

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

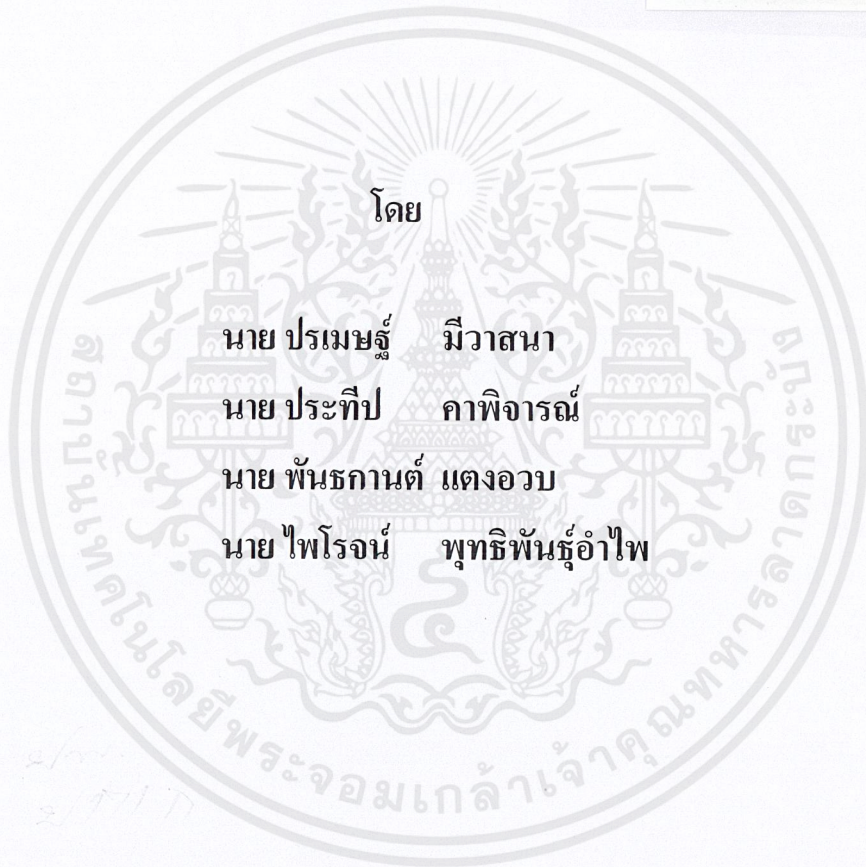
การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กความถี่ต่ำ โดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม

Design of Low-frequency Small Transformer

Using Optimization Technique



T117510



โดย

นาย ประเมษฐ์ มีวาสนา

นาย ประทีป คาพิจารณ์

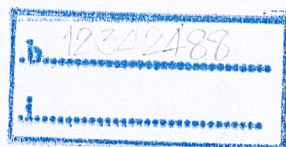
นาย พันธกานต์ แดงอวบ

นาย ไพโรจน์ พุทธิพันธ์อำไพ

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 117510

วัน,เดือน,ปี.....5 ส.ค. 2554



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

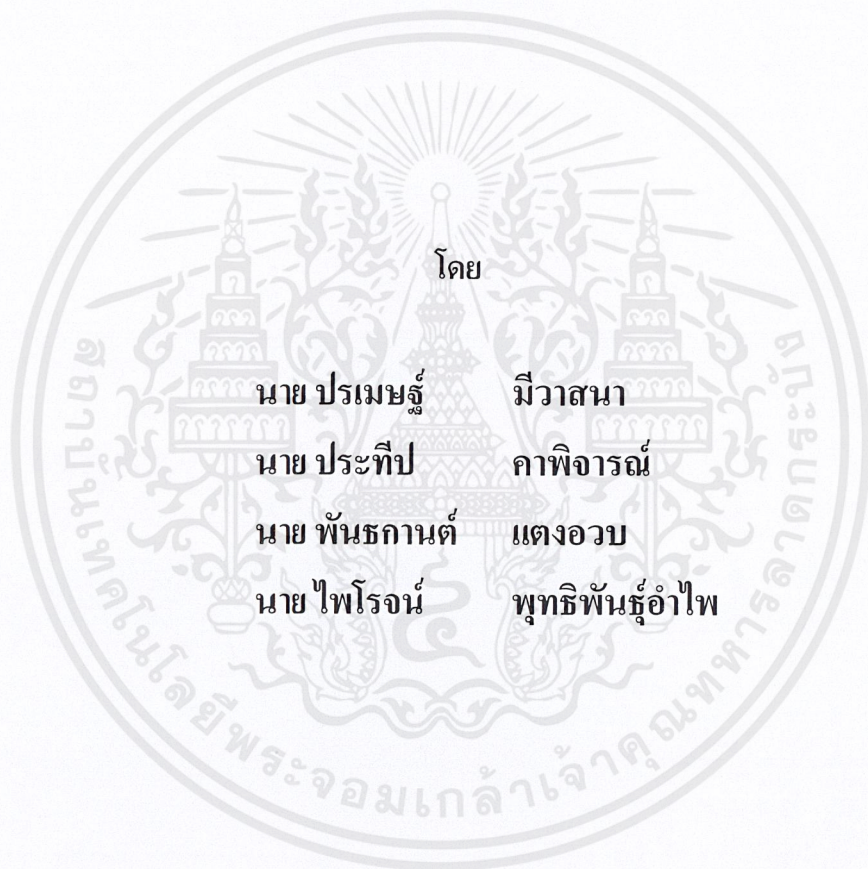
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กความถี่ต่ำ  
โดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม

**Design of Low-frequency Small Transformer  
Using Optimization Technique**



โดย

นาย ประเมษฐ์

มีวาสนา

นาย ประทีป

กาพิจารย์

นาย พันธกานต์

แตงอวบ

นาย ไพโรจน์

พุทธิพันธุ์อำไพ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

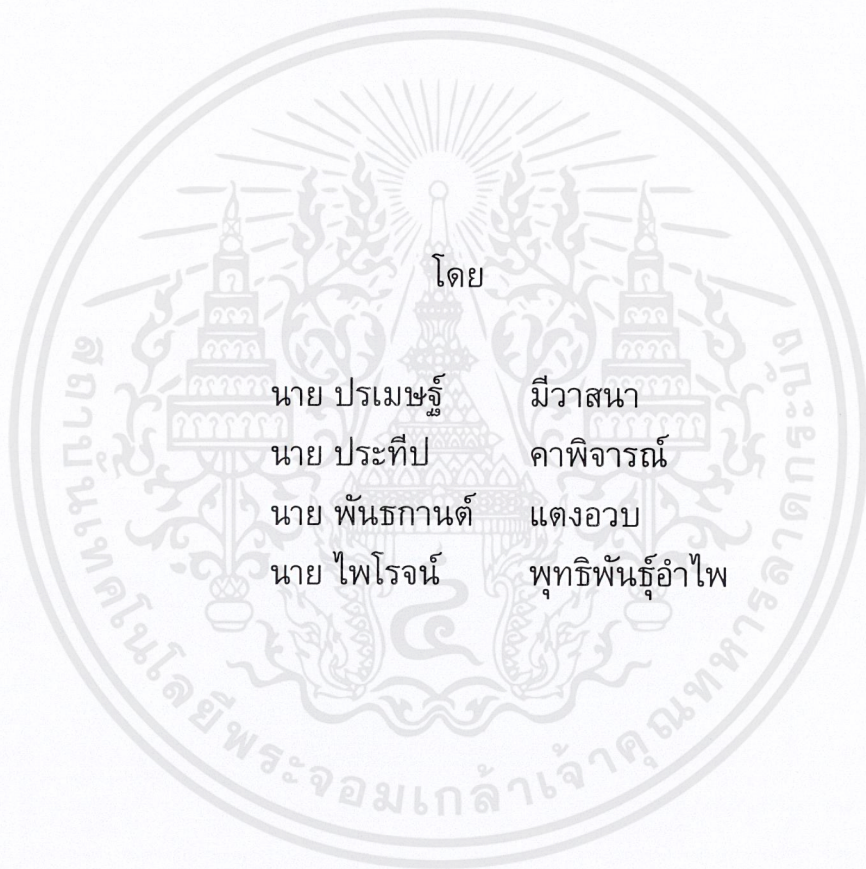
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2553

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กความถี่ต่ำ โดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม  
Design of Low-frequency Small Transformer Using Optimization Technique



โดย

นาย ประเมษฐ์

มีวาสนา

นาย ประทีป

คาพิจารณ์

นาย พันธกานต์

แดงอวบ

นาย ไพโรจน์

พุทธิพันธุ์อำไพ

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2553

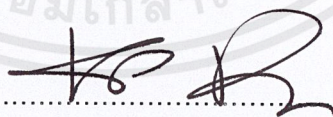
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กความถี่ต่ำ โดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม

ผู้จัดทำ

- |                 |                 |               |
|-----------------|-----------------|---------------|
| 1. นายปรเมษฐ์   | มีวาสนา         | รหัส 50010900 |
| 2. นายประทีป    | คาพิจารณ์       | รหัส 50010904 |
| 3. นายพันธกานต์ | แดงอวบ          | รหัส 50011083 |
| 3. นายไพโรจน์   | พุทธิพันธุ์อำไพ | รหัส 50011143 |



.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รศ.ดร.ชัยวุฒิ นัตถรอุทัย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กความถี่ต่ำ โดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม

นายปรเมษฐ์	มีวาสนา	รหัส 50010900
นายประทีป	คาพิจารณ์	รหัส 50010904
นายพันธกานต์	แดงอวบ	รหัส 50011083
นายไพโรจน์	พุทธิพันธุ์อำไพ	รหัส 50011143
รศ.ดร.ชัยวุฒิ	ฉัตรอุทัย	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2553

### บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กความถี่ต่ำด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้โปรแกรมแมทแลบ (จีเนติกอัลกอริทึม) ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อให้ได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีคุณลักษณะตามเป้าหมายที่ต้องการออกแบบ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีราคาต่ำที่สุด หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงสุด และหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีราคาต่ำโดยสามารถกำหนดประสิทธิภาพได้ตามต้องการ ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้นั้นจะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดขึ้น ในปริญญาานิพนธ์นี้ นำเสนอผลการออกแบบที่เหมาะสมของหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 300 และ 500 โวลต์-แอมป์ 220/110 โวลต์ การหาค่าที่เหมาะสมนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าตามที่ต้องการได้

คำสำคัญ: การออกแบบที่เหมาะสม, หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก

## Design of Low-frequency Small Transformer Using Optimization Technique

Poramate Meevasana

Prateep Kapijan

Pantakan Tang-eueb

Pairoj Puttipunaumpai

Assoc.Prof.Dr.Chaiwut Chat-uthai Advisor

2010

### Abstract

This project presents the design of low-frequency small transformer using optimization technique. MATLAB/Genetic Algorithm Optimization Toolbox is proposed in order to evaluate the parameters of transformer structure such as low cost or high efficiency or low cost with defined efficiency specifications. The optimal design results of 300 VA and 500 VA, 220/110 V transformers are presented. This optimization technique can be applied for designing the transformer having the desire specification.

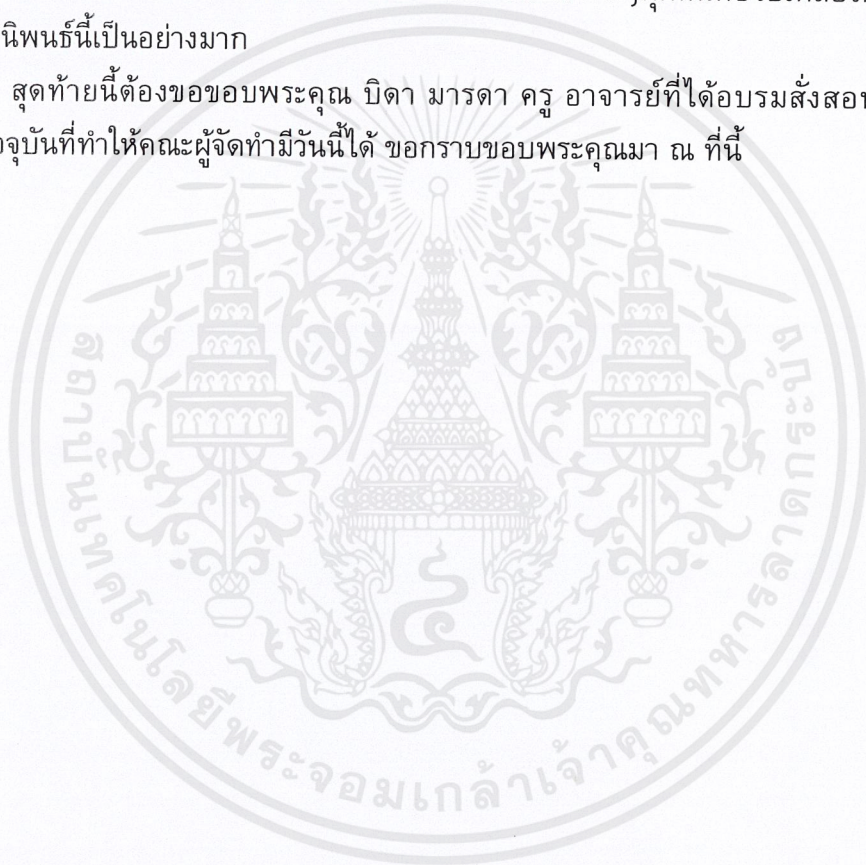
Keywords: Design optimization, Small transformer

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ส่งเสริมในเรื่องของการทำวิจัยของนักศึกษา ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย อาจารย์ที่ปรึกษา เป็นอย่างสูงที่กรุณาให้คำปรึกษา รวมทั้งแนะนำโครงการและให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้าน ตลอดจนอาจารย์ในภาควิชาที่ประสิทธิประสาทความรู้ให้กับผู้เขียนในครั้งนี้

นอกจากนี้ผู้จัดทำต้องขอขอบคุณเพื่อนร่วมพล แสงทน รุ่นพี่ที่กำลังศึกษาปริญญาเอกที่ให้คำปรึกษาและแนะนำช่วยเหลือทางด้านโปรแกรม และเพื่อนๆทุกคนที่ช่วยเหลือโครงการและปริญญาโทนี้เป็นอย่างมาก

สุดท้ายนี้ต้องขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ครู อาจารย์ที่ได้อบรมสั่งสอนตั้งแต่เด็กจนถึงปัจจุบันที่ทำให้คณะผู้จัดทำวันนี้ได้ ขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้



# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ.....	VI
สารบัญตาราง.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและความสำคัญ.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 ทฤษฎีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก.....	4
2.3 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก.....	5
2.3.1 โครงสร้างแกนเหล็ก.....	5
2.3.2 โครงสร้างขดลวดตัวนำ.....	6
2.4 กำลังการสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า.....	7
2.4.1 กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก ( $P_{core}$ ).....	7
2.4.1.1 การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loss).....	7
2.4.1.2 การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy current loss).....	7
2.4.2 การสูญเสียในขดลวดตัวนำ ( $P_{cu}$ ).....	8
2.5 สมการการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเบื้องต้น.....	9
2.5.1 การหาปริมาตร น้ำหนัก และราคาของแกนเหล็ก.....	9
2.5.2 การหาพื้นที่การพันของขดลวด.....	9
2.5.3 การหาปริมาตร น้ำหนัก และราคาของขดลวด.....	10
2.6 ขั้นตอนการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ IV การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การทดสอบคุณลักษณะของแกนเหล็กและผลการตรวจสอบสมการ การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า.....	15
3.1 บทนำ.....	15
3.2 กรณีที่จ่ายแรงดันที่ขดลวดขดที่ 1.....	17
3.3 กรณีที่จ่ายแรงดันที่ขดลวดขดที่ 1 อนุกรมกับขดที่ 2.....	18
3.4 กรณีที่จ่ายแรงดันที่ขดลวดขดที่ 1 ขดที่ 2 และขดที่ 3 อนุกรมกัน.....	20
3.5 ผลการตรวจสอบสมการการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า.....	25
บทที่ 4 เป้าหมายการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสม.....	27
4.1 บทนำ.....	27
4.2 หม้อแปลงไฟฟ้าราคาต่ำสุด.....	27
4.3 หม้อแปลงไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงสุด.....	28
4.4 หม้อแปลงไฟฟ้าราคาต่ำกำหนดประสิทธิภาพได้.....	30
บทที่ 5 การใช้งานโปรแกรมออกแบบโซลินอยด์แกนอากาศแบบประหยัด.....	32
5.1 บทนำ.....	32
5.2 เป้าหมายราคาต่ำสุด.....	33
5.3 เป้าหมายประสิทธิภาพสูงสุด.....	35
5.4 เป้าหมายราคาต่ำสุดโดยกำหนดประสิทธิภาพ.....	37
5.5 การเปรียบเทียบราคาและประสิทธิภาพของแต่ละเป้าหมาย.....	39
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	42
6.1 บทนำ.....	42
6.2 สรุปผลการจำลองเป้าหมายราคาต่ำสุด.....	43
6.3 สรุปผลการจำลองเป้าหมายประสิทธิภาพสูงสุด.....	43
6.4 สรุปผลการจำลองเป้าหมายราคาต่ำสุดโดยกำหนดประสิทธิภาพ.....	43
บรรณานุกรม.....	45
ภาคผนวก ก.....	46
ภาคผนวก ข.....	47
ภาคผนวก ค.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า.....5
2.2	โครงสร้างของแผ่นเหล็กที่นำมาจัดเรียงเป็นแกน E I.....6
2.3	Hysteresis loop ของแกนเหล็ก.....7
2.4	แสดงภาพตัดแกนเหล็กที่เกิดกระแสไหลวน.....8
2.5	แสดงพื้นที่การพันขดลวด..... 10
2.6	แสดงความยาวเฉลี่ยต่อรอบการพัน..... 11
3.1	รูปร่างหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับทดสอบคุณสมบัติแกนเหล็ก..... 15
3.2	จ่ายแรงดันที่ขดลวดขดที่ 1..... 16
3.3	จ่ายแรงดันที่ขดลวดขดที่ 1 และขดที่ 2 อนุกรมกัน.....16
3.4	จ่ายแรงดันที่ขดลวดขดที่ 1 ขดที่ 2 และขดที่ 3 อนุกรมกัน.....16
3.5	กราฟเส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็กของแกนเหล็กทดสอบ.....22
3.6	กราฟ $P_c$ ของขดที่ 1, 1+2, 1+2+3.....23
3.7	กราฟ $P_c$ แต่ละแบบ ที่คิด B จากแรงดันที่ต่างกัน.....25
4.1	Flowchart ของโปรแกรมราคาต่ำสุด.....28
4.2	Flowchart ของโปรแกรมประสิทธิภาพสูงสุด.....29
4.3	Flowchart ของโปรแกรมราคาต่ำสุดที่สามารถกำหนดประสิทธิภาพได้.....31
5.1	หน้าจอการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กความถี่ต่ำโดยวิธีหาค่าที่เหมาะสม.....32
5.2	ตัวอย่างการจำลองการออกแบบเป้าหมายราคาต่ำสุด 300 VA, $J=4$ .....33
5.3	กราฟการเปรียบเทียบราคาหาค่าความหนาแน่นกระแส ( $J$ ) ค่าต่าง ๆ.....34
5.4	ตัวอย่างการจำลองการออกแบบเป้าหมายประสิทธิภาพสูงสุด 300 VA, $J=4$ .....35
5.5	กราฟการเปรียบเทียบประสิทธิภาพหาค่าความหนาแน่นกระแส ( $J$ ) ค่าต่าง ๆ.....36
5.6	ตัวอย่างการจำลองการออกแบบเป้าหมายราคาต่ำสุดโดยกำหนด ประสิทธิภาพ 300 VA, $J=4$ ..... 37
5.7	กราฟแห่งเปรียบเทียบราคาและประสิทธิภาพเป้าหมายราคาต่ำโดยกำหนด.....38
5.8	กราฟแห่งเปรียบเทียบราคาและประสิทธิภาพเป้าหมายราคาต่ำโดยกำหนด ประสิทธิภาพพิกัด 500 VA..... 39
5.9	กราฟเปรียบเทียบราคาของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละเป้าหมายพิกัด 300 VA, $J=4$ .....41
ก.1	ลักษณะการตัดแกนเหล็ก E และ I.....46
ข.1	พื้นที่การพันขดลวด..... 47
ค.1	โครงสร้างแกนเหล็ก..... 50

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ผลการทดสอบของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ป้อนไฟที่ขดลวดขดที่ 1.....	17
3.2 ผลการทดสอบของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ป้อนไฟที่ขดลวดขดที่ 1 และขดที่ 2 อนุกรมกัน.....	19
3.3 ผลการทดสอบของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ป้อนไฟที่ขดลวดขดที่ 1 ขดที่ 2 และขดที่ 3 อนุกรมกัน.....	20
3.4 แสดงการคิดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B$ ) จากแรงดันที่ ตกคร่อมขดลวดแต่ละขด.....	24
3.5 ตารางเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการกับค่าที่ได้จากหม้อแปลงต้นแบบ.....	26
5.1 ข้อมูลผลการจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าราคาต่ำสุดพิกัด 300 VA.....	33
5.2 ข้อมูลผลการจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าราคาต่ำสุดพิกัด 500 VA.....	33
5.3 ข้อมูลผลการจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงสุดพิกัด 300 VA .....	35
5.4 ข้อมูลผลการจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงสุดพิกัด 500 VA .....	35
5.5 ข้อมูลผลการจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าราคาต่ำสุดโดยกำหนด ประสิทธิภาพ 300 VA .....	37
5.6 ข้อมูลผลการจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าราคาต่ำสุดโดยกำหนด ประสิทธิภาพ 500 VA .....	38
5.7 ข้อมูลการเปรียบเทียบราคาและประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า พิกัด 300 VA .....	39
5.8 ข้อมูลการเปรียบเทียบราคาและประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า พิกัด 500 VA .....	40
5.9 ข้อมูลการเปรียบเทียบผลการจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละเป้าหมาย พิกัด 300 VA, $J=4$ .....	40

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กเป็นอุปกรณ์ที่ถูกนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ตามเครื่องใช้ไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ การเลือกใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าก็ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้เลือกใช้ว่าต้องการพิจารณาเรื่องใดเป็นหลัก เช่น พิจารณาเรื่องประสิทธิภาพ ดังนั้นควรเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการสูญเสียที่ต่ำ หรือ พิจารณาในเรื่องราคาต่ำเพราะต้องการลดต้นทุนการผลิต ซึ่งในการออกแบบโดยทั่วไป ผู้ออกแบบจะใช้วิธีการลองผิดลองถูกจากประสบการณ์และความชำนาญของผู้ออกแบบโดยการทดลองเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย ขนาดแกนเหล็กและความยาวขดลวดการออกแบบโดยวิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย สิ้นเปลืองเวลาและอาจจะได้ผลการออกแบบที่ไม่ตรงตามเป้าหมายที่ต้องการ ดังนั้นปริญาณิพนธ์นี้จึงได้นำเอาวิธีการเชิงตัวเลขในการหาค่าที่เหมาะสม (Numerical optimization method) ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าสูงสุดหรือค่าต่ำสุดของฟังก์ชันมาใช้ช่วยในการหาโครงสร้างที่เหมาะสมเพื่อให้ได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีคุณลักษณะตามที่ต้องการ

#### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

สำหรับจุดมุ่งหมายของวิทยานิพนธ์นี้คือการศึกษาแนวทางการในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กความถี่ต่ำด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมเพื่อให้ได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ โดยทำการศึกษาวิธีการคำนวณหาโครงสร้างต่างๆของหม้อแปลงไฟฟ้าและศึกษาวิธีการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้โปรแกรม MATLAB/genetic algorithm optimization toolbox (GAOT) จากนั้นทำการสร้างโปรแกรมการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีเป้าหมายต่างๆ ประกอบด้วย ราคาต่ำสุด ประสิทธิภาพสูงสุด และราคาต่ำที่สามารถกำหนดประสิทธิภาพได้ โดยมีการสร้างหม้อแปลงต้นแบบ และนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่ใช้ จากนั้นนำผลที่ทำการตรวจสอบความถูกต้องเรียบร้อยแล้ว มาใช้วิเคราะห์การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าลักษณะต่าง ๆ ตามที่ต้องการ

#### 1.3 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตของการวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้คือการเสนอแนวทางการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก ความถี่ต่ำ ด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม เพื่อออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีพิกัด 300 VA และ 500 VA แรงดันไฟฟ้า 220/110 V ให้มีคุณลักษณะตามที่ต้องการ ซึ่งแบ่งเป้าหมายของการออกแบบเป็น 3 เป้าหมาย คือ ราคาต่ำสุด ประสิทธิภาพสูงสุด และราคาต่ำที่สามารถกำหนดประสิทธิภาพได้ หลังวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่น ขนาดแกนเหล็ก, ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก, จำนวนรอบขดลวด เพื่อนำไปอธิบายเกี่ยวกับโครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปภายใต้คุณลักษณะที่แตกต่างกัน

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการศึกษาวิธีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยใช้โปรแกรม GAOT หวังหาค่าที่เหมาะสมให้กับเป้าหมายที่ต้องการ สิ่งที่จะคาดว่าจะได้รับคือรู้วิธีใช้โปรแกรม MATLAB/genetic algorithm optimization toolbox สำหรับออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก อีกทั้งยังได้รับความรู้เรื่องการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรแต่ละตัวเป็นอย่างไรเมื่อมีเป้าหมายที่แตกต่างกัน เช่น ถ้าต้องการหม้อแปลงไฟฟ้าที่ราคาต้นทุนต่ำ ก็ควรใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดเล็ก แต่ผลที่ตามมาคือประสิทธิภาพจะต่ำด้วย และโปรแกรมนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบเรื่องอื่น ๆ ได้อีกด้วย

#### 1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกจะเป็นการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการสร้างโปรแกรม MATLAB/Genetic Algorithm Optimization Toolbox (GAOT) และส่วนที่สองจะเป็นการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งทั้ง 2 ส่วนมีรายละเอียดดังนี้

ส่วนแรกจะศึกษาเกี่ยวกับวิธีการสร้างโปรแกรมก่อน โดยเริ่มแรกจะต้องสร้างหน้าต่างป้อนค่าและหน้าต่างแสดงผล โดยใช้ Graphical User Interfaces (GUIs) เป็นโปรแกรมที่สามารถรับค่าโดยตรงจากผู้ใช้ จากนั้นจะนำโปรแกรม Genetic Algorithm Optimization Toolbox (GAOT) เป็นตัวคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อหาค่าที่เหมาะสมกับคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ต้องการ

ส่วนที่สองจะทำการศึกษาวิธีการออกแบบหม้อแปลงขนาดเล็กและทำการทดสอบแกนเหล็กเพื่อหาค่า Magnetic flux density ที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก จากนั้นทดลองออกแบบและสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กขึ้นมา 1 ตัว เพื่อนำไปใช้เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าตัวต้นแบบ นำผลที่ได้จากการใช้โปรแกรม GAOT กับผลที่วัดได้จากหม้อแปลงไฟฟ้าตัวต้นแบบ เพื่อทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่เขียนขึ้นมา เมื่อพบว่าโปรแกรมสามารถใช้งานได้จริงแล้วจึงทำการสร้างโปรแกรมขึ้น เพื่อหาค่าที่เหมาะสมให้กับเป้าหมายการออกแบบทั้ง 3 เป้าหมาย มีการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรแต่ละตัว คือ ขนาดแกนเหล็ก ( $E, D$ ) , ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ( $B$ ) , จำนวนรอบขดลวด ( $N$ ) เพื่อดูลักษณะการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าและค่าพารามิเตอร์อื่น เช่น ราคาหม้อแปลงไฟฟ้า ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าว่าจะเปลี่ยนแปลงในลักษณะใด

รายละเอียดของการนำเสนอวิทยานิพนธ์นี้สามารถแบ่งได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กแบบทั่วไป โดยใช้สมการฟาราเดย์เป็นสมการในการออกแบบ และแสดงโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กรวมถึงตัวแปรแต่ละตัว

บทที่ 3 การทดสอบแกนเหล็ก เพื่อหาคุณสมบัติแกนเหล็ก โดยเราจะทำการหากราฟ Coreloss/kg. , กราฟ Exciting power เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า, การหาความยาวขดลวด เพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการออกแบบ

บทที่ 4 เป้าหมายของการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 เป้าหมาย คือ ราคาต่ำสุด , ประสิทธิภาพสูงสุด , ราคาต่ำสามารถกำหนดประสิทธิภาพได้ มีการนำเสนอเป้าหมายที่เขียนในโปรแกรม GAOT และแสดงเงื่อนไขทั้งหมดที่เขียนขึ้นในแต่ละโปรแกรมซึ่งจะมีโปรแกรมที่แตกต่างกัน ทั้ง 3 โปรแกรม

บทที่ 5 แสดงผลการจำลองของโปรแกรมแต่ละเป้า โดยมีเป้าหมายดังนี้ เป้าหมายราคาต่ำสุด เป้าหมายประสิทธิภาพสูงสุด และเป้าหมายราคาต่ำสุดโดยกำหนดประสิทธิภาพ ในการจำลองโปรแกรมจะทำการจำลอง 2 พิกัดคือ 300 VA และ 500 VA ทำการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นกระแส ( $J$ ) เพื่อศึกษาแนวโน้มของโปรแกรมและทำการเปรียบเทียบ

บทที่ 6 สรุปผลการดำเนินงานที่ผ่านมาทั้งหมด รวมถึงทำการวิเคราะห์ผลการออกแบบ โดยโปรแกรมแต่ละเป้าหมาย จุดประสงค์การออกแบบ

## บทที่ 2

### ทฤษฎีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก

#### 2.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า กำลังสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเบื้องต้น ซึ่งจะอธิบายถึงสมการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้มีความรู้ความเข้าใจพื้นฐานการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเบื้องต้น แล้วจึงนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบ หม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ รวมไปถึงการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสมโดยมีเป้าหมายต่าง ๆ ตามที่ผู้ออกแบบต้องการ

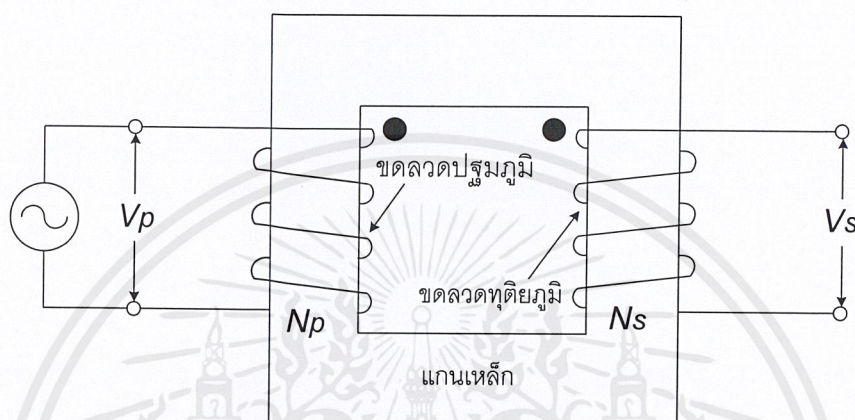
#### 2.2 ทฤษฎีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก

จากนิยามของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 384-2524) “หม้อแปลงไฟฟ้า หมายถึง เครื่องมือซึ่งอาศัยการเหนี่ยวนำด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า แปลงค่าแรงดันและกระแสสลับระหว่างขดลวดสองขดหรือมากกว่า ให้เป็นค่าแรงดันและกระแสต่าง ๆ กัน ณ ความถี่เดียวกัน” ดังนั้นหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากวงจรหนึ่งไปยังอีกวงจรหนึ่ง โดยการเปลี่ยนทั้งค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าซึ่งใช้หลักการวางจรมแม่เหล็กที่กระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งไม่มีจุดต่อถึงกันทางไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยทั่วไปหม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยขดลวดหลัก 2 ขด ได้แก่ ขดลวดแรงดันสูง (High voltage winding) และขดลวดแรงต่ำ (Low voltage winding) ในขณะที่ใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าจะเรียกชื่อขดลวดด้านรับแรงดันไฟฟ้าเข้าว่าขดลวดปฐมภูมิ (Primary winding) และขดลวดด้านจ่ายแรงดันไฟฟ้าออกเข้ากับภาระไฟฟ้าเรียกว่าขดลวดทุติยภูมิ (Secondary winding) ในทางอุดมคติจะไม่พิจารณาค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด ส่วนระดับแรงดันไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเท่านั้น

การแปลงแรงดันไฟฟ้าโดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้านั้นใช้หลักการเหนี่ยวนำระหว่างเส้นแรงแม่เหล็ก ระหว่างขดลวดทั้งสองของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยที่ขดลวดปฐมภูมิซึ่ง ต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าสลับนั้นจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลเข้าขดลวดเกิดเป็นเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นที่ขดลวดปฐมภูมิ และเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะขยายตัวไปตัดกับขดลวดทุติยภูมิ แรงดันที่เกิดขึ้นนี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดทั้งสอง กล่าวคือ ถ้าจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิน้อยกว่าจำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ จะเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดเพิ่มแรงดัน (Step-up transformer) แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้าจำนวนรอบของขดปฐมภูมิมากกว่าทุติยภูมิ จะเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดลดแรงดัน (Step-down transformer)

## 2.3 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก

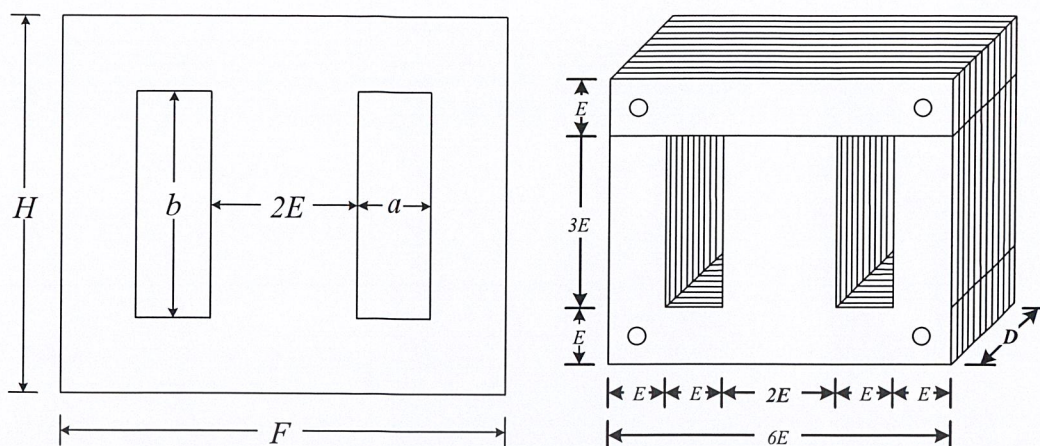
หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้งานอยู่โดยทั่วไปมีขดลวดสองชุดพันรอบแกนเหล็กที่ทำด้วยสาร ferromagnetic เป็นแผ่นเหล็กบาง ๆ (laminated core) นำมาวางเรียงซ้อนกัน ส่วนประกอบที่สำคัญของหม้อแปลงไฟฟ้ามีอยู่ 2 ส่วนคือส่วนของแกนเหล็ก (Core) ซึ่งเป็นส่วนที่มีพลังงานสนามแม่เหล็กปรากฏอยู่ และส่วนของขดลวด (Winding) ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยจะแสดง ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า

### 2.3.1 โครงสร้างแกนเหล็ก

โครงสร้างวงจรมแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กโดยทั่วไปนิยมใช้โครงสร้างเป็นแบบเชลล์ ซึ่งมีลักษณะการประกอบกันของแผ่นเหล็กรูป E และ I ขนาดขากลางของแกนเหล็กจะเป็นสองเท่าของขาข้าง เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กหลักที่เกิดขึ้นบริเวณขากลางจะแบ่งกระจายออกด้านข้างด้านละเท่า ๆ กัน ส่วนขนาดของช่องฟันขดลวดนั้นจะมีขนาดสัดส่วนขึ้นกับเป้าหมายของการออกแบบและลักษณะการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า แต่การออกแบบแกนเหล็กที่นิยม จะออกแบบโดยไม่มีการสูญเสียเศษวัสดุจากการตัด ดังรูปที่ 2.2 โดยกำหนดให้ขนาดความกว้างของช่องฟันขดลวด ( $a$ ) เท่ากับ  $E$  ซึ่งจะเป็นครึ่งหนึ่งของขนาดขากลาง  $2E$  และความสูง ( $b$ ) จะมีขนาดเป็นสามเท่าของความกว้าง ( $a$ ) เท่ากับ  $3E$  ลักษณะสัดส่วนของแกนเหล็กที่ได้จากการออกแบบนี้จะเรียกว่าแกนแบบประหยัด ขนาดความกว้าง ( $F$ ) และความสูง ( $H$ ) ของแกนเหล็กจะมีสัดส่วนกันเป็น 6:5



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของแผ่นเหล็กที่นำมาจัดเรียงเป็นแกน E I

แกนเหล็กซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าจะทำด้วยสาร ferromagnetic ซึ่งมีคุณสมบัติทางแม่เหล็กที่ดีคือ มีค่าความซึมซาบแม่เหล็กสูง ( $\mu$ ) เพื่อลดค่าความสูญเสียทางแม่เหล็กเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loss) และเพื่อลดการรั่วของเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งจะทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นกระจายอยู่ในส่วนที่เป็นแกนเหล็กเท่านั้น โครงสร้างแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก แผ่นเหล็กที่ประกอบเป็นวงจรแม่เหล็ก แผ่นเหล็กที่ประกอบเป็นวงจรแม่เหล็กจะเป็นแผ่นบาง ๆ มีความหนาประมาณ 0.35-0.5 มม. วางเรียงอัดซ้อนกันเพื่อเป็นการลดค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก (Eddy current loss) ซึ่งค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กทั้งสองค่าเรียกรวมกันว่าความสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss)

### 2.3.2 โครงสร้างขดลวดตัวนำ

ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กมีโครงสร้างเป็นกลุ่มลวดตัวนำพื้นที่หน้าตัดกลม ทำด้วยทองแดงหรืออลูมิเนียมจำนวนสองชุดหรือมากกว่าพันอยู่รอบวงจรแม่เหล็กเดียวกันแต่ไม่มีการต่อถึงกันทางไฟฟ้า การเลือกใช้ขนาดของตัวนำขึ้นกับพิกัดกำลังไฟฟ้า แรงดันใช้งาน หม้อแปลงไฟฟ้ารวมถึงความหนาแน่นกระแส (Current density) และวิธีการระบายความร้อน การออกแบบจะคำนวณขนาดของตัวนำที่ต้องการแล้วนำไปเลือกขนาดตัวนำมาตรฐานจากตารางข้อมูลลวดตัวนำซึ่งมาตรฐานที่มีการใช้งานในปัจจุบันได้แก่ AWG (American Wire Gauge), SWG (Standard Wire Gauge) ข้อมูลที่ได้จากตารางข้อมูลลวดตัวนำได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (mm.), พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ ( $\text{mm}^2$  หรือ Cmil), น้ำหนักของตัวนำ (g/m) และความต้านทานของตัวนำ ( $\text{kg./}\Omega$  หรือ  $\Omega/\text{m}$ )

## 2.4 กำลังการสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า

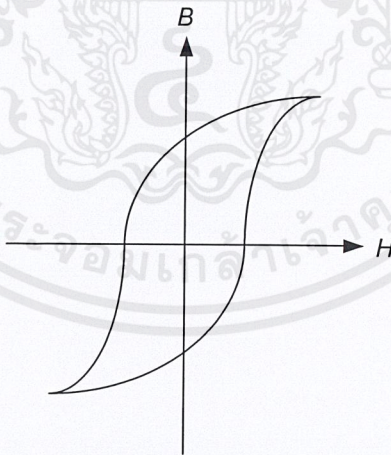
กำลังการสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งประกอบด้วยกำลังการสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) และกำลังการสูญเสียในขดลวดตัวนำ (Copper loss)

### 2.4.1 กำลังการสูญเสียในแกนเหล็ก ( $P_{core}$ )

การสูญเสียในแกนเหล็กจะประกอบด้วย การสูญเสีย 2 ชนิด คือ การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิสและการสูญเสียเนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลวนในแกนเหล็ก ทั้งนี้เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าคงที่ตลอดเวลาทุกสภาวะไหลด ดังนั้นการสูญเสียในแกนเหล็กนี้จึงมีค่าคงที่แม้ว่าไหลดจะมีการเปลี่ยนแปลง

#### 2.4.1.1 การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loss)

เป็นความสูญเสียในแกนเหล็กที่เกิดจากคุณสมบัติของแกนเหล็กมีสนามแม่เหล็กตกค้าง และการอิมตัวของแกนเหล็กทำให้เกิดฮิสเทอรีซิสลูป ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งเกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าสลับมีการเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทาง การเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจึงเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางตลอดเวลาด้วยอัตราเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า ดังนั้น เส้นแรงแม่เหล็กจึงกลับเข้าไปมาอยู่ตลอดเวลาการกลับทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะต้องใช้พลังงานส่วนหนึ่งเพื่อเอาชนะความฝืดของโมเลกุล พลังงานที่ใช้ไปในรูปของพลังงานความร้อน จึงเรียกการสูญเสียนี้ว่าฮิสเทอรีซิส

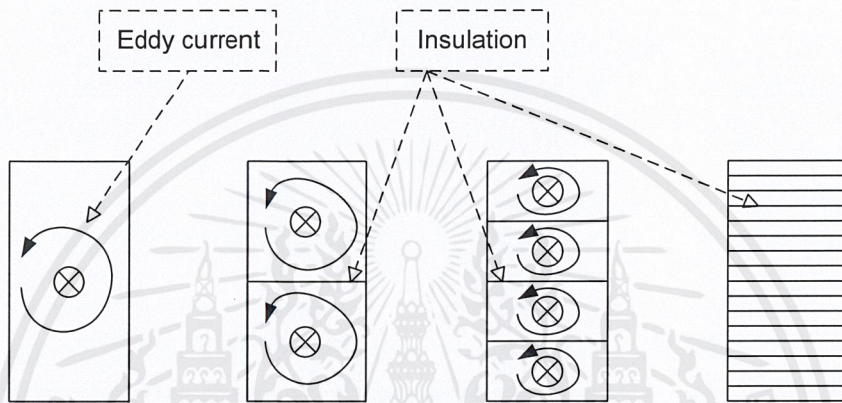


รูปที่ 2.3 Hysteresis loop ของแกนเหล็ก

#### 2.4.1.2 การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy current loss)

เป็นความสูญเสียในแกนเหล็กที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแกนเหล็กที่ใช้เป็นวงจรมแม่เหล็กแล้วทำให้เกิดกระแสไหลวน ดังรูปที่ 2.4 เนื่องจากกระแสไฟฟ้าสลับมีการเปลี่ยนแปลงขนาด และทิศทาง การเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจึงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางตลอดเวลาด้วยการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กดังกล่าว จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของแรงดันไฟฟ้าตามกฎของไมเคิลฟาราเดย์ เนื่องจากแกนเหล็กนั้นเป็นตัวนำชนิดหนึ่ง และในแกนเหล็กนั้นจะเป็นวงจรปิดและมีความต้านทานอยู่ด้วย จึงทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลวนขึ้นในแกนเหล็ก และเกิดการสูญเสียเนื่องจากผลของกระแสไฟฟ้ายกกำลังสอง และความต้านทานของแกนเหล็ก ( $I^2R$ ) จะแสดงผลในรูปของความร้อน การสูญเสียจะสามารถทำให้ลดลงได้โดยการใช้เหล็กแผ่นบาง ๆ การสูญเสียในแกนเหล็กจะสามารถหาได้โดยการทดสอบสภาวะเปิดวงจรดังได้กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 2.4 แสดงภาพตัดแกนเหล็กที่เกิดกระแสไหลวน

#### 2.4.2 การสูญเสียในขดลวดตัวนำ ( $P_{cu}$ )

การสูญเสียในขดลวดตัวนำหรือขดลวดทองแดง เกิดขึ้นเนื่องจากความต้านทานของขดลวดทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานภาวะไม่มีโหลดจะมีกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดปฐมภูมิเพียงเล็กน้อย ดังนั้นการสูญเสียที่เกิดขึ้นก็จะมีปริมาณเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อต่อโหลดกับขดลวดทุติยภูมิจะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านโหลดและกระแสไฟฟ้าในขดลวดปฐมภูมิจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น ดังนั้นการสูญเสียจึงมีค่ามากขึ้น จึงอาจกล่าวได้ว่าการสูญเสียในขดลวดตัวนำของหม้อแปลงไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่ากระแสไฟฟ้าของโหลดหรือขนาดของโหลด และสูญเสียไปในรูปของความร้อน การสูญเสียในขดลวดตัวนำทั้งสองด้านของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถได้จากสมการ (2.1)

$$P_{cu} = I_p^2 R_p + I_s^2 R_s \quad (2.1)$$

เมื่อ  $R_p, R_s$  เป็นค่าความต้านทานไฟฟ้าของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิตามลำดับ  
 $I_p, I_s$  เป็นปริมาณกระแสที่ไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิตามลำดับ

## 2.5 สมการการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเบื้องต้น

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าโดยทั่วไปนั้นจะพิจารณาจากพิกัดกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า ความถี่ ความหนาแน่นกระแสและคุณลักษณะของแกนเหล็กที่ใช้งาน จาก Faraday's สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced voltage) ในขดลวดที่พันรอบแกนเหล็กที่มีจำนวนรอบเท่ากับ  $N$  ดังสมการ (2.2)

$$V = 4.44 fNB_{\max} A_m F_s \quad (2.2)$$

เมื่อ	$V$	คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวดด้านที่พิจารณา (V)
	$f$	คือ ความถี่ของระบบไฟฟ้า (Hz)
	$N$	คือ จำนวนรอบของขดลวดที่พิจารณา (Turn)
	$B_{\max}$	คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (Wb/m <sup>2</sup> )
	$A_m$	คือ พื้นที่หน้าตัดของวงจรมแม่เหล็ก (m <sup>2</sup> )
	$F_s$	คือ ค่า Stacking factor

### 2.5.1 การหาปริมาตร น้ำหนัก และราคาของแกนเหล็ก

เมื่อดูจากรูปที่ 2.2 สามารถหาปริมาตรของแกนเหล็กได้จากสมการ (2.3) และเมื่อรู้ค่าความหนาแน่นของเหล็ก ( $\rho$ ) ที่นำมาใช้ ก็จะหาน้ำหนักของแกนเหล็กได้ตามสมการ (2.4) จากนั้นถ้าเราทราบราคาเหล็ก (บาท/กิโลกรัม) จะได้ว่าราคาของแกนเหล็กดังสมการที่ (2.5)

$$\text{Volume of core} = 24E^2 DF_s \quad (2.3)$$

$$\text{Weight of core} = \text{Volume} \times \text{Density of core} \quad (2.4)$$

$$\text{Cost of core} = \text{Weight} \times \text{Price of core per kg.} \quad (2.5)$$

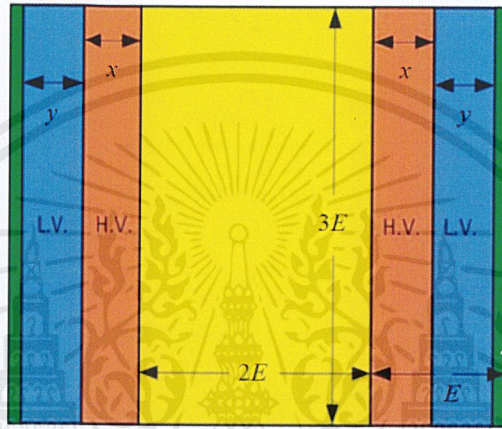
### 2.5.2 การหาพื้นที่การพันของขดลวด

จากรูปที่ 2.5 แสดงถึงพื้นที่การพันของขดลวดซึ่งแบ่งเป็นพื้นที่ส่วนแรงสูงและพื้นที่ส่วนแรงต่ำ เมื่อรู้ขนาดขดลวดและจำนวนรอบของขดลวด จึงนำไปใช้คพื้นที่การพันขดลวด ค่าที่คำนวณได้จะต้องเข้าเงื่อนไขตามสมการ (2.6) เสียก่อนจึงจะสามารถพันขดลวดได้ และสามารถหาความหนาของขดลวดแรงสูงและแรงต่ำได้ดังสมการ (2.7) และสมการ (2.8) ตามลำดับ

$$A_w = \frac{N_{H.V.} A_c, H.V. + N_{L.V.} A_c, L.V.}{F_w} \leq 3E^2 \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดยที่  $A_w$  คือ พื้นที่หน้าตัดของการพัน  
 $N_{H.V.}$  คือ จำนวนรอบของขดลวดด้านแรงดันสูง  
 $N_{L.V.}$  คือ จำนวนรอบของขดลวดด้านแรงดันต่ำ  
 $A_{c,H.V.}$  คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวดด้านแรงดันสูง  
 $A_{c,L.V.}$  คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวดด้านแรงดันต่ำ  
 $F_w$  คือ ค่า winding factor มีค่าประมาณ 0.4 – 0.6  
 $E$  คือ ความกว้างของช่องการพัน



รูปที่ 2.5 แสดงพื้นที่การพันขดลวด

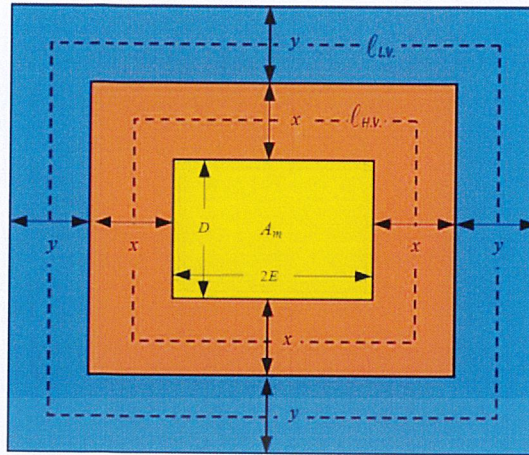
$$\text{ความหนาของขดลวดแรงสูง } (x) = \frac{N_{H.V.} \cdot A_{c,H.V.}}{F_w 3E} \quad (2.7)$$

$$\text{ความหนาของขดลวดแรงต่ำ } (y) = \frac{N_{L.V.} \cdot A_{c,L.V.}}{F_w 3E} \quad (2.8)$$

โดยที่  $x+y$  ต้องมีค่าน้อยกว่า  $E$  ดังรูปที่ 2.5

### 2.5.3 การหาปริมาตร น้ำหนัก และราคาของขดลวด

ขั้นแรกเราต้องทำการหาความยาวเฉลี่ยต่อรอบของขดลวดด้านแรงสูง และขดลวดด้านแรงต่ำเสียก่อน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.6 โดยสามารถหาได้จากสมการ (2.9) และ (2.10) ตามลำดับ จากนั้นนำค่าที่ได้ไปหาปริมาตร น้ำหนัก และราคา ของขดลวด ตามสมการ (2.11) ถึง (2.15) เช่นเดียวกับการหาปริมาตร น้ำหนัก และราคาของเหล็ก



รูปที่ 2.6 แสดงความยาวเฉลี่ยต่อรอบการพัน

$$l_{H.V.} = 2(2E + x) + 2(D + x) \quad (2.9)$$

$$l_{L.V.} = 2(2E + 2x + y) + 2(D + 2x) + y \quad (2.10)$$

$$\text{Volume H.V.} = l_{H.V.} \cdot N_{H.V.} \cdot A_{c,H.V.} \quad (2.11)$$

$$\text{Volume L.V.} = l_{L.V.} \cdot N_{L.V.} \cdot A_{c,L.V.} \quad (2.12)$$

$$\text{Weight H.V.} = \text{Volume H.V.} \times \text{Density} \quad (2.13)$$

$$\text{Weight L.V.} = \text{Volume L.V.} \times \text{Density} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} \text{Cost of winding} = &[(\text{Weight H.V.} \times \text{Price of winding H.V. per kg.}) \\ &+ (\text{Weight L.V.} \times \text{Price of winding L.V. per kg.})] \end{aligned} \quad (2.15)$$

โดยที่  $l_{H.V.}$  และ  $l_{L.V.}$  คือความยาวของขดลวดเฉลี่ยต้านแรงดันสูงและแรงดันต่ำตามลำดับ

## 2.6 ขั้นตอนการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

โครงสร้างหลักของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กจะประกอบไปด้วยโครงสร้างของแกนเหล็กและโครงสร้างของขดลวดตัวนำ จากสมการ (2.16) ซึ่งเป็นสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เมื่อจัดรูปสมการใหม่ ดังสมการ (2.17) จะเห็นว่าทอมทางด้านซ้ายเป็นอัตราส่วนของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อจำนวนรอบขดลวดซึ่งเป็นทอมที่แสดงถึงโครงสร้างของขดลวดตัวนำ ส่วนทอมทางด้านขวาเป็นทอมที่แสดงถึงโครงสร้างของแกนเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V = 4.44 fNB_{\max} A_m \quad (2.16)$$

$$\frac{V_s}{N_s} = \frac{V_p}{N_p} = 4.44 fB_{\max} A_m \quad (2.17)$$

- เมื่อ  $V_p$  คือ พิกัดแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ  
 $V_s$  คือ พิกัดแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ  
 $N_p$  คือ จำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิ  
 $N_s$  คือ จำนวนรอบของขดลวดด้านทุติยภูมิ

จากโครงสร้างของแกนเหล็กที่เป็นการเรียงอัดซ้อนกันของแผ่นเหล็กซิลิกอน โดยทั่วไป จะมีช่องว่างระหว่างแผ่นอยู่เล็กน้อย ดังนั้นปริมาตรและรูปร่างภายนอกกับปริมาตรของเนื้อแกนเหล็กจึงไม่เท่ากัน จึงกำหนดค่า  $F_s$  (Stacking factor) เป็นอัตราส่วนของปริมาตรเหล็กจริงต่อปริมาตรเหล็กเมื่อนำมาเรียงซ้อนกัน ค่า  $F_s$  จะมีค่าน้อยกว่าหนึ่งเสมอ โดยทั่วไปค่าอัตราส่วน  $F_s$  ของแกนเหล็กแต่ละชนิดจะต่างกันออกไปตามวิธีการผลิต การฉาบผิวหน้าและการอัดแกน ดังนั้นสมการ (2.18) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{V_p}{N_p} = \frac{V_s}{N_s} = 4.44 fB_{\max} A_m F_s \quad (2.18)$$

จากสมการ (2.18) เมื่อกำหนดค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อจำนวนรอบของขดลวดและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ต้องการ ทำให้ทราบพื้นที่หน้าตัดของวงจรมแม่เหล็ก การพิจารณาเลือกใช้แกนเหล็กจากขนาดของแกนเหล็กมาตรฐานเพื่อประกอบเป็นวงจรมแม่เหล็กจำเป็นต้องพิจารณาพื้นที่ช่องว่างการพันขดลวดด้วยโดยจะต้องมีพื้นที่เพียงพอสำหรับการพันขดลวดทั้ง 2 ชุด ในการออกแบบนี้เราจะกำหนดให้แรงดันด้านปฐมภูมิ ( $V_p$ ) เป็นด้านแรงดันสูง และแรงดันด้านทุติยภูมิ ( $V_s$ ) เป็นด้านแรงดันต่ำ ดังนั้นสามารถอธิบายเป็นขั้นตอนการออกแบบได้ดังนี้

### ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าพิกัด

กำหนดพิกัด  $S$  (VA),  $V_p/V_s$ ,  $f$  (Hz) และเลือกชนิดของแกนเหล็กที่มีขนาดตามต้องการ และคำนวณค่ากระแสที่พิกัดทางด้านปฐมภูมิ ( $I_p$ ) และด้านทุติยภูมิ ( $I_s$ ) ดังสมการ (2.19) และสมการ (2.20)

$$I_p = \frac{S}{V_p} \quad (2.19)$$

$$I_s = \frac{S}{V_s} \quad (2.20)$$

### ขั้นตอนที่ 2 หาขนาดลวดตัวนำ

หาขนาดพื้นที่หน้าตัดขดลวด  $A_{c(p)}$  และ  $A_{c(s)}$  โดยเลือกใช้ค่าความหนาแน่นกระแส ( $J$ ) ที่ใช้งานเหมาะสมในช่วง 2.0 ถึง 5.0 A/mm<sup>2</sup> แล้วแทนค่าตามสมการ (2.21) และสมการ (2.22)

$$A_{c(p)} = \frac{I_p}{J} \quad (\text{mm}^2) \quad (2.21)$$

$$A_{c(s)} = \frac{I_s}{J} \quad (\text{mm}^2) \quad (2.22)$$

### ขั้นตอนที่ 3 กำหนดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B_{\max}$ )

เลือกค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก  $B_{\max}$  ที่ต้องการออกแบบโดยดูจากกราฟ  $B-H$

### ขั้นตอนที่ 4 ออกแบบค่า Voltage per turn ( $V/N$ )

เลือกออกแบบค่า  $V/N$  จากสมการ (2.18) โดยการเลือกขนาดแกนขากลาง ( $2E$ ) และความหนาแกนขากลาง ( $D$ ) ซึ่งจะได้ค่า  $A_m$  ตามสมการ (2.23) และกำหนดค่า  $F_s$  จากนั้นจะทราบจำนวนรอบขดลวดต้านแรงดันสูง ( $N_p$ ) และจำนวนรอบขดลวดต้านแรงดันต่ำ ( $N_s$ )

$$A_m = D \times 2E \quad (\text{mm}^2) \quad (2.23)$$

### ขั้นตอนที่ 5 คำนวณพื้นที่การพันขดลวด

รู้ค่า  $N_p$ ,  $N_s$ ,  $A_{c(p)}$ ,  $A_{c(s)}$  และกำหนดค่า  $F_w$  นำไปแทนในสมการ (2.6) ก็จะได้ค่า  $A_w$  แต่ต้องเข้าใจเงื่อนไขว่าจะต้องมีค่าน้อยกว่า  $3E^2$

### ขั้นตอนที่ 6 คำนวณปริมาตร และ น้ำหนักของแกนเหล็ก

คำนวณจากสมการ (2.3) และ (2.4) ตามลำดับ

### ขั้นตอนที่ 7 คำนวณปริมาตร และ น้ำหนักของขดลวด

คำนวณจากสมการ (2.11) , (2.12) , (2.13) และ (2.14) ตามลำดับ

### ขั้นตอนที่ 8 คำนวณค่าความสูญเสียรวมของหม้อแปลง ( $P_t$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยความสูญเสียในแกนเหล็กและความสูญเสียในขดลวด

ความสูญเสียในแกนเหล็ก ( $P_{core}$ ) :  $P_{core} = P_c W_c$  (W)

โดยที่  $P_c$  คือ กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (W/kg.)

$W_c$  คือ น้ำหนักแกนเหล็ก (kg.)

ความสูญเสียในขดลวดตัวนำ ( $P_{cu}$ ) : คำนวณจากสมการ (2.1)

ความสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า ( $P_t$ ) :  $P_t = P_{core} + P_{cu}$

### ขั้นตอนที่ 9 คำนวณราคาของหม้อแปลงไฟฟ้า

ราคาแกนเหล็ก : คำนวณจากสมการ (2.5)

ราคาขดลวดตัวนำ : คำนวณจากสมการ (2.15)

ราคารวมของหม้อแปลงไฟฟ้า = ราคาแกนเหล็ก + ราคาขดลวดตัวนำ

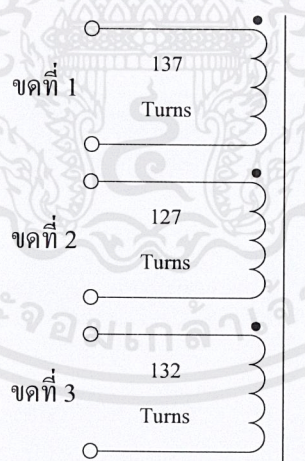
### บทที่ 3

## การทดสอบคุณลักษณะของแกนเหล็ก และผลการตรวจสอบสมการการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

### 3.1 บทนำ

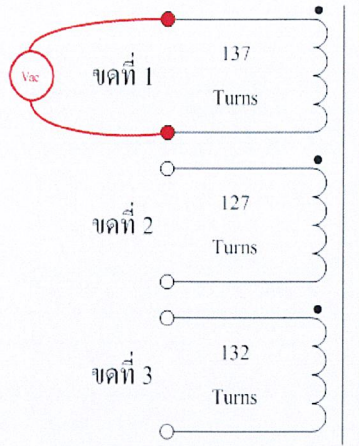
การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเราจำเป็นที่จะต้องรู้คุณลักษณะของแกนเหล็กก่อน เนื่องจากการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าได้มีการคิดประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วย ซึ่งการคิดประสิทธิภาพนั้นก็จะต้องรู้ค่าการสูญเสียทั้ง 2 ส่วน คือ ค่าสูญเสียจากขดลวด (Copper loss) และค่าสูญเสียจากแกนเหล็ก (Core loss) ในส่วนของ Copper loss เราสามารถที่จะหาได้จากสมการการออกแบบ แต่ในส่วน Core loss เราจะรู้ได้จากคุณลักษณะของแกนเหล็กที่เราซื้อ มา แต่ถ้าในกรณีที่แกนเหล็กที่เราซื้อมานั้น ไม่มีคุณลักษณะของแกนเหล็กมาให้ เราก็ต้องมาทำการทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะของแกนเหล็ก โดยคุณลักษณะของแกนเหล็กที่เราต้องการหา คือ กราฟเส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็กของแกนเหล็ก และกราฟ  $P_c$  (Watt/kg) ของแกนเหล็ก

โดยการหาคุณลักษณะของแกนเหล็กเราจะทำการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบขึ้นมา โดยใช้ลวดเบอร์ SWG 22 และพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก  $38 \times 38$  ตารางมิลลิเมตร หม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบที่เราสร้างจะประกอบด้วยขดลวด 3 ขด ดังรูปที่ 3.1

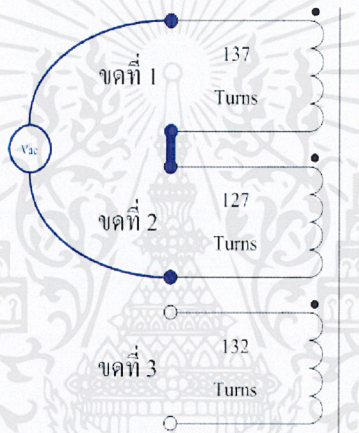


รูปที่ 3.1 รูปวงจรหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับทดสอบคุณสมบัติแกนเหล็ก

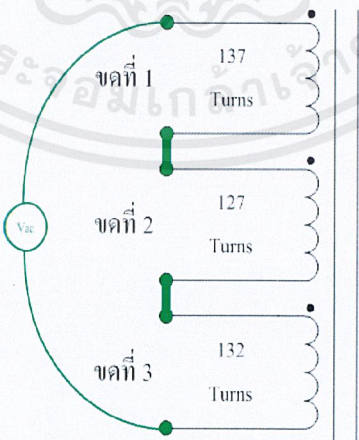
นำหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบมาทำการทดสอบแบบเปิดวงจร โดยทำการจ่ายแรงดัน 3 แบบ คือ จ่ายแรงดันที่ขดลวดขดที่ 1 (137 รอบ) ดังรูปที่ 3.2, จ่ายแรงดันที่ขดที่ 1 อนุกรมกับขดที่ 2 (264 รอบ) ดังรูปที่ 3.3 และจ่ายแรงดันที่ขดที่ 1 ขดที่ 2 และขดที่ 3 อนุกรมกัน (396 รอบ) ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.2 จ่ายแรงดันที่ขดลวดขดที่ 1



รูปที่ 3.3 จ่ายแรงดันที่ขดลวดขดที่ 1 และขดที่ 2 อนุกรมกัน



รูปที่ 3.4 จ่ายแรงดันที่ขดลวดขดที่ 1 ขดที่ 2 และขดที่ 3 อนุกรมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 กรณีที่จ่ายแรงดันที่ขดลวดขดที่ 1

ทำการเพิ่มแรงดันและคอยสังเกตการเปลี่ยนแปลงของกระแส ในช่วงแรกกระแสจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็นเชิงเส้นกับแรงดันที่ป้อนเข้า และเมื่อเพิ่มแรงดันจนถึงค่า ๆ หนึ่ง กระแสจะเริ่มเพิ่มขึ้นไม่เป็นเชิงเส้น เราจึงค่อย ๆ เพิ่มแรงดันทีละน้อย ๆ หลังจากนั้นทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน ( $V$ ), กระแสไฟฟ้า ( $I$ ), กำลังไฟฟ้า ( $P$ ), Exciting power ( $S$ ) เมื่อเรานำค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้ไปแทนในสมการการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้างแสดงในสมการ (2.2) จะได้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B$ ) ดังนี้

$$B_1 = \frac{V_1}{4.44 \times 50 \times 38 \times 38 \times 0.96 \times N_1} \quad (3.1)$$

ถ้าเรานำแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดที่ 1 ไปแทนใน  $V_1$  และจำนวนรอบของขดลวดขดที่ 1 ซึ่งคือ 137 รอบ ไปแทนใน  $N_1$  ตามลำดับในสมการ (3.1) เราจะได้ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่คิดจากขดลวดขดที่ 1 ( $B_1$ ) ก็จะได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ป้อนไฟที่ขดลวดขดที่ 1

$V_1$ (V)	$I$ (A)	$P_c$ (W/kg)	$S$ (VA)	$B_1$ (T)
5.01	0.0482	0.0533	0.24	0.1189
9.98	0.0728	0.1909	0.72	0.2367
14.91	0.0944	0.3814	1.40	0.3536
19.80	0.1129	0.6260	2.23	0.4696
24.95	0.1328	0.9537	3.31	0.5918
30.04	0.1517	1.3516	4.71	0.7126
32.00	0.1707	1.5247	5.46	0.7590
34.94	0.1936	1.8140	6.76	0.8287
36.64	0.2134	2.0000	7.82	0.8690
37.39	0.2242	2.0909	8.38	0.8868
39.30	0.2568	2.3471	10.10	0.9321
41.02	0.2915	2.6074	11.96	0.9729
41.31	0.2986	2.6611	12.33	0.9798
42.27	0.3216	2.8305	13.60	1.0026
43.46	0.3529	3.0619	15.34	1.0308

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

$V_l$ ( V )	$I$ ( A )	$P_c$ ( W/kg )	$S$ ( VA )	$B_l$ ( T )
44.66	0.3880	3.3305	17.33	1.0592
45.04	0.3984	3.4132	17.94	1.0683
46.67	0.4500	3.8264	21.00	1.1069
48.49	0.5151	4.3677	24.98	1.1501
50.05	0.5735	4.8842	28.71	1.1871
51.41	0.6249	5.3719	32.13	1.2194
53.60	0.7165	6.2768	38.41	1.2713
55.61	0.8075	7.2231	44.91	1.3190
57.42	0.8923	8.1487	51.24	1.3619
59.45	0.9910	9.2685	58.91	1.4101

### 3.3 กรณีที่จ่ายแรงดันที่ขดลวดขดที่ 1 อนุกรมกับขดที่ 2

ทำการเพิ่มแรงดันและคอยสังเกตการเปลี่ยนแปลงของกระแส ในช่วงแรกกระแสจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็นเชิงเส้นกับแรงดันที่ป้อนเข้า และเมื่อเพิ่มแรงดันจนถึงค่าๆหนึ่ง กระแสจะเริ่มเพิ่มขึ้นไม่เป็นเชิงเส้น เราจึงค่อยๆเพิ่มแรงดันทีละน้อยๆ หลังจากนั้นทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน ( $V$ ) , กระแสไฟฟ้า ( $I$ ) , กำลังไฟฟ้า ( $P$ ) , Exciting power ( $S$ ) เมื่อเรานำค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้ไปแทนในสมการการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าดังแสดงในสมการ (2.2) จะได้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B$ ) ดังนี้

$$B_{l+2} = \frac{V_{l+2}}{4.44 \times 50 \times 38 \times 38 \times 0.96 \times N_{l+2}} \quad (3.2)$$

ถ้าเรานำแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดที่ 1 อนุกรมกับขดที่ 2 ไปแทนใน  $V_{l+2}$  และจำนวนรอบของขดลวดขดที่ 1 อนุกรมกับขดที่ 2 ซึ่งคือ 264 รอบ ไปแทนใน  $N_{l+2}$  ตามลำดับในสมการ (3.2) เราจะได้ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่คิดจากขดลวดขดที่ 1 อนุกรมกับขดที่ 2 ( $B_{l+2}$ ) ก็จะได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ผลการทดสอบของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ป้อนไฟที่ขดลวดขดที่ 1 และขดที่ 2 อนุกรมกัน

$V_{1+2} (V)$	$I (A)$	$P_c (W/kg)$	$S (VA)$	$B_{1+2} (T)$
4.96	0.0167	0.0132	0.08	0.0611
10.10	0.0256	0.0570	0.26	0.1243
14.95	0.0322	0.1194	0.48	0.1841
19.89	0.0386	0.1991	0.77	0.2448
25.03	0.0446	0.2966	1.12	0.3081
29.97	0.0500	0.4041	1.50	0.3688
34.98	0.0553	0.5289	1.93	0.4305
39.99	0.0603	0.6735	2.41	0.4922
45.06	0.0654	0.8388	2.95	0.5546
49.97	0.0708	1.0165	3.54	0.6150
54.95	0.0770	1.2148	4.23	0.6763
60.18	0.0849	1.4462	5.11	0.7407
64.54	0.0935	1.6570	6.03	0.7943
69.93	0.1087	1.9462	7.60	0.8607
74.94	0.1294	2.2727	9.70	0.9224
80.17	0.1596	2.7024	12.80	0.9867
85.01	0.1945	3.1983	16.53	1.0463
89.78	0.2355	3.8140	21.15	1.1050
94.87	0.2849	4.6115	27.03	1.1677
100.12	0.3415	5.6157	34.19	1.2323
105.00	0.3990	6.7107	41.89	1.2924
109.15	0.4518	7.7764	49.32	1.3434
112.90	0.503	8.8388	56.80	1.3896
116.22	0.5494	9.8305	63.84	1.4305
119.61	0.6028	10.9586	72.11	1.4722
122.47	0.6508	11.9462	79.70	1.5074
125.52	0.7038	13.0000	88.34	1.5449

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

$V_{I+2}$ (V)	$I$ (A)	$P_c$ (W/kg)	$S$ (VA)	$B_{I+2}$ (T)
127.85	0.7496	13.8347	95.83	1.5736
130.28	0.8039	14.7438	104.73	1.6035
132.22	0.8509	15.4628	112.50	1.6274
134.21	0.902	16.1942	121.06	1.6519
136.08	0.9586	16.9008	130.45	1.6749
137.43	1.0062	17.4462	138.28	1.6915

### 3.4 กรณีที่จ่ายแรงดันที่ขดลวดขดที่ 1 ขดที่ 2 และขดที่ 3 อนุกรมกัน

ทำการเพิ่มแรงดันและคอยสังเกตการเปลี่ยนแปลงของกระแส ในช่วงแรกกระแสจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็นเชิงเส้นกับแรงดันที่ป้อนเข้า และเมื่อเพิ่มแรงดันจนถึงค่า ๆ หนึ่ง กระแสจะเริ่มเพิ่มขึ้นไม่เป็นเชิงเส้น จากนั้นค่อย ๆ เพิ่มแรงดันทีละน้อย ๆ ทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน ( $V$ ), กระแสไฟฟ้า ( $I$ ), กำลังไฟฟ้า ( $P$ ), Exciting power ( $S$ ) เมื่อนำค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้ไปแทนในสมการการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าดังแสดงในสมการ (2.2) จะได้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B$ ) ดังนี้

$$B_{I+2+3} = \frac{V_{I+2+3}}{4.44 \times 50 \times 38 \times 38 \times 0.96 \times N_{I+2+3}} \quad (3.3)$$

ถ้าเรานำแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดที่ 1 ขดที่ 2 และ ขดที่ 3 อนุกรมกัน ไปแทนใน  $V_{I+2+3}$  และจำนวนรอบของขดลวดที่ 1 ขดที่ 2 และ ขดที่ 3 อนุกรมกัน ซึ่งคือ 396 รอบ ไปแทนใน  $N_{I+2+3}$  ตามลำดับในสมการ (3.3) เราจะได้ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่คิดจากขดลวดที่ 1 ขดที่ 2 และ ขดที่ 3 อนุกรมกัน ( $B_{I+2+3}$ ) ก็จะได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ผลการทดสอบของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ป้อนไฟที่ขดลวดขดที่ 1 ขดที่ 2 และขดที่ 3 อนุกรมกัน

$V_{I+2+3}$ (V)	$I$ (A)	$P_c$ (W/kg)	$S$ (VA)	$B_{I+2+3}$ (T)
5.07	0.0088	0.0057	0.04	0.0416
9.98	0.0134	0.0243	0.13	0.0819
15.04	0.0171	0.0557	0.25	0.1234
20.04	0.0202	0.0962	0.40	0.1644

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 (ต่อ)

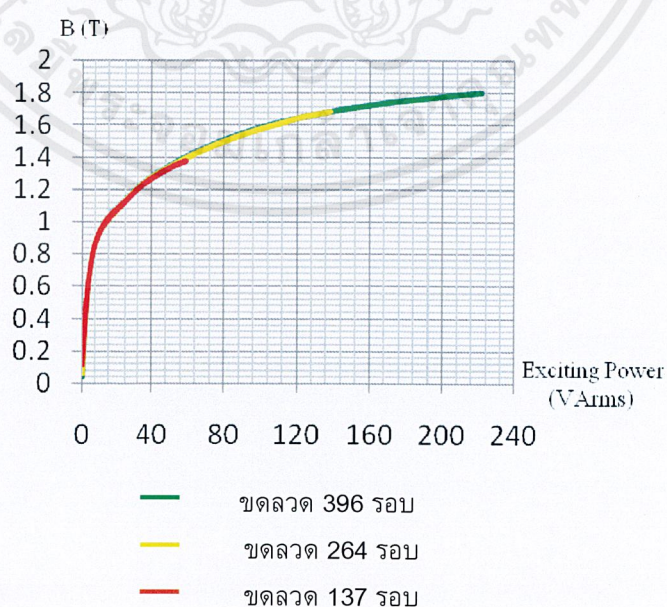
$V_{l+2+3}$ ( V )	$I$ ( A )	$P_c$ ( W/kg )	$S$ ( VA )	$B_{l+2+3}$ ( T )
25.15	0.0232	0.1466	0.58	0.2064
30.06	0.0259	0.2008	0.77	0.2467
34.96	0.0285	0.2603	1.00	0.2868
40.22	0.0312	0.3305	1.25	0.3300
44.93	0.0334	0.4008	1.50	0.3687
50.39	0.0358	0.4876	1.80	0.4135
55.12	0.0379	0.5743	2.09	0.4523
60.17	0.0401	0.6735	2.41	0.4937
65.06	0.0423	0.7727	2.75	0.5338
69.96	0.0440	0.8842	3.11	0.5741
75.00	0.0469	1.0082	3.52	0.6154
80.44	0.0500	1.1528	4.02	0.6601
85.07	0.0527	1.2809	4.48	0.6980
90.32	0.0563	1.4338	5.08	0.7411
95.01	0.0602	1.5826	5.72	0.7796
100.10	0.0656	1.7561	6.57	0.8214
104.97	0.0723	1.9338	7.59	0.8613
110.10	0.0813	2.1528	8.95	0.9034
115.07	0.0923	2.3925	10.62	0.9442
120.05	0.1057	2.6776	12.69	0.9851
125.23	0.1218	3.0206	15.26	1.0276
129.98	0.1385	3.3842	18.00	1.0666
135.09	0.1586	3.8429	21.42	1.1085
140.19	0.1802	4.3636	25.26	1.1504
145.38	0.2042	4.9752	29.69	1.1930
150.05	0.2266	5.5785	34.00	1.2313
154.96	0.2522	6.3057	39.08	1.2716
160.06	0.2805	7.1322	44.89	1.3134
164.80	0.3078	7.9586	50.72	1.3523
170.17	0.3409	8.9958	58.00	1.3964

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 (ต่อ)

$V_{I+2+3}$ (V)	$I$ (A)	$P_c$ (W/kg)	$S$ (VA)	$B_{I+2+3}$ (T)
175.00	0.3723	9.9793	65.16	1.4360
180.35	0.4098	11.1405	73.91	1.4799
185.11	0.4463	12.2148	82.63	1.5190
189.89	0.4862	13.3223	92.32	1.5582
195.02	0.5367	14.5578	104.66	1.6003
200.26	0.5996	15.8677	120.08	1.6433
204.91	0.6699	17.0041	137.27	1.6815
207.16	0.7072	17.5619	146.50	1.6999
209.78	0.7565	18.2479	158.69	1.7214
212.13	0.8063	18.8677	171.05	1.7407
213.91	0.8507	19.3760	181.97	1.7553
218.16	0.9669	20.5991	210.93	1.7902
219.44	1.0087	21.0082	221.35	1.8007

จากตารางที่ 3.1, ตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3 เมื่อนำค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B$ ) กับค่า Exciting power มาสร้างเป็นกราฟให้อยู่ในกราฟเดียวกันจะได้ดังรูป 3.5

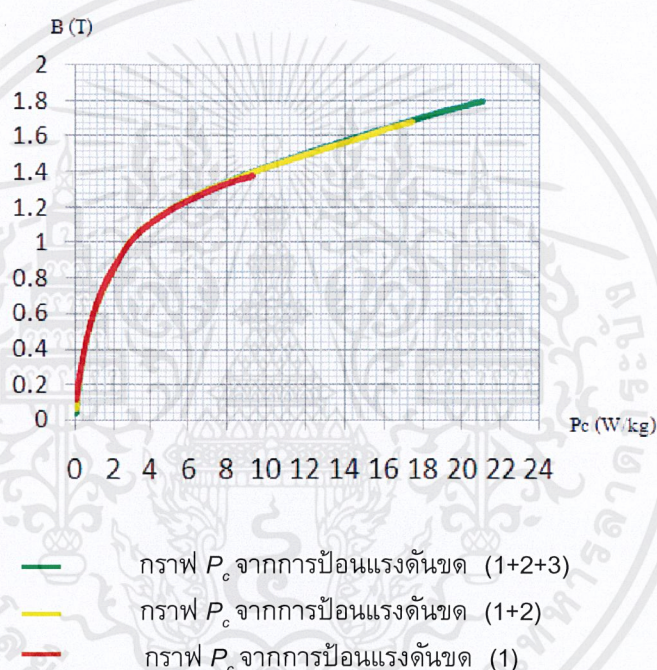


รูปที่ 3.5 กราฟเส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็กของแกนเหล็กทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.5 จะสังเกตเห็นได้ว่าไม่ว่าเราจะใช้จำนวนรอบของขดลวดเท่าใดก็ตาม ลักษณะของเส้นกราฟจะไปในทิศทางเดียวกัน เนื่องมาจากเป็นแกนเหล็กชนิดเดียวกัน นอกจากนั้นแล้วถ้ามองที่กราฟจะเห็นได้ว่ากราฟเริ่มที่จะอ้อมตัวชัดเจนที่  $B$  ประมาณ 1.4 T ขึ้นไป ดังนั้นในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเราจึงควรที่จะออกแบบไม่ให้ค่า  $B$  สูงกว่าค่านี้มากนัก

นอกจากนั้นเราก็นำค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B$ ) กับ  $P_c$  (Watt/kg) จากตารางที่ 3.1, ตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3 มาสร้างเป็นกราฟให้อยู่ในกราฟเดียวกันจะได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 กราฟ  $P_c$  ของขดที่ 1 , 1+2 , 1+2+3

จากรูปที่ 3.6 ก็จะเห็นได้ว่าเมื่อเราออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า ถ้าเรารู้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B$ ) ก็จะทำให้เรารู้ค่า Core loss ของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งเราสามารถนำค่าดังกล่าวไปคิดเรื่องประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าต่อไปได้

แต่ถ้าในกรณีที่เราป้อนแรงดันเข้าที่ขดลวดขดที่ 1 หลังจากนั้นทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน ( $V_1$ ) , แรงดันไฟฟ้าคล่อมขดที่ 2 ( $V_2$ ) , แรงดันไฟฟ้าคล่อมขดที่ 3 ( $V_3$ ) , กระแสไฟฟ้า ( $I$ ) , กำลังไฟฟ้า ( $P$ ) , Exciting power ( $S$ ) เมื่อเรานำค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้ในแต่ละอัน ( $V_1, V_2, V_3$ ) ไปแทนในสมการการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้างแสดงในสมการ (2.2) จะได้อ่านค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B$ ) ในแต่ละค่าออกมาดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงการคิดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B$ ) จากแรงดันที่ตกคร่อมขดลวด  
แต่ละขด

$V_1$ (V)	$V_2$ (V)	$V_3$ (V)	$I$ (A)	$P_c$ (W/kg)	$VA$ (VA)	$B_1$ (T)	$B_2$ (T)	$B_3$ (T)
5.01	4.60	4.78	0.0482	0.0533	0.24	0.1189	0.1177	0.1177
9.98	9.22	9.59	0.0728	0.1909	0.73	0.2367	0.2359	0.2360
14.91	13.74	14.27	0.0944	0.3814	1.41	0.3536	0.3515	0.3513
19.80	18.30	18.97	0.1129	0.6260	2.24	0.4696	0.4682	0.4670
24.95	22.98	23.91	0.1328	0.9537	3.31	0.5918	0.5879	0.5886
30.04	27.67	28.79	0.1517	1.3516	4.72	0.7126	0.7079	0.7087
32.00	29.48	30.63	0.1707	1.5247	5.46	0.7590	0.7542	0.7540
34.94	32.15	33.44	0.1936	1.8140	6.76	0.8287	0.8226	0.8232
36.64	33.80	35.12	0.2134	2.0000	7.82	0.8690	0.8648	0.8645
37.39	34.43	35.79	0.2242	2.0909	8.38	0.8868	0.8809	0.8810
39.30	36.24	37.62	0.2568	2.3471	10.10	0.9321	0.9272	0.9261
41.02	37.78	39.29	0.2915	2.6074	11.96	0.9729	0.9666	0.9672
41.31	38.03	39.60	0.2986	2.6611	12.33	0.9798	0.9730	0.9748
42.27	38.92	40.45	0.3216	2.8305	13.60	1.0026	0.9958	0.9958
43.46	40.02	41.58	0.3529	3.0619	15.34	1.0308	1.0239	1.0236
44.66	41.10	42.69	0.388	3.3305	17.33	1.0592	1.0516	1.0509
45.04	41.46	43.07	0.3984	3.4132	17.94	1.0683	1.0608	1.0603
46.67	42.93	44.63	0.45	3.8264	21.00	1.1069	1.0984	1.0987
48.49	44.63	46.35	0.5151	4.3677	24.98	1.1501	1.1419	1.1410
50.05	46.04	47.83	0.5735	4.8842	28.71	1.1871	1.1780	1.1774
51.41	47.28	49.14	0.6249	5.3719	32.13	1.2194	1.2097	1.2097
53.60	49.24	51.25	0.7165	6.2768	38.41	1.2713	1.2598	1.2616
55.61	51.06	53.07	0.8075	7.2231	44.91	1.3190	1.3064	1.3064
57.42	52.60	54.85	0.8923	8.1487	51.24	1.3619	1.3458	1.3503
59.45	54.00	56.68	0.991	9.2685	58.91	1.4101	1.3816	1.3953

แล้วนำค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B$ ) แต่ละค่ากับ  $P_c$  (Watt/kg.) มาสร้าง  
เป็นกราฟให้อยู่ในกราฟเดียวกัน จะได้ดังรูป 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- กราฟ  $P_c$  โดยคิดค่า  $B$  จาก  $V_1$
- กราฟ  $P_c$  โดยคิดค่า  $B$  จาก  $V_2$
- กราฟ  $P_c$  โดยคิดค่า  $B$  จาก  $V_3$

รูปที่ 3.7 กราฟ  $P_c$  แต่ละแบบ ที่คิด  $B$  จากแรงดันที่ต่างกัน

จากรูปที่ 3.7 จะสังเกตเห็นได้ว่าที่ค่า Core loss เดียวกัน ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B$ ) ที่คิดจาก  $V_2$  กับ  $V_3$  จะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B$ ) ที่คิดจาก  $V_1$  จะมีค่าสูงกว่าแบบที่คิดจาก  $V_2$  กับ  $V_3$  เป็นเพราะว่า  $V_1$  ที่เรานำมาคิด  $B$  นั้นไม่ใช่แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แต่เป็นแรงดันที่ป้อนซึ่ง  $V_1$  จะมีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งจะต้องไปตกคร่อมที่ลวดด้านปฐมภูมิส่วนหนึ่ง ดังนั้น  $B$  ที่คิดออกมาจึงมีค่ามากกว่า

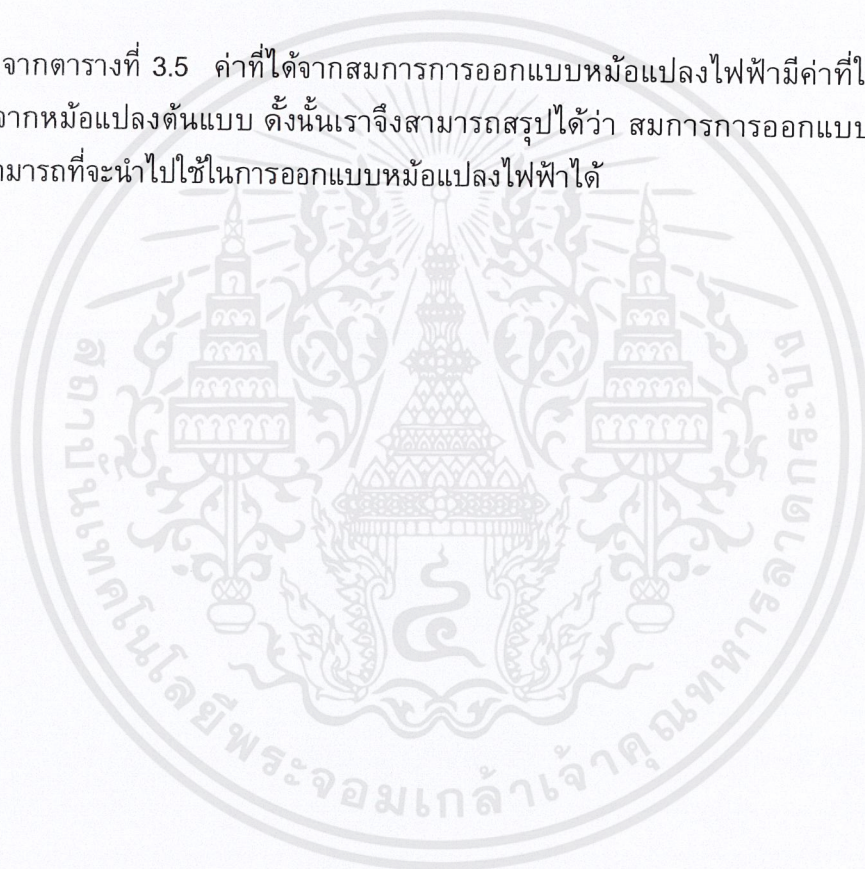
### 3.5 ผลการตรวจสอบสมการการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

สมการการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าจากที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 นั้นจำเป็นที่จะต้องทำการตรวจสอบว่าสมการที่ได้กล่าวมานั้นใช้ในการออกแบบได้จริงหรือไม่ โดยการใช้วิธีคำนวณจากสมการการออกแบบมาเทียบกับค่าที่ได้จากหม้อแปลงต้นแบบ ผลที่ได้เป็นดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ตารางเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการกับค่าที่ได้จากหม้อแปลงต้นแบบ

ข้อมูล	คำนวณจากสมการ	หม้อแปลงต้นแบบ
ความยาวลวด H.V.(m)	97.36	99.15
ความยาวลวด L.V. (m)	62.03	61.38
น้ำหนักลวด H.V. (kg)	0.352	0.350
น้ำหนักลวด L.V. (kg)	0.458	0.422
น้ำหนักเหล็ก (kg)	2.418	2.423

จากตารางที่ 3.5 ค่าที่ได้จากสมการการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากหม้อแปลงต้นแบบ ดังนั้นเราจึงสามารถสรุปได้ว่า สมการการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถที่จะนำไปใช้ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### เป้าหมายการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสม

#### 4.1 บทนำ

สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับสมการเป้าหมายที่ใช้ในการออกแบบ รวมทั้งเงื่อนไขที่สร้างขึ้นมาเพื่อโปรแกรมทำงานได้อย่างถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยเป้าหมายที่ต้องการแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กมีทั้งหมด 3 เป้าหมาย คือ ราคาต่ำสุด, ประสิทธิภาพสูงสุด, ราคาต่ำสามารถกำหนดประสิทธิภาพได้ และบทนี้ยังได้นำเสนอ Flow chart แสดงขั้นตอนการทำงานของแต่ละโปรแกรมเพื่อให้เข้าใจขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมที่สร้างขึ้น

#### 4.2 หม้อแปลงไฟฟ้าราคาต่ำสุด

เมื่อต้องการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีราคาของหม้อแปลงไฟฟ้าต่ำ ซึ่งก็หมายถึงราคาของส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้าตัวนั้นเอง ส่วนประกอบหลัก ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กก็คือ แกนเหล็ก และขดลวด ดังนั้นสมการเป้าหมายจะสร้างขึ้นมาจากราคาของแกนเหล็กและขดลวดรวมกัน

$$\text{Minimize } F(2E, D, B, N_{H.V.}, N_{L.V.}) = [\text{Core weight} \times \text{Core cost}] + [\text{Windings weight} \times \text{Copper cost}] \quad (4.1)$$

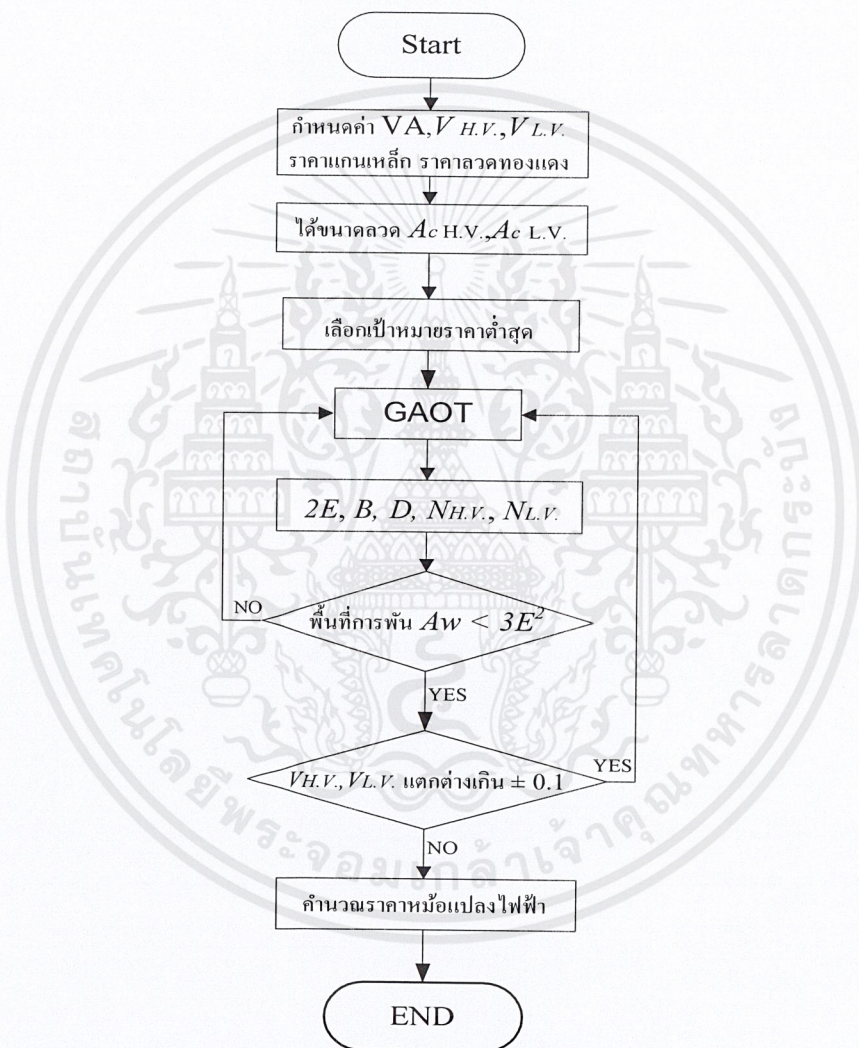
เมื่อได้สมการเป้าหมายและกำหนดค่า input ต่าง ๆ ให้กับโปรแกรมแล้ว ค่าที่ถูกกำหนดขึ้นจะถูกส่งมาประมวลผลหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้โปรแกรม GAOT ซึ่งภายในโปรแกรมจะมีใส่ฟังก์ชันที่เป็นเงื่อนไขเข้าไป สำหรับเป้าหมายการออกแบบนี้เงื่อนไขที่ถูกสร้างขึ้นจะมีอยู่ 2 เงื่อนไข คือ เงื่อนไขพื้นที่การพันและเงื่อนไขแรงดัน input

เงื่อนไขแรงดัน input ที่สร้างขึ้นมาเพื่อต้องการตรวจสอบว่าค่าแรงดัน input ที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม GAOT จะแตกต่างจากแรงดัน input ที่ป้อนเข้าไปเกิน 0.1 V หรือไม่ ถ้าเกินจะมีการวนloopให้โปรแกรม GAOT หาค่าตัวแปรใหม่ การทำงานจะวนไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะได้ค่าตัวแปรที่เหมาะสม ตัวแปรที่อยู่ในสมการเงื่อนไขจะประกอบไปด้วยตัวแปร  $(E, D, B, N)$  ขนาดแกนเหล็ก ( $E$ ), ความหนาของหม้อแปลงไฟฟ้า ( $D$ ), ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ( $B$ ), จำนวนรอบของขดลวด ( $E$ ) และ  $A_m$  หมายถึงพื้นที่แกนเหล็ก  $F_w$  หมายถึง พื้นที่เผื่อสำหรับการพัน

$$\text{สมการเงื่อนไขแรงดัน : } V = 4.44 fNB_{\max} A_m F_s \quad (4.2)$$

$$\text{สมการเงื่อนไขพื้นที่การพัน} : A_w = \frac{N_{H.V.} A_{c,H.V.} + N_{L.V.} A_{c,L.V.}}{F_w} \leq 3E^2 \quad (4.3)$$

ถ้าหากผ่านตรวจสอบเงื่อนไขทั้ง 2 เงื่อนไขดังกล่าว แสดงว่าได้ค่าของตัวแปรที่เหมาะสมแล้ว จึงนำเอาตัวแปรที่ได้ทั้ง 5 ตัวไปคำนวณหาราคาหม้อแปลงไฟฟ้ามา ก็จะได้ราคาหม้อแปลงไฟฟ้าที่ต่ำ แต่การที่จะรู้ค่าที่จากการประมวลผลด้วยโปรแกรม GAOT หลาย ๆ รอบและนำมาวิเคราะห์ สรุปขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมดัง Flow chart



รูปที่ 4.1 Flowchart ของโปรแกรมราคาต่ำสุด

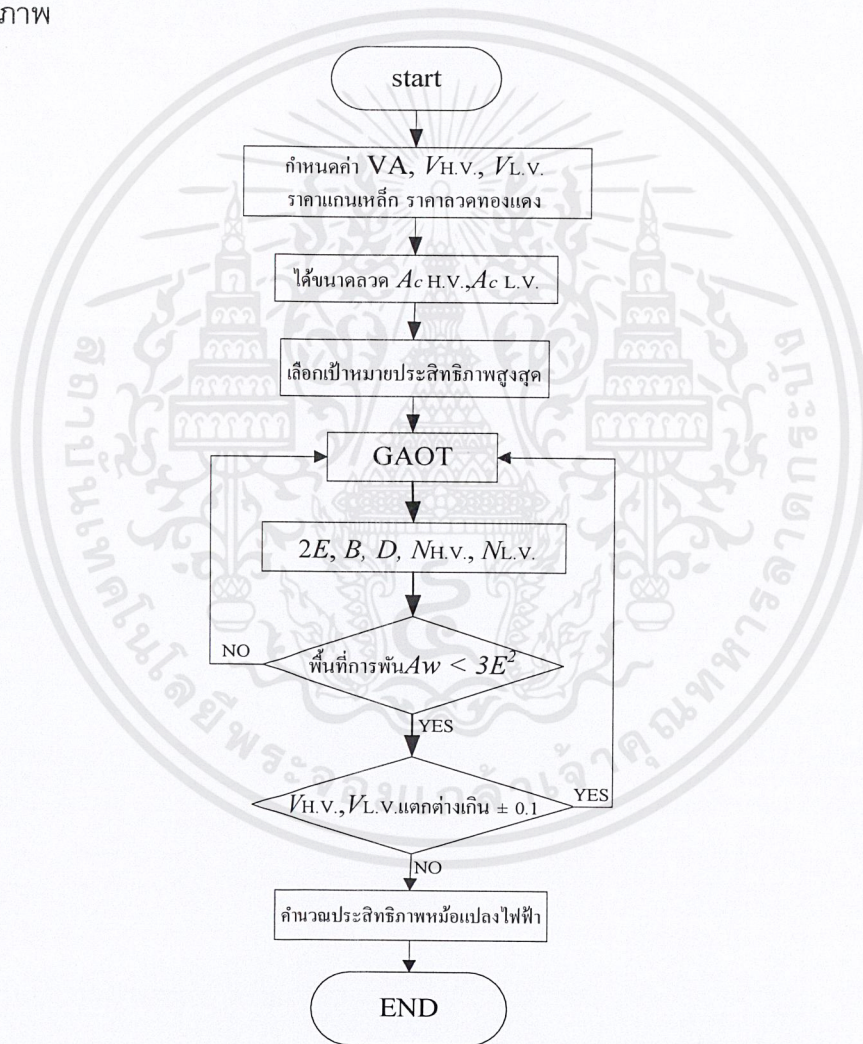
### 4.3 หม้อแปลงไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงสุด

แนวคิดสำหรับการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าสูงสุดขึ้นมา เพื่อต้องการแสดงให้เห็นความแตกต่างจากเป้าหมายแรกที่ยกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าราคาต่ำสุด จะเห็นได้ว่าเป้าหมายประสิทธิภาพสูงนี้จะมีลักษณะที่ตรงข้ามกับเป้าหมายแรกคือ เป้าหมายนี้จะไม่นำเอาราคามาเอกซารนี้เป็นเอกซารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาแต่จะมุ่งเน้นพิจารณาในเรื่องของการสูญเสียซึ่งการสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กประกอบไปด้วยการสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) และการสูญเสียในขดลวดทองแดง (Copper loss) มีการนำเอาการสูญเสียทั้งสองมาตั้งเป็นสมการเป้าหมายจะได้ดังนี้

$$\text{Minimize } F(2E, D, B, N_{H.V.}, N_{L.V.}) = [\text{Core loss}] + [\text{Total copper loss}] \quad (4.4)$$

สมการเงื่อนไขสำหรับโปรแกรมนี้ก็เหมือนกับเงื่อนไขในโปรแกรมแรกซึ่งก็คือ เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้าโดยใช้สมการฟาราเดย์ และ เงื่อนไขในเรื่องของพื้นที่การพัน ถ้าหากตรวจสอบผ่านเงื่อนไขทั้ง 2 ดังกล่าวโปรแกรม GAOT ก็จะทำค่าตัวแปรที่เหมาะสมไปคำนวณหาค่าประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.2 Flowchart ของโปรแกรมประสิทธิภาพสูงสุด

วิธีการหาค่าประสิทธิภาพจะมีการนำกราฟที่ทำการทดสอบแกนเหล็กมาปรับเปรียบเทียบเพื่อหาค่า  $P_c$  (Watt/kg.) วิธีการคือ เมื่อโปรแกรม GAOT หาค่าตัวแปร  $B$  มาได้ จะมีการนำค่า  $B$  ที่ได้ไปตรวจสอบว่าอยู่ในช่วงไหนเพื่อหาค่า  $P_c$  จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคูณกับน้ำหนักของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกนเหล็ก ก็จะได้ Core loss ออกมา สำหรับวิธีการหา Copper loss จะมีการทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวด ( $R$ ) และหาค่าจากสมการ  $P_{Cu} = I^2 R$

#### 4.4 หม้อแปลงไฟฟ้าราคาต่ำกำหนดประสิทธิภาพได้

สำหรับการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีเป้าหมายคือออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าราคาต่ำ โดยสามารถกำหนดประสิทธิภาพได้นั้น เป็นการนำเอาการออกแบบทั้ง 2 เป้าหมายมาร่วมกัน ถ้าการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถกำหนดประสิทธิภาพได้ก็จะทราบถึงปริมาณพลังงานที่จะได้รับ และผู้ออกแบบได้เห็นถึงโครงสร้างของหม้อแปลงที่มีอยู่หลากหลาย ดังนั้นในทางปฏิบัติการเลือกใช้หม้อแปลงก็สามารถเลือกได้หลากหลายเช่นกันขึ้นอยู่กับว่าผู้เลือกใช้จะพิจารณาเรื่องใดเป็นหลัก อาจจะเป็นเรื่องราคาหรือประสิทธิภาพ หรืออาจพิจารณาทั้ง 2 อย่างเลยก็ได้ จึงได้มีการสร้างโปรแกรมนี้ขึ้นมาเพื่อรองรับความต้องการเหล่านั้น

เป้าหมายหลักที่ใช้ในการออกแบบคือ เรื่องของราคา เพราะแนวคิดคือ ต้องออกแบบให้ได้หม้อแปลงไฟฟ้าราคาต่ำสุดภายใต้ประสิทธิภาพที่ต้องการ สมการราคาก็จะประกอบด้วยราคาแกนเหล็กและราคาขดลวดเช่นเดิม

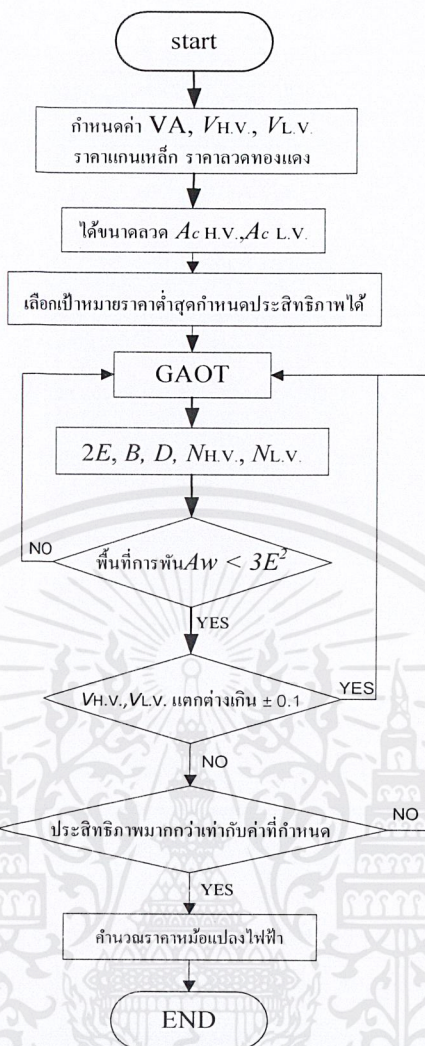
$$\text{Minimize } F(2E, D, B, N_{H.V.}, N_{H.V.}) = [\text{Core weight} \times \text{Core cost}] + [\text{Windings weight} \times \text{Copper loss}] \quad (4.5)$$

เงื่อนไข 2 เงื่อนไขแรกก็จะเหมือนเดิมคือเงื่อนไขแรงดันและเงื่อนไขพื้นที่การพันที่แตกต่างคือโปรแกรมนี้จะมีเพิ่มขึ้นมา 1 เงื่อนไขคือ เงื่อนไขตรวจสอบค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการหาค่าโดยโปรแกรมว่าน้อยกว่าประสิทธิภาพที่กำหนดหรือไม่ ถ้าหากน้อยกว่าโปรแกรม GAOT จะหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมออกมาใหม่ สำหรับสมการเงื่อนไขตรวจสอบประสิทธิภาพมีดังนี้

$$\% \text{ eff} = \frac{(S \times p.f.) - \text{coreloss} - \text{copperloss}}{S \times p.f.} \times 100 \quad (4.6)$$

เมื่อทำการตรวจสอบเงื่อนไขทั้ง 3 แล้วโปรแกรมก็จะนำค่าตัวแปรที่ได้ไปคำนวณหาค่าประสิทธิภาพด้วยวิธีการปรับเทียบที่กล่าวมาและหาราคา สำหรับราคาที่ได้ออกมาดังกล่าวจะเป็นราคาที่ต่ำสุดภายใต้ประสิทธิภาพที่กำหนดขึ้น และประสิทธิภาพที่กำหนดจะต้องอยู่ระหว่างประสิทธิภาพที่ได้จากโปรแกรมออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าราคาต่ำ(ประสิทธิภาพต่ำสุด)และหม้อแปลงไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงสุดที่พิกัดใดๆ ถ้าหากทำการกำหนดค่าประสิทธิภาพที่อยู่นอกขอบเขตของช่วงของประสิทธิภาพดังกล่าว โปรแกรม GAOT จะไม่สามารถหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมได้ ต่อไปคือ flow chart แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 Flowchart ของโปรแกรมราคาต่ำสุดที่สามารถกำหนดประสิทธิภาพได้

สำหรับโปรแกรมการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมสามารถนำไปใช้ในการออกแบบได้จริง เนื่องจากในโครงการนี้ได้มีการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าขึ้นมาแล้ว พบว่าค่าที่ได้จากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าเช่น Core loss, Copper loss, ราคาหม้อแปลงไฟฟ้า มีความใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม GAOT มาก อีกทั้งโปรแกรม GAOT ยังสามารถนำไปใช้ในการออกแบบงานอื่นๆได้อย่างหลากหลาย เพียงแต่ต้องทราบเป้าหมายว่าต้องการอะไร และต้องมองให้ออกว่าอะไรคือตัวแปรที่เราต้องการหา

## บทที่ 5

### ผลการจำลองโปรแกรม

#### 5.1 บทนำ

ในบทนี้จะแสดงผลการจำลองของโปรแกรมแต่ละเป้า โดยมีเป้าหมายดังนี้ เป้าหมายราคาต่ำสุด เป้าหมายประสิทธิภาพสูงสุด และเป้าหมายราคาต่ำสุดโดยกำหนดประสิทธิภาพ ในการจำลองโปรแกรมจะทำการจำลอง 2 พิกัดคือ 300 VA และ 500 VA และทำการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นกระแส ( $J$ ) และทำการเปรียบเทียบ ซึ่งจะใช้โปรแกรม Genetic Algorithm Optimization Toolbox ของโปรแกรม MATLAB ซึ่งได้นำจอของโปรแกรม ดังนี้

รูปที่ 5.1 หน้าจอการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กความถี่ต่ำโดยวิธีหาค่าที่เหมาะสม

## 5.2 เป้าหมายราคาต่ำสุด

เป้าหมายราคาต่ำสุดจะจำลอง 2 พิกัด 300 VA และ 500 VA และทำการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นกระแส ( $J$ ) เป็น 3, 4 และ 5 A/mm<sup>2</sup> ซึ่งจะได้ผลการจำลองดังนี้

Design of Low - frequency Small Transformer Using Optimization Technique

**Design Objective**

Low Cost Transformer

High Efficiency Transformer

Low Cost Transformer Define Efficiency

Define Efficiency :  %

**Input**

Rated voltamp : 300 VA

Rated H.V. : 220 V

Rated H.V. : 110 V

Density current : 4 A / square mm

H.V. : SWG#22 0.404 square mm

L.V. : SWG#19 0.825 square mm

Type core : A

Silicon steel price : 100 Baht / kg

H.V. winding price : 140 Baht / kg

L.V. winding price : 160 Baht / kg

power Factor : 0.8

Start

**Optimization**

Magnetic flux density (B) : 1.6 T

2E : 32.71 mm

D : 40.06 mm

Cost of core : 189.00 Baht

Winding of H.V. : 492 Turns

Winding of L.V. : 246 Turns

Cost of highvoltage : 42.47 Baht

Cost of lowvoltage : 54.18 Baht

Total winding cost : 106.65 Baht

Total cost : 295.66 Baht

Core loss : 26.84 W

Copper loss : 17.50 W

Total loss : 44.34 W

Rated Efficiency : 81.53 %

รูปที่ 5.2 ตัวอย่างการจำลองการออกแบบเป้าหมายราคาต่ำสุด 300 VA,  $J=4$

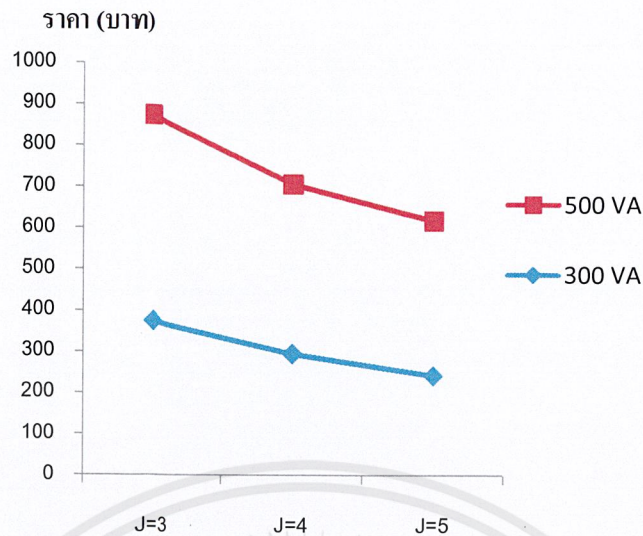
ตารางที่ 5.1 ข้อมูลผลการจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าราคาต่ำสุดพิกัด 300 VA

แกนเหล็ก					ขดลวด							Rated	ราคารวม (บาท)
$J$ (A/mm <sup>2</sup> )	$B$ (T)	$2E$ (mm)	$D$ (mm)	Core loss (W)	ราคา (บาท)	SWG H.V.	$N_{H.V.}$ (รอบ)	SWG L.V.	$N_{L.V.}$ (รอบ)	Cu loss (W)	ราคา (บาท)	Eff. (%)	
3	1.6	35.5	42.9	33.92	238.9	#21	422	#18	211	11.72	136.3	81.00	375.2
4	1.6	32.7	40.1	26.84	189.0	#22	492	#19	246	17.50	106.6	81.53	295.6
5	1.6	32.8	30.6	20.66	145.5	#23	641	#20	321	26.45	97.7	80.37	243.2

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลผลการจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าราคาต่ำสุดพิกัด 500 VA

แกนเหล็ก					ขดลวด							Rated	ราคารวม (บาท)
$J$ (A/mm <sup>2</sup> )	$B$ (T)	$2E$ (mm)	$D$ (mm)	Core loss (W)	ราคา (บาท)	SWG H.V.	$N_{H.V.}$ (รอบ)	SWG L.V.	$N_{L.V.}$ (รอบ)	Cu loss (W)	ราคา (บาท)	Eff. (%)	
3	1.6	38.8	48.4	45.46	320.1	#19	344	#17	172	20.38	177.8	83.54	497.9
4	1.6	35.5	48.4	38.21	269.0	#20	375	#18	188	27.80	142.0	83.50	411.0
5	1.6	35.4	43.4	34.04	239.7	#21	420	#18	210	32.40	135.7	83.39	375.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 กราฟการเปรียบเทียบราคาหาค่าความหนาแน่นกระแส ( $J$ ) ค่าต่างๆ

จากตารางที่ 5.1 และ 5.2 หม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 300 VA และ 500 VA เมื่อเพิ่มความหนาแน่นของกระแส ( $J$ ) ทำให้ขดลวดมีขนาดเล็กลงจะส่งผลต่อจำนวนรอบผลที่ได้คือราคาลดลงจากปริมาณขดลวดที่น้อยลง และจะพบว่าเหล็กมีปริมาณน้อยลงเนื่องจากค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B$ ) ที่มีค่ามากที่สุด จึงทำให้ราคาถูกลงกว่าเมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแส ( $J$ ) ในส่วนของพิกัด 500 VA ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าจึงมีราคาสูงกว่าพิกัด 300 VA ในการออกแบบราคาต่ำสุดนั้นจะไม่พิจารณาต้นทุนเสียเพราะเน้นที่หม้อแปลงไฟฟ้าราคาต่ำสุดจึงมีค่าประสิทธิภาพที่มีแนวโน้มไม่แน่นอน

### 5.3 เป้าหมายประสิทธิภาพสูงสุด

เป้าหมายประสิทธิภาพสูงสุดจะจำลอง 2 พิกัด 300 VA และ 500 VA และทำการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นกระแส ( $J$ ) เป็น 3, 4 และ 5 A/mm<sup>2</sup> ซึ่งจะได้ผลการจำลองดังนี้

**Design of Low-frequency Small Transformer Using Optimization Technique**

**Input:**

- Rated voltamp: 300 VA
- Rated H.V.: 220 V
- Rated H.V.: 110 V
- Density current: 4 A/square mm
- H.V.: SWG#22, 0.404 square mm
- L.V.: SWG#19, 0.625 square mm
- Type core: A
- Silicon steel price: 100 Baht/kg
- H.V. winding price: 140 Baht/kg
- L.V. winding price: 160 Baht/kg
- power Factor: 0.8

**Optimization:**

- Magnetic flux density (B): 0.92 T
- 2E: 35.3 mm
- D: 81.6 mm
- Cost of core: 447.3 Baht
- Winding of H.V.: 387 Turns
- Winding of L.V.: 193 Turns
- Cost of highvoltage: 49.48 Baht
- Cost of lowvoltage: 66.17 Baht
- Total winding cost: 115.6 Baht
- Total cost: 562.95 Baht
- Core loss: 9.83 W
- Copper loss: 19.07 W
- Total loss: 28.90 W
- Rated Efficiency: 87.95 %

**Design Objective:**

- Low Cost Transformer
- High Efficiency Transformer
- Low Cost Transformer Define Efficiency
- Define Efficiency: %

Start

รูปที่ 5.4 ตัวอย่างการจำลองการออกแบบเป้าหมายประสิทธิภาพสูงสุด 300 VA,  $J=4$

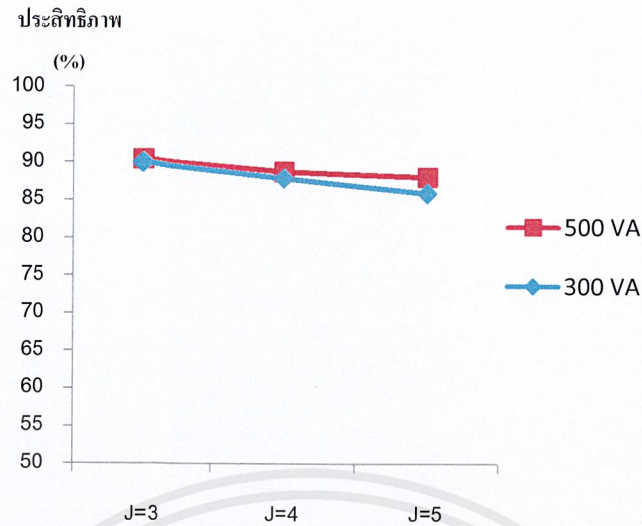
ตารางที่ 5.3 ข้อมูลผลการจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงสุดพิกัด 300 VA

แกนเหล็ก					ขดลวด							Rated Eff. (%)	ราคารวม (บาท)
$J$ (A/mm <sup>2</sup> )	$B$ (T)	$2E$ (mm)	$D$ (mm)	Core loss (W)	ราคา (บาท)	SWG H.V.	$N_{H.V.}$ (รอบ)	SWG L.V.	$N_{L.V.}$ (รอบ)	Cu loss (W)	ราคา (บาท)		
3	0.72	38.1	97.9	7.94	626.4	#21	382	#18	191	16.07	185.1	89.99	811.5
4	0.92	35.3	81.6	9.83	447.3	#22	387	#19	193	19.07	115.6	87.95	562.95
5	0.88	37.3	85.6	10.57	526.2	#23	363	#20	181	23.2	84.21	85.93	610.39

ตารางที่ 5.4 ข้อมูลผลการจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงสุดพิกัด 500 VA

แกนเหล็ก					ขดลวด							Rated Eff. (%)	ราคารวม (บาท)
$J$ (A/mm <sup>2</sup> )	$B$ (T)	$2E$ (mm)	$D$ (mm)	Core loss (W)	ราคา (บาท)	SWG H.V.	$N_{H.V.}$ (รอบ)	SWG L.V.	$N_{L.V.}$ (รอบ)	Cu loss (W)	ราคา (บาท)		
3	0.83	40.8	103	13.01	761.2	#19	294	#17	174	25.18	219.1	90.45	980.35
4	0.92	40.7	97.3	15.63	711.6	#20	281	#18	141	29.04	148.9	88.83	860.5
5	0.92	41.0	90.1	14.75	673	#21	300	#18	150	32.76	135.3	88.12	808.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

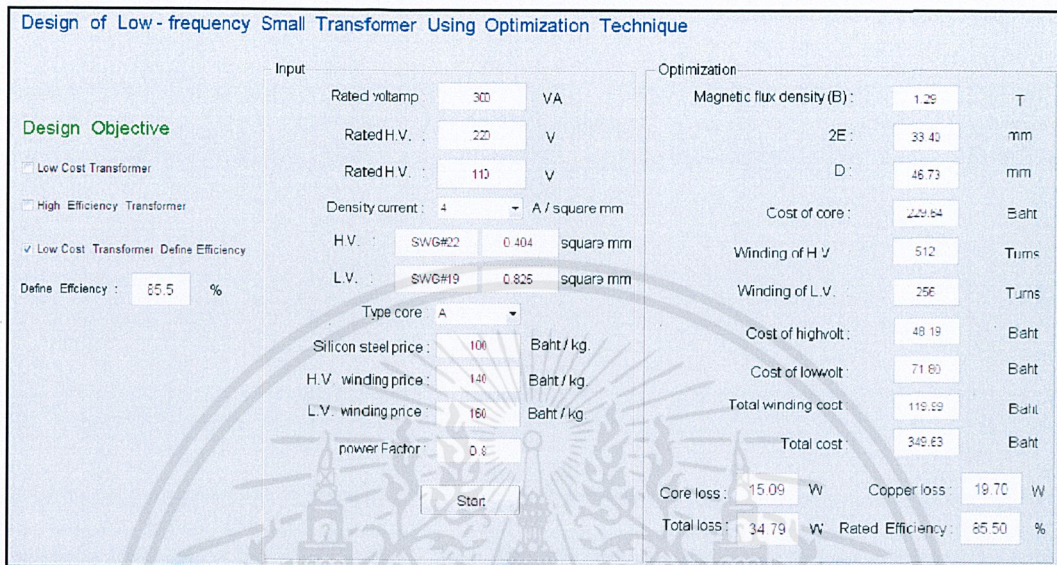


รูปที่ 5.5 กราฟการเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ค่าความหนาแน่นกระแส ( $J$ ) ค่าต่างๆ

จากตารางที่ 5.3 และ 5.4 แสดงผลของโปรแกรมในสมการเป้าหมายประสิทธิภาพสูงสุด สามารถที่จะสรุปได้ดังนี้เมื่อเพิ่มขนาดพิกัดกำลังของหม้อแปลงไฟฟ้า จะทำให้ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเนื่องจากขนาดพิกัดของกำลังเพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าแกนเหล็กจะใหญ่ขึ้นทำให้ Coreloss เพิ่มขึ้นและการที่แกนเหล็กมีขนาดใหญ่ขึ้น รวมถึงจำนวนรอบของลวดทองแดงเพิ่มขึ้นทำให้ความยาวของลวดทองแดงยาวขึ้นมีผลทำให้ Copperloss เพิ่มขึ้นก็ตาม แต่การเพิ่มขึ้นของ Coreloss และ Copperloss มีสัดส่วนที่น้อยกว่าการเพิ่มขึ้นของพิกัดกำลังของหม้อแปลงไฟฟ้าการลดความหนาแน่นของกระแสมีผลทำให้ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการลดค่าความหนาแน่นของกระแสทำให้ลวดทองแดงมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานของลวดทองแดงลดลง ส่งผลให้ Copper loss มีขนาดน้อยลง แต่การลดค่าความหนาแน่นของกระแสจะมีผลต่อ Core loss น้อยมาก

### 5.4 เป้าหมายราคาต่ำสุดโดยกำหนดประสิทธิภาพ

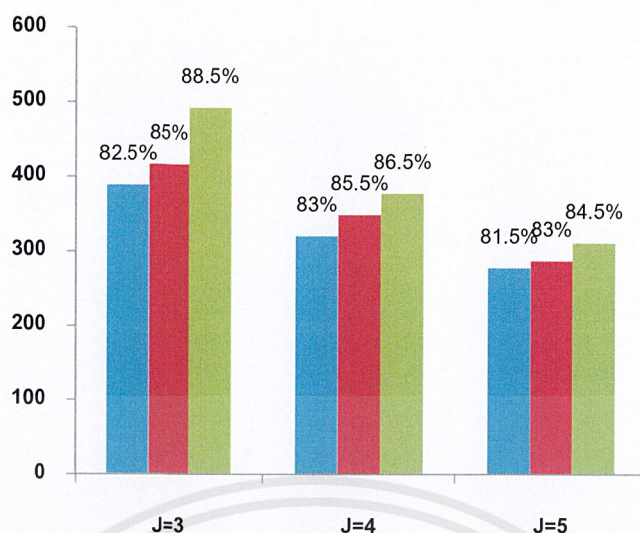
ราคาต่ำสุดซึ่งจำลอง 2 พิกัด 300 VA และ 500 VA และทำการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นกระแส ( $J$ ) เป็น 3, 4 และ 5 A/mm<sup>2</sup> ซึ่งจะได้ผลการจำลองดังนี้



รูปที่ 5.6 ตัวอย่างการจำลองการออกแบบเป้าหมายราคาต่ำสุดโดยกำหนดประสิทธิภาพ 300 VA,  $J = 4$

ตารางที่ 5.5 ข้อมูลผลการจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าราคาต่ำสุดโดยกำหนดประสิทธิภาพ 300 VA

แกนเหล็ก						ขดลวด				Defined	ราคารวม (บาท)
$J$ (A/mm <sup>2</sup> )	$B$ (T)	$2E$ (mm)	$D$ (mm)	Core loss (W)	ราคา (บาท)	$N_{H.V.}$ (รอบ)	$N_{L.V.}$ (รอบ)	Cu loss (W)	ราคา (บาท)	Rated Eff. (%)	
3	1.53	36.8	40.9	29.33	244.4	449	225	12.44	144.8	82.5	389.2
3	1.39	39.2	37.1	21.76	251.4	510	255	14.19	165.4	85.0	416.8
3	1.11	40.1	43.2	11.50	305.7	537	269	16.06	187.0	88.5	492.7
4	1.44	37.5	30.3	19.00	188.0	626	313	21.79	133.0	83.0	321.0
4	1.29	33.4	46.7	15.1	229.6	512	256	19.70	120.0	85.5	349.6
4	1.16	34.4	47.4	10.9	247.6	544	272	21.43	130.5	86.5	378.1
5	1.50	30.0	50.0	22.80	199.1	458	229	21.36	78.28	81.5	277.4
5	1.38	30.4	49.6	17.16	201.3	495	248	23.40	85.83	83.0	287.0
5	1.22	30.0	55.0	11.67	218.1	510	255	25.52	93.59	84.5	311.7

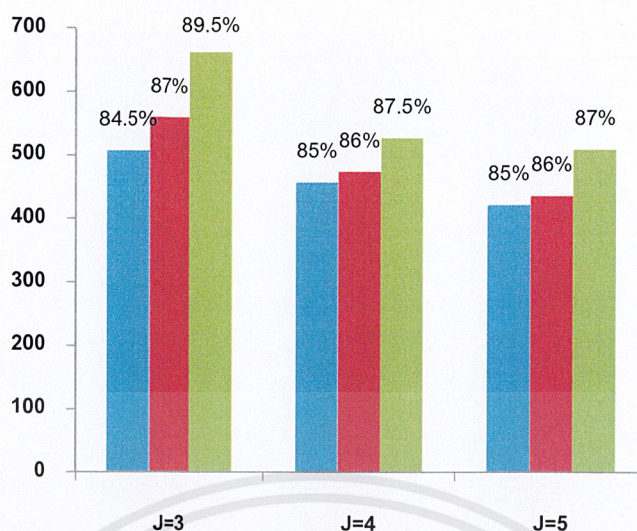


รูปที่ 5.7 กราฟแท่งเปรียบเทียบราคาและประสิทธิภาพเป้าหมายราคาต่ำโดยกำหนดประสิทธิภาพพิกัด 300 VA

ตารางที่ 5.6 ข้อมูลผลการจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าราคาต่ำสุดโดยกำหนดประสิทธิภาพ 500 VA

แกนเหล็ก					ขดลวด					Defined Rated Eff. (%)	ราคารวม (บาท)
$J$ (A/mm <sup>2</sup> )	$B$ (T)	$2E$ (mm)	$D$ (mm)	Core loss (W)	ราคา (บาท)	$N_{H.V.}$ (รอบ)	$N_{L.V.}$ (รอบ)	Cu loss (W)	ราคา (บาท)		
3	1.54	41.8	39.6	38.83	305.6	401	201	23.15	202.1	84.5	507.7
3	1.36	41.6	45.7	27.82	349.1	398	199	24.11	210.4	87.0	559.5
3	1.09	41.4	57.3	15.82	434.3	395	198	26.16	228.1	89.5	662.4
4	1.38	41.9	34.3	22.33	265.5	520	260	37.65	192.2	85.0	457.6
4	1.33	40.0	42.6	21.82	300.3	456	228	34.08	174.1	86.0	474.4
4	1.16	38.0	55.3	15.66	351.9	422	211	34.32	175.4	87.5	527.4
5	1.38	38.5	40.7	22.66	266.7	475	238	37.2	155.9	85.0	422.6
5	1.33	34.7	55.2	21.66	293.4	403	202	34.33	143.3	86.0	436.7
5	1.15	38.0	55.9	15.05	355.9	423	212	36.90	153.9	87.0	509.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 5.8** กราฟแท่งเปรียบเทียบราคาและประสิทธิภาพเป้าหมายราคาต่ำโดยกำหนดประสิทธิภาพพิกัด 500 VA

จากตารางที่ 5.5 และ 5.6 จะเห็นว่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น โปรแกรมจะพยายามลดค่าความสูญเสียที่เกิดจากแกนเหล็กและขดลวด โดยการปรับค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กให้ต่ำลง (Core loss ลดลง) ซึ่งจะไปยังค้ำให้พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กใหญ่ขึ้น แต่การลดลงของ Core loss จะมีผลทำให้ Copper loss สูงขึ้นโดยจำนวนรอบขดลวดจะมากขึ้น ดังนั้นราคาจึงปรับตัวสูงขึ้นตามประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น (ในกรณีนี้ราคาเหล็กจะมีผลมากกว่าราคาลวดเนื่องจากราคาลวดสูงกว่าราคาเหล็กไม่มากนัก)

### 5.5 การเปรียบเทียบราคาและประสิทธิภาพของแต่ละเป้าหมาย

จากผลการจำลองของโปรแกรม จะทำการนำราคาและประสิทธิภาพมาเปรียบเทียบค่าเพื่อจะสังเกตแนวโน้มที่เกิดขึ้น

**ตารางที่ 5.7** ข้อมูลการเปรียบเทียบราคาและประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 300 VA

J (A/mm <sup>2</sup> )	ราคาต่ำสุด		ราคาต่ำสุดและมีประสิทธิภาพตามที่กำหนด						ประสิทธิภาพสูงสุด	
	ราคา (บาท)	Eff. (%)	ราคา (บาท)	Eff. (%)	ราคา (บาท)	Eff. (%)	ราคา (บาท)	Eff. (%)	ราคา (บาท)	Eff. (%)
3	375.2	81.0	389.3	82.5	416.1	85.0	492.8	88.5	811.5	89.9
4	295.6	81.5	321.0	83.0	349.6	85.5	378.1	86.5	562.9	87.9
5	243.2	80.4	277.4	81.5	287.2	83.0	311.7	84.5	610.4	85.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.8 ข้อมูลการเปรียบเทียบราคาและประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 500 VA

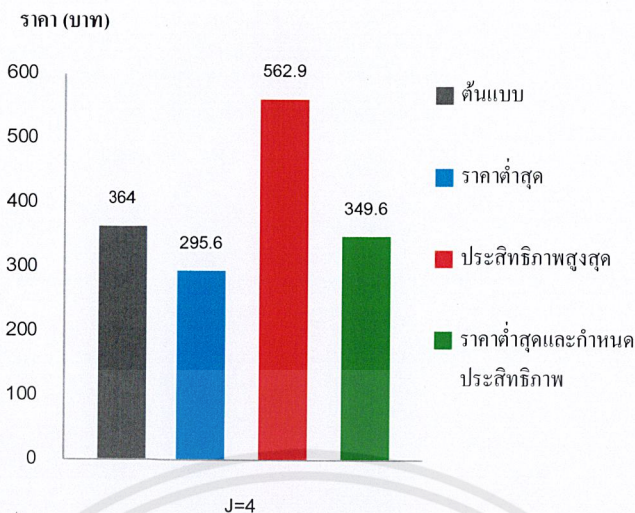
J (A/mm <sup>2</sup> )	ราคาต่ำสุด		ราคาต่ำสุดและมีประสิทธิภาพตามที่กำหนด						ประสิทธิภาพสูงสุด	
	ราคา (บาท)	Eff. (%)	ราคา (บาท)	Eff. (%)	ราคา (บาท)	Eff. (%)	ราคา (บาท)	Eff. (%)	ราคา (บาท)	Eff. (%)
3	497.9	83.5	507.7	84.5	559.5	87.0	662.4	89.5	980.3	90.5
4	411.0	83.5	457.6	85.0	474.4	86.0	527.4	87.5	860.5	88.8
5	375.4	83.4	410.1	85.0	436.8	86.0	532.8	87.0	911.2	88.1

จากตารางที่ 5.7 และ 5.8 เป็นการเปรียบเทียบการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 3 เป้าหมาย ผลที่ได้จะเห็นได้ว่าเป้าหมายทั้งสามมีความโดดเด่นที่แตกต่างกันออกไปทั้งในเรื่องของราคา ประสิทธิภาพ ถ้าดูจากผลการออกแบบในส่วนของเป้าหมายราคาต่ำสุด ราคารวมของหม้อแปลงไฟฟ้าจะถูกกว่าเป้าหมายอื่น และประสิทธิภาพที่ได้ออกมาจะต่ำกว่าเป้าหมายอื่นเช่นกัน เนื่องจากยังไม่มี การนำเงื่อนไขประสิทธิภาพมาพิจารณา ในทางกลับกันถ้าออกแบบโดยเลือกใช้ประสิทธิภาพสูงสุด จะเห็นว่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าก็จะสูงกว่าเป้าหมายอื่นเช่นกันแต่ราคาค่อนข้างที่จะสูง เนื่องมาจากยังไม่มี การคำนึงในเรื่องของราคา ถ้าพิจารณาทั้งราคาและประสิทธิภาพ จะสามารถออกแบบให้มีเป้าหมายราคาต่ำสุดโดยกำหนดประสิทธิภาพตามต้องการได้ โดยประสิทธิภาพที่กำหนดจะกำหนดให้อยู่ระหว่างสองเป้าหมายแรก ปรากฏว่าราคาที่ได้จะสูงกว่าแบบเป้าหมายราคาต่ำที่สุด แต่ประสิทธิภาพก็จะดีกว่า และถ้าเปรียบเทียบกับเป้าหมายประสิทธิภาพสูงที่สุดแล้ว ราคาที่ได้ก็จะต่ำกว่าแต่ประสิทธิภาพที่ได้ก็จะต่ำกว่าเช่นกัน

ตารางที่ 5.9 ข้อมูลการเปรียบเทียบผลการจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละเป้าหมายพิกัด 300 VA, J=4

	ต้นแบบ	ราคาต่ำสุด	ประสิทธิภาพ สูงสุด	ราคาต่ำและกำหนด ประสิทธิภาพ
2E (mm)	38.0	32.7	35.3	33.4
D (mm)	38.0	40.1	81.6	46.7
B (T)	1.295	1.60	0.92	1.29
N <sub>H.V.</sub> (Turns)	552	492	387	512
N <sub>L.V.</sub> (Turns)	276	246	193	256
Total losses (W)	34.7	44.3	28.9	34.8
Total cost (Baht)	363.9	295.6	562.0	349.6
Efficiency (%)	85.5	81.53	87.95	865.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 กราฟเปรียบเทียบราคาของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละเป้าหมายพิกัด 300 VA,  $J=4$

### สรุป

จากตารางที่ 5.9 เป็นการเปรียบเทียบการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสามเป้าหมายด้วยโปรแกรม MATLAB/GAOT กับการออกแบบโดยไม่ได้ใช้โปรแกรม โดยเป็นการออกแบบที่พิกัดเดียวกัน ผลที่ได้จะเห็นได้ว่าการออกแบบแบบเป้าหมายราคาต่ำที่สุด ราคาที่ได้จะต่ำกว่าแบบที่ไม่ได้ออกแบบด้วยโปรแกรม ส่วนการออกแบบแบบเป้าหมายประสิทธิภาพสูงที่สุด ผลที่ได้จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรมจะมีค่าสูงกว่าประสิทธิภาพที่ไม่ได้ออกแบบด้วยโปรแกรม ส่วนการออกแบบแบบเป้าหมายราคาต่ำสุด โดยสามารถกำหนดประสิทธิภาพได้ ผลที่ได้จะเห็นได้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยโปรแกรม เทียบกับแบบที่ไม่ได้ออกแบบด้วยโปรแกรม ที่ประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน ราคาที่ได้จากที่ออกแบบด้วยโปรแกรมก็จะต่ำกว่าแบบที่ไม่ได้ออกแบบด้วยโปรแกรม ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 5.9 ดังนั้นข้อดีของเป้าหมายราคาต่ำที่สุด โดยสามารถกำหนดประสิทธิภาพได้คือเราสามารถที่จะเลือกประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ โดยราคาที่ได้ออกจะเป็นราคาที่ต่ำที่สุดที่ประสิทธิภาพนั้นๆ

## บทที่ 6

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 บทนำ

ปริญญาานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยอาศัยทฤษฎีของการหาค่าที่เหมาะสมเพื่อออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าให้มีคุณลักษณะตามต้องการ ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีทั่วไป ผู้ออกแบบสามารถออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าให้มีพิกัดกำลัง แรงดันไฟฟ้า และความถี่ตามที่กำหนดเท่านั้นโดยไม่สามารถที่จะกำหนดคุณลักษณะอื่นๆของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ ในการที่ผู้ออกแบบต้องการปรับเปลี่ยนคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้า เช่น ราคาต้นทุนประสิทธิภาพ ก็ต้องทำการออกแบบโดยวิธีลองผิดลองถูกซึ่งขึ้นกับประสบการณ์ของผู้ออกแบบเช่น การปรับขนาดแกนเหล็ก หรือ ค่า  $B_{max}$  ที่ใช้ แต่ในความเป็นจริงเป็นไปได้ยากมากที่ผู้ออกแบบจะทราบว่าต้องปรับแกนเหล็กอย่างไรเพื่อให้ได้  $B_{max}$  ตามที่ต้องการได้ วิธีการนี้จึงเป็นวิธีการที่เสียเวลาอีกทั้งยังไม่ได้ค่าที่แน่นอน ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จึงแนวทางวิธีการหาค่าที่เหมาะสมเข้ามาช่วยในการออกแบบเพื่อให้ได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีคุณลักษณะตามที่ต้องการ

โดยปกติการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าจะทำการออกแบบโดยการคำนวณจากสมการฟาราเดย์ ซึ่งผลการออกแบบที่ได้สามารถนำไปสร้างหม้อแปลงได้จริง ในโครงการนี้เริ่มจากการออกแบบตามสมการดังกล่าวแล้วนำไปสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าตัวต้นแบบ และหม้อแปลงตัวที่ออกแบบมานั้นจะถูกนำเอาไปทดสอบแกนเหล็กเพื่อหาคุณสมบัติแกนเหล็ก และทำการทดสอบ Open circuit เพื่อนำไปหา Core loss ทำการวัดความต้านทานเพื่อหา Copper loss และ ทำการชั่งน้ำหนักแกนเหล็ก และวัดความยาวรอบของขดลวดทั้งหมด เพื่อนำไปคำนวณหาต้นทุนราคาหม้อแปลงไฟฟ้า โดยหม้อแปลงตัวดังกล่าวยังไม่มีเป้าหมายการออกแบบที่แน่ชัดเมื่อได้ข้อมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าตัวต้นแบบเรียบร้อยแล้ว จึงทำการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม GAOT โดยเป้าหมายแรกที่ทำกรออกแบบคือหม้อแปลงไฟฟ้าราคาต่ำสุดที่พิกัดกำลัง 300 VA เมื่อนำผลที่ได้จากการออกแบบโดยโปรแกรมมาเปรียบเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าตัวต้นแบบพบว่าราคาของหม้อแปลงไฟฟ้าตัวที่ออกแบบโดยโปรแกรมมีราคาถูกกว่าจริง

เมื่อได้โปรแกรมที่สามารถใช้งานได้จริงแล้วจึงนำโปรแกรมที่นำเชื่อถือไปออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเพิ่ม อีก 2 เป้าหมาย คือ หม้อแปลงไฟฟ้าเป้าหมายประสิทธิภาพสูงสุด และหม้อแปลงไฟฟ้าเป้าหมายราคาต่ำโดยกำหนดประสิทธิภาพในการออกแบบ รวมเป็น 3 เป้าหมาย และ ทำการออกแบบที่พิกัดกำลัง 300 VA และ 500 VA โดยใช้ความหนาแน่นกระแส ( $J$ ) เท่ากับ 3, 4, 5 เพื่อดูแนวโน้มว่าตัวแปรแต่ละตัวมีผลอย่างไรต่อการออกแบบ

## 6.2 สรุปผลการจำลองเป้าหมายราคาต่ำสุด

หม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 300 VA และ 500 VA เมื่อเพิ่มความหนาแน่นของกระแส ทำให้ขดลวดมีขนาดเล็กลงจะส่งผลต่อจำนวนรอบผลที่ได้คือราคาลดลงจากปริมาณขดลวดที่น้อยลง และจะพบว่าเหล็กมีปริมาณน้อยลงเนื่องจากค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ที่มีค่ามากที่สุด จึงทำให้ราคารวมถูกกว่าเมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแส ในส่วนของพิกัด 500 VA ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า จึงมีราคาสูงกว่าพิกัด 300 VA ในการออกแบบราคาต่ำสุดนั้นจะไม่พิจารณาค่าสูญเสีย เพราะเน้นที่หม้อแปลงไฟฟ้าราคาต่ำสุดจึงมีค่าประสิทธิภาพที่มีแนวโน้มไม่แน่นอน

## 6.3 สรุปผลการจำลองเป้าหมายประสิทธิภาพสูงสุด

ผลของโปรแกรมในสมการเป้าหมายประสิทธิภาพสูงสุด สามารถที่จะสรุปได้ดังนี้ เมื่อเพิ่มขนาดพิกัดกำลังของหม้อแปลงไฟฟ้า จะทำให้ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากขนาดพิกัดของกำลังเพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าแกนเหล็กจะใหญ่ขึ้นทำให้ Core loss เพิ่มขึ้น และการที่แกนเหล็กมีขนาดใหญ่ขึ้น รวมถึงจำนวนรอบของลวดทองแดงเพิ่มขึ้นทำให้ความยาวของลวดทองแดงยาวขึ้นมีผลทำให้ Copper loss เพิ่มขึ้นก็ตาม แต่การเพิ่มขึ้นของ Core loss และ Copper loss มีสัดส่วนที่น้อยกว่าการเพิ่มขึ้นของพิกัดกำลังของหม้อแปลงไฟฟ้า การลดความหนาแน่นของกระแสมีผลทำให้ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการลดค่าความหนาแน่นของกระแสทำให้ลวดทองแดงมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานของลวดทองแดงลดลง ส่งผลให้ Copper loss มีขนาดน้อยลง แต่การลดค่าความหนาแน่นของกระแสจะมีผลต่อ Core loss น้อยมาก

## 6.4 สรุปผลการจำลองเป้าหมายราคาต่ำสุดโดยกำหนดประสิทธิภาพ

จะเห็นว่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น โปรแกรมจะพยายามลดค่าความสูญเสียที่เกิดจากแกนเหล็กและขดลวด โดยการปรับค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กให้ต่ำลง (Core loss ลดลง) ซึ่งจะไปบังคับให้พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กใหญ่ขึ้น แต่การลดลงของ Core loss จะมีผลทำให้ Copper loss สูงขึ้นโดยจำนวนรอบขดลวดจะมากขึ้น ดังนั้นราคาจึงปรับตัวสูงขึ้นตามประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น (ในกรณีนี้ราคาเหล็กจะมีผลมากกว่าราคาลวดเนื่องจากราคาลวดสูงกว่าราคาเหล็กไม่มากนัก)

การเปรียบเทียบการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 3 เป้าหมาย ผลที่ได้จะเห็นได้ว่าเป้าหมายทั้งสามมีความโดดเด่นที่แตกต่างกันออกไปทั้งในเรื่องของราคา ประสิทธิภาพ ถ้าดูจากผลการออกแบบในส่วน of เป้าหมายราคาต่ำสุด ราคาของหม้อแปลงไฟฟ้าจะถูกกว่าเป้าหมายอื่น และประสิทธิภาพที่ได้ออกมาจะต่ำกว่าเป้าหมายอื่นเช่นกัน เนื่องจากยังไม่มี การนำเงื่อนไขประสิทธิภาพมาพิจารณา ในทางกลับกันถ้าออกแบบโดยเลือกใช้ประสิทธิภาพสูงสุด จะเห็นว่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าก็จะสูงกว่าเป้าหมายอื่นเช่นกันแต่ราคาค่อนข้างที่จะสูง เนื่องจากยังไม่มี การคำนึงในเรื่องของราคา ถ้าพิจารณาทั้งราคาและประสิทธิภาพ จะ

สามารถออกแบบให้มีเป้าหมายราคาต่ำสุดโดยกำหนดประสิทธิภาพตามต้องการได้ โดยประสิทธิภาพที่กำหนดจะกำหนดให้อยู่ระหว่างสองเป้าหมายแรก ปรากฏว่าราคาที่ได้จะสูงกว่าแบบเป้าหมายราคาต่ำที่สุด แต่ประสิทธิภาพก็จะดีกว่า และถ้าเปรียบเทียบกับเป้าหมายประสิทธิภาพสูงที่สุดแล้ว ราคาที่ได้ก็จะต่ำกว่าแต่ประสิทธิภาพที่ได้ก็จะต่ำกว่าเช่นกัน

### สรุป

เมื่อเราต้องการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีราคาของหม้อแปลงไฟฟ้าต่ำ ซึ่งก็หมายถึงราคาของส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้านั้นเอง ส่วนประกอบหลักๆของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กก็คือ แกนเหล็กและขดลวด การทำงานของโปรแกรมก็จะพิจารณาเฉพาะเป้าหมายการออกแบบและเงื่อนไขที่กำหนดเท่านั้น ซึ่งในการออกแบบเป้าหมายราคาต่ำสุด จะได้หม้อแปลงไฟฟ้าราคาต่ำสุดจริงแต่ประสิทธิภาพที่ได้ก็ออกมาดีกว่าเช่นกัน จึงมีแนวคิดที่จะออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงด้วย ทั้งนี้ก็เพื่อเป็นการเพิ่มทางเลือกในการเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้า เพราะในปัจจุบันจำเป็นต้องพิจารณาในเรื่องของพลังงานด้วย สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงการออกแบบโดยโปรแกรมก็จะไม่คำนึงถึงเรื่องของราคาด้วยเช่นกัน ผลที่ได้คือได้หม้อแปลงประสิทธิภาพสูงแต่มีราคาแพงกว่าหม้อแปลงที่ออกแบบหลายเท่าตัว ดังนั้นจึงได้นำเอาเป้าหมายการออกแบบทั้ง 2 เป้าหมายข้างต้นมาทำการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเป้าหมายที่ 3 คือ หม้อแปลงไฟฟ้าราคาต่ำโดยกำหนดประสิทธิภาพในการออกแบบได้

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าราคาต่ำโดยสามารถกำหนดประสิทธิภาพได้ เป้าการออกแบบโดยใช้สมการราคาต่ำสุดเป็นเป้าหมาย ส่วนเงื่อนไขที่เพิ่มเข้าไปคือ เรื่องของประสิทธิภาพ โดยจะต้องออกแบบหาตัวแปรต่างๆเสร็จแล้วต้องตรวจสอบว่าผลการคำนวณได้ประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้าเท่ากับประสิทธิภาพที่กำหนดหรือไม่ ถ้าหากเท่ากันก็จะแสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ออกมาเห็นได้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าเป้าหมายสุดท้ายเป็นหม้อแปลงที่มีความยืดหยุ่นในการออกแบบมากที่สุด ซึ่งถ้าหากนำแนวทางการออกแบบดังกล่าวไปใช้ออกแบบหม้อแปลงขนาดใหญ่จะมีส่วนช่วยในการลดต้นทุน เพิ่มประสิทธิภาพและมากกว่านั้นจะเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับระบบไฟฟ้าได้อีกด้วย

## บรรณานุกรม

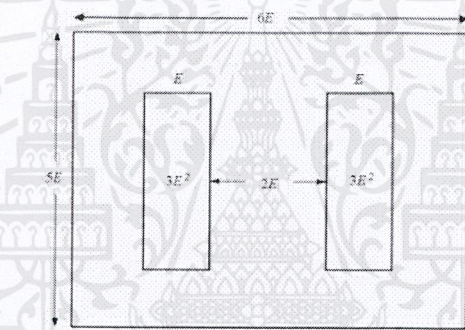
- [1] รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ. เอกสารประกอบการเรียนวิชา Electrical Engineering. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. ตุลาคม 2551.
- [2] รศ.ดร.ชัยวุฒิ จิตรอุทัย. เอกสารประกอบการเรียนวิชา Electromechanical Energy Conversion. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. ตุลาคม 2551.
- [3] พิสิฐ วนิชชานันท์. MATLAB การประยุกต์ใช้งานทางวิศวกรรมไฟฟ้า. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พิมพ์ครั้งที่ 3, 2551.
- [4] ชีรพล โพธิ์พงศ์วิวัฒน์. การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสม.วิทยานิพนธ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
- [5] รศ.พิชิต ล้ายอง. เครื่องจักรกลไฟฟ้า. สำนักพิมพ์มีนเซอร์วิสเซ็พพลาย, พิมพ์ครั้งที่ 1, 2553.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก  
ตัวอย่างการคำนวณพื้นที่การพัน

เมื่อกำหนดให้

พื้นที่หน้าตัดของขดลวดด้านแรงดันสูง	มีค่า	0.404 mm <sup>2</sup>
พื้นที่หน้าตัดของขดลวดด้านแรงดันต่ำ	มีค่า	0.825 mm <sup>2</sup>
จำนวนรอบของขดลวดด้านแรงสูง	มีค่า	552 turn
จำนวนรอบขดลวดด้านแรงต่ำ	มีค่า	276 turn
ความกว้างของช่องการพัน	มีค่า	19 mm
winding factor	มีค่า	0.4 – 0.6



รูปที่ ก.1 ลักษณะการตัดแกนเหล็ก E และ I

$$\begin{aligned}
 \text{พื้นที่การพัน } (A_w) &= \frac{N_{LV} \cdot A_{CLV} + N_{HV} \cdot A_{CHV}}{F_w} \\
 &= \frac{(276)(0.825 \times 10^{-6}) + (552)(0.404 \times 10^{-6})}{0.5} \\
 &= 901.41 \text{ ตารางมิลลิเมตร}
 \end{aligned}$$

แต่เนื่องจากพื้นที่การพันต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $3E^2$

$$\begin{aligned}
 3E^2 &= 3 \times (38)^2 \\
 &= 1,083 \text{ ตารางมิลลิเมตร}
 \end{aligned}$$

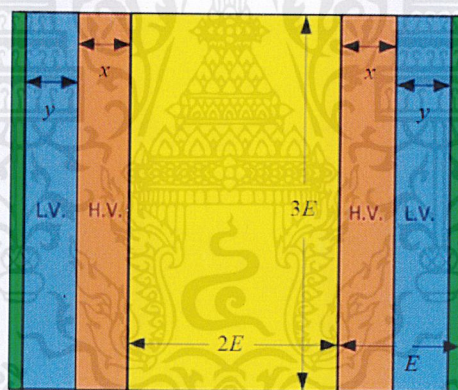
จะเห็นได้ว่า  $A_w < 3E^2$  ดังนั้นหม้อแปลงนี้จึงสามารถพันได้

## ภาคผนวก ข

## ตัวอย่างการคำนวณความยาวและน้ำหนักของลวดตัวนำ

เมื่อกำหนดให้

พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก	มีค่า	38 × 38	mm <sup>2</sup>
พื้นที่หน้าตัดของขดลวดต้านแรงดันสูง	มีค่า	0.404	mm <sup>2</sup>
พื้นที่หน้าตัดของขดลวดต้านแรงดันต่ำ	มีค่า	0.825	mm <sup>2</sup>
จำนวนรอบของขดลวดต้านแรงสูง	มีค่า	552	turn
จำนวนรอบขดลวดต้านแรงต่ำ	มีค่า	276	turn
ความกว้างของช่องการพัน	มีค่า	19	mm
winding factor	มีค่า	0.4 – 0.6	
Density ของลวดทองแดง	มีค่า	8960	kg/m <sup>3</sup>



รูปที่ ข.1 พื้นที่การพันขดลวด

$$\begin{aligned}
 \text{ความหนาของขดลวดแรงสูง } (x) &= \frac{N_{H.V.} \cdot A_{C_{H.V.}}}{F_w \cdot 3E} \\
 &= \frac{(552) (0.404 \times 10^{-6})}{(0.65) (3 \times 19 \times 10^{-3})} \\
 &= 6.02 \text{ มิลลิเมตร}
 \end{aligned}$$

$$\text{ความหนาของขดลวดแรงต่ำ } (y) = \frac{N_{L.V.} \cdot A_{C_{L.V.}}}{F_w \cdot 3E}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{(276)(0.825 \times 10^{-6})}{(0.65)(3 \times 19 \times 10^{-3})}$$

$$= 6.15 \text{ มิลลิเมตร}$$

ความยาวเฉลี่ยต่อรอบของขดลวดแรงสูง ( $l_{H.V.}$ )

$$l_{H.V.} = 2(2E + x) + 2(D + x)$$

$$= 2[(38 \times 10^{-3}) + (6.02 \times 10^{-3})] + 2[(38 \times 10^{-3}) + (6.02 \times 10^{-3})]$$

$$= 176.38 \times 10^{-3} \text{ m}$$

ความยาวเฉลี่ยต่อรอบของขดลวดแรงสูง ( $l_{L.V.}$ )

$$l_{L.V.} = 2(2E + 2x + y) + 2(D + 2x + y)$$

$$= 2[(38 \times 10^{-3}) + (2 \times 6.02 \times 10^{-3}) + (6.15 \times 10^{-3})]$$

$$+ 2[(38 \times 10^{-3}) + (2 \times 6.02 \times 10^{-3}) + (6.15 \times 10^{-3})]$$

$$= 224.76 \times 10^{-3} \text{ m}$$

ความยาวทั้งหมดของขดลวดแรงสูง ( $L_{H.V.}$ ) =  $N_{H.V.} \times l_{H.V.}$

$$= 552 \times 176.38 \times 10^{-3}$$

$$= 97.36 \text{ m}$$

ความยาวทั้งหมดของขดลวดแรงต่ำ ( $L_{L.V.}$ ) =  $N_{L.V.} \times l_{L.V.}$

$$= 276 \times 224.76 \times 10^{-3}$$

$$= 62.03 \text{ m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาตรของขดลวดต้านแรงสูง ( } V_{H.V.} \text{ )} &= N_{H.V.} \times l_{H.V.} \times Ac_{H.V.} \\
 &= 552 \times 176.38 \times 10^{-3} \times 0.404 \times 10^{-6} \\
 &= 3.93 \times 10^{-5} \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาตรของขดลวดต้านแรงสูง ( } V_{L.V.} \text{ )} &= N_{L.V.} \times l_{L.V.} \times Ac_{L.V.} \\
 &= 276 \times 224.76 \times 10^{-3} \times 0.825 \times 10^{-6} \\
 &= 5.12 \times 10^{-5} \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{น้ำหนักขดลวดต้านแรงสูง ( } W_{H.V.} \text{ )} &= V_{H.V.} \times \text{Density} \\
 &= 3.93 \times 10^{-5} \times 8960 \\
 &= 0.352 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{น้ำหนักขดลวดต้านแรงต่ำ ( } W_{L.V.} \text{ )} &= V_{L.V.} \times \text{Density} \\
 &= 5.12 \times 10^{-5} \times 8960 \\
 &= 0.458 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

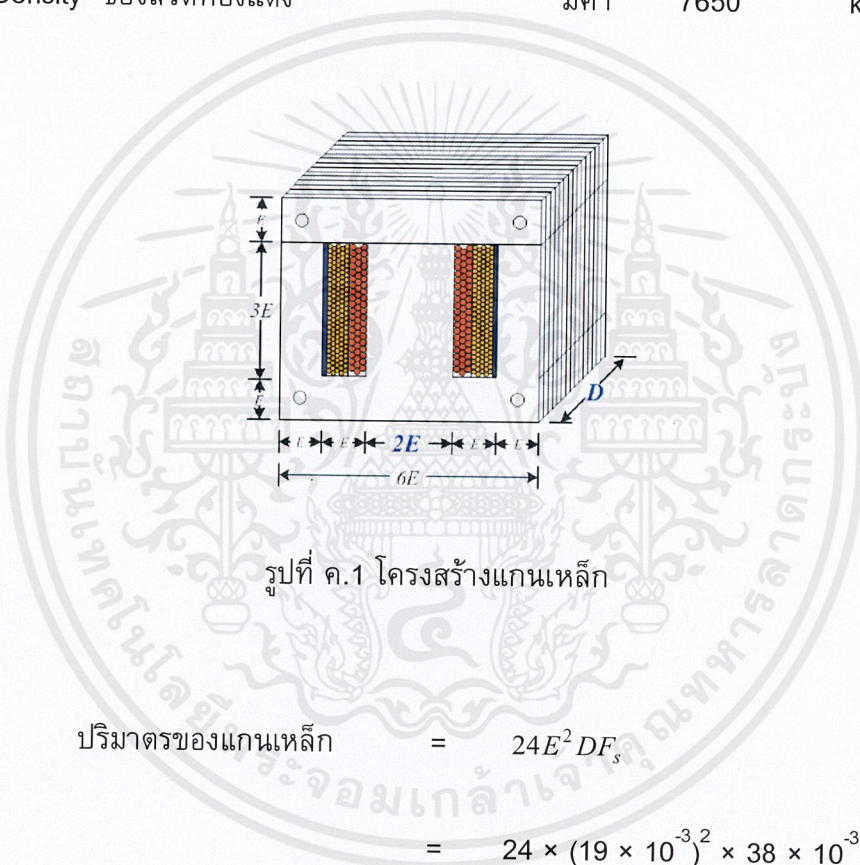
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

## ตัวอย่างการคำนวณน้ำหนักของแกนเหล็ก

เมื่อกำหนดให้

พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก	มีค่า	$38 \times 38$	$\text{mm}^2$
ความกว้างของช่องการพัน	มีค่า	19	mm
stack factor	มีค่า	0.96	
Density ของลวดทองแดง	มีค่า	7650	$\text{kg/m}^3$



รูปที่ ค.1 โครงสร้างแกนเหล็ก

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาตรของแกนเหล็ก} &= 24E^2 DF_s \\
 &= 24 \times (19 \times 10^{-3})^2 \times 38 \times 10^{-3} \times 0.96 \\
 &= 3.16 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \\
 \text{น้ำหนักของแกนเหล็ก} &= \text{Volume} \times \text{Density} \\
 &= 3.16 \times 10^{-4} \times 7650 \\
 &= 2.418 \text{ kg.}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้