลวดทองแดงให้ตรง ซึ่งจะไม่ทำให้เส้นลวดทองแดงงอ หรือคด และยังไม่ทำให้เกิดช่องอากาศในขณะพันอีกด้วย
4. การใช้งานของหม้อแปลง ควรใช้กับระดับแรงดันที่เหมาะสมกับอุปกรณ์ที่ใช้งานด้วย



เอกสารอ้างอิง

- [1] รัชชัย อัดถวิบูลย์กุล. (2538). หม้อแปลงไฟฟ้า. นนทบุรี : เจริญรุ่งเรืองการพิมพ์.
- [2] ไชยชาญ หินเกิด. (2549). หม้อแปลงไฟฟ้า. ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น).
- [3] ดุสิต สุรย์ราช. (2538). ทฤษฎีหม้อแปลงไฟฟ้า. คณะวิชาช่างไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์. วิทยาลัยเทคนิคชัยภูมิ : ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ.
- [4] สุขชัย สุรินทร์วงศ์. (2543). หม้อแปลงระบบไฟฟ้า 1 เฟส และ 3 เฟส. ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น).
- [5] ประสิทธิ์ ภูสมมา. (2553). หม้อแปลงไฟฟ้า. ครั้งที่ 1. มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี
- [6] อาจารย์ดร.ชนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์, เอกสารประกอบการเรียน **Electrical Machines I**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, จาก [http://www.sut.ac.th/engineering/electrical/courses/429301/Lecture%20Notes%20-%20Student%20Version/EMACH%2001%20\(Student\).pdf](http://www.sut.ac.th/engineering/electrical/courses/429301/Lecture%20Notes%20-%20Student%20Version/EMACH%2001%20(Student).pdf)



เบอร์ลวดทองแดง มาตรฐาน S.W.G	เส้นผ่าศูนย์กลาง	พื้นที่หน้าตัด	ทนกระแสได้ (A)
	mm	mm ²	
0000	10.2	81.71	270.11
000	9.5	70.88	233.62
00	8.8	60.82	199.77
0	8.2	52.81	177.22
1	7.6	45.36	151.94
2	7.0	38.48	128.60
3	6.4	32.17	107.21
4	5.9	27.34	90.86
5	5.4	22.90	75.87
6	4.9	18.86	62.23
7	4.5	15.90	52.29
8	4.1	13.20	43.22
9	3.7	10.75	35.01
10	3.3	8.55	27.66
11	2.9	6.61	22.72
12	2.6	5.31	18.26
13	2.3	4.15	14.29
14	2.0	3.14	10.80
15	1.9	2.54	8.751
16	1.8	2.01	6.915
17	1.4	1.54	5.294
18	1.2	1.15	3.890
19	1.0	0.79	2.701
20	0.91	0.65	2.188
21	0.81	0.51	1.2729
22	0.72	0.41	1.324

23	0.61	0.2922	0.972
24	0.56	0.2463	0.817
25	0.51	0.2047	0.675
26	0.45	0.1624	0.547
27	0.40	0.1288	0.432
28	0.38	0.1134	0.370
29	0.36	0.1021	0.312
30	0.31	0.0755	0.243
31	0.29	0.0661	0.204
32	0.28	0.0616	0.176
33	0.25	0.0510	0.169
34	0.23	0.0451	0.137
35	0.21	0.0346	0.108
36	0.19	0.0285	0.098
37	0.17	0.0227	0.078
38	0.15	0.0177	0.063
39	0.13	0.0133	0.046
40	0.12	0.0114	0.039
41	0.11	0.0101	0.033
42	0.10	0.0081	0.027
43	0.091	0.0065	0.022
44	0.081	0.0052	0.017
45	0.071	0.0040	0.013
46	0.061	0.0029	0.0097
47	0.051	0.0020	0.0068
48	0.041	0.0013	0.0047
49	0.030	0.0007	0.0024
50	0.025	0.0005	0.0017



เบอร์ลวด		กระแสพัน หม้อแปลง ไฟฟ้า	เส้นผ่าศูนย์กลาง				พื้นที่หน้าตัด		
AWG	SWG	mil	mil	inch	mm.	Cir.mil	Inch ²	Mm ²	
-	7/0		500.000	0.50000	12.7000	250,000	0.19640000	126.700	
-	6/0		464.000	0.46400	11.7860	215,296	0.16910000	109.100	
4/0	-		460.000	0.46000	11.6840	211,600	0.16620000	107.200	
-	5/0		432.000	0.43200	10.9730	186,624	0.14660000	94.5600	
3/0	-	-	409.600	0.40960	10.4040	167,772	0.13180000	85.0300	
-	4/0	-	400.000	0.40000	10.1600	160,000	0.12570000	81.0700	
-	3/0	-	372.000	0.37200	9.44000	138,384	0.10870000	70.1200	
2/0	-	-	364.000	0.36400	9.26600	133,079	0.10450000	67.4200	
-	2/0	-	348.000	0.34800	8.83900	121,104	0.09512000	61.3600	
0	-	-	324.900	0.32490	8.25000	105,560	0.08291000	54.4900	
-	0	-	324.000	0.32400	8.23000	104,976	0.08245000	53.1900	
-	1	-	300.000	0.30000	7.62900	90,000	0.07069000	45.6000	
1	-	-	289.300	0.28930	7.34800	83,694	0.06573000	42.4100	
-	2	-	267.000	0.26700	7.01000	76,176	0.05983000	39.6000	
2	-	-	257.624	0.25762	6.54360	66,370	0.05214780	33.6436	
-	3	-	252.000	0.25200	6.40100	63,504	0.04988000	32.1800	
-	4	-	232.500	0.23250	5.89300	53,824	0.04227000	27.2700	
3	-	-	229.400	0.22940	5.82700	52,624	0.04133000	26.6600	
-	5	-	212.000	0.21200	5.30500	44,944	0.03530000	22.7700	
4	-	-	204.300	0.20430	5.18900	41,738	0.03278000	21.1500	
-	6	-	192.000	0.19200	4.0770	36,864	0.02895000	18.6800	
5	-	-	181.900	0.18190	4.62100	33,088	0.02599000	16.7700	
-	7	-	176.000	0.17600	4.47000	30,976	0.02433000	15.7000	
6	-	-	162.000	0.16200	4.11500	26,244	0.02061000	13.3000	

-	8	-	160.000	0.16000	4.06400	25,600	0.02011000	12.9700
7	-	-	144.300	0.14430	3.66500	20,822	0.01635000	10.5500
-	9	-	144.000	0.14400	3.65800	20,736	0.01629000	10.5200
8	-	-	128.500	0.12850	3.26400	16,512	0.01297000	8.36800
-	10	36.410	128.000	0.12800	3.25100	16,384	0.01287000	8.30200
-	11	29.900	116.000	0.11600	2.94600	13,456	0.01057000	6.81800
9	-	29.080	114.000	0.11440	2.90600	13,087	0.01028000	6.63200
-	12	24.040	104.000	0.10400	2.64200	10,816	0.00849500	5.48100
10	-	23.080	101.900	0.10190	2.50000	10,384	0.00815600	5.26200
-	13	18.810	92.0000	0.09200	2.33700	8,464	0.00664800	4.28900
11	-	18.300	90.7500	0.09075	2.30500	8,234	0.00646700	4.17200
12	-	14.510	80.8100	0.08081	2.05300	6,350	0.00512900	3.30900
-	14	14.220	80.0000	0.08000	2.03200	6,400	0.00502700	3.24300
-	15	11.520	72.0000	0.07200	1.82900	5,184	0.00407200	2.62700
13	-	11.510	71.9600	0.07196	1.82800	5,178	0.00406700	2.62400
14	-	9.120	64.0800	0.06408	1.62800	4,106	0.00322500	2.08100
-	16	9.100	64.0000	0.06400	1.62600	4,096	0.00321700	2.07500
15	-	7.240	57.0700	0.05707	1.45000	3,257	0.00255800	1.65000
-	17	6.970	56.0000	0.05600	1.42200	3,136	0.00246300	1.58900
16	-	5.740	50.8200	0.05082	1.29100	2,583	0.00202900	1.30900
-	18	5.120	48.0000	0.04800	1.21900	2,304	0.00181000	1.16700
17	-	4.550	45.2600	0.04526	1.15000	2,048	0.00160800	1.03700
18	-	3.610	40.8000	0.04080	1.02400	1,642	0.00127500	0.82260
-	19	3.560	40.0000	0.04000	1.01600	1,600	0.00125700	0.81070
-	20	2.880	36.0000	0.03600	0.91440	1,296	0.00101800	0.65760
19	-	2.860	35.8900	0.03589	0.91160	1,288	0.00101200	0.65290
-	21	2.270	32.0000	0.03200	0.81280	1,024	0.00080420	0.51850
20	-	2.270	31.9600	0.03196	0.81100	1,021	0.00080190	0.51740

21	-	1.800	28.4600	0.02846	0.72290	810.0	0.00063620	0.41050
-	22	1.740	28.0000	0.02800	0.71120	784.0	0.00061560	0.39730
22	-	1.430	27.5600	0.02756	0.64380	642.6	0.00050470	0.32560
-	23	1.280	24.0000	0.02400	0.60960	576.0	0.00045240	0.29190
23	-	1.130	22.5700	0.02257	0.57330	509.4	0.00040010	0.25810
-	24	1.080	22.0000	0.02200	0.55830	484.0	0.00038010	0.24520
24	-	0.898	20.1000	0.02010	0.51060	404.0	0.00031730	0.20470
-	25	0.889	20.0000	0.02000	0.50800	400.0	0.00031420	0.20270
-	26	0.720	18.0000	0.01800	0.45720	324.0	0.00025450	0.16420
25	-	0.712	17.9000	0.01790	0.45070	320.0	0.00025160	0.16230
-	27	0.598	16.4000	0.01640	0.41660	269.0	0.00021130	0.13630
26	-	0.565	15.9400	0.01594	0.40490	254.1	0.00019980	0.12880
-	28	0.487	14.8000	0.01480	0.37590	219.0	0.00017200	0.11100
27	-	0.448	14.2000	0.01420	0.36060	201.6	0.00015830	0.10210
-	29	0.411	13.6000	0.01360	0.34540	165.0	0.00014530	0.09372
28	-	0.355	12.6400	0.01264	0.32110	159.8	0.00012550	0.08097
-	30	0.342	12.4000	0.01240	0.31500	153.6	0.00012080	0.07791
-	31	0.299	11.6000	0.01160	0.29460	134.6	0.00010570	0.06818
29	-	0.282	11.2600	0.01126	0.28590	126.8	0.00009959	0.06425
-	32	0.259	10.8000	0.01080	0.27430	116.6	0.00009158	0.05913
30	-	0.224	10.0300	0.01003	0.25460	100.6	0.00007901	0.05097
-	33	0.222	10.0000	0.01000	0.25400	100.0	0.00006954	0.05067
-	34	0.188	9.20000	0.00920	0.23370	84.64	0.00006648	0.04289
31	-	0.177	8.92000	0.00892	0.22380	79.71	0.00006260	0.04039
-	35	0.157	8.40000	0.00840	0.21340	70.56	0.00005542	0.03575
32	-	0.140	7.95000	0.00795	0.20190	63.20	0.00004964	0.03203
-	36	0.128	7.60000	0.00760	0.19300	57.76	0.00004536	0.02927
33	-	0.111	7.08000	0.00708	0.17980	50.13	0.00003937	0.02540

-	37	0.103	6.80000	0.00680	0.17270	46.24	0.00003632	0.02343
34	-	0.088	6.30500	0.00630	0.16010	39.75	0.00003122	0.02014
-	38	0.080	6.00000	0.00600	0.15240	36.00	0.00002827	0.01824
35	-	0.078	5.61500	0.00561	0.14260	35.30	0.00002476	0.01597
-	39	0.060	5.20000	0.00520	0.13210	27.04	0.00002124	0.01370
36	-	0.056	5.00000	0.00500	0.12700	25.00	0.00001963	0.01267
-	40	0.051	4.80000	0.00480	0.12190	23.04	0.00001810	0.01167
37	-	0.044	4.45300	0.00453	0.11310	19.83	0.00001557	0.01005
-	41	0.043	4.40000	0.00440	0.11100	19.36	0.00001521	0.00981
-	42	0.036	4.00000	0.00400	0.10160	16.00	0.00001257	0.00810
38	-	0.035	3.96500	0.00396	0.10070	15.72	0.00001235	0.00796
-	43	0.029	3.60000	0.00360	0.09110	12.96	0.00001018	0.00656
39	-	0.028	3.53100	0.00353	0.08960	12.47	0.00000979	0.00631
-	44	0.023	3.20000	0.00320	0.08130	10.24	0.00000804	0.00580
40	-	0.022	3.14500	0.00314	0.07980	9.890	0.00000776	0.00501

ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นายทศพร อุปกำ
ภูมิลำเนา 216 หมู่ 6 ต.ธารทอง อ.พาน จ.เชียงราย
ประวัติการศึกษา
- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนแม่ลาววิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: dokapon_5880@hotmail.com



ชื่อ นายอภินันท์ บรรจง
ภูมิลำเนา 21 หมู่ 2 ต.บางกระบือ อ.เมือง จ.สิงห์บุรี
ประวัติการศึกษา
- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสิงห์บุรี
- ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: moonoy-kung@hotmail.com