



การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้า  
Analysis of the Performance of Transformer in Distribution System

นัฐโชติ รักษ์ไทยเจริญชีพ  
พูนศรี วรรณการ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2563  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อเรื่อง : การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้า  
ผู้วิจัย : รศ.ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.พระนคร  
ผศ.ดร.พูนศรี วรรณการ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.พระนคร  
พ.ศ. : 2563

### บทคัดย่อ

การออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าย่อยมีความสำคัญมาก เนื่องจากจะช่วยป้องกันอันตรายที่เกิดจากความผิดพลาดซึ่งทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวและแรงดันไฟฟ้าสัมผัสมีค่าสูงจนทำให้เกิดอันตรายถึงชีวิตได้ อีกทั้งยังช่วยป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์และเพิ่มความเชื่อถือได้ให้กับระบบไฟฟ้ากำลังอีกด้วย ปัจจุบันสถานีไฟฟ้าย่อยแบบที่ใช้ก๊าซเป็นฉนวน (Gas Insulated Substation: GIS) ถูกสร้างขึ้นมากโดยเฉพาะในบริเวณที่มีพื้นที่จำกัด เนื่องจากใช้พื้นที่น้อยกว่าแบบที่ใช้อากาศเป็นฉนวน (Air Insulated Substation: AIS) ในการที่จะสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยแบบ GIS ขึ้นมาแทนแบบ AIS และการปรับปรุงหรือซ่อมบำรุงสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นจำเป็นต้องสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยขนาดเล็กอีกสถานีหนึ่งขึ้นมาเพื่อทำการจ่ายไฟฟ้าทดแทนให้กับสถานีไฟฟ้าย่อยเดิม แต่การที่มีสถานีไฟฟ้าย่อยสองสถานีในบริเวณเดียวกันอาจทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของกราวด์โพเทนเชียลที่มีความชันสูงระหว่างระบบกราวด์กริดของทั้งสองสถานีขึ้นได้ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวที่มีค่าสูงขณะที่มีความผิดพลาดเกิดขึ้น ดังนั้นก่อนทำการปรับปรุงหรือซ่อมบำรุงสถานีไฟฟ้าย่อยจึงต้องทำการวิเคราะห์ระยะห่างของกราวด์กริดและขนาดของสถานีไฟฟ้าย่อยที่สร้างขึ้นใหม่ว่าจะมีผลอย่างไรต่อการเกิดแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำว รวมทั้งศึกษาผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวและแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่จะเกิดขึ้นดังกล่าว

Title : Analysis of the Performance of Transformer in Distribution System

Researcher : Associate Professor Dr.Nattachote Rugthaicharoencheep,

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, RMUTP

Assistant Professor Dr.Poonsri Wannakarn

Department of Electrical Engineering,

Faculty of Engineering, RMUTP

Year : 2020

### Abstract

Ground grid design of substation is very important. It will help prevent the danger caused by the fault which causes the high step voltage and high touch voltage and may cause the operator to die. It also helps prevent damage to equipment and increases reliability for power systems as well. Currently, the Gas Insulated Substation (GIS) has been built a lot, especially in areas with limited space because it takes less space than the Air Insulated Substation (AIS). In order to create a substation of the GIS model instead of the AIS model. In order to create the GIS instead of AIS, including the improvement or maintenance of the substation, it is necessary to build another small substation to supply electricity to replace electricity from the original substation. However, there are two substation stations in the same area may cause an increase of high-slope ground potential between the ground grid systems of both substations. It will cause high step voltage and high touch voltage while the fault is diminished. Therefore, before improvement or maintenance of substation, the ground grid distance and the size of the newly constructed substation must be analyzed that what effect on step voltage and touch voltage generation. Including studying the effects of step voltage and touch voltage that will occur.

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2563 ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณผู้เกี่ยวข้องที่ไม่ได้กล่าวนามในที่นี้ ที่ให้ความช่วยเหลือตลอดมา ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยในครั้งนี้ ล้วนเป็นผลมาจากความกรุณาทุกท่าน คณะผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยขอมอบบูชาแด่คณาจารย์ทุกท่านที่ประสาทวิชาความรู้แก่คณะผู้วิจัย

คณะผู้วิจัย



# สารบัญ

## หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 แนวทางการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 แม่เหล็กและการเหนี่ยวนำ	3
2.1.1 แม่เหล็กไฟฟ้า	5
2.1.2 วงจรแม่เหล็ก	6
2.1.3 ความซาบซึมได้	8
2.1.4 กระแสไหลวน	11
2.1.5 สนามแม่เหล็ก	12
2.2 ฟลักแม่เหล็ก	12
2.2.1 ความต้านทานฟลักแม่เหล็ก	12
2.3 หม้อแปลงเฟสเดียว	14
2.3.1 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า	14
2.3.2 การทำงานเบื้องต้นของหม้อแปลงไฟฟ้า	17
2.3.3 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าในหม้อแปลง	19
2.4 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า	21
2.4.1 Voltage Regulation	21
2.4.2 แฟคเตอร์ของพื้นที่ช่องว่างการพันขดลวด	22
2.4.3 $S_1$ Wire Insulation	23
2.4.4 $S_2$ Fill Factor	25
2.4.5 $S_3$ Effective Window	29

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 การทดสอบหม้อแปลงและประสิทธิภาพ	32
2.5.1 การทดสอบหม้อแปลง	32
2.5.2 การสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า	35
2.5.3 ประสิทธิภาพของหม้อแปลง	36
2.5.4 ประสิทธิภาพตลอดทั้งวัน	37
2.6 มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย	37
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	
3.1 ผังการผลิตและกรรมวิธีการผลิต	40
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน	41
3.3 ออกแบบและสร้างโต๊ะทดสอบ หม้อแปลงทดสอบ และวงจรจ่ายกระแสไฟฟ้าชุดทดสอบ	41
3.3.1 การออกแบบโต๊ะทดสอบ	41
3.3.2 การออกแบบหม้อแปลงทดสอบ 1 เฟส	44
3.3.3 ขั้นตอนในการพันหม้อแปลงไฟฟ้า	50
3.4 วงจรจ่ายกระแสไฟฟ้าชุดทดสอบ	53
3.5 วงจรทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า	53
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	
4.1 การทำงานของชุดทดสอบประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้า	54
4.1.1 หลักการทำงาน	54
4.2 หลักการทำงานชุดทดสอบประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้า	56
4.3 ผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้า	56
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	58
บรรณานุกรม	59
ภาคผนวก ก ประวัติย่อผู้วิจัย	60

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา

ปัจจุบันที่เทคโนโลยีมีความก้าวหน้าและพัฒนาไปอย่างรวดเร็วทำให้โรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ต้องพึ่งพาเทคโนโลยีในการขยายฐานการผลิตอยู่เสมอ ซึ่งอุปกรณ์เครื่องใช้ต่าง ๆ ล้วนได้รับการพัฒนามาจากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีจนนำมาผลิตเป็นสิ่งของเครื่องใช้เพื่ออำนวยความสะดวก ความปลอดภัยให้กับมนุษย์มากมาย การใช้เทคโนโลยีของมนุษย์ที่เห็นได้ชัดเจนก็คือการใช้เทคโนโลยี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ

หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power Transformer) เป็นอุปกรณ์หนึ่งที่มีความสำคัญและจำเป็นต่อทุกฝ่าย ในภาคอุตสาหกรรมการผลิตและใช้ไฟฟ้า หากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังมีปัญหา ก็จะก่อให้เกิดการจ่ายกระแสไฟฟ้าไม่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นการดูแล ทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังให้ทำงานได้ปกติและไม่มีความเสี่ยงต่อความเสียหาย จึงเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่จะช่วยทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในด้านปฐมภูมิ ทุติยภูมิ ของหม้อแปลงไฟฟ้าระดับแรงดันต่ำ แบบเฟสเดียว ซึ่งการทดสอบประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีการทดสอบระดับแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และความถี่ เพื่อให้เป็นไปตามจุดประสงค์ในการนำไปใช้งานกับอุปกรณ์ไฟฟ้า

จากความสำคัญที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าชุดทดสอบประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระดับแรงดันต่ำแบบ 1 เฟส ซึ่งการศึกษาครั้งนี้จะศึกษาว่า ชุดทดสอบประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระดับแรงดันต่ำแบบ 1 เฟส สามารถทดสอบประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ ทุติยภูมิ ซึ่งชุดทดสอบประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งทำให้หม้อแปลงไฟฟ้ามีความน่าเชื่อถือการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าวงจรไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี และจากการศึกษาครั้งนี้ทำให้การประยุกต์ใช้เครื่องวัดแรงดันไฟฟ้า เครื่องวัดกระแสไฟฟ้า และเครื่องวัดกำลังไฟฟ้างดงกล่าวมีประสิทธิภาพในการวัดค่าต่าง ๆ ได้ละเอียดมากขึ้น

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อออกแบบและสร้างชุดทดสอบประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระดับแรงดันต่ำแบบ 1 เฟส
- 1.2.2 เพื่อทราบหลักการทดสอบ และการวิเคราะห์ผลหม้อแปลงไฟฟ้าระดับแรงดันต่ำ แบบ 1 เฟส
- 1.3.2 เพื่อทราบประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระดับแรงดันต่ำแบบ 1 เฟส

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 แรงดันในการทดสอบไม่เกิน 220 โวลต์
- 1.3.2 แบบจำลองการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าระดับแรงดันต่ำแบบ 1 เฟส

### 1.4 แนวทางการดำเนินงาน

แนวคิดในการสร้างชุดทดสอบประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระดับแรงดันต่ำแบบ 1 เฟส ซึ่งการวิจัยนี้จะพบว่าชุดทดสอบประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระดับแรงดันต่ำแบบ 1 เฟส สามารถทดสอบประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิ ซึ่งชุดทดสอบประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าว่ามีประสิทธิภาพในการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังโหลดทางไฟฟ้าได้เป็นอย่างไร และจากการวิจัยนี้ทำให้สามารถประยุกต์ใช้เครื่องวัดแรงดันไฟฟ้า เครื่องวัดกระแสไฟฟ้า และเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าในการนำมาวัดค่าต่าง ๆ เพื่อหาประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟสได้

#### วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทบทวนวรรณกรรม
2. ศึกษาข้อมูลเทคนิคการวิเคราะห์หม้อแปลงไฟฟ้า
3. ศึกษาข้อทฤษฎีการทดสอบหม้อแปลง
4. ศึกษาการประเมินการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า
5. กำหนดรูปแบบปัญหา เพื่อทดสอบหม้อแปลง
6. ประมวลผลทดสอบ และวิเคราะห์ผล
7. สรุปผลการทดสอบ
8. รวบรวมข้อมูล เรียบเรียง ตรวจสอบ และจัดทำเอกสารรายงานผลการวิจัยและเผยแพร่

ผลงาน

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้ทราบแนวทางการออกแบบชุดทดสอบประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระดับแรงดันต่ำแบบ 1 เฟส
- 1.5.2 สามารถทดสอบประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระดับแรงดันต่ำแบบ 1 เฟส
- 1.5.3 สามารถนำไปศึกษาเพื่อต่อยอดการทดสอบประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระดับแรงดันต่ำแบบ 1 เฟส



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับหม้อแปลงไฟฟ้าและอุปกรณ์ทดสอบประสิทธิภาพ ซึ่งได้แก่ ทฤษฎีแม่เหล็กและการเหนี่ยวนำ(Magnet and Induction)[1] ทฤษฎีฟลักแม่เหล็ก[1] ทฤษฎีหม้อแปลงเฟสเดียว[2-3] ทฤษฎีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า[4] ทฤษฎีการทดสอบประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้า[5-8] และทฤษฎีมาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย พ.ศ.2556[9]

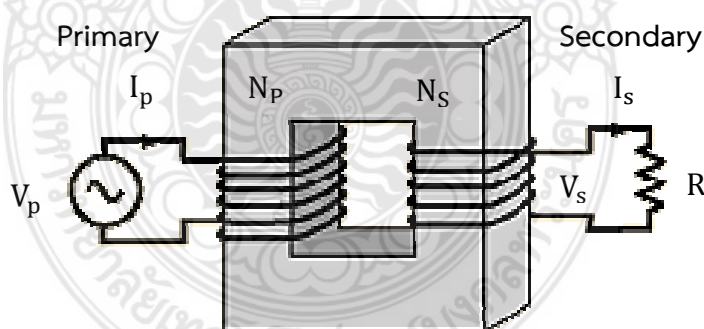
**หม้อแปลงไฟฟ้า** คือ อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้เปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยโครงสร้างหม้อแปลงประกอบด้วย

1. แกนของหม้อแปลง (Core)มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลางกลวง โดยมากมักจะใช้แผ่นเหล็กอ่อนบางๆ หลายๆแผ่นอันซ้อนกัน แกนเหล็กอ่อน มีหน้าที่รวมเส้นแรงแม่เหล็กจากขดลวดปฐมภูมิไปเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสในขดลวดทุติยภูมิ

2. ขดขดลวดปฐมภูมิ (Primary Coil) ทำหน้าที่เป็นขดที่รับไฟจากแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับ เพื่อที่จะทำการแปลงระดับแรงดัน

3. ขดขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Coil) ทำหน้าที่เป็นขดที่จ่ายไฟที่ทำการแปลงระดับแล้วจ่ายไปยังโหลด

โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส (2ขดลวด) มีลักษณะแสดงในภาพที่ 2.1



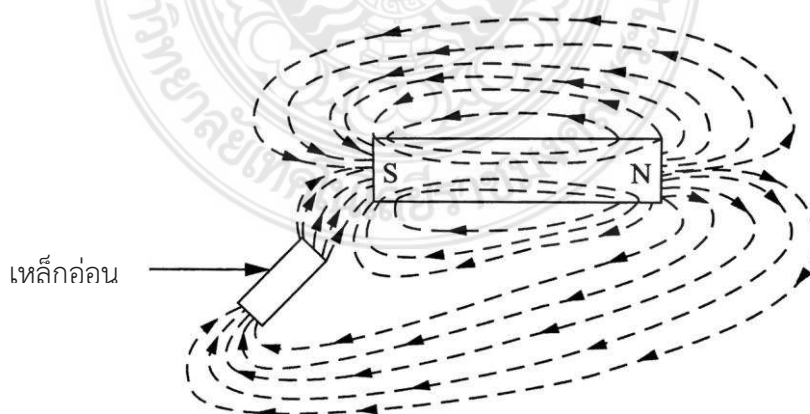
ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส

#### 2.1แม่เหล็กและการเหนี่ยวนำ (Magnet and Induction)

อำนาจแม่เหล็กไม่สามารถมองเห็นด้วยตาซึ่งเปรียบเทียบกับกระแสลมถึงแม้ว่าจะมีอำนาจมาก แต่ก็ไม่สามารถมองเห็นด้วยตา อำนาจแม่เหล็กก็เช่นเดียวกันเรามองไม่เห็น แต่สามารถรู้ได้ด้วยความรู้สึก อำนาจแม่เหล็กจะวิ่งออกจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่ง คุณสมบัติอันหนึ่งของเส้นแรงแม่เหล็กคือ เส้นแรงแม่เหล็กแต่ละเส้นนั้นจะผลัดกัน จะไม่มีเส้นแรงตัดกันหรือรวมกันเป็นเส้นเดียว

และไม่มีฉนวนใดในโลกที่จะกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก เส้นแรงแม่เหล็กจะวิ่งผ่านวัตถุได้ทุกชนิดซึ่งแตกต่างกันก็ตรงที่วัตถุบางชนิดเส้นแรงแม่เหล็กผ่านได้ยาก และบางชนิดเส้นแรงแม่เหล็กผ่านได้ง่าย วัตถุที่เส้นแรงแม่เหล็กผ่านได้ยากแสดงว่าวัตถุนั้นเฉื่อย เส้นแรงแม่เหล็กจะเดินในทางที่มีความต้านทานแม่เหล็กต่ำและเนื่องจากอากาศมีความต้านทานแม่เหล็กสูงกว่าเหล็ก ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กจะเดินผ่านเหล็กได้ง่ายกว่าอากาศด้วยเหตุนี้จึงทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กในเหล็กมีมากกว่าในอากาศ

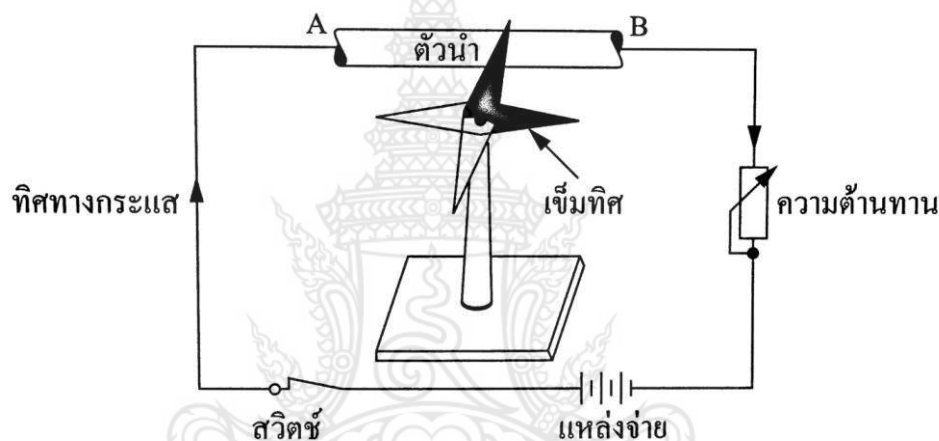
จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่มีอยู่ในพื้นที่หนึ่งตารางเซนติเมตรเรียกว่า ความเข้มสนามแม่เหล็ก เส้นทางที่เส้นแรงแม่เหล็กใช้เป็นทางเดินหรือเป็นจุดที่เส้นแรงแม่เหล็กเข้าหรือออกก็คือขั้วแม่เหล็ก ทางเดินนี้เรียกว่าวงจรแม่เหล็ก (Magnetic circuit) จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่วิ่งผ่านก้อนวัตถุใด ๆ จะมีค่าสูงสุดเพียงค่าหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุนั้น ๆ เมื่อมีเส้นแรงแม่เหล็กจำนวนเท่าค่าสูงสุดวิ่งผ่านวัตถุใดเรียกว่า วัตถุนั้นถึงจุดอิ่มตัวต่อเส้นแรงแม่เหล็ก (Saturation) และอำนาจแม่เหล็กนั้นอาจทำให้เกิดขึ้นได้ในสารที่ยังมิได้เป็นแม่เหล็กด้วยวิธีการเหนี่ยวนำคือ ถ้าเราวางแท่งแม่เหล็กอ่อนแห่งหนึ่งลงในสนามแม่เหล็กถาวร ในระยะเวลาที่ไม่นานนักเหล็กอ่อนนั้นจะมีอำนาจแม่เหล็กเกิดขึ้น เพราะถูกเหนี่ยวนำ สาเหตุที่เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นในขณะนี้เพราะเส้นแรงแม่เหล็กที่วิ่งอยู่ในอากาศจะพยายามเบนวิ่งเข้าหาแท่งเหล็กอ่อนดังแสดงในภาพที่ 2.2 เหล็กอ่อนนั้นมีความต้านทานแม่เหล็กน้อยกว่าอากาศ ขณะที่เส้นแรงแม่เหล็กวิ่งผ่านเหล็กอ่อนโมเมนต์ของเหล็กอ่อนจะเรียงตัวกันใหม่ให้ขนานกับแนวเส้นแรงแม่เหล็ก พร้อมกับชี้ขั้วเหนือของโมเมนต์ไปทางทิศเดียวกันกับเส้นแรงแม่เหล็กนั้นด้วยในขณะนี้เองแท่งเหล็กอ่อนซึ่งถูกเหนี่ยวนำจะมีอำนาจแม่เหล็กและเกิดขั้วเหนือขั้วใต้ดังแสดงในภาพที่ 2.2 ต่อมาถ้าแยกแท่งแม่เหล็กถาวรออกแท่งเหล็กอ่อนจะสูญเสียกำลังอำนาจแม่เหล็กลงไปมากแต่ก็ไม่ถึงกับเป็นศูนย์ เพราะจะมีอำนาจแม่เหล็กตกค้างอยู่บ้างอำนาจแม่เหล็กนี้เรียกว่า อำนาจแม่เหล็กตกค้าง Residual flux หรือ Residual magnetism)



ภาพที่ 2.2 การเหนี่ยวนำแม่เหล็กในเหล็กอ่อน

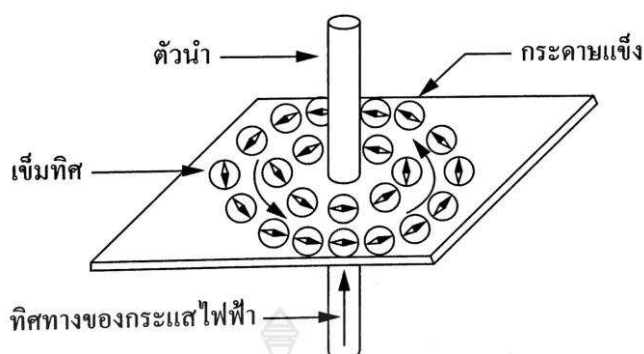
### 2.1.1 แม่เหล็กไฟฟ้า

ในปี ค.ศ. 1819 แฮนส์คริสเตียนเออสเตด (Hans Christian Oversted) นักฟิสิกส์ชาวเดนมาร์กได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการไหลของกระแสไฟฟ้า และพบว่าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นเสมอ การทดลองของเออสเตดนั้นแสดงได้ดังภาพที่ 2.3 โดยการนำเอาลวดตัวนำไฟฟ้า AB ต่อเข้ากับเซลล์ไฟฟ้า และให้ตัวนำนั้นวางขนานกับเข็มทิศที่วางอยู่ใต้ตัวนำนั้น เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำจะทำให้เข็มทิศเกิดการเบี่ยงเบนไปจากแนวขนานเดิม โดยเข็มทิศจะตั้งฉากกับตัวนำ AB แต่เมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลกลับทางเข็ม ทิศจะเกิดการเบี่ยงเบนกลับทางไปอีกทิศทางหนึ่ง ซึ่งทำมุมกับตำแหน่งเดิม 180 องศาและยังพบอีกว่าถ้าให้ลวดตัวนำทำมุม 90 องศากับเข็มทิศแล้วเข็มทิศจะไม่เบี่ยงเบนไปในทิศทางใด ๆ เลย



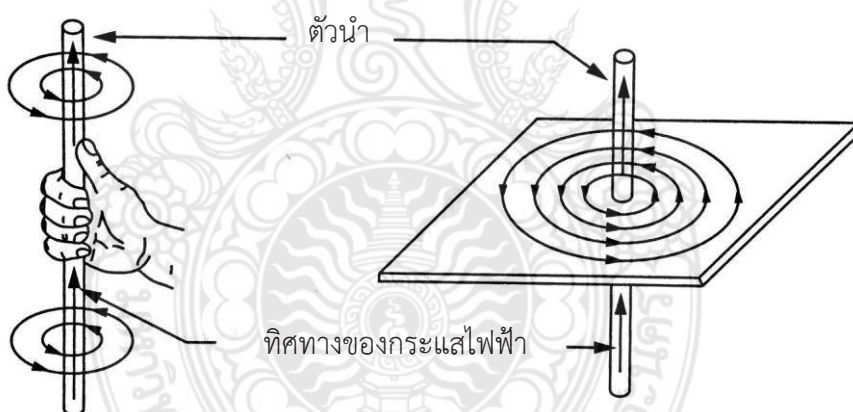
ภาพที่ 2.3 การทดลองของเออสเตด

เออสเตดยังได้ค้นพบอีกว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลของกระแสไฟฟ้านั้นประกอบไปด้วยเส้นแรงแม่เหล็กจำนวนหนึ่งจัดเรียงเป็นวงรอบ ๆ ตัวนำที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านนั้น โดยตัวนำจะเป็นจุดศูนย์กลางของวงกลมเหล่านั้น เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ตัวนำนี้ถ้ายังอยู่ห่างตัวนำมากอำนาจแม่เหล็กก็ยิ่งน้อย การเกิดสนามแม่เหล็กนี้สามารถแสดงดังภาพที่ 2.4 โดยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำไฟฟ้าที่อยู่ในแนวตั้งทะลุผ่านกระดาษแข็ง แล้วนำเข็มทิศวางไว้บนกระดาษแข็งตามตำแหน่งต่าง ๆ จะสังเกตเห็นว่าทิศทางของเข็มทิศจะหันเหเรียงตามกันไปเป็นวงกลมรอบตัวนำ โดยให้สีดำแทนด้วยขั้วเหนือและสีขาวแทนด้วยขั้วใต้หรืออาจใช้ผงเหล็กโรยจะสังเกตเห็นว่าผงเหล็กจะจัดเรียงตัวกันเป็นวงกลม



ภาพที่ 2.4 การกินเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ

ความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กรอบ ๆ ตัวนำไฟฟ้ากับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำสามารถหาได้โดยใช้กฎมือขวาของเส้นแรงแม่เหล็ก (Right hand rule of magnetic field) คือ ให้ใช้มือขวากำรอบตัวนำไฟฟ้า โดยให้หัวแม่มือชี้ไปตามความยาวของตัวนำ แทนทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า และใช้นิ้วทั้งสี่ที่เหลือกำรอบตัวนำ โดยนิ้วทั้งสี่จะแทนทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ตัวนำ แสดงดังภาพที่ 2.5

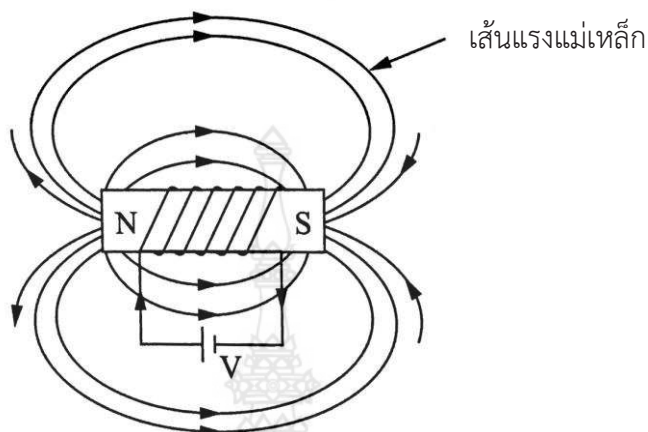


ภาพที่ 2.5 กฎมือขวาของเส้นแรงแม่เหล็ก

### 2.1.2 วงจรแม่เหล็ก (Magnetic Circuit)

วงจรแม่เหล็ก หมายถึง ทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งกฎเกณฑ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในวงจรแม่เหล็กเหมือนกันกับวงจรไฟฟ้า แต่ก็ได้หมายความว่าเหมือนกันทั้งหมดเพราะ หน่วยต่าง ๆ ที่ใช้ในวงจรแม่เหล็กกับวงจรไฟฟ้านั้น จะต่างกันแต่ความหมายต่าง ๆ นั้นมักจะคล้ายกันเช่น แรงดันแม่เหล็กหมายถึงแหล่งที่ทำให้เกิดการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็ก ส่วนในวงจรไฟฟ้านั้น มีแรงดันไฟฟ้าซึ่งเป็นแหล่งที่ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร

จากภาพที่ 2.6 เป็นการแสดงให้เห็นถึงลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ขดลวดที่พันไว้บนแกนเหล็กโดย ขดลวดนั้นมีกระแสไหลผ่าน ส่วนทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กนั้นสามารถหาได้จากการใช้กฎมือขวา



ภาพที่ 2.6 ลักษณะของการเกิดเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ขดลวดเมื่อมีกระแสไหล

### 1. ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Maximum Flux Density)

ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก คือ ปริมาณของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดการเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หนึ่งหน่วย ซึ่งจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กต่อพื้นที่นี้เรียกว่า ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมีหน่วยวัดเป็นเวเบอร์ต่อตารางเมตร (Weber per square meter,  $\frac{Wb}{m^2}$ ) หรือเทสลา (Tesla) ใช้สัญลักษณ์  $B$  ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสามารถหาได้จากสมการ คือ

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad \frac{Wb}{m^2} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $B$  = ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเป็นเวเบอร์ต่อตารางเมตร ( $\frac{Wb}{m^2}$ )

$\Phi$  = เส้นแรงแม่เหล็กเป็นเวเบอร์ (Wb)

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของวงจรมแม่เหล็กเป็นตารางเมตร ( $m^2$ )

(1 เทสลา มีค่าเท่ากับ  $1 \frac{Wb}{m^2}$ )



หรือความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กอาจหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$B = \mu H \frac{Wb}{m^2} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $\mu$  = ความซาบซึมได้ของวัสดุ(ที่เป็นสารแม่เหล็ก)มีหน่วยเป็นเฮนรีต่อเมตรหรือเวเบอร์ต่อแอมแปร์เมตร ( $\frac{H}{m}$  หรือ  $\frac{Wb}{A-m}$ )

$H$  = ความเข้มของสนามแม่เหล็กเป็นแอมแปร์ต่อเมตร หรือแอมแปร์เทอนต่อเมตร ( $\frac{A}{m}$  หรือ  $\frac{A-T}{m}$ )

### 2.1.3 ความซาบซึมได้ (Permeability)

จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ที่แท้จริงขึ้นอยู่กับโมเลกุลของแกนเหล็กว่าจะสามารถวางตัวในแนวเดียวกันได้ง่ายเพียงใด เรียกว่าความซาบซึมได้ ซึ่งใช้สัญลักษณ์  $\mu$  (เป็นอักษรกรีกอ่านว่ามิว) ความซาบซึมได้นี้เป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นแห่งการเหนี่ยวนำต่อแรงดันแม่เหล็ก ดังนั้นจะได้ว่า

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2.3)$$

ดังนั้น  $B = \mu H \frac{Wb}{m^2}$

$$B = \mu_0 \mu_r H \frac{Wb}{m^2}$$

$\mu_0$  = ค่าความซึมซาบได้ของอากาศบริเวณที่ไม่มีเส้นแรงใด ๆ มาเกี่ยวข้องเลย และไม่ใช่สุญญากาศ(เพราะว่าในสุญญากาศเส้นแรงแม่เหล็กผ่านได้)

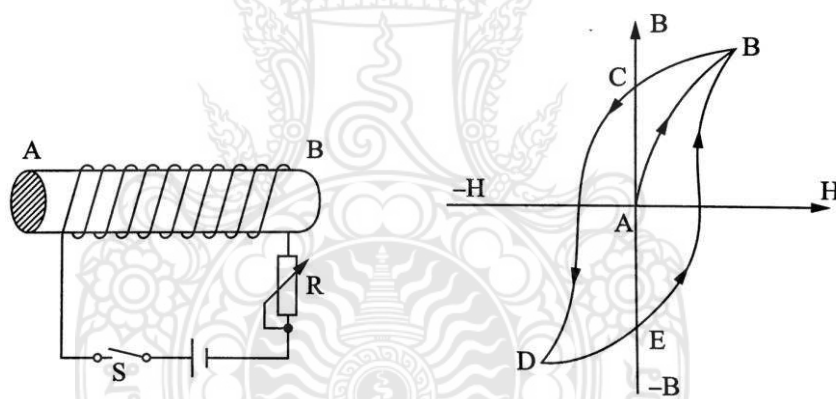
$\mu_r$  = ค่าความซาบซึมได้สัมพัทธ์ ซึ่งหมายถึงความซาบซึมได้ของสารอื่น ๆ (Relative permeability)

$$\mu_r = 1 \text{ สำหรับในอากาศ}$$

$\mu_r$  เป็นอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในสารอย่างหนึ่งกับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในอากาศ เมื่อใช้ความเข้มของสนามแม่เหล็กเท่ากัน

ความซาบซึมได้ คือ ความยินยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กผ่าน ความซาบซึมของสุญญากาศเป็น 1 โดยปกติทั่วไปจะกล่าวถึงเฉพาะความซาบซึมได้สัมพัทธ์ ซึ่งหมายถึงตัวกลางเช่นเหล็กยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กผ่านได้เป็นที่เท่าของอากาศ เมื่อมีความเข้มของสนามแม่เหล็กเท่ากัน

เมื่อใช้แกนเหล็กในการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มของสนามแม่เหล็กจะเห็นว่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นตามเส้นโค้งการเกิดอำนาจแม่เหล็กตามเส้น AB จนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัวของเส้นโค้ง แล้วถ้าทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กหมดไปโดยการลดกระแสไฟฟ้าที่ล้นน้อยจนกระทั่งกระแสเป็นศูนย์ ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะลดลงแต่ไม่ซำร่อยเส้นโค้งเดิม โดยที่กระแสเป็นศูนย์แล้ว ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะยังไม่เป็นศูนย์จะได้เส้นโค้งเป็นเส้น BC ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง ดังแสดงในภาพที่ 2.7 และถ้าต้องการทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง (Residual magnetism) ในแกนเหล็กลดลงเป็นศูนย์เราจะต้องเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าใหม่ และวัดค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะได้เส้นโค้งตั้งเส้น CD เมื่อถึงจุด D อันเป็นจุดอิ่มตัวในอีกทิศทางหนึ่งของค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กและถ้าลดปริมาณของกระแสไฟฟ้าลงเส้นโค้งจะเป็นตามแนวของเส้น DE และถ้าเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแสใหม่และค่อย ๆ เพิ่มกระแสไฟฟ้าอีกเส้นโค้งจะเป็นเส้น EB ซึ่งทำให้เส้นรอบรูปเป็น BCDEB ซึ่งเส้นโค้งดังกล่าวนี้เรียกว่าเส้นโค้งความล้าหรือเส้นโค้งฮิสเทอรีซิส (Hysteresis curve)



ภาพที่ 2.7 แสดงเส้นโค้งฮิสเทอรีซิส

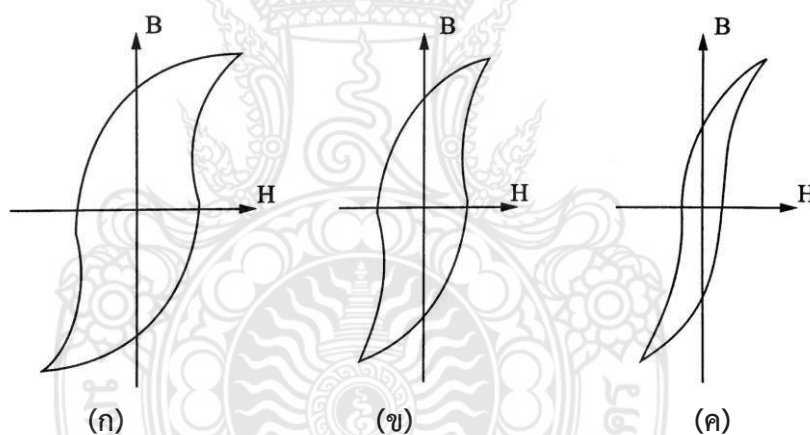
เส้นโค้งฮิสเทอรีซิสมีความสำคัญในการที่จะใช้ออกแบบหรือจัดหาสารมาทำแกนแม่เหล็กแม่เหล็กถาวรเช่นแม่เหล็กแท่ง แม่เหล็กเกือกม้าหรือแม่เหล็กที่ใช้ทำเป็นเข็มทิศจะต้องมีเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสกว้าง ๆ เพื่อให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กคงอยู่ได้นาน สารดังกล่าวเอามาทำแม่เหล็กไฟฟ้าไม่ได้ดีถ้าจะเอาเหล็กมาทำแกนหม้อแปลง เหล็กดังกล่าวจะต้องมีเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสแคบ ๆ ด้วยเหตุผลคือการกลับทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กในหม้อแปลงต่อหนึ่งไซเคิลของไฟฟ้ากระแสสลับนั้น ต้องสิ้นเปลืองพลังงาน พื้นที่เส้นโค้งฮิสเทอรีซิสจะบอกปริมาณพลังงานที่สูญเสียไปในหนึ่งไซเคิลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของวัตถุที่ทำแกนหม้อแปลง พลังงานดังกล่าวจะสูญเสียไปมากในเมื่อเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสกว้าง ๆ วัสดุที่ใช้ทำแม่เหล็กถาวรที่มีเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสกว้าง ได้แก่ โลหะ

ผสมอลนิโค (Alnico) ทำจากอะลูมิเนียมนิเกิลและเหล็กโคบอลต์ ส่วนแกนเหล็กหม้อแปลงนั้นนิยมใช้เหล็กอ่อน (Soft iron) เนื่องจากมีพื้นที่เส้นโค้ง ฮิสเตอรีซิสแคบดังแสดงในภาพที่ 2.8 ฮิสเตอรีซิสนี้วัดเป็นพลังงานซึ่งสูญเสียไปในรูปของความร้อนที่เกิดขึ้นในวงจรแม่เหล็กในแท่งเหล็กนั้น พื้นที่ของรูปฮิสเตอรีซิสจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของสารแม่เหล็ก

จากภาพที่ 2.8 (ก) เป็นค่าของเหล็กชนิดแข็งเนื่องจากเป็นเหล็กชนิดที่มีความสามารถในการเก็บอำนาจแม่เหล็กไว้ได้สูงและมีอำนาจในการกลับที่เดิมช้า มีคุณสมบัติเกือบเป็นแม่เหล็กถาวรจึงมีค่า ฮิสเตอรีซิสสูงแสดงว่ามีพื้นที่มาก การที่นำมาทำเป็นโลหะผสมระหว่างอะลูมิเนียมนิเกิลกับเหล็กกล้าเรียกว่าอัลนิโคอัลลอยด์ (Alnico alloys) ซึ่งพบว่าสารนี้มีอำนาจเป็นแม่เหล็กถาวรได้

จากภาพที่ 2.8 (ข) เป็นเหล็กอ่อนและเหล็กหล่อ แสดงว่าวัสดุนี้มีความซาบซึมของแม่เหล็กได้สูงมีอำนาจการกลับคืนของแม่เหล็กปานกลางดังนั้นเหล็ก 2 อย่างนี้สามารถทำเป็นแม่เหล็กไฟฟ้าได้

จากภาพที่ 2.8 (ค) เป็นเหล็กแผ่นบางผสม แสดงถึงมีความซาบซึมของแม่เหล็กได้สูงมากและมีค่าฮิสเตอรีซิสต่ำ ดังนั้นวัสดุส่วนใหญ่ที่ใช้ทำอาร์เมเจอร์และแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าจะใช้วัสดุที่มีอำนาจการกลับคืนของแม่เหล็กเร็ว



ภาพที่ 2.8 (ก) เส้นโค้งฮิสเตอรีซิสของสารที่ทำแม่เหล็ก

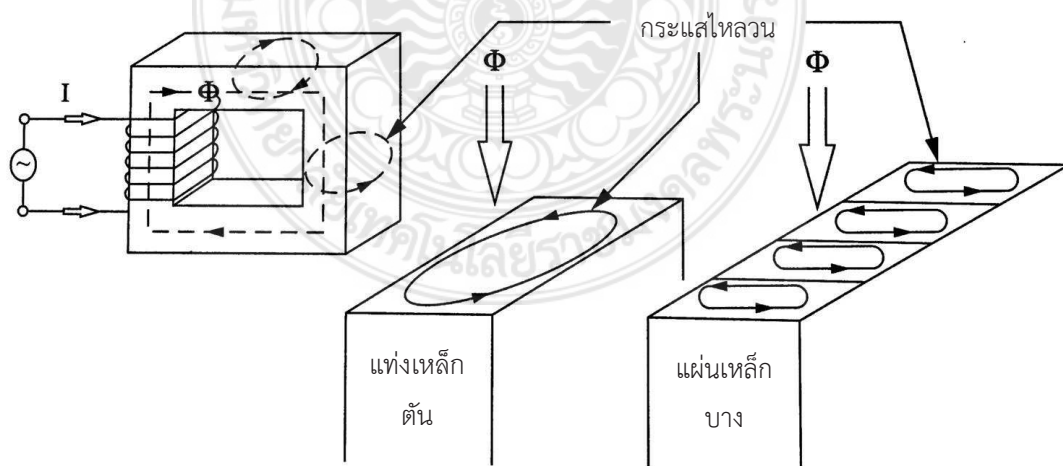
(ข) เส้นโค้งฮิสเตอรีซิสของเหล็กอ่อนและเหล็กหล่อ

(ค) เส้นโค้งฮิสเตอรีซิสของสารที่ทำแกนเหล็กหม้อแปลง



### 2.1.4 กระแสไหลวน (Eddy Current)

กระแสไหลวนจะทำให้เกิดการสูญเสียขึ้นเนื่องจากกระแสไหลวนอยู่ภายในสารแม่เหล็กโดยถ้าทำให้สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ผ่านตัวนำ จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นภายในตัวนำนั้นแต่ถ้าเราใส่แกนเหล็กเข้าไปในขดลวดที่มีไฟฟ้ากระแสสลับไหลอยู่ ก็จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงเป็นลักษณะของรูปคลื่นไซน์ด้วย การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นภายในแกนเหล็ก และแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กนี้จะเป็นตัวทำให้เกิดมีกระแสไหลวนเวียนขึ้นภายในแกนเหล็กนั้น ซึ่งเรียกกระแสไฟฟ้านี้ว่ากระแสไหลวน กระแสไหลวนจะเกิดขึ้นในแกนเหล็กทุก ๆ ชนิดของสารที่เป็นตัวนำไฟฟ้ากระแสสลับ จะไหลผ่านความต้านทานไฟฟ้าของสารแม่เหล็ก ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนขึ้น ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากกำลังสูญเสียซึ่งมีค่า  $I^2R$  และเนื่องจากความต้านทานของเหล็กมีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับสารชนิดอื่น ๆ ดังนั้นการสูญเสียกำลังเนื่องจากกระแสไหลวนในแกนเหล็กจึงมีค่าค่อนข้างสูง หรือความถี่ของการกลับไปและขนาดของกระแสไหลวน จะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของเส้น แรงแม่เหล็กกลับมาของเส้นแรงแม่เหล็ก และความต้านทานไฟฟ้าของแกนเหล็กการสูญเสีย เนื่องจากกระแสไหลวนนี้สามารถทำให้ลดลงได้โดยการใช้แกนเหล็กที่เป็นแผ่นเหล็กบาง ๆ (Laminated sheet steel) อัดซ้อนเข้าด้วยกัน โดยในแต่ละแผ่นจะใช้สารเคลือบผิวที่มีค่าความต้านทานสูงซึ่งจะทำให้กระแสไหลวนที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กที่ใช้แกนเหล็กแผ่นบาง ๆ อัดซ้อนกันมีค่าลดลงอย่างมาก ดังนั้นจึงทำให้กำลังสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวนมีค่าลดลงหรือมีค่าน้อยลงตามไปด้วย กระแสไหลวนที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กที่มีเนื้อเดียวกันตลอดและในแกนเหล็กที่เป็นแผ่นบางอัดซ้อนกันแสดงได้ดังภาพที่ 2.9 ดังนั้นเราจึงไม่นำเอาแกนเหล็กที่มีเนื้อเดียวกันตลอด หรือแกนเหล็กตันมาใช้กับแรงดันแม่เหล็กไฟฟ้ากระแสสลับ



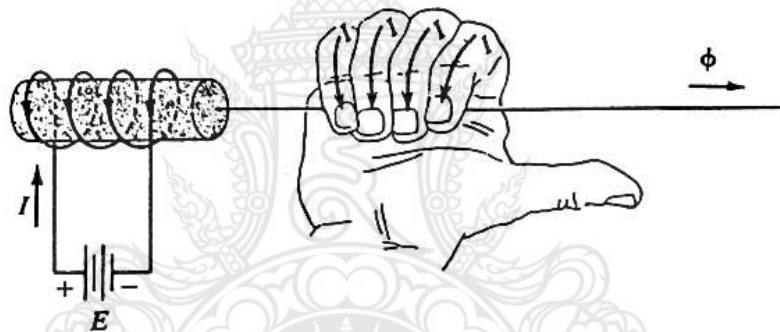
ภาพที่ 2.9 การเกิดกระแสไหลวนในแกนเหล็ก

### 2.1.4 สนามแม่เหล็ก (Magnetic Field)

สนามแม่เหล็กหมายถึงบริเวณหรือพื้นที่ที่มีเส้นแรงแม่เหล็กส่งผ่านไปถึง บางครั้งก็เรียกว่าสนามเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic field of force) และเส้นแรงแม่เหล็กนี้ถือว่ามีทิศทางออกจากขั้วเหนือของแม่เหล็กผ่านอากาศหรือตัวกลางอื่น ๆ ไปยังขั้วใต้ของแม่เหล็ก และเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะครบวงจรของตัวเอง และก็จะไม่ตัดซึ่งกันและกัน สนามแม่เหล็กมีหน่วยวัดเป็นเวเบอร์ (Weber, Wh) ใช้สัญลักษณ์  $\Phi$  โดย 1 เวเบอร์มีค่าเท่ากับ  $10^8$  เส้น

### 2.2 ฟลักแม่เหล็ก (Flux ; $\phi$ )

ฟลักแม่เหล็ก ในวงจรแม่เหล็กเปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า เรากำหนดทิศทางของการไหลของฟลักแม่เหล็กด้วยเส้นแนวจินตภาพ (Imaginary line) ได้เช่นเดียวกันกับกระแสไฟฟ้า และทิศทางหรือทางเดินของฟลักแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงได้เหมือนกับกระแสไฟฟ้า



ภาพที่ 2.10 ทิศทางของฟลักแม่เหล็กโดยการกำมือขวาที่แกนเหล็กตัวนำแม่เหล็ก

ทิศทางของฟลักแม่เหล็กหาได้โดยการกำมือขวาที่แกนตัวนำแม่เหล็กในภาพที่ 2.10 และหาบนิ้วทั้ง 4 ตามทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในขดลวด โดยนิ้วหัวแม่มือแทนทิศทางการไหลของฟลักแม่เหล็กที่ตัวนำแม่เหล็กนั้น

ถ้าทราบค่าฟลักแม่เหล็ก ( $\Phi$ ) และพื้นที่หน้าตัดของแกนตัวนำแม่เหล็ก (A) จะช่วยให้ทราบค่า ความหนาแน่นของฟลัก (Flux Density ; B) ได้

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (2.4)$$

ตารางที่ 2.1 แสดงหน่วยในระบบอังกฤษ,SI

หน่วยในระบบอังกฤษ	หน่วยในระบบ SI
$\Phi$ = เส้น (lines)	$\Phi$ = เวเบอร์ (Wb)
$B$ = เส้น/ตารางนิ้ว (lines/in <sup>2</sup> )	$B$ = เวเบอร์/ตารางนิ้ว (Wb/m <sup>2</sup> )
$A$ = ตารางนิ้ว (in <sup>2</sup> )	$A$ = ตารางเมตร (m <sup>2</sup> )

$$1 \text{ เวเบอร์ (Wb)} = 10^8 \text{ เส้น (lines)}$$

### 2.2.1 ความต้านทานฟลักแม่เหล็ก (Reluctance)

ในวงจรไฟฟ้ามีความต้านทาน (resistance) เป็นตัวต้านการไหลของกระแสไฟฟ้า ในทำนองเดียวกันวงจรแม่เหล็กก็มีตัวต้านการไหลของฟลักแม่เหล็กซึ่งเรียกว่า ความต้านทานฟลักแม่เหล็ก ความต้านทานของขดลวดทองแดงในวงจรไฟฟ้าหาค่าได้ดังนี้

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $R$  = ความต้านทานของขดลวดทองแดง  
 $\rho$  = ความต้านทานจำเพาะของขดลวดทองแดง  
 $l$  = ความยาวของขดลวดทองแดง  
 $A$  = พื้นที่หน้าตัดของขดลวดทองแดง

แทนค่าความต้านทานจำเพาะ (*resistivity* ;  $\rho$ ) ด้วยความนำจำเพาะ (*conductivity* ;  $\sigma$  ; ซึ่งเป็นส่วนกลับของความต้านทานจำเพาะ) ลงในสมการ

$$R = \frac{l}{\sigma A} \quad (2.6)$$

ในทำนองเดียวกัน สมการความต้านทานฟลักแม่เหล็กจะมีค่าเป็น

$$R_m = \frac{l}{\mu A} \quad (2.7)$$

- เมื่อ  $R_m$  = ความต้านทานฟลักแม่เหล็ก  
 $l$  = ความยาวของแกนตัวนำ  
 $A$  = พื้นที่หน้าตัดของแกนแม่เหล็ก  
 $\mu$  = ซึมซาบจำเพาะของตัวนำแม่เหล็ก

## 2.3 หม้อแปลงเฟสเดียว

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นเครื่องกลไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่ถ่ายเทพลังงานไฟฟ้าจากวงจรไฟฟ้าหนึ่งไปยังอีกวงจรไฟฟ้าหนึ่งโดยที่ความถี่ไม่เปลี่ยนแปลงนั้นก็หมายความว่าหม้อแปลงไฟฟ้านั้นสามารถเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าได้คือเพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้าและยังสามารถเพิ่มหรือลดกระแสไฟฟ้าได้อีกด้วยแต่ไม่สามารถเพิ่มหรือลดความถี่ของไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้าจะใช้ได้กับไฟฟ้ากระแสสลับเท่านั้น

### 2.3.1 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer Construction)

หม้อแปลงไฟฟ้ามีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน คือ

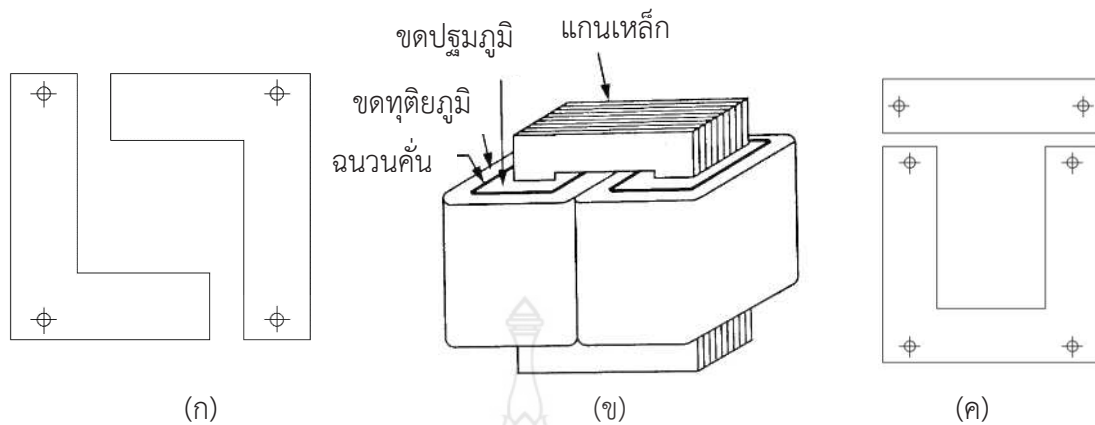
#### 1. ขดลวด (Winding)

หม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยขดลวดสองขดคือขดลวดที่ทำหน้าที่รับแรงดันไฟฟ้าเข้ามาเราเรียกขดลวดนี้ว่าขดปฐมภูมิหรือขดอินพุต (Primary Winding or Input winding) ส่วนขดลวดอีกขดหนึ่งคือขดลวดที่ทำหน้าที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าออกไปให้กับโหลดเราเรียกขดลวดนี้ว่าขดทุติยภูมิหรือขดเอาต์พุต (Secondary winding or Output winding)

#### 2. แกนเหล็ก (Core)

แกนเหล็กที่ใช้ทำหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ และเป็นแผ่นเหล็กที่มีส่วนผสมของซิลิกอนแกนเหล็กอาจจะทำเป็นแผ่นยาวรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือเป็นรูปตัว L มาเรียงเข้าด้วยกันแกนเหล็กที่เป็นแผ่นยาวสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะขอเป็นวงรอบขดลวดแกนเหล็กนี้จะมี ความต้านทานแม่เหล็กต่ำแกนเหล็กหม้อแปลงไฟฟ้าที่นิยมใช้กันทั่ว ๆ ไปมี 3 แบบคือ

2.1 แบบแกนหรือแบบคอร์ (Core type) แกนเหล็กแบบนี้จะมีลักษณะเป็นรูปตัว L สองตัวประกบเข้าหากันดังแสดงในภาพที่ 2.11 (ก) และมีการพันขดลวดไว้ที่ขาของแกนเหล็กทั้ง 2 ด้านดังแสดงในภาพที่ 2.11 โดยขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิจะพันไว้แต่ละด้านของแกนเหล็กแต่ถ้าขดลวดมีหลายขดจะต้องคั่นระหว่างขดด้วยฉนวนและจะพันขดลวดแรงดันไฟฟ้าต่ำไว้ชั้นในสุดนอกจากแกนเหล็กจะถูกออกแบบเป็นรูปตัว L แล้วยังอาจจะถูกออกแบบเป็นรูปตัว U และ I ดังแสดงในภาพที่ 2.11 (ค)

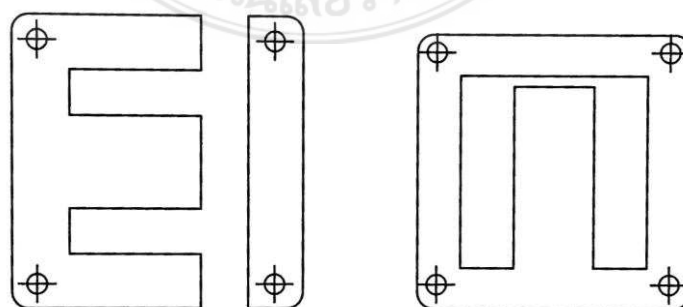


ภาพที่ 2.11 ลักษณะแกนเหล็กแบบแกนหรือแบบคอร์

2.2 แบบเชลล์ (Shell type) แกนเหล็กแบบนี้มีลักษณะเป็นรูปตัว E กับ I ดังนั้นจึงนิยมเรียกแกนเหล็กแบบนี้ว่าแกนเหล็กแบบ EI โดยแกนเหล็กแบบนี้จะพันขดลวดไว้ที่ขากลางของแกนเหล็กซึ่งขากลางของแกนเหล็กนี้จะมีขนาดเป็น 2 เท่าของขาริมทั้ง 2 ด้านลักษณะแกนเหล็กและการพันขดลวดแสดงได้ดังภาพที่ 2.11 (ก) และภาพที่ 2.11 (ข) แกนเหล็กแบบนี้บางครั้งอาจออกแบบเป็นรูปตัว M ดังแสดงในภาพที่ 2.12 แกนเหล็กแบบนี้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะถูกแยกออกเป็น 2 ส่วนดังแสดงในภาพที่ 2.13

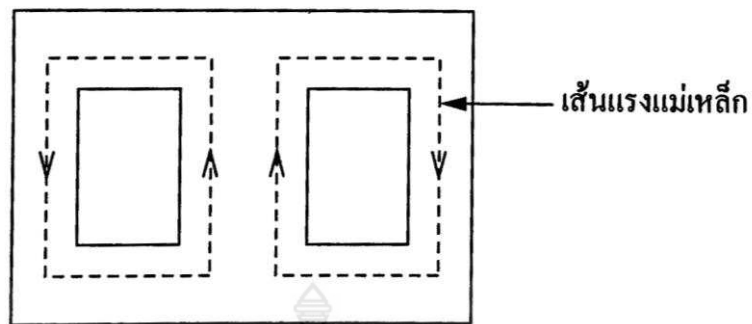


ภาพที่ 2.11 ลักษณะแกนเหล็กแบบเชลล์



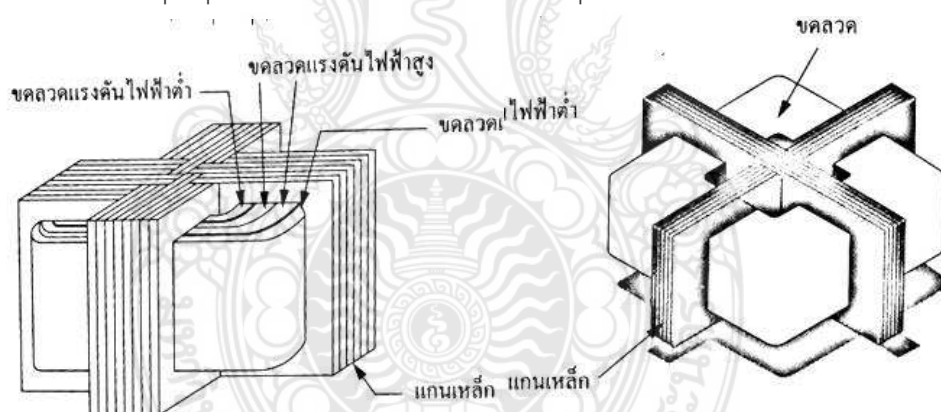
ภาพที่ 2.12 แสดงลักษณะแกนเหล็กแบบเชลล์ที่ให้เป็นแบบตัว M





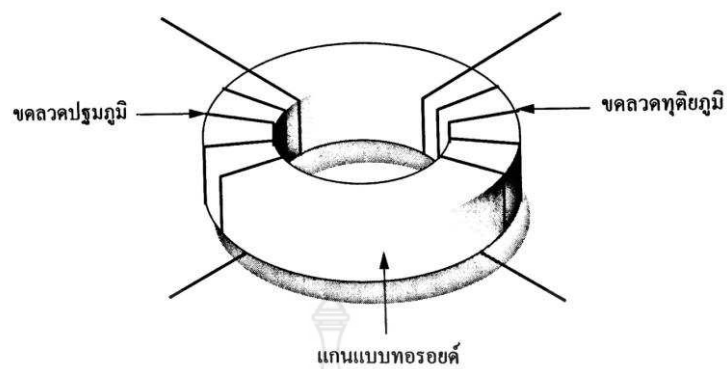
ภาพที่ 2.13 ลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กบนแกนเหล็ก

2.3 แบบ H แกนเหล็กแบบนี้เป็นการรวมกันระหว่างแกนเหล็กแบบคอร์กับแบบเชลล์หรือรวมแบบตัว L เข้ากับแบบ EI หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้แกนเหล็กแบบ H พร้อมการพันขดลวดแสดงได้ดังภาพที่ 2.14 ซึ่งเป็นรูปที่มองจากด้านบนโดยขดลวดจะจัดไว้เป็นส่วน ๆ คือขดลวดแรงดันไฟฟ้าสูงจะถูกพันไว้ระหว่างขดลวดชุดแรงดันไฟฟ้าต่ำทั้งสองชุดและระหว่างขดลวดแต่ละชุดจะคั่นด้วยฉนวน การพันขดลวดแบบนี้จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลน้อยที่สุดซึ่งหม้อแปลงอาจจะเป็นชนิดแปลงแรงดันไฟฟ้าขึ้น (Step-up) หรือแปลงแรงดันไฟฟ้าลง (Step-down) ก็ได้



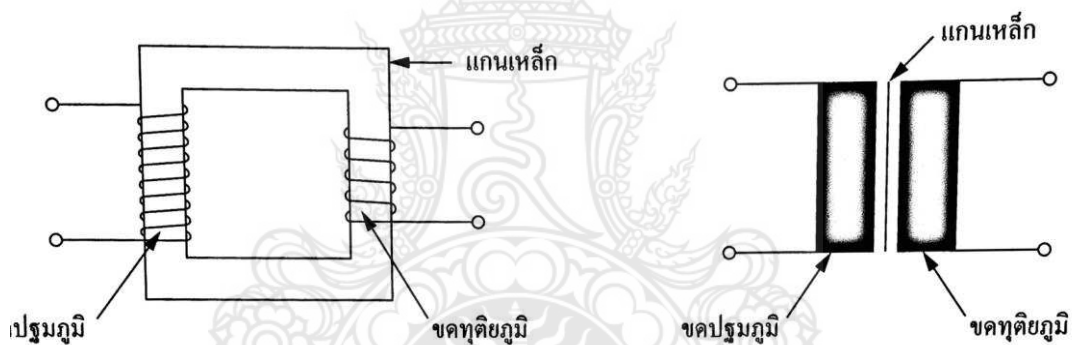
ภาพที่ 2.14 ลักษณะหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้แกนเหล็กแบบ H

แกนเหล็กหม้อแปลงไฟฟ้าโดยทั่วไปแล้วจะนิยมใช้แบบคอร์และแบบเชลล์นอกจากนี้ยังอาจใช้แกนเหล็กที่เรียกว่าทอรอยด์ (Toroidal) ซึ่งเป็นการใช้งานพิเศษทอรอยด์จะมีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมากกว่าแกนเหล็กชนิดอื่นลักษณะของแกนทอรอยด์แสดงได้ดังภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.15 หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้แกนแบบทอรอยด์

จากที่กล่าวมาแล้วว่าหม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยขดลวด 2 ขดซึ่งสามารถเขียนรูปพื้นฐานและสัญลักษณ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ดังแสดงในภาพที่ 2.16

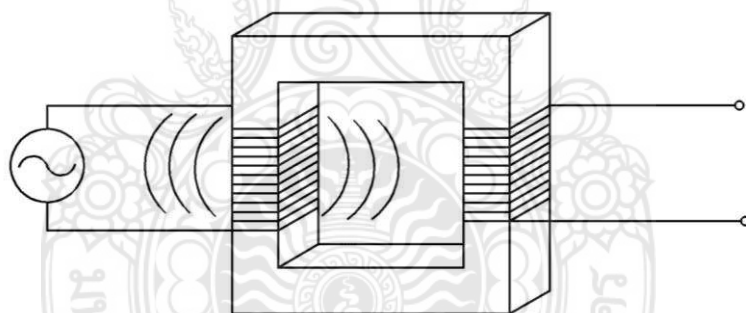


ภาพที่ 2.16 รูปพื้นฐานและสัญลักษณ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า

### 2.3.2 การทำงานเบื้องต้นของหม้อแปลงไฟฟ้า (Basic Operation Principles of Transformer)

เครื่องมือสิ่งหนึ่งที่มีประโยชน์มากที่สุดในระบบไฟฟ้ากระแสสลับและมีความสะดวกสบายในการที่จะเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าโดยการใช้เครื่องกลไฟฟ้าที่อยู่กับที่เครื่องมือนั้นก็คือหม้อแปลงไฟฟ้าเพราะหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่ไม่มีสิ่งหนึ่งสิ่งใดเคลื่อนที่เลย ดังนั้นค่าบำรุงรักษาจึงต่ำและเป็นเครื่องกลไฟฟ้าชนิดเดียวที่ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าก็อาศัยหลักการพื้นฐานคือสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงไปตัดกับตัวนำทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำนั้น จากวงจรพื้นฐานของหม้อแปลงไฟฟ้ารูปที่ 2.16 ซึ่งประกอบด้วยขดลวด 2 ขดเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดปฐมภูมิจะทำให้มีกระแสไหลในขดปฐมภูมินั้นและจะเกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นที่ขดปฐมภูมิเมื่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดปฐมภูมิเพิ่มจากศูนย์จนกระทั่งถึง

สูงสุดทางด้านบวกสนามแม่เหล็กจะแผ่กระจายอยู่รอบ ๆ ขดลวดเมื่อกระแสไฟฟ้าลดลงจากสูงสุดทางบวกจนกระทั่งเป็นศูนย์สนามแม่เหล็กจะยุบตัวลงและเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสูงสุดไปทางลบสนามแม่เหล็กก็จะแผ่กระจายอีกแต่มีขั้วตรงกันข้ามกับตอนแรกสนามแม่เหล็กจะยุบตัวอีกเมื่อกระแสไฟฟ้าลดลงจากสูงสุดทางด้านลบจนกระทั่งถึงศูนย์สนามแม่เหล็กจะแผ่กระจายและยุบตัวลงจะเป็นเช่นนี้ตลอดไปและสนามแม่เหล็กที่แผ่กระจายและยุบตัวนี้จะตัดกับขดลวดปฐมภูมิทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดปฐมภูมิแรงดันไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำขึ้นนี้จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดปฐมภูมินั้นแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดปฐมภูมินี้เป็นการเหนี่ยวนำที่ขดปฐมภูมิเองจึงเรียกการเหนี่ยวนำนี้ว่าการเหนี่ยวนำตัวเอง (Self induction) และแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ขดลวดปฐมภูมินี้เรียกว่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับหรือแรงดันไฟฟ้าต่อต้าน (Counter e.m. or Back e.m.) และกระแสที่ไหลในหม้อแปลงขณะไม่มีโหลดนี้เรียกว่ากระแสกระตุ้น (Excited current) เนื่องจากขดทุติยภูมินั้นพันอยู่บนแกนเหล็กเดียวกันกับขดปฐมภูมิจึงทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดทุติยภูมิการเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดทุติยภูมินี้เรียกว่าการเหนี่ยวนำร่วม (Mutual induction) แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขด ทุติยภูมิจะสามารถหาได้จากอัตราส่วนของจำนวนรอบขดลวดทุติยภูมิกับขดปฐมภูมิ



ภาพที่ 2.17 เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น

กระแสที่ไหลเข้าขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้านั้นถูกจำกัดโดย 3 องค์ประกอบ คือ

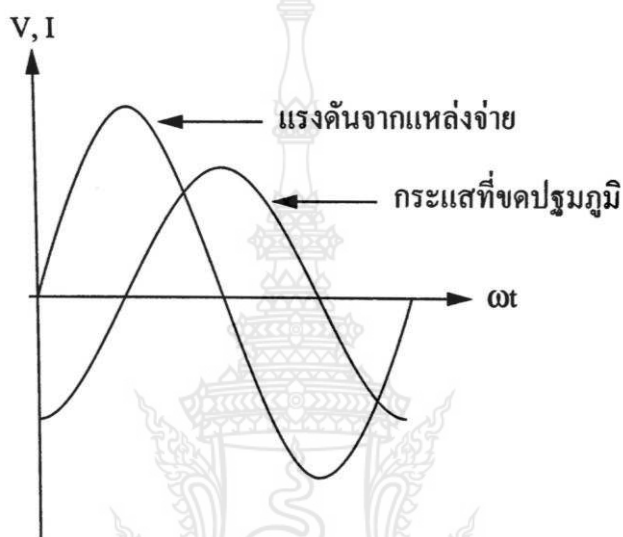
1. แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไฟ
2. ความต้านทานของขดลวดขุดปฐมภูมิ
3. การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก

สามารถหาได้จากค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ที่เกิดขึ้นที่ขดลวดปฐมภูมิเมื่อต่อเข้ากับแหล่งจ่าย



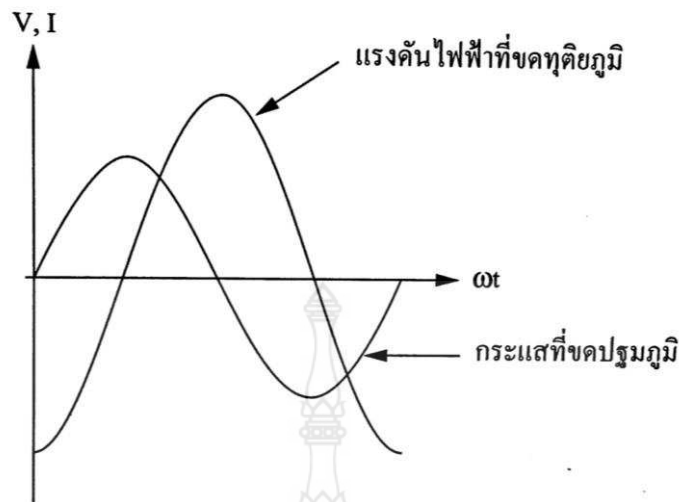
### 2.3.3 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าในหม้อแปลง

เมื่อขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแต่ทางด้านขดทุติยภูมิไม่ได้ต่อเข้ากับโพลตกระแสที่ไหลในขดปฐมภูมิจะถูกจำกัดโดยค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ของขดปฐมภูมินั้นซึ่งเป็นจุดสำคัญของขดลวดตัวนำกระแสไฟฟ้านี้เรียกว่ากระแสกระตุ้นโดยกระแสกระตุ้นนี้จะล่าหลัง (Lagging) แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดปฐมภูมิเป็นมุม 90 องศาจากรูปคลื่นที่แสดงในภาพที่ 2.18



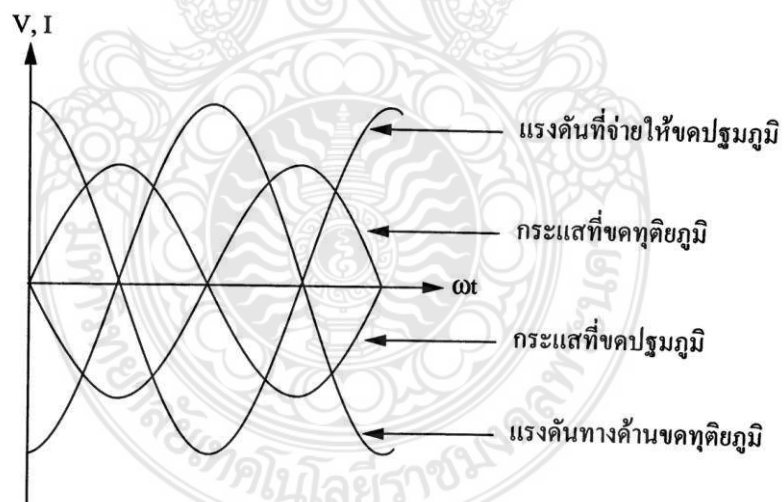
ภาพที่ 2.18 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดปฐมภูมิล่าหลังแรงดันไฟฟ้า 90 องศาขณะไม่มีโหลด

สนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดปฐมภูมิจะไปตัดกับขดลวดทุติยภูมิทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดทุติยภูมิซึ่งแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นนี้จะล่าหลังกระแสที่ขดในขดปฐมภูมิเป็นมุม 90 องศาแสดงในรูปคลื่นภาพที่ 2.19 แต่แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดปฐมภูมินำหน้ากระแสที่ไหลในขดปฐมภูมิอยู่ 90 องศา ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดทุติยภูมิจึงล่าหลังแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดปฐมภูมิเป็นมุม 180 องศาและแรงดันไฟฟ้าที่ขดทุติยภูมินี้จะเกิดพร้อม (Inphase) กับแรงดันไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำขึ้นในขดปฐมภูมิ



ภาพที่ 2.19 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่ขดทุติยภูมิล่าหลังกระแสที่ขดปฐมภูมิ 90 องศา

เมื่อต่อโหลดเข้ากับทางด้านขดทุติยภูมิจะทำให้มีกระแสไหลในขดทุติยภูมิเพราะว่าหม้อแปลงเป็นอินดักทีฟกระแสที่ขดทุติยภูมิจะล่าหลังแรงดันขดทุติยภูมิ 90 องศาเมื่อแรงดันที่ขดทุติยภูมิล่าหลังกระแสที่ขดปฐมภูมิอยู่ 90 องศากระแสที่ขดทุติยภูมิจะต่างเฟสกับกระแสที่ไหลในขดปฐมภูมิ 180 องศาดังแสดงในภาพที่ 2.20



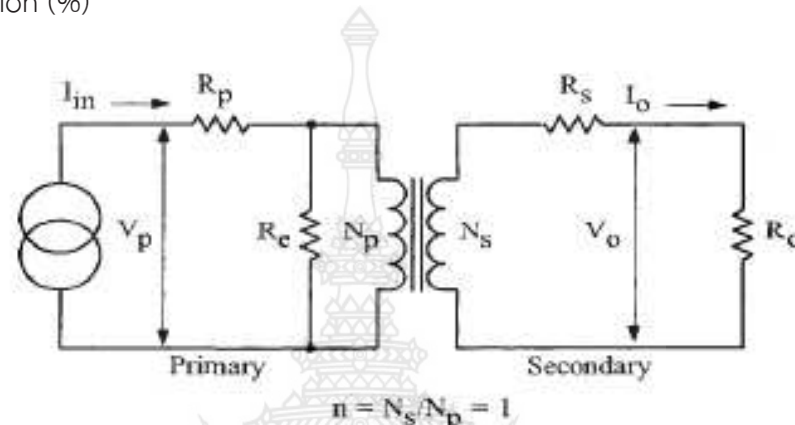
ภาพที่ 2.20 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิ

## 2.4 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

### 2.4.1 Voltage Regulation

หม้อแปลงขนาดเล็กโดยทั่วไปจะพิจารณาจากการจำกัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหรือดูจากการควบคุมแรงดัน เราประมาณให้ขนาดและน้ำหนักให้น้อยที่สุด ในภาพที่ 2.21 แสดงให้เห็นถึง Circuit Diagram ของหม้อแปลงที่มีขดลวดทุติยภูมิหนึ่งขด

$\alpha$  = Regulation (%)



ภาพที่ 2.21 Transformer Circuit Diagram.

เมื่อประมาณให้หม้อแปลงมีขนาดและน้ำหนักน้อยที่สุดความจุไฟฟ้าที่กระจายในขดลวดทุติยภูมิสามารถละทิ้งไปได้ เพราะความถี่และแรงดันทางด้านขดลวดทุติยภูมิไม่ได้มากเกินกว่าค่าที่ยอมรับได้มาก ยิ่งกว่านั้นรูปทรงของขดลวดก็ถูกออกแบบให้จำกัดการรั่วไหลของเส้นแรง ให้อยู่ในระดับเพียงพอที่จะละทิ้งไปได้ ภายใต้สภาวะการทำงาน

Voltage Regulation ของหม้อแปลงคำนวณได้จาก

$$\alpha = \frac{V_o(\text{N.L.}) - V_o(\text{F.L.})}{V_o(\text{F.L.})} (100)\% \quad (2.8)$$

$$\text{หรือ } \alpha = \frac{P_{cu}}{P_o} (100)\%$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง  $K_g$  กับ Voltage Regulation

หม้อแปลงจะถูกออกแบบเพื่อให้มีอุณหภูมิการทำงานที่ต้องการเรายังสามารถออกแบบเพื่อให้มี Voltage Regulation ที่ต้องการได้ ซึ่งมีความสัมพันธ์ของ  $\alpha$  และ  $K_g$  ดังสมการ

$$\alpha = \frac{P_t}{2K_g K_e} \% \quad (2.9)$$

ค่าคงที่  $K_g$  พิจารณาจากรูปทรงของแกน ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$K_g = \frac{W_a A_c^2 K_u}{MLT} \text{ cm}^5 \quad (2.10)$$

ค่าคงที่  $K_e$  พิจารณาจากสภาวะการทำงานในทางไฟฟ้าและทางแม่เหล็ก ซึ่งมีความสัมพันธ์กัน ดังสมการ

$$K_e = 0.145 K_f^2 f^2 B_m^2 (10^{-4}) \quad (2.11)$$

เมื่อ  $f$  = ความถี่

$B_m$  = Flux Density

$K_f$  = Waveform Coefficient

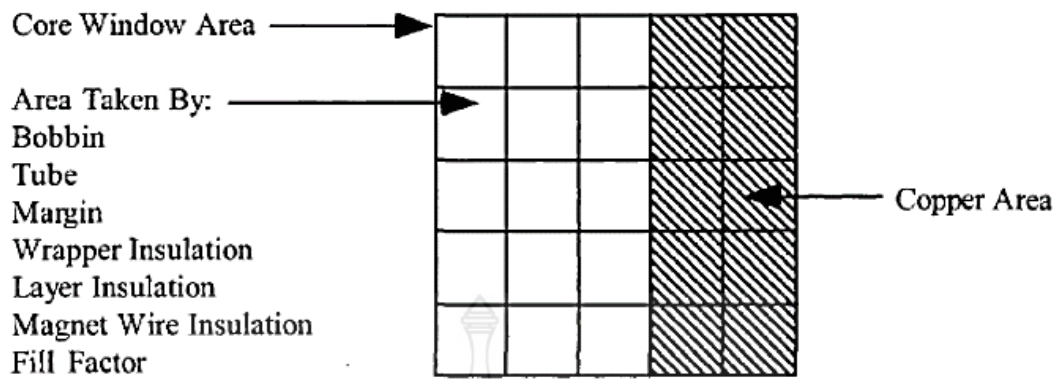
โดยเท่ากับ 4.0 เมื่อเป็น Square Wave 4.44 เมื่อเป็น Sine Wave จากสมการข้างบนจะเห็นว่า Flux Density ความถี่ที่ใช้งาน และรูปแบบของคลื่นนั้น มีผลกับขนาดของหม้อแปลง

#### 2.4.2 แฟคเตอร์ของพื้นที่ช่องว่างการพันขดลวด (Window utilization factor, $K_u$ )

ในแกนแม่เหล็กแต่ละชนิดมีช่องว่างสำหรับการพันขดลวด ในการออกแบบหม้อแปลงหรือตัวเหนี่ยวนำจะต้องคำนึงถึงค่าแฟคเตอร์ของช่องว่างที่จะบรรจุลวดตัวนำลงไปให้พอดีกับช่องว่างในแกนแม่เหล็กแต่ละชนิด ซึ่งสิ่งที่ต้องคำนึงถึงมีดังต่อไปนี้

1. ฉนวนของลวดตัวนำ (Wire Insulation)
2. การจัดวางลวดตัวนำ (Wire Lay)
3. พื้นที่ของบ็อบบิ้น (Bobbin)
4. ความต้องการของชั้นฉนวน หรือฉนวนระหว่างชั้นตัวนำ

ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อกันโดยตรงกับค่า  $K_u$  โดยปกติเราให้กำหนดให้ค่า  $K_u = 0.4$  ดังที่แสดงใน ภาพที่ 2.23



ภาพที่ 2.22 Window Area ที่ถูกพันโดยลวดตัวนำ

แฟกเตอร์  $K_u$  โดยทั่วไปคำนวณได้จากพื้นที่  $S_1, S_2, S_3$  และ  $S_4$

$$K_u = S_1 \times S_2 \times S_3 \times S_4 \quad (2.12)$$

โดยที่

$$S_1 = \frac{\text{พื้นที่หน้าตัดตัวนำ}}{\text{พื้นที่หน้าตัดตัวนำ} + \text{ฉนวน}} \quad (2.13)$$

$$S_2 = \frac{(\text{จำนวนรอบ})(\text{พื้นที่หน้าตัดตัวนำหนึ่งรอบ})}{\text{พื้นที่ช่องว่างที่สามารถใช้งานได้}} \quad (2.14)$$

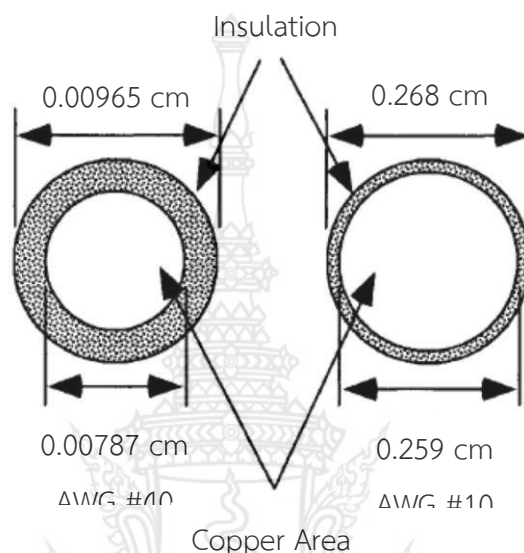
$$S_3 = \frac{\text{พื้นที่ช่องว่างที่สามารถใช้งานได้}}{\text{พื้นที่ช่องว่างทั้งหมด}} \quad (2.15)$$

$$S_4 = \frac{\text{พื้นที่ช่องว่างที่สามารถใช้งานได้}}{\text{พื้นที่ช่องว่างที่สามารถใช้งานได้} + \text{พื้นที่ฉนวน}} \quad (2.16)$$

#### 2.4.3 $S_1$ Wire Insulation

ในการออกแบบหม้อแปลงไม่ว่ากระแสสูงหรือกระแสต่ำอัตราส่วนของพื้นที่ตัวนำ (Ratio Of Conductor Area) ทั้งหมดอยู่ในช่วง 0.941 ถึง 0.673 ขึ้นอยู่กับขนาดของลวดตัวนำ ดังในภาพที่ 2.24 ความหนาของฉนวนทำให้ตัวนำมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากเกินไปจนความเป็นจริง แสดงให้เห็นว่าฉนวนมีผลกับขนาดพื้นที่ทั้งหมดของลวดตัวนำ

หากเราดูในภาพที่ 2.24 นั้น จะใช้สายตีเกลียวเพื่อลดผลของ Skin Effect จะทำให้เกิดผลกระทบที่สำคัญกับค่า Window Utilization factor,  $K_u$  ค่าของ  $S_1$  ไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของลวดตัวนำแต่ขึ้นอยู่กับจำนวนของลวดตัวนำ ในตารางที่ 3.1 แสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนของลวดตัวนำกับจำนวนในการใช้งานแต่ละประเภท เมื่อเราออกแบบหม้อแปลงกระแสต่ำควรวางอย่างยั้งที่จะนำค่าอัตราส่วนนี้มาประเมินค่า  $S_1$  เพราะหากฉนวนหนาขึ้นพื้นที่หน้าตัดตัวนำก็จะมากขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 2.23 เปรียบเทียบขนาดฉนวนของลวดตัวนำแต่ละขนาด

ตารางที่ 2.2 แสดงขนาดของอัตราส่วนฉนวนต่อขนาดตัวนำ

Magnetic Wire Data (Nominal)					
Size AWG	Bare Area (cm <sup>2</sup> )	Ratio Bare/Single	Ratio Bare/Heavy	Ratio Bare/Triple	Ratio Bare/Quad
10	0.1019	0.961	0.930	0.910	0.880
15	0.0571	0.939	0.899	0.867	0.826
20	0.0320	0.917	0.855	0.812	0.756
25	0.0179	0.878	0.793	0.733	0.662
30	0.0100	0.842	0.743	0.661	0.574
35	0.0056	0.815	0.698	0.588	0.502
40	0.0031	0.784	0.665	0.544	0.474



#### 2.4.4 $S_1$ Fill Factor

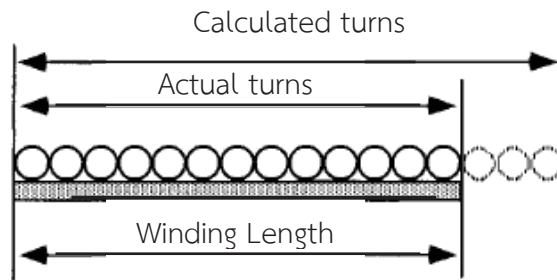
$S_1$  คือ แฟคเตอร์ของการวางลวดตัวนำ หรือ ชั้นของลวดตัวนำ สำหรับพื้นที่ช่องว่างที่สามารถใช้งานได้ เมื่อขดลวดมีจำนวนรอบมาก ๆ ทำให้มีความหนาแน่นของการเรียงตัวของลวดตัวนำสูงในการพันเราจะวางเรียงตัวนำใน Bobin ได้น้อยกว่าที่คำนวณประมาณ 10 – 15% ขึ้นอยู่กับเครื่องมือและทักษะในการพัน ดูที่ภาพที่ 2.25 ชั้นวางลวดตัวนำขึ้นอยู่กับ ความตึงของลวดตัวนำและคุณภาพของลวดตัวนำ เช่น ความต่อเนื่องของเส้นผ่านศูนย์กลางสายและเทคนิคการพันสาย ซึ่งขึ้นอยู่กับทักษะของผู้พันสาย แฟคเตอร์ของการวางลวดตัวนำมีความสัมพันธ์เปลี่ยนแปลงตามขนาดของสายในพื้นที่การวางสายดังแสดงให้เห็นในตาราง 2.3 และ 2.4 โดยตารางได้แสดงถึงด้านนอกของเส้นผ่านศูนย์กลางลวดตัวนำประเภทใช้งานหนักตั้งแต่เบอร์ 10 - 44 AWG

#### ตารางที่ 2.3 ตารางแฟคเตอร์การวางสาย

Wire Lay Factor For Layer Wound Coils			
AWG	Insulated Wire OD (inch)	Insulated Wire OD (cm)	Wire Lay Factor
10 to 25	0.1051 - 0.0199	0.2670 - 0.0505	0.90
26 to 30	0.0178 - 0.0116	0.0452 - 0.0294	0.89
31 to 35	0.0105 - 0.0067	0.0267 - 0.0170	0.88
36 to 38	0.0060 - 0.0067	0.0152 - 0.0124	0.87
39 to 40	0.0043 - 0.0038	0.0109 - 0.0096	0.86
41 to 44	0.0034 - 0.0025	0.00863 - 0.00635	0.85
Heavy film magnetic wire			

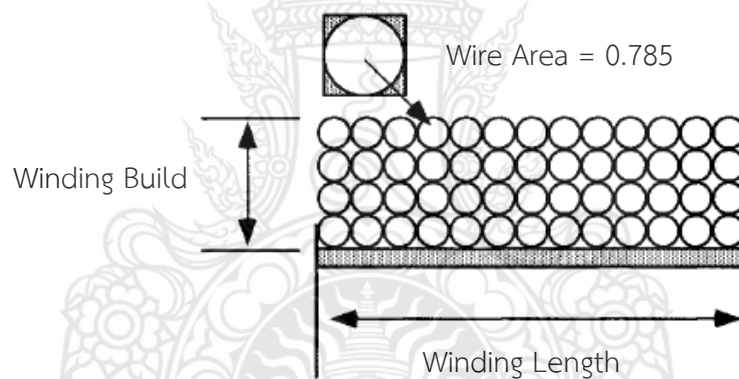
#### ตารางที่ 2.4 ตารางแฟคเตอร์เมื่อการวางสายไม่เป็นระเบียบ

Wire Lay Factor For Layer Wound Coils			
AWG	Insulated Wire OD (inch)	Insulated Wire OD (cm)	Wire Lay Factor
10 to 22	0.1051 - 0.0276	0.267 - 0.0701	0.90
23 to 39	0.0623 - 0.0109	0.0249 - 0.0043	0.85
40 to 44	0.0038 - 0.0025	0.0096 - 0.00635	0.75
Heavy film magnetic wire			



ภาพที่ 2.24 ความยาวของการวางสายที่สามารถทำได้ต่อพื้นที่การวาง

การวางสายในอุดมคติ 2 แบบคือการวางสายแบบสี่เหลี่ยม(Square)ดังแสดงใน ภาพที่ 2.26 และการวางสายแบบหกเหลี่ยม(Hexagonal)ดังแสดงในภาพที่ 2.27 การวางสายที่ง่ายที่สุดคือวางให้เสมอกันรอบต่อรอบและวางชั้นต่อชั้นดังในรูปที่ 2.26 การวางสายแบบสี่เหลี่ยม (Square) ทางทฤษฎีให้ใช้ค่าแฟคเตอร์เท่ากับ 0.785

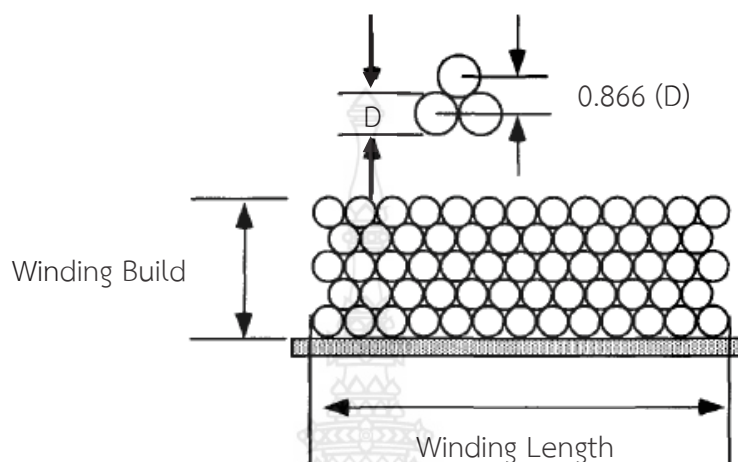


ภาพที่ 2.25 การวางสายแบบสี่เหลี่ยม (Square) แฟคเตอร์= 0.785

ตามที่ปรากฏจะดีกว่าหากใช้การวางสายแบบหกเหลี่ยม(Hexagonal)ดังแสดงในภาพที่ 2.27 เปรียบเทียบการวางสายแบบสี่เหลี่ยม (Square) ดังแสดงใน ภาพที่ 2.26 ในการวางสายแบบสี่เหลี่ยมนี้ความเป็นจริงเราไม่สามารถวางสายซ้อนทับด้านบนของกันและกันชั้นต่อชั้นได้อย่างสม่ำเสมอเหมือนการวางสายแบบสี่เหลี่ยมในอุดมคติ เพราะจะมีร่องของสายชั้นที่ต่ำกว่าเมื่อเราพันในชั้นต่อไปในการพันแบบหกเหลี่ยมนี้สายจะมีความแน่นมากที่สุดการวางสายแบบหกเหลี่ยม(Hexagonal)จะมีค่าทางทฤษฎีที่ยอมรับได้เท่ากับ 0.9072 การวางสายแบบสี่เหลี่ยม(Square) ที่ใช้ค่า 0.785 เป็นไปไม่ได้ที่จะพันได้สำเร็จโดยไม่มีชั้นฉนวนกันแต่ละชั้นของการพัน ฉนวนที่เพิ่มเข้ามาจะลดค่าแฟคเตอร์การวางสายลง และหากใช้การวางสายแบบหกเหลี่ยม(Hexagonal) ที่ใช้ค่า 0.907 ก็เป็นเรื่องยากเพราะการพันการวางสายแบบหกเหลี่ยม (Hexagonal) ด้วยมือ นั้น จะเกิดผลในการพันตามมาดังนี้



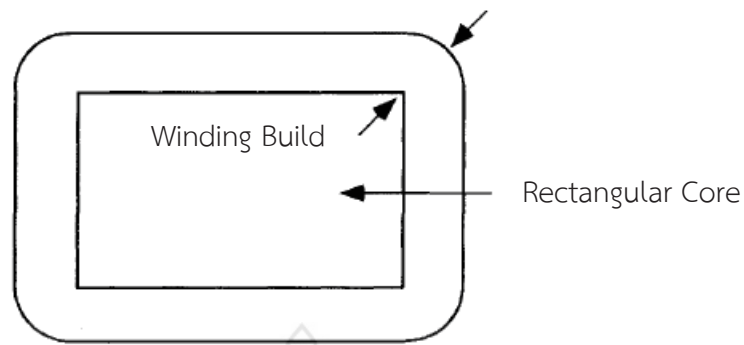
ในชั้นแรกการพันจะสามารถพันได้อย่างเรียบร้อยในชั้นที่สองความยากในการพันจะเกิดขึ้นและชั้นที่สาม,สี่และชั้นต่อ ๆ ไปจะทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของขดลวดเกิดขึ้น วิธีการพันแบบนี้จึงเหมาะกับงานที่มีจำนวนรอบน้อย ๆ หากงานมีจำนวนรอบมาก ๆ อาจทำให้ขดลวดที่พันเสร็จไม่เป็นระเบียบเรียบร้อยได้



ภาพที่ 2.26 การวางสายแบบหกเหลี่ยม (Hexagonal) แฟคเตอร์ = 0.907

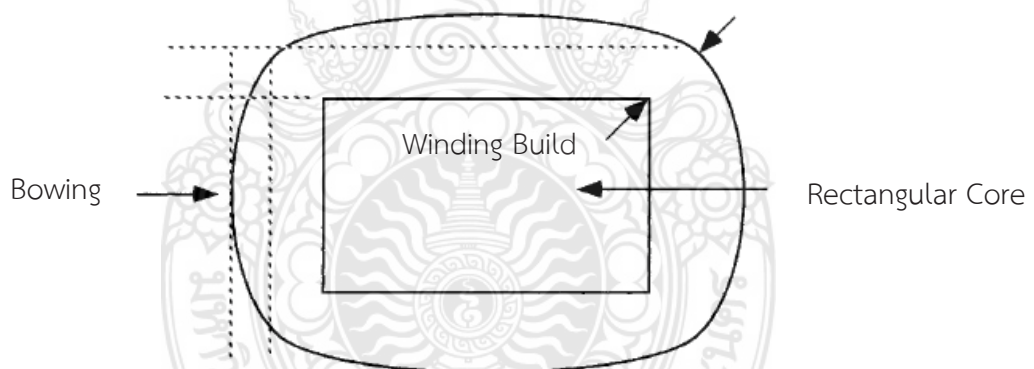
การพันขดลวดในอุดมคติของ Bobbin ทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก ดังแสดงในภาพที่ 2.27 ในการพันขดลวดบน Bobbin ทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก ความสูงของชั้นขดลวดต้องไม่ออกนอกขอบเขตของ Bobbin ไม่ล้นออกมาหรือสูงจนเกิดความโค้ง (Bowling) ดังแสดงในภาพที่ 2.26 ความโค้งของขดลวดขึ้นอยู่กับสัดส่วนของขดลวดและความสูงของขดลวดโดยปกติที่ใช้งานอยู่จริงควรลดการพันขดลวดลง 15 ถึง 20% หรือ 0.85X ของการพันปกติ จะทำให้ผลของความโค้งของขดลวด (Bowling) จะไม่สำคัญอีกต่อไป

สุดท้ายเมื่อการเปรียบเทียบการวางสายแบบสี่เหลี่ยม (Square) โดยใช้แผ่นฉนวนวางแต่ละชั้นกับแบบการวางสายแบบหกเหลี่ยม (Hexagonal) และพันบิดเบี้ยวไม่เป็นระเบียบ ทั้งสองแบบดูเหมือนว่าจะมีค่าแฟคเตอร์การวางสายอยู่ที่ประมาณ 0.61 ตัวอย่างเช่น เมื่อเราออกแบบเราต้องมี Bobbin ที่เหมาะสม มีขนาดสายและจำนวนรอบการพันที่เหมาะสม นี่คือนิสัยปกติทั่วไปที่เกิดขึ้นในการออกแบบ

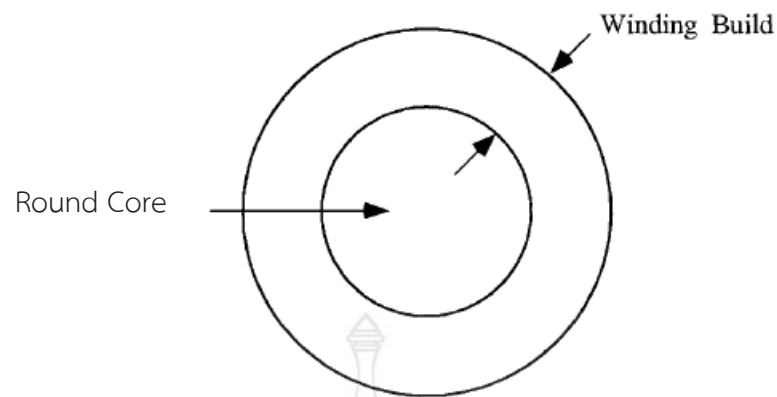


ภาพที่ 2.27 ขดลวดอุดมคติใน Bobbin ทรงสี่เหลี่ยม

การทำให้ลดของความโค้ง (Bowling) ให้ลดลงต่ำสุดนั้น Bobbin แบบทรงกลม ดังแสดงในภาพที่ 2.30 จะเหมาะกับการออกแบบที่สุด เพราะ Bobbin แบบทรงกลม จะให้แรงดึงที่สม่ำเสมอทั้ง 360 องศา รอบ ๆ Bobbin ทั้งสำหรับชั้นที่เหมือนกันและชั้นที่ไม่เป็นระเบียบ และประโยชน์อื่นของการใช้ Bobbin แบบทรงกลมคือลดการรั่วไหลการเหนี่ยวนำ ที่มาจากผลของความโค้ง (Bowling) ที่เกิดจากการพันขดลวด



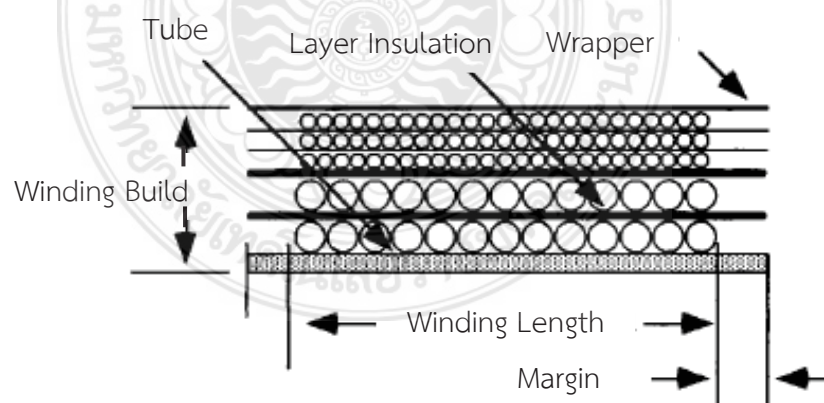
ภาพที่ 2.28 ความโค้ง (Bowling) ของขดลวด ในหม้อแปลง



ภาพที่ 2.29 Round Bobbin

#### 2.4.5 $S_3$ Effective Window

Effective Window,  $S_3$  เป็นตัวกำหนดขนาดพื้นที่ว่างของ Window ที่ถูกใช้ในการพันขดลวด ซึ่งพื้นที่ที่เกิดจากการพันขดลวดสำหรับผู้ออกแบบนั้น ขึ้นอยู่กับการกำหนดค่าของ Bobbin หรือ Tube ในการออกแบบชั้นของขดลวดนั้น หากใช้ Tube จำเป็นต้องใช้พื้นที่ขอบ (Margin) ดังแสดงในภาพที่ 2.31 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Margin นั้นจะแปรเปลี่ยนไปตามขนาดของสาย ดังเช่นในตาราง 2.5 หากเราดูในภาพที่ 2.31 และตาราง 2.5 จะเห็นได้ว่า Margin ลดพื้นที่ของ Window ได้อย่างไร เมื่อสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าขึ้นโดยใช้เทคนิคการพัน ความหนาของชั้นฉนวนที่วางบนชั้นขดลวดต้องเป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ซึ่งความหนาของฉนวนที่เราจะใช้นั้นต้องดูตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสาย ดังแสดงในตารางที่ 2.6



ภาพที่ 2.30 Transformer Winding with Margins

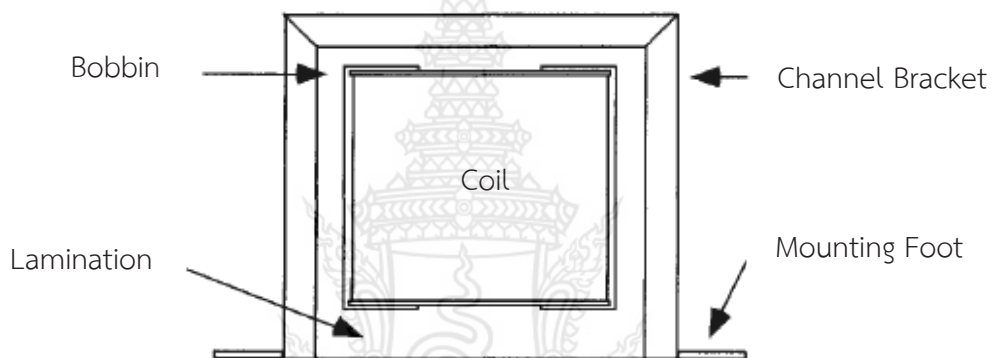
ตารางที่ 2.5 ระยะขอบของขดลวด

Winding Margins Versus AWG		
AWG	Margin	
	cm	inch
10 - 15	0.635	0.25
16 - 18	0.475	0.187
19 - 21	0.396	0.156
22 - 31	0.318	0.125
32 - 37	0.236	0.093
38 - up	0.157	0.062

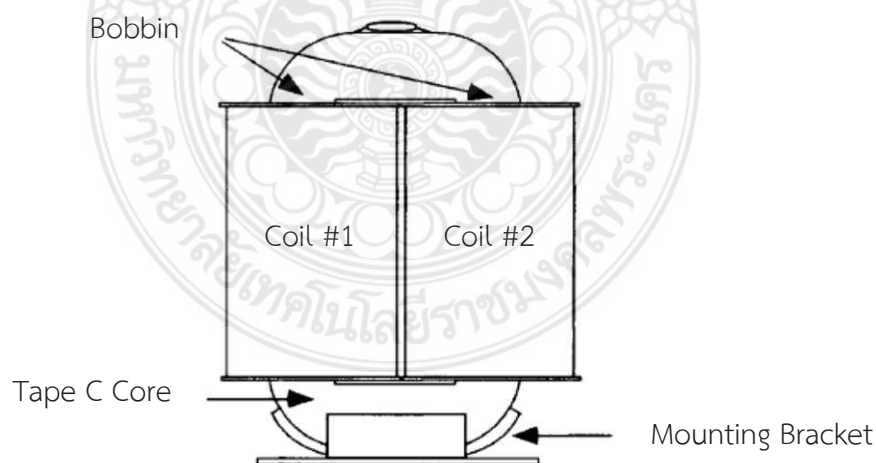
ตารางที่ 2.6 ความหนาของชั้นฉนวน

Layer Insulation Thickness		
AWG	Insulation Thickness	
	cm	inch
10 - 16	0.02540	0.01000
17 - 19	0.01780	0.00700
20 - 21	0.01270	0.00500
22 - 23	0.00760	0.00300
24 - 27	0.00510	0.00200
28 - 33	0.00381	0.00150
34 - 41	0.00254	0.00100
42 - 46	0.00127	0.00050

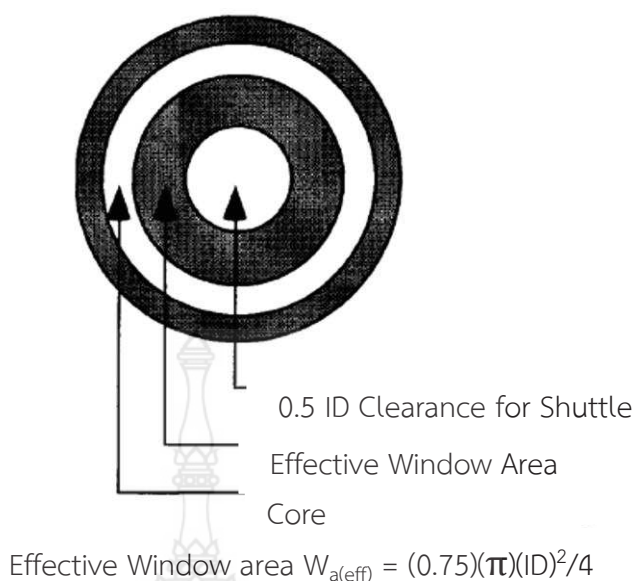
ในการออกแบบ หม้อแปลง Bobbin เดี่ยว ดังแสดงในภาพที่ 2.32 พิจารณาให้ใช้ค่า Effective Area,  $W_a$  ระหว่าง 0.835 ถึง 0.929 สำหรับแกน Laminated และ 0.55 ถึง 0.75 สำหรับแกน Ferrites และในการออกแบบ หม้อแปลงแบบ Bobbin คู่ ดังแสดงในภาพที่ 2.33 พิจารณาให้ใช้ค่า Effective Area,  $W_a$  ระหว่าง 0.687 ถึง 0.873 สำหรับแกนแบบแท็บ C มีข้อแตกต่างเล็กน้อยในแกน Toroid ในเทอม  $S_3$  จะเป็นตัวกำหนดว่ามีพื้นที่ของ Window ที่สามารถพันขดลวดได้จริงอยู่เท่าไร ในการพันบนแกน Toroid นั้น จะต้องมีช่องว่างให้กระสวย (Shuttle) สามารถผ่านไปมาได้ หากครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในสำรองไว้ให้กระสวย (Shuttle) จะมีค่า 75% ของ Window Area,  $W_a$  หลังจากการออกแบบที่ผ่านๆ มาค่าที่ดีที่สุดซึ่งก็คือค่า  $S_3 = 0.75$  และแกน Toroid ก็จัดอยู่ในหมวดหมู่ข้างต้นเช่นกัน



ภาพที่ 2.31 โครงสร้างหม้อแปลงแบบ Single Bobbin



ภาพที่ 2.32 โครงสร้างหม้อแปลงแบบ Dual Bobbin



ภาพที่ 2.33 Effective Winding Area ของแกน Toroidal

## 2.5 การทดสอบหม้อแปลงและประสิทธิภาพ

### 2.5.1 การทดสอบหม้อแปลง (Transformer Test)

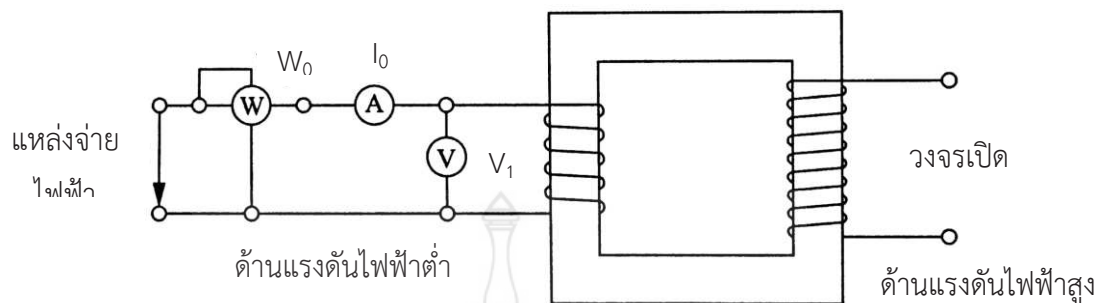
การทดสอบหม้อแปลงก็เพื่อ หาค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กและกำลังสูญเสียในลวดทองแดง ซึ่งเมื่อเราทราบค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กและกำลังสูญเสียในลวดทองแดงแล้วจะทำให้เราสามารถ คำนวณหาประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ การทดสอบหม้อแปลงหากำลังสูญเสียนี้สามารถ ทดสอบได้จากการทดสอบขณะวงจรเปิดและการทดสอบขณะลัดวงจร

#### 1. การทดสอบขณะวงจรเปิด (Open Circuit Test)

การทดสอบขณะวงจรเปิดหรือการทดสอบขณะไม่มีโหลด (No load test) หรือบางครั้งอาจ เรียกว่าการทดสอบเพื่อหาการสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss or iron loss test) เพราะการ ทดสอบนี้จะทำให้หาค่าการสูญเสียในแกนเหล็กได้ การทดสอบขณะวงจรเปิดกระทำในการแสดงใน รูป 2.34 ซึ่งจะเห็นว่าเป็นการจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าขดแรงดันไฟฟ้าต่ำ ในการทดสอบแบบวงจรเปิด จะนิยมจ่ายไฟเข้าทางด้านขดลวดแรงดันไฟฟ้าต่ำ เพราะว่าสะดวกต่อการหาเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า โดยเฉพาะวัตต์มิเตอร์ ดังนั้นเราจะต้องทำการตรวจสอบหม้อแปลงเสียก่อนว่าขดปฐมภูมิหรือขดทุติย ภูมิเป็นขดขดแรงดันไฟฟ้าต่ำด้วยการใช้โอห์มมิเตอร์ จากรูป 2.35 ด้านขดแรงดันไฟฟ้าต่ำจะมี เครื่องมือวัดทางไฟฟ้าต่ออยู่ คือ โวลต์มิเตอร์ แอมมิเตอร์ และ วัตต์มิเตอร์ ส่วนทางด้านขดลวด แรงดันไฟฟ้าสูงนั้นเปิดปลายไว้ โดยโวลต์มิเตอร์ทำหน้าที่ใช้ในการทดสอบ แอมมิเตอร์ทำหน้าที่วัด กระแสไหลในหม้อแปลงในขณะไม่มีโหลดซึ่งแทนด้วย  $I_0$  เรียกว่ากระแสขณะไม่มีโหลด (No load current) กระแสขณะไม่มีโหลดนี้จะมีค่าต่ำมากมีค่าประมาณ 2-10% ของกระแสขณะไม่มีโหลด เต็มที่ (Full load current or Rated load current) ส่วนวัตต์มิเตอร์นั้นทำหน้าที่วัดกำลังไฟฟ้าที่



เกิดขึ้นทั้งหมด ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่วัดได้นี้เป็นกำลังสูญเสียในแกนเหล็กที่เกิดขึ้นทั้งหมดแทนด้วย  $W_0$  และค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กนี้จะมีค่าคงที่ไม่ว่าหม้อแปลงนั้นจะมีโหลดหรือไม่มีโหลดก็ตาม



ภาพที่ 2.34 วงจรการทดสอบหม้อแปลงขณะไม่มีโหลด

ถ้าให้  $W_0$  = ค่าที่อ่านได้จากวัตต์มิเตอร์  
 $V_1$  = แรงดันที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์  
 $I_0$  = กระแสขณะไม่มีโหลดที่อ่านได้จากแอมมิเตอร์

ดังนั้นจะได้ว่า

$$W_0 = V_1 I_0 \cos \theta_0 \text{ W} \quad (2.17)$$

เมื่อ  $\cos \theta_0$  = เพาเวอร์แฟกเตอร์ของหม้อแปลงในขณะไม่มีโหลด

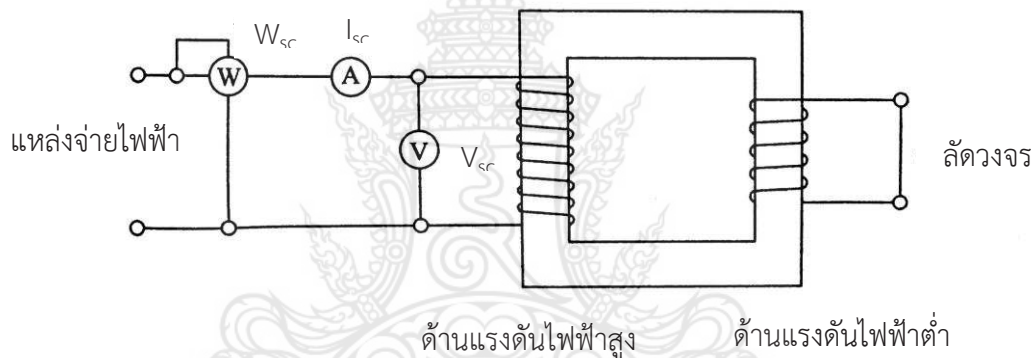
นั่น

$$\cos \theta_0 = \frac{W_0}{V_1 I_0} \quad (2.18)$$

## 2. การทดสอบขณะลัดวงจร (Short Circuit Test)

การทดสอบขณะลัดวงจร บางครั้งอาจเรียกว่าการทดสอบเพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance test) หรือการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังสูญเสียในลวดทองแดง (Copper loss test) เพราะว่าการทดสอบนี้จะทำให้หาค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ นอกจากจะหาค่าอิมพีแดนซ์สมมูลได้แล้วยังสามารถหาค่าความต้านทานสมมูลและค่าลิกแกจรีแอกแตนซ์สมมูลได้อีกด้วยซึ่งค่าต่าง ๆ เหล่านี้เป็นค่าคงที่ของหม้อแปลงและยังสามารถหาค่ากำลังสูญเสียในขดลวดทองแดงขณะมีโหลดเต็มที่ได้ด้วย การทดสอบขณะวงจรกระทำดังแสดงในรูปที่ 2.35 ซึ่งจะเห็นว่าเป็นการจ่ายไฟฟ้าเข้าที่ขดแรงดันไฟฟ้าสูงและลัดวงจรขดลวดแรงดันไฟฟ้าต่ำไว้ซึ่งอาจจะลัดวงจรเข้าด้วยกันโดยตรงหรือ

อาจจะลัดวงจรด้วยการใช้แอมมิเตอร์ที่มีความต้านทานต่ำต่อไว้ก็ได้ส่วนทางด้านขดลวดแรงดันไฟฟ้าสูงที่จ่ายไฟเข้าไปนั้นจะมีเครื่องมือวัดไฟฟ้าต่ออยู่เช่นเดียวกันกับการทดสอบขณะวงจรเปิด คือ โวลต์มิเตอร์ แอมมิเตอร์ และวัตต์มิเตอร์ โดยโวลต์มิเตอร์ทำหน้าที่วัดแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบขณะลัดวงจร แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบนั้นจะจ่ายไฟฟ้าให้กับขดลวดแรงดันไฟฟ้าสูงมีค่าประมาณ 5-10% ของขดลวดแรงดันไฟฟ้าสูง แอมมิเตอร์ทำหน้าที่วัดกระแสขณะที่มีโหลดเต็มที่(Full load current)วัตต์มิเตอร์ทำหน้าที่วัดกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทั้งหมด ซึ่งกำลังไฟฟ้านี้เป็นกำลังสูญเสียในลวดทองแดงทั้งหมด ค่ากำลังสูญเสียในลวดทองแดงนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงตามสภาพของกระแสที่ไหลในหม้อแปลง คือ กระแสไหลมากกำลังสูญเสียก็จะมาก กระแสไหลน้อยกำลังสูญเสียก็จะน้อย การสูญเสียในลวดทองแดงจะเกิดขึ้นในสภาวะที่หม้อแปลงมีโหลด ซึ่งการที่กระแสไหลมากหรือนั้นก็ขึ้นอยู่กับโหลดนั่นเอง ถ้าโหลดน้อยมากกระแสก็จะไหลมาก โหลดน้อยกระแสก็จะไหลน้อยเราอาจกล่าวได้ว่ากำลังสูญเสียในลวดทองแดงนั้นขึ้นอยู่กับโหลด



ภาพที่ 2.35 วงจรการทดสอบหม้อแปลงขณะลัดวงจร

ถ้าให้  $W_{sc}$  = ค่าที่อ่านได้จากวัตต์มิเตอร์ซึ่งเป็นค่ากำลังสูญเสียในลวดทองแดงทั้งหมด

$I_{sc}$  = ค่าที่อ่านได้จากแอมมิเตอร์ซึ่งเป็นกระแสที่ไหลในหม้อแปลงในขณะลัดวงจร

$V_{sc}$  = ค่าที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์ ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบขณะลัดวงจร

ดังนั้นจะได้

$$Z_{sc} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \quad (2.19)$$

เมื่อ  $Z_{sc}$  = อิมพีแดนซ์สมมูลที่หาได้จากการทดสอบขณะลัดวงจร

$Z_{sc} = Z_{01}$  เมื่อการทดสอบนั้นเราจ่ายไฟเข้าที่ขดปฐมภูมิ

$Z_{sc} = Z_{02}$  เมื่อการทดสอบนั้นเราจ่ายไฟเข้าที่ขดทุติยภูมิ



จากกำลังสูญเสียในลวดทองแดง  $= I^2 R$  (2.20)

ดังนั้นจะได้ว่า  $W_{sc} = (I_{sc})^2 \times R_{sc}$  (2.21)

นั่นคือ  $R_{sc} = \frac{W_{sc}}{(I_{sc})^2}$  (2.22)

เมื่อ

$R_{sc}$  = ความต้านทานสมมูลที่หาได้จากการทดสอบขณะลัดวงจร

$R_{sc} = R_{01}$  เมื่อการทดสอบนั้นเราจ่ายไฟเข้าที่ขดปฐมภูมิ

$R_{sc} = R_{02}$  เมื่อการทดสอบนั้นเราจ่ายไฟเข้าที่ขดทุติยภูมิ

จาก  $X = \sqrt{Z^2 - R^2}$  (2.23)

ดังนั้นจะได้  $X_{sc} = \sqrt{(Z_{sc})^2 - (R_{sc})^2}$  (2.24)

เมื่อ

$X_{sc}$  = ลีแกนจ์แอกแทนซ์สมมูลที่หาได้จากการทดสอบขณะลัดวงจร

$X_{sc} = X_{01}$  เมื่อการทดสอบนั้นเราจ่ายไฟเข้าที่ขดปฐมภูมิ

$X_{sc} = X_{02}$  เมื่อการทดสอบนั้นเราจ่ายไฟเข้าที่ขดทุติยภูมิ

## 2.5.2 การสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า (Loss in a Transformer)

หม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องกลไฟฟ้าชนิดเดียวกันที่ไม่มีส่วนหนึ่งส่วนใดเคลื่อนที่เลยดังนั้นการสูญเสียในทางกลซึ่งรู้จักกัน คือ การสูญเสียเนื่องจากความฝืดและแรงลมไม่มี ดังนั้นการสูญเสียในหม้อแปลงจึงเหลือเพียง 2 ส่วนคือ

1. การสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss or Iron Loss) การสูญเสียในแกนเหล็กประกอบไปด้วยการสูญเสีย 2 ส่วน คือ

1.1 การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loss) เกิดขึ้นเนื่องจากการกลับไปกลับมาของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่แกนเหล็กที่ใช้พันหม้อแปลง เพราะว่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดนี้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางตลอดเวลา ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นถึงเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางตลอดเวลาด้วยเช่นกัน การเปลี่ยนแปลงนี้จะทำให้โมเมนต์ของแกนเหล็กเกิดการเสียดสีกันเป็นเหตุให้เกิดความร้อนขึ้น การสูญเสียนี้เรียกว่า การสูญเสีย

เนื่องจากฮีสเทอรีซิส การสูญเสียนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณ เกรดของแกนเหล็ก ค่าสูงสุดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก และความถี่ของการกลับไปกลับมาของเส้นแรงแม่เหล็กการสูญเสียเนื่องจากฮีสเทอรีซิสสามารถทำให้ลดได้ โดยการเลือกใช้โลหะที่เป็นแกนเหล็กหม้อแปลงเป็นเหล็กที่มีสัมประสิทธิ์ของฮีสเทอรีซิสต่ำ (Low hysteresis coefficient) โดยทั่วไปแล้วจะเลือกใช้แกนเหล็กที่มีส่วนผสมของซิลิกอนพิเศษ(Special silicon steel)

**1.2 การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy current loss)** เกิดขึ้นเนื่องจากไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายให้ขดลวดนั้นมีการเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับกระแสไฟฟ้าสลับนั้นตัดกับแกนเหล็กของหม้อแปลงทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าขึ้นในแกนเหล็ก และมีกระแสไหลวนอยู่ในแกนเหล็ก เนื่องจากแกนมีความต้านทาน กระแสไหลวนนี้จะทำให้เกิดกำลังสูญเสียขึ้นเรียกว่า การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน การสูญเสียนี้นี้จะมีมากถ้าใช้แกนเหล็กตัน การลดการสูญเสียนี้นี้ทำได้โดยการใช้แผ่นเหล็กบาง ๆ อัดซ้อนเข้าด้วยกัน การสูญเสียในแกนเหล็กจะหาได้จากการทดสอบหม้อแปลงขณะไม่มีโหลด

## 2. การสูญเสียในลวดทองแดง (Copper Loss)

การสูญเสียในลวดทองแดงเกิดขึ้นเนื่องจาก การที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านความต้านทานขดขดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ ซึ่งจะเกิดขึ้นในสภาวะที่หม้อแปลงมีโหลด แต่ในขณะที่ไม่มีโหลดนั้นก็มีกระแสไหลผ่านเฉพาะขดลวดปฐมภูมิและกระแสมีค่าน้อยมาก การสูญเสียในลวดทองแดงขณะไม่มีโหลดมีค่าน้อยมากจึงไม่นำมาคิด ดังนั้นการสูญเสียในลวดทองแดงจึงมีมากในขณะที่มีโหลด จะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของกระแสที่ไหลในขดลวดหรืออาจกล่าวได้ว่าเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของโหลด การสูญเสียนี้นี้จะทำให้เกิดความร้อนขึ้น การสูญเสียในลวดทองแดงสามารถหาได้จากการทดสอบห้อมแปลงขณะลัดวงจร การสูญเสียในลวดทองแดงจะหาได้จากสมการพื้นฐาน คือ  $I^2R$

### 2.5.3 ประสิทธิภาพของหม้อแปลง (Efficiency of a Transformer)

หม้อแปลงเป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือกลไฟฟ้าชนิดอื่น เพราะว่าหม้อแปลงไม่มีการสูญเสียในทางกล ประสิทธิภาพใช้ตัวย่อ Eff.หรือใช้สัญลักษณ์  $\eta$  ประสิทธิภาพของหม้อแปลงสามารถหาได้ดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{\text{กำลังอินพุต}}{\text{กำลังเอาต์พุต}} \times 100\% \quad (2.25)$$

$$\text{หรือ } \eta = \frac{\text{Power input}}{\text{Power output}} \times 100\% \quad (2.26)$$

$$\text{เมื่อกำลังเอาต์พุต} = V_2 I_2 \cos \theta \quad \text{W} \quad (2.27)$$

$$\text{หรือกำลังเอาต์พุต} = \text{kVA} \times \cos \theta \quad \text{kW} \quad (2.28)$$

$$\text{กำลังอินพุต} = \text{กำลังเอาต์พุต} + \text{กำลังสูญเสีย} \quad (2.29)$$

$$\text{เมื่อกำลังสูญเสีย} = \text{กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก} + \text{กำลังสูญเสียในลวดทองแดง} \quad (2.30)$$

#### 2.5.4 ประสิทธิภาพตลอดทั้งวัน (All-day Efficiency)

โดยปกติหม้อไฟฟ้าในระบบจำหน่าย ถึงแม้บางช่วงเวลาจะไม่มีภาระจ่ายโหลดเลยแต่ทางด้านของปฏิกิริยายังคงต่อเข้ากับแหล่งจ่ายอยู่ตลอด 24 ชั่วโมงและใน 24 ชั่วโมงหม้อแปลงไม่ได้จ่ายโหลดเต็มที่ตลอดก็ตามสภาพการเปลี่ยนแปลงของโหลด และการสูญเสียในแกนเหล็กก็จะเกิดขึ้นตลอดเวลาที่หม้อแปลงยังต่ออยู่กับแหล่งจ่าย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องคำนวณหาประสิทธิภาพตลอดทั้งวันของหม้อแปลงประสิทธิภาพตลอดทั้งวันใช้สัญลักษณ์  $\eta_{\text{all-day}}$  ซึ่งประสิทธิภาพของหม้อแปลงตลอดทั้งวันสามารถหาได้ดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพตลอดทั้งวัน} = \frac{\text{กำลังเอาต์พุตเป็น kWh}}{\text{กำลังอินพุตเป็น kWh}} \times 100\% \quad (2.31)$$

เมื่อ

กำลังเอาต์พุตเป็น kWh = กำลังเอาต์พุต × จำนวนชั่วโมงที่ใช้งานมีหน่วยเป็นกิโลวัตต์ชั่วโมง (kWh)

กำลังอินพุตเป็น kWh = กำลังเอาต์พุตเป็น kWh + กำลังสูญเสียทั้งหมดเป็น kWh

กำลังสูญเสียทั้งหมดเป็น kWh = กำลังสูญเสียในแกนเหล็กเป็น kWh + กำลังสูญเสียในลวดทองแดงเป็น kWh

#### 2.6 มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย พ.ศ.2556

บริภัณฑ์และสายไฟฟ้าทุกชนิด ต้องมีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) ฉบับล่าสุด หรือมาตรฐานที่การไฟฟ้า ยอมรับ เช่น มาตรฐาน IEC, BS, ANSI, NEMA, DIN, VDE, UL, JIS, AS หรือเป็นชนิดที่ได้รับความเห็นชอบจากการไฟฟ้า ก่อน โดยมาตรฐาน ที่อ้างอิงให้ยึดถือตามฉบับที่ปรับปรุงล่าสุด มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

## 2.6.1 มาตรฐานสายไฟฟ้าหุ้มฉนวน

2.6.1.1 สายไฟฟ้าทองแดงหุ้มฉนวน พีวีซี เป็นไปตาม มอก. 11-2553

2.6.1.2 สายไฟฟ้าอะลูมิเนียมหุ้มฉนวน พีวีซี เป็นไปตาม มอก. 293-2541

หมายเหตุ 1. การไฟฟ้านครหลวง ห้ามใช้ในการเดินสายภายในของระบบไฟฟ้าแรงต่ำ

2. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอนุญาตให้ใช้สายชนิดนี้เป็นตัวนำประธานได้เฉพาะการเดินสายลอยในอากาศบนวัสดุฉนวน ภายนอกอาคาร

2.6.1.3 สายไฟฟ้าทองแดงหุ้มฉนวนครอสลิงก์ด์พอลิเอทิลีน เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60502 หรือ มาตรฐานที่กำหนดไว้ข้างต้น

2.6.1.4 สายไฟฟ้าตามมาตรฐานการไฟฟ้านครหลวง หรือการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

## 2.6.2 เซฟตี้สวิตช์ (Safety Switch)

ต้องปลดหรือสับวงจรได้พร้อมกันทุก ๆ ตัวนำเส้นไฟ รวมอยู่ในกล่องเดียวกันและจะเปิดฝาได้ต่อเมื่อได้ปลด วงจรแล้ว หรือการเปิดฝานั้นเป็นผลให้วงจรถูกปลดด้วย และต้องสามารถปลดและสับกระแสใช้ งานในสภาพปกติได้ ในกรณีที่ใช้งานเป็นสวิตช์อย่างเดียว อนุญาตให้ใช้แบบ Non-fuse ได้

## 2.6.3 เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker)

2.6.3.1 ต้องเป็นแบบปลดได้โดยอิสระ (trip free) และต้องปลดสับได้ด้วยมือ ถึงแม้ว่าปกติการปลดสับจะทำได้วิธีอื่นก็ตาม

2.6.3.2 ต้องมีเครื่องหมายแสดงอย่างชัดเจนว่าอยู่ในตำแหน่งสับหรือปลด

2.6.3.3 ถ้าเป็นแบบปรับตั้งได้ต้องเป็นแบบการปรับตั้งค่ากระแสหรือเวลา โดยในขณะที่ใช้งานกระทำโดยเฉพาะผู้ที่มีหน้าที่เกี่ยวข้อง

2.6.3.4 ต้องมีเครื่องหมายแสดงพิกัดของแรงดัน กระแส และความสามารถในการตัดกระแสที่เห็นได้ชัดเจนและถาวรหลังจากติดตั้งแล้ว หรือเห็นได้เมื่อเปิดแผ่นกั้นหรือฝาทรง

2.6.3.5 เซอร์กิตเบรกเกอร์สำหรับระบบแรงต่ำให้เป็นไปตามมาตรฐานดังนี้

2.6.3.5.1 เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้ในสถานที่อยู่อาศัยหรือสถานที่คล้ายคลึงกัน พิกัดไม่เกิน 125 แอมแปร์ ให้เป็นไปตาม IEC 60898 กรณีพิกัดกระแสเกิน 125 แอมแปร์ ให้เป็นไปตาม IEC 60947-2

2.6.3.5.2 เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้ในสถานที่อื่น ๆ ให้เป็นไปตาม IEC 60947-2 หรือ IEC 60898

## 2.6.4 เครื่องตัดไฟรั่ว (Residual Current Device หรือ RCD)

เครื่องตัดไฟรั่วที่ใช้ลดอันตรายจากการถูกไฟฟ้าดูด สำหรับแรงดันไม่เกิน 440 โวลต์ สำหรับบ้านอยู่อาศัยหรือสถานที่คล้ายคลึงกันต้องมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน IEC 60755, IEC 61008, IEC 61009, IEC 61543, มอก. 2425-2552 หรือ มอก. 909-2548 มีรายละเอียดดังนี้

2.6.4.1 เครื่องตัดไฟรั่วควรมีค่ากระแสรั่วที่กำหนด (rated residual operating current,  $I_{\Delta n}$ ) ไม่เกิน 30 มิลลิแอมแปร์ และมีช่วงระยะเวลาในการตัด (break time หรือ operating time) ไม่เกิน 0.04 วินาที เมื่อกระแสรั่วมีค่า  $5 I_{\Delta n}$  (อาจใช้ค่า 0.25 แอมแปร์แทนค่า  $5 I_{\Delta n}$  ก็ได้) และ ไม่ทำงานเมื่อกระแสรั่วมีค่า  $0.5 I_{\Delta n}$

2.6.4.2 เครื่องตัดไฟรั่วต้องเป็นชนิดที่ปลดสายไฟเส้นที่มีไฟทุกเส้นออกจากวงจรรวมทั้งสายนิวทรัล (neutral) ยกเว้น สายนิวทรัลนั้นมีการต่อลงดินโดยตรง

2.6.4.3 ห้ามต่อวงจรลัดคร่อมผ่าน (by pass) เพื่อป้องกันเครื่องตัดไฟรั่วปลดวงจรเมื่อไฟรั่ว

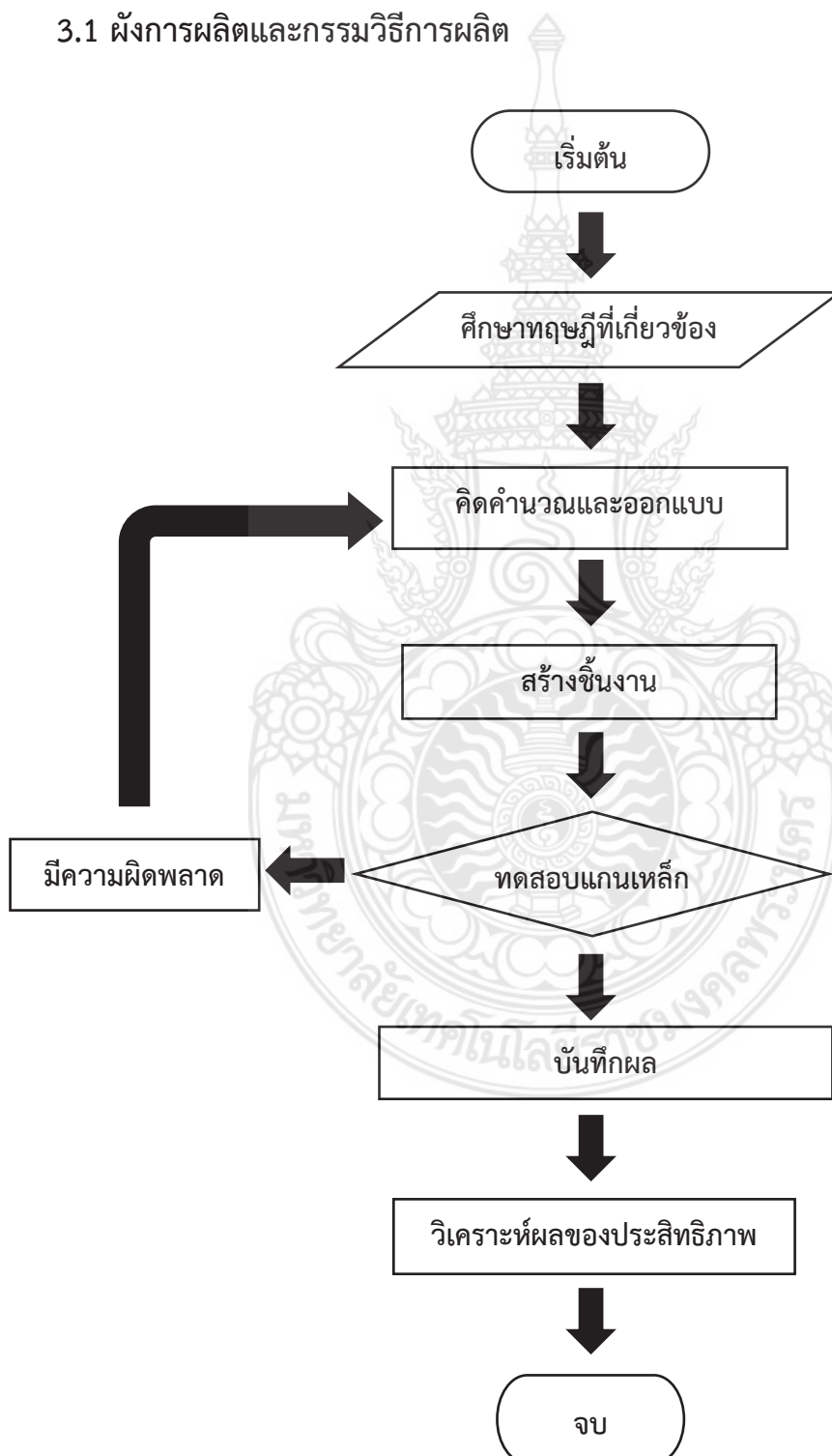


### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงาน

ในการจัดทำโครงการวิจัยชุดทดสอบประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระดับแรงดันต่ำแบบ single phase นี้ ผู้จัดทำโครงการวิจัยมีวิธีดำเนินงานโครงการวิจัยตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

#### 3.1 ผังการผลิตและกรรมวิธีการผลิต





### 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาความเป็นมาและสาเหตุของปัญหา
2. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
3. วางแผนปรึกษากับอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัยวิศวกรรมไฟฟ้า
4. คิดคำนวณและออกแบบชุดทดสอบ
5. สร้างชุดทดสอบ
6. ทดสอบวิเคราะห์ผลประสิทธิภาพชุดทดสอบและหาข้อบกพร่อง
7. แก้ไขข้อบกพร่อง
8. จัดทำรูปเล่มโครงการวิจัย

### 3.3 ออกแบบและสร้างโต๊ะทดสอบ หม้อแปลงทดสอบ และวงจรจ่ายกระแสไฟฟ้าชุดทดสอบ

#### 3.3.1 การออกแบบโต๊ะทดสอบ

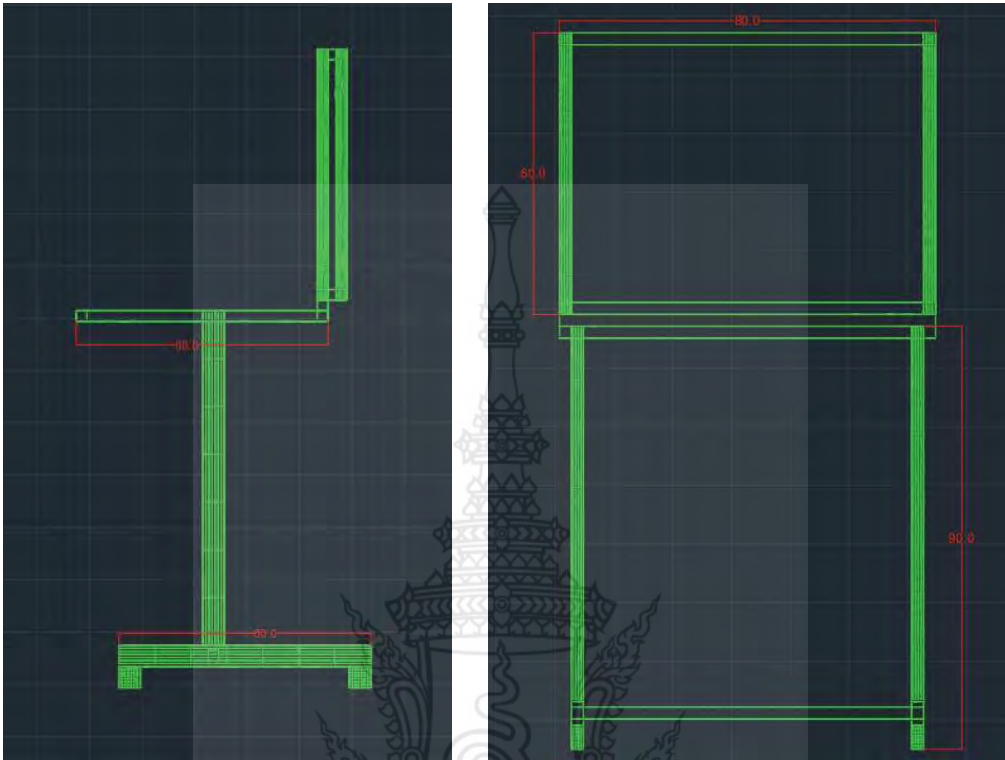
1. การออกแบบโต๊ะทดสอบโดยใช้โปรแกรม Autocad สร้างการจำลองแบบโต๊ะทดสอบที่มีอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพที่ 3.1 การออกแบบโต๊ะทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

## 2. แบบ General Arrangement

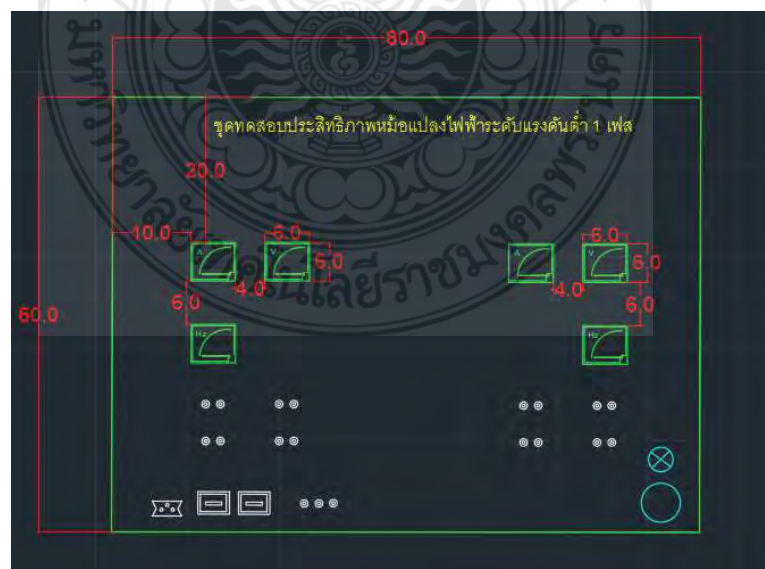
แบบโต๊ะทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า บอกขนาด ความสูง กว้าง ลึก และความยาว



ภาพที่ 3.2 แบบ General Arrangement

## 3. แบบ Cutout

แบบ Cutout บอกขนาดอุปกรณ์ ระยะในการจัดวางอุปกรณ์



ภาพที่ 3.3 แบบ Cutout

4. การสร้างโต๊ะทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าโดยการขึ้นรูปตัวโครงสร้างด้วยเหล็กกล่อง ซึ่งใช้เหล็กขนาด 1 x 1 นิ้ว และ 2 x 1 นิ้ว



ภาพที่ 3.4 เหล็กสำหรับขึ้นรูปโต๊ะทดสอบ

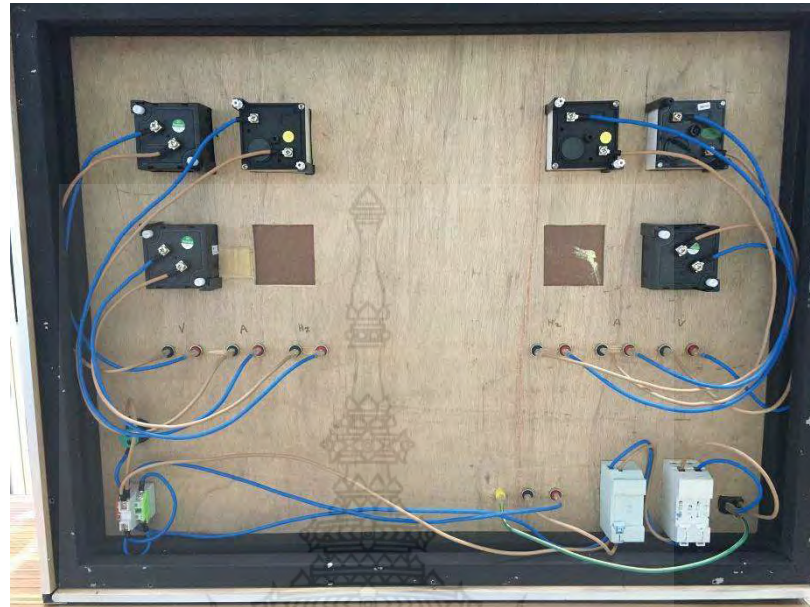
5. การติดตั้งอุปกรณ์ เครื่องมือวัดทางไฟฟ้า ได้แก่ Volt meter, Amp-meter, Frequency meter และ Lamp



ภาพที่ 3.5 การติดตั้งอุปกรณ์ เครื่องมือวัดทางไฟฟ้า

## 6. การ Wiring

การเดินสายไฟฟ้าเข้าอุปกรณ์ต่าง ๆ



ภาพที่ 3.6 การ Wiring เข้าอุปกรณ์ต่างๆ

### 3.3.2 การออกแบบหม้อแปลงทดสอบ 1 เฟส

1. คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง จะหาขนาดพื้นที่หน้าตัดได้ต้องรู้กำลังของหม้อแปลงว่าจะให้จ่ายได้เท่าใด กำลังของหม้อแปลงก็คือผลคูณของกระแสและแรงดันที่หม้อแปลงตัวนี้จะจ่ายได้ นั่นคือ เท่ากัน  $V \times A$  เมื่อ  $V$  คือแรงดันเอาต์พุตและ  $A$  คือกระแสเอาต์พุตพื้นที่หน้าตัดดังสมการ

$$\sqrt{\frac{VA}{5.58}}$$

2. หาจำนวนรอบของขดปฐมภูมิ เอาพื้นที่หน้าตัดที่หาได้ในข้อ 1 มาคำนวณหาจำนวนรอบของขดปฐมภูมิตามสูตร

$$N = \frac{E \times 10^8}{4 \times F \times B_n \times A}$$



- เมื่อ  $E$  คือ แรงดันขดปฐมภูมิ (220V)  
 $F$  คือ ความถี่ของไฟกระแสสลับทางอินพุต (50Hz)  
 $B_n$  คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็กสูงสุดที่ผ่านแกนที่แกนเหล็กยังไม่อิ่มตัว  
 (ใช้ 64500 เส้น/ตารางนิ้ว)  
 $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนที่หาได้จากข้อ1 (ตารางนิ้ว)

3. หาจำนวนรอบของทุติยภูมิ หาได้จากสูตร

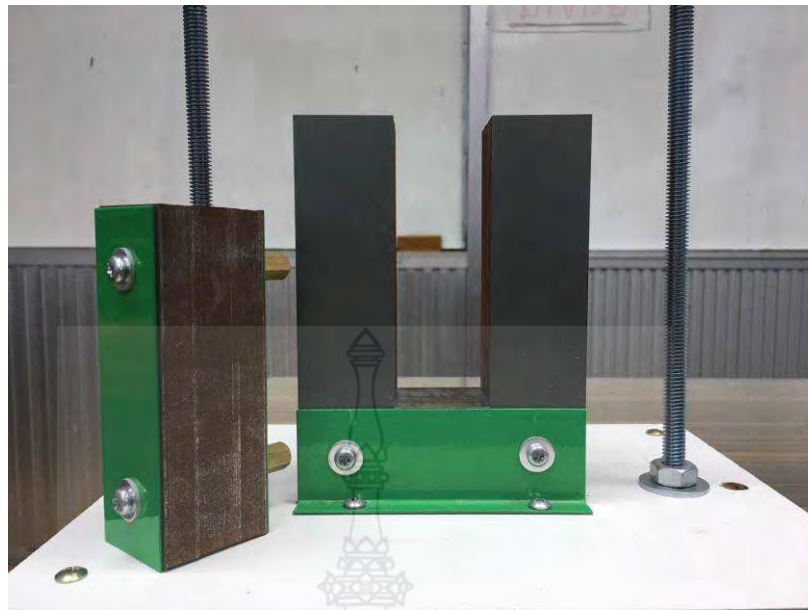
$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

- โดย  $E_1$  คือ แรงดันขดปฐมภูมิ  
 $E_2$  คือ แรงดันขดทุติยภูมิ  
 $n_1$  คือ จำนวนรอบขดปฐมภูมิ  
 $n_2$  คือ จำนวนรอบขดทุติยภูมิ

4. หาขนาดของลวดที่ใช้พัน

4.1 ข้อจำกัดทางด้านไฟฟ้า ข้อจำกัดทางด้านนี้คือลวดต้องไม่ร้อนเกินไปเมื่อจ่ายกระแสเต็มที่ตั้งนั้นก็หมายความว่าต้องไม่ได้ลวดรับและกระแสมากเกินไป เมื่อเทียบกับพื้นที่หน้าตัดของลวด ตัวเลขที่ใช้กันมากคือ 400-7000 เซอร์คิวลามีต/แอมแปร์ ซึ่งถ้ากำหนดค่าจะใช้กระแสที่แอมแปร์สามารถคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดได้ ตัวเลข 400-700 นี้แล้วแต่เราจะเลือกใช้กล่าวคือถ้าเลือกตัวเลขน้อย เช่น 450 cm/amp จะได้ลวดขนาดใหญ่ขึ้น

4.2 ข้อจำกัดด้านขนาด เนื่องจากลักษณะเหล็กเป็นรูปตัว U และ I ซึ่งมีช่องว่างเหลือไว้ให้พันลวดตามรูปที่ 3.5 และมีผู้ผลิตขึ้นมาเป็นขนาดต่าง ๆ เนื่องจากเราไม่พันลวดลงบนแกนเหล็กโดยตรง แต่พันในบ็อบบิ้น แล้วจึงเอาบ็อบบิ้นมาสวมแกนตัว U ตามรูป



ภาพที่ 3.7 แกนเหล็ก UI

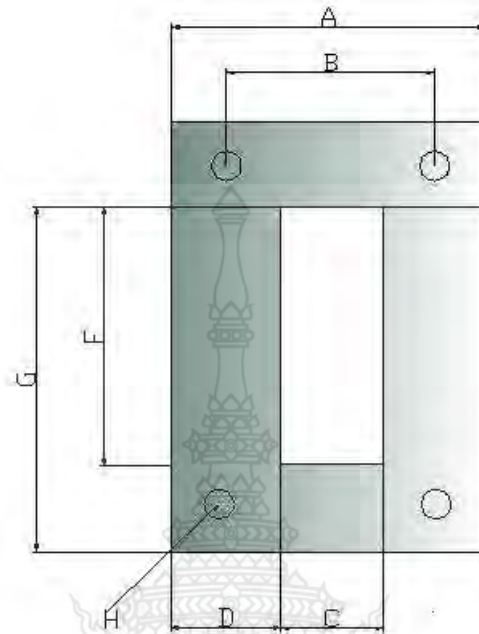


ภาพที่ 3.8 บ็อบบี้ใช้กับแกนเหล็ก UI

ซึ่งบ็อบบี้ก็มีขายเป็นขนาดต่าง ๆ ดังนั้นต้องเลือกขนาดบ็อบบี้ในสวมแกนเหล็กพอดีแล้ว  
เรียงแผ่นเหล็กซ้อนกันให้ได้พื้นที่ที่เราคำนวณเอาไว้

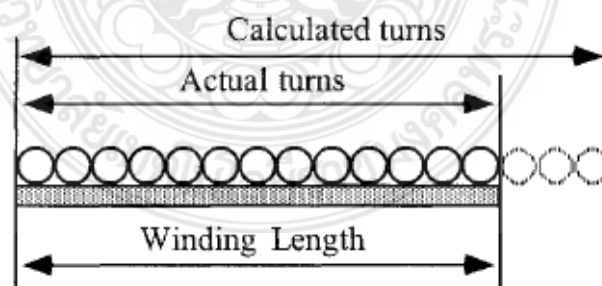


รายละเอียดขนาดของตัว U และ I จะมีสัดส่วนดังนี้คือ



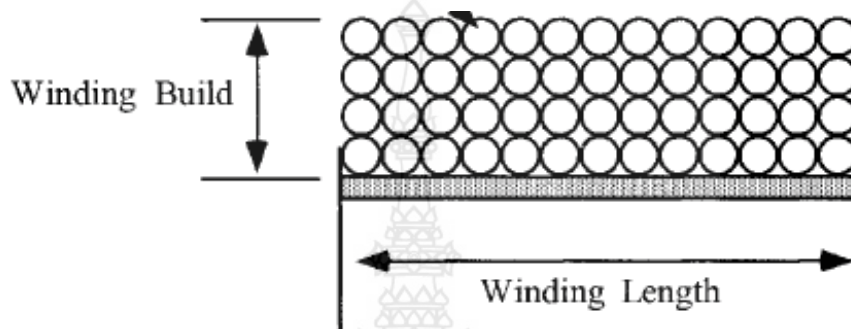
ภาพที่ 3.9 การบอกรายละเอียดขนาดของแกนเหล็ก UI

$a : b : c : d = 1 : 2 : 3 : 6$  จากอัตราส่วนนี้ถ้าเราทราบระยะด้านใดด้านหนึ่งย่อมคำนวณหาความยาวของด้านที่เหลือได้หมด แกนตัว U ที่มีขายจะมีขนาดดังต่อไปนี้ (บอกขนาดด้าน G เป็นมิลลิเมตร) คือ 10, 13, 16, 19, 20, 22, 25, 28, 32, 38, 45, 52, 63 เวลาพันลวดในบ็อบบิ้นแล้วจะเป็นลักษณะดังนี้



ภาพที่ 3.10 แสดงลักษณะการพันลวดในบ็อบบิ้น

ขนาดของลวดต้องเลือกให้ขดลวดทั้งหมดพันลงในบ็อบปinned แล้วสวมลงแกนเหล็กได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับว่ามีพื้นที่หน้าตัดแกนอยู่ที่เท่าใด ตารางที่ 3.1 จะบอกว่าลวดทองแดงเบอร์ไหนพันรอบแกนบ็อบปinned นั้นแล้วได้พื้นที่หน้าตัดของขดลวด 1 ตารางนิ้วต้องพันกี่รอบ เช่นลวดเบอร์ 23 SWG ถ้าพันรอบแกนบ็อบปinned 1340 รอบ พื้นที่หน้าตัดจะมีขนาด 1 ตารางนิ้ว ดังนั้นถ้าบ็อบปinned สูง 1 นิ้ว ขดลวดจะอ้วนหนาออกมา 1 นิ้ว



ภาพที่ 3.11 การจัดเรียงขดลวดลงบนบ็อบปinned

ตารางที่ 3.1 ตารางความสัมพันธ์ของจำนวนรอบกับขนาดพื้นที่หน้าตัดของขดลวด

เบอร์ลวดทองแดง มาตรฐาน S.W.G	เส้นผ่าศูนย์กลาง (Diameter) mm	พื้นที่หน้าตัด (Area) mm <sup>2</sup>	ทนกระแสได้ (A)
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	22.9	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	1.729
22	0.72	0.41	1.324
23	0.61	0.2922	0.972

คำนวณหม้อแปลงทดสอบระดับแรงดันต่ำขนาด 1:2

กำหนดพื้นที่หน้าตัด = 6.3 ตารางนิ้ว

$$\begin{aligned}
 \text{จำนวนรอบ} &= \frac{E \times 10^8}{4.44 \times F \times B \times A} \\
 &= \frac{120 \times 10^8}{4.44 \times 50 \times 64500 \times 6.3} \\
 &= 133 \text{ รอบ}
 \end{aligned}$$

เลือกขนาดขดลวด ใช้ตัวเลข 450 cm/amp

$$\text{กระแส} \quad \frac{VA}{V} = \frac{600}{120} = 5 \text{ A}$$

ต้องใช้ลวดที่มีขนาด  $450 \times 5 = 2250$

คูตารางการเลือกใช้ลวด เลือกใช้ลวดเบอร์ 17

$$\begin{aligned} \text{จำนวนรอบ} &= \frac{n_1 \times E_2}{E_1} \\ &= \frac{133 \times 60}{120} \\ &= 67 \text{ รอบ} \end{aligned}$$

เลือกขนาดขดลวด ใช้ตัวเลข 450 cm/amp

$$\text{กระแส} \frac{VA}{V} = \frac{600}{60} = 10 \text{ A}$$

ต้องใช้ลวดที่มีขนาด  $450 \times 10 = 4500$

คูตารางการเลือกใช้ลวด เลือกใช้ลวดเบอร์ 14

### 3.3.3 ขั้นตอนในการพันหม้อแปลงไฟฟ้า

ขั้นตอนในการพันเป็นดังนี้

1. นำกระดาษเคลือบไมลาร์มาพันรอบข็อบบิ้น



ภาพที่ 3.12 ข็อบบิ้นที่พันด้วยกระดาษไมลาร์

2. นำขีบบิ้นที่จะพันลวดทองแดงมาติดตั้งกับเครื่องพันลวด



ภาพที่ 3.13 ติดตั้งขีบบิ้นเข้ากับเครื่องพันลวดทองแดง

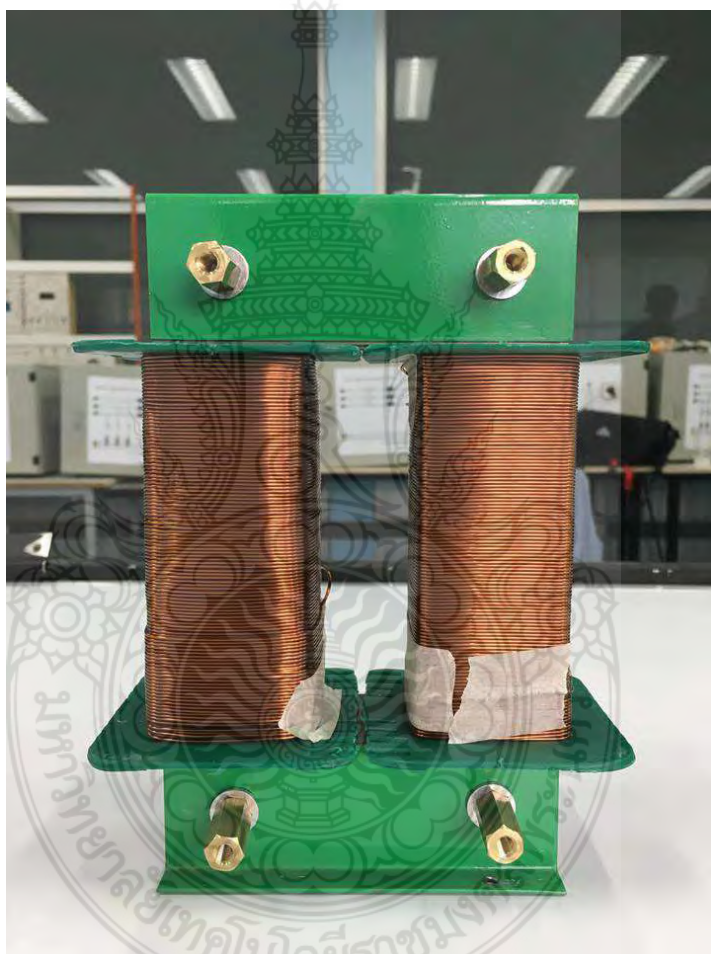
3. พันลวดทองแดงอาบนํ้ายามาพันที่ตัวขีบบิ้นให้เหลือปลายลวดด้านหนึ่งไว้ให้ยาวพอสมควรแล้วจึงพันลวดทองแดงไปรอบ ๆ แกนของขีบบิ้นให้ลวดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบบนทางใดทางหนึ่งพันจนครบจำนวนรอบที่คำนวณไว้จากการคำนวณหม้อแปลงทดสอบทั้งสองชุดมีจำนวนรอบที่ 244 รอบ และ 144 รอบ เมื่อพันครบรอบแล้วให้เพื่อปลายลวดเหลือไว้พอสมควรจึงตัดลวด



ภาพที่ 3.14 พันลวดทองแดงลงในขีบบิ้น จำนวน 244 รอบ



4. ชูขวานิชเมื่อพันลวดทั้ง 2 ชุดเสร็จแล้วเพื่อยึดลวดทองแดงซึ่งพันไว้ให้แน่นเพื่อจะได้ไม่เกิดการเสียดสีกันเมื่อใช้งานต้องนำบ็อบบิ้นที่มีลวดพันอยู่เสร็จแล้วนี้ไปชุบน้ำยาวานิชน้ำยานี้จะแข็งตัวเวลาแห้งช่วยปิดขดลวดให้แน่นเวลาชุกก็เพียงแต่จุ่มบ็อบบิ้นนั้นทั้งชุดลงไปในกระป๋องน้ำยาน้ำยาจะซึม เข้าไปอยู่ระหว่างขดลวดจะเห็นฟองอากาศผุดออกมารอจนฟองอากาศหมดแสดงว่าน้ำยาซึมเข้าไปเต็มที่แล้วจึงเอาบ็อบบิ้นมาฟ้งให้แห้งโดยปกติวานิชจะมี 2 ชนิดคือแบบแห้งเร็วและแห้งช้าแบบแห้งช้าต้องอบด้วยความร้อนซึ่งอาจทำได้โดยฉายไฟสปอท์ไลท์ส่องจนแห้งสำหรับแบบธรรมดาทั้งไว้ในอากาศประมาณ 12 ชั่วโมงก็แห้งสนิท

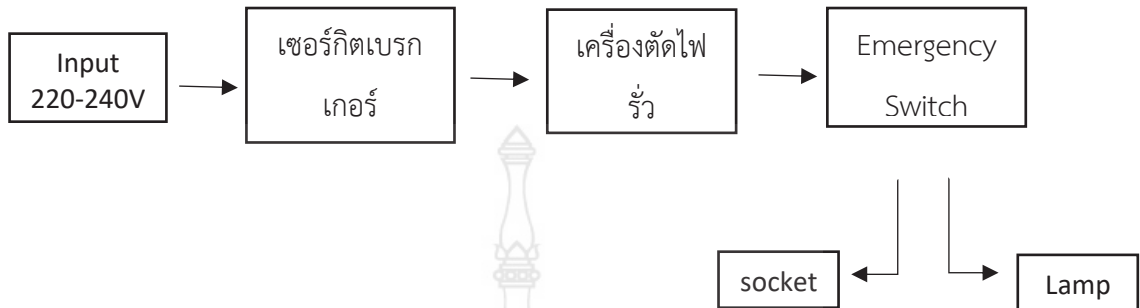


ภาพที่ 3.15 หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 1:2



### 3.4 วงจรจ่ายกระแสไฟฟ้าชุดทดสอบ

วงจรจ่ายกระแสไฟฟ้าซึ่งมีการผ่านอุปกรณ์ตัดต่อ ก่อนจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าอุปกรณ์ต่างๆในชุดทดสอบประสิทธิภาพ แบบวงจรจ่ายกระแสไฟฟ้า ดังนี้



ภาพที่ 3.16 วงจรชุดทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

1.การเลือกใช้อุปกรณ์ทางไฟฟ้าตามมาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย พ.ศ.2556

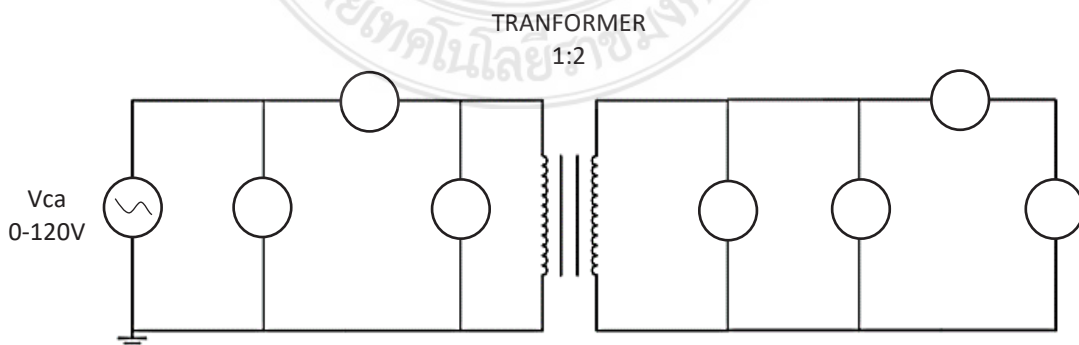
-เซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาด 32A เป็นไปตาม IEC 60898

-เครื่องตัดไฟรั่ว พิกัด 10A  $\Delta n$  ไม่เกิน 30 มิลลิแอมแปร์ ตามมาตรฐาน IEC 60755, IEC 61008, IEC 61009, IEC 61543, มอก. 2425-2552 หรือ มอก. 909-2548

-สายไฟฟ้าทองแดงหุ้มฉนวน พีวีซี ขนาด 1X2.5 sq.mm. เป็นไปตาม มอก. 11-2553

### 3.5 วงจรทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

วงจรนี้ใช้แรงดันตั้งแต่ 0-120 V ประกอบด้วยเครื่องมือวัดค่าทางไฟฟ้า ได้แก่ Volt meter Amp-meter และ Frequency meter ทั้งด้าน Input และ Output เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆ ทางไฟฟ้า เพื่อนำมาวิเคราะห์ ดังวงจรต่อไปนี้



ภาพที่ 3.17 วงจรการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

## บทที่ 4

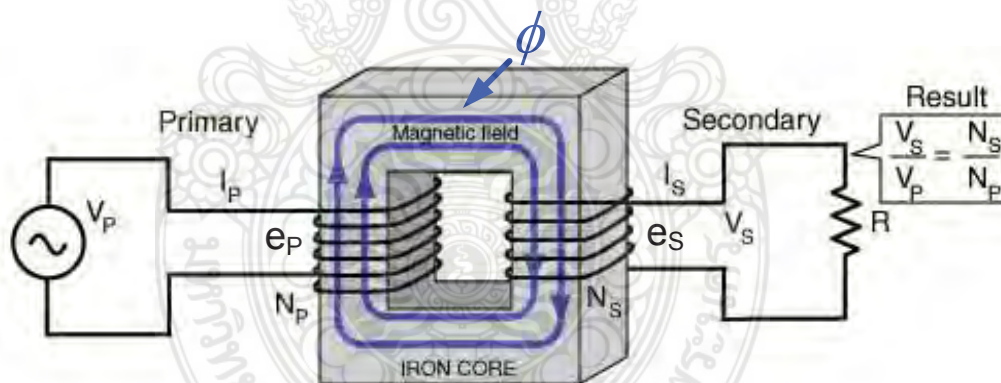
### ผลการดำเนินงาน

การจัดทำโครงการวิจัยชุดทดสอบประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระดับแรงดันต่ำ แบบ single phase นี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระดับแรงดันต่ำ แบบ single phase และค้นคว้าเรื่องที่สนใจ ผู้จัดทำโครงการวิจัยสามารถนำมาประยุกต์ใช้ให้เข้ากับการเรียนรู้ ซึ่งมีผลการดำเนินงานโครงการวิจัย ดังนี้

#### 4.1 การทำงานของชุดทดสอบประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้า

##### 4.1.1 หลักการทำงาน

ขดลวดปฐมภูมิเมื่อต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับ จะมีกระแสไหลในขดลวดปฐมภูมิจะส่งผลทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไหลวนในแกนเหล็ก และจากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) และกฎของเลนส์ (Lenz's Law) พบว่าจะทำให้มีการเหนี่ยวนำที่ขดลวดปฐมภูมิทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่มีทิศทางตรงข้ามกับแหล่งจ่าย ( $e_p$ ) และเหนี่ยวนำที่ขดลวดทุติยภูมิ สร้างแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ( $e_s$ ) และกระแส ( $i_s$ ) ไหลไปยังโหลดที่ต่ออยู่ หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 2

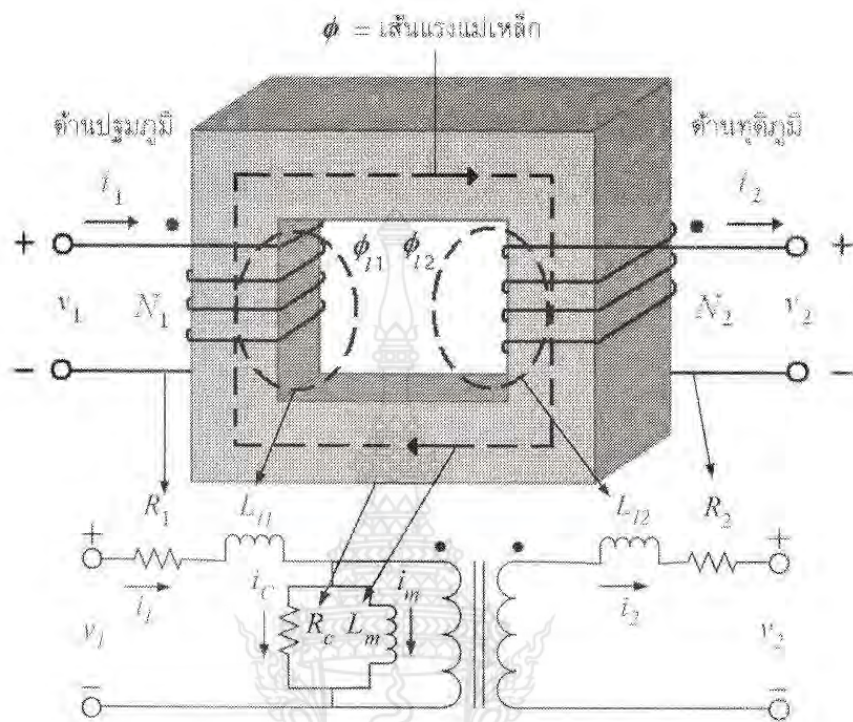


ภาพที่ 4.1 หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า

##### 1. วงจรสมมูลในทางปฏิบัติ

เป็นวงจรสมมูลที่พิจารณาถึงกำลังไฟฟ้าสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า , ค่าความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก(Magnetizing Inductance)ในการทำให้แกนเหล็กสร้างสนามแม่เหล็ก และ ผลของการสูญเสียของเส้นแรงแม่เหล็ก (Leakage Flux) เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กไหลวนในอากาศแทนที่จะผ่านแกนแม่เหล็ก

วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าในทางปฏิบัติ ดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 วงจรสมมูลในทางปฏิบัติ

เมื่อ  $L_{11}, L_{12}$  คือ ความเหนี่ยวนำเนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กสูญเสีย

$L_m$  คือ ความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก

$R_1 R_2$  คือ ความต้านทานในขดลวด

$R_c$  คือ ความต้านทานในแกนเหล็ก

โดยทั่วไปการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า จะให้ค่า  $L_m$  มีค่ามากๆ เพื่อให้จะทำให้กระแสทำแม่เหล็ก (Magnetizing Current) มีค่าน้อย เมื่อเทียบกับกระแสไฟฟ้าของโหลดประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

## 2. ประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้า

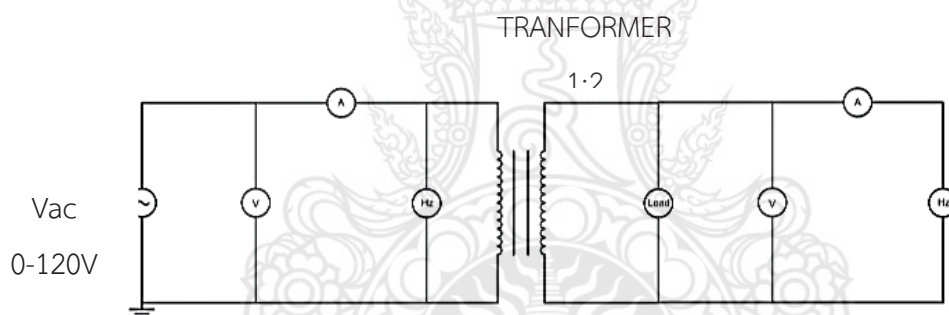
ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า หาได้จาก

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{\text{กำลังไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ}}{\text{กำลังไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ}} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned}
 n &= \frac{P_{out}}{P_{in}} \\
 &= \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{Loss}} \\
 &= \frac{P_{in} - P_{Loss}}{P_{in}}
 \end{aligned}$$

### 4.2 หลักการทำงานชุดทดสอบประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้า

การทดสอบประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้าโดยวิธีการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส แบบเปิดวงจรและลัดวงจร โดยการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส แบบเปิดวงจร เครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าจะถูกนำมาต่อทางด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำเพื่อความปลอดภัยต่อผู้ทดสอบ ส่วนการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส แบบลัดวงจร เครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าจะถูกนำมาต่อทางด้านแรงดันไฟฟ้าสูง เพื่อหาค่า Ratio ของหม้อแปลงอัตราส่วน 1:2



ภาพที่ 4.3 การทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า อัตราส่วน 1:2

### 4.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้า

การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยชุดทดสอบประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระดับแรงดันต่ำ 1 เฟส ที่สร้างขึ้นสามารถ ทดสอบระดับแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และความถี่ ได้ดังนี้

**ตัวอย่าง** การหาประสิทธิภาพของหม้อแปลงขณะมีโหลด 600 W ที่แรงดัน 120 V

$$\text{จากสูตร ประสิทธิภาพ} = \frac{\text{กำลังไฟฟ้า Output}}{\text{กำลังไฟฟ้า Output} + \text{กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมด}}$$

$$\begin{aligned}
 P_{cu \text{ loss } 1} &= I^2R \\
 &= 1.3^2 \times 1.4 \\
 &= 2.366 \text{ W}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{\text{cu loss 2}} &= I^2R \\
 &= 1.3^2 \times 0.7 \\
 &= 1.183 \text{ W}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{\text{core loss}} &= 17.6 \text{ W} \\
 P_{\text{loss รวม}} &= (2.366 + 1.1833) = 21.149 \text{ W}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ประสิทธิภาพ } \eta &= \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}} + P_{\text{loss}}} \times 100 \\
 &= \frac{72.8}{72.8 + 21.149} \times 100 \\
 &= 77.49\%
 \end{aligned}$$

ตารางที่ 4.1 ค่าการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด

ขณะไม่มีโหลด											
แรงดัน	Input					Output					
	แรงดัน (V)	กระแส (I)	กำลังไฟฟ้า (W)	PF	ความถี่ (Hz)	แรงดัน (V)	กระแส (I)	กำลังไฟฟ้า (W)	PF	ความถี่ (Hz)	%Vreg
50 V	50	0.2	0	0	50.03	24.8	0	0	50	0	0.8
70 V	70	0.3	5.3	0.23	49.97	34.9	0	0	50.01	0	0.286
90 V	90.3	0.5	8.5	0.21	50.01	44.6	0	0	50.02	0	0.889
120 V	120	1	17.9	0.15	49.99	59.1	0	0	50.02	0	1.500

ตารางที่ 4.2 ค่าการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขณะมีโหลด

ขณะมีโหลด												
แรงดัน	Input					Output						
	แรงดัน (V)	กระแส (I)	กำลังไฟฟ้า (W)	PF	ความถี่ (Hz)	แรงดัน (V)	กระแส (I)	กำลังไฟฟ้า (W)	PF	ความถี่ (Hz)	%Vreg	% η
No Load	120	1	17.9	0.15	50	59.1	0	0	50	0	1.5	-
200 W	120	1	42.3	0.34	50.04	58.5	0.4	24.5	50.01	1	2.5	56.18
400 W	120	1.1	66.3	0.5	50.04	57.9	0.9	48.3	50.09	1	3.5	70.86



## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การจัดทำโครงการวิจัยชุดทดสอบประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระดับแรงดันต่ำแบบ 1 เฟส นี้ หลังจากได้ศึกษาการออกแบบและดำเนินการทดสอบจากบทที่แล้วมา ในบทนี้ผู้จัดทำก็นำผลการดำเนินงานมาสรุป

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

จากการศึกษาและสร้างชุดทดสอบประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระดับแรงดันต่ำ แบบ 1 เฟส ได้ทำการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ ด้านทุติยภูมิ เพื่อดูค่าอัตราส่วนการแปลงกระแส (Ratio) ของหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อการดูแลทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังให้ทำงานได้ปกติและไม่มีความเสี่ยงต่อความเสียหาย จึงเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่จะช่วยทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในด้านปฐมภูมิ ทุติยภูมิ ของหม้อแปลงไฟฟ้าระดับแรงดันต่ำ แบบเฟสเดียว ซึ่งการทดสอบประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้า จะมีการทดสอบระดับแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และหากลังไฟฟ้า เพื่อให้เป็นไปตามจุดประสงค์ในการนำไปใช้งานกับอุปกรณ์ไฟฟ้า และเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย จากการศึกษาทำให้สามารถที่จะสรุปผลการทดสอบ ได้ดังนี้

1. สำหรับการศึกษาศึกษาและสร้างชุดทดสอบครั้งนี้ สามารถทราบค่าผลทางประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระดับแรงดันต่ำแบบ 1 เฟส ซึ่งสามารถได้ค่าจากการสูญเสียในขดลวด การสูญเสียในแกนเหล็ก
2. กระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าไปเข้าที่ขดลวดปฐมภูมิ ซึ่งแรงดันไฟฟ้านี้ก็จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก และการจ่ายแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุตมากขึ้น ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลเพิ่มมากขึ้นด้วย ส่งผลให้มีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นที่ขดลวดปฐมภูมิมากขึ้น การขยายตัวของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะไปตัดกับขดลวดทางด้านทุติยภูมิ และเกิดการเหนี่ยวนำของแรงดันไฟฟ้าขึ้น จึงทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรด้านทุติยภูมิผ่านไปยังโหลด

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรใช้มิเตอร์แบบดิจิตอลวัดเปรียบเทียบกับมิเตอร์อนาล็อกด้วย เพื่อเปรียบเทียบค่าที่วัดได้มีความละเอียดมากขึ้น เพราะเมื่อวัดด้วยมิเตอร์แบบอนาล็อกอาจมีความคลาดเคลื่อนที่มากกว่าแบบดิจิตอล
2. ควรหาค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าที่วัดได้จากมิเตอร์จากทั้งสองแบบดังกล่าว เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุด



## บรรณานุกรม

- [1] ศุภชัย สุรินทร์วงศ์. **วงจรแม่เหล็กและหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไป**. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2542.
- [2] ไชยชาญ หินเกิด. **หม้อแปลงไฟฟ้า**. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2557.
- [3] มงคล ทองสงคราม. **หม้อแปลงไฟฟ้า**. กรุงเทพฯ: ห้างหุ้นส่วนจำกัด วิ.เจ. พรินต์ติ้ง, 2547.
- [4] Mulukutla S. Sarma, **Electric Machines**, West Publishing Company, 1994.
- [5] Wei Hu Youhua Hou Fei Xu and Ji Yu. “**The loss analysis and research of power plant's Connecting Transformer.**” IEEE Proceedings of the 29th Chinese Control Conference.2110.
- [6] W. McDermid and J. Lambert. “**Power transformer testing at Manitoba Hydro's high voltage test facility.**” International Conference on High Voltage Engineering and Application. 2012.
- [7] Agus Purwadi Nana Heryana and Dadan Nurafiat. “**Testing and diagnostics of power transformer in PT. Indonesia Power Kamojang Geothermal Power Plant unit 1 .**” International Conference on Electrical Engineering and Informatics. 2011.
- [8] Evgen Pichkalyov Meltem Sevim Evgen Dzyuba. “**AUDIO TRANSFORMER DESIGN FOR TUBE AMPLIFIER WITH IMPROVED QUALITY AND REDUCED COST.**” IEEE Standard Education Committee. 2012.
- [9] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. **มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย พ.ศ.2556**. กรุงเทพฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2556.

ไม่มีเนื้อหาจากต้นฉบับ



## คณะผู้วิจัย



รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร  
E-mail: nattachote.r@rmutp.ac.th

### การศึกษา

ปร.ด. (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
วศ.ม. (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
วศ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร  
คอ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทเวศร์

### งานวิจัยที่สนใจ

การวางแผนและปฏิบัติการในระบบไฟฟ้ากำลัง ผลกระทบของการเชื่อมต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายในระบบจำหน่ายไฟฟ้า และเทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุด

### ใบอนุญาตประกอบวิชาชีพ

ใบอนุญาตประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม ระดับสามัญวิศวกร สาขาไฟฟ้า งานไฟฟ้ากำลัง  
ใบอนุญาตผู้ตรวจสอบอาคาร

### สมาชิกสมาคมวิชาชีพ

- สมาคมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า (แห่งประเทศไทย)
- สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.) สามัญสมาชิก ตลอดชีพ
- Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology Association of Thailand (ECTI Thailand)
- Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE)
- The Institution of Engineering and Technology (IET)
- International Association of Computer Science and Information Technology (IACSIT)

## คณะผู้วิจัย



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พูนศรี วรรณการ  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร  
E-mail: poonsri.w@rmutp.ac.th

### การศึกษา

วศ.ด.(วิศวกรรมไฟฟ้า)  
วศ.ม.(วิศวกรรมไฟฟ้า)  
วศ.บ.(วิศวกรรมไฟฟ้า)

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

### งานวิจัยที่สนใจ

อิเล็กทรอนิกส์กำลัง และระบบไฟฟ้ากำลัง

### ใบอนุญาตประกอบวิชาชีพ

ใบอนุญาตประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม ระดับภาคีวิศวกร สาขาไฟฟ้า งานไฟฟ้ากำลัง

### สมาชิกสมาคมวิชาชีพ

- สมาคมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า (แห่งประเทศไทย)