

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟ  
ให้มีราคาต่ำโดยใช้จีเนติกอัลกอริทึม

MINIMUM COST DESIGN OF HIGH-VOLTAGE TRANSFORMERS FOR  
MICROWAVE OVEN USING GENETIC ALGORITHMS



วินัย สิทินันท์เจริญ

WINAI SITTINANCHAROEN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2546

ISBN 974-324-797-1

b.....  
i.....

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 48948  
วัน, เดือน, ปี 13 ส.ค. 2547

สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยค่า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**MINIMUM COST DESIGN OF HIGH-VOLTAGE TRANSFORMERS FOR  
MICROWAVE OVEN USING GENETIC ALGORITHMS**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2003**

**ISBN 974-324-797-1**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2003**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟให้มีราคาต่ำโดยใช้จันเนติกอัลกอริทึม
นักศึกษา	นายวินัย สิทธิพันธ์เจริญ
รหัสประจำตัว	44061010
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ชัชวาลย์ ฉัตรรุทัย

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เสนอแนวทางการพัฒนาการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟให้มีราคาต่ำโดยใช้จันเนติกอัลกอริทึม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง ที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าของตู้อบไมโครเวฟ 500 - 1,000 W แรงดันด้านปฐมภูมิ 100-230V 50/60 Hz การออกแบบสามารถกำหนดค่าอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดได้ โดยนำมาเป็นเงื่อนไขในการออกแบบ โครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงใช้แกนเหล็ก EI มาตรฐานชนิด 50 RM800 การออกแบบสามารถพิจารณาหาโครงสร้างที่เหมาะสมซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลักได้แก่ โครงสร้างของแกนเหล็กและโครงสร้างของขดลวดตัวนำ เพื่อให้เป็นไปตามเป้าหมายที่ต้องการตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบกำหนดให้เป็นพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก, ช่องว่างพันขดลวดตัวนำ และค่าความหนาแน่นของกระแสด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ การคำนวณโครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงใช้การหาค่าที่เหมาะสมแบบจันเนติกอัลกอริทึม โดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาด้วยภาษา Visual Basic พบว่าการออกแบบโดยใช้จันเนติกอัลกอริทึมทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงมีราคาลดลง, สามารถออกแบบที่อุณหภูมิเพิ่มของขดลวดขนาดต่าง ๆ ได้ และสามารถออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่มีประสิทธิภาพสูงได้ หลังจากการออกแบบได้มีการสร้างต้นแบบและทดสอบตามมาตรฐาน UL923 และ IEC-335-2-25 พบว่าการทดสอบกำลังไฟฟ้าเอาท์พุทที่ตู้อบไมโครเวฟมีค่าใกล้เคียงกับพิกัดที่ตั้งไว้ และผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดมีค่าผิดพลาดจากการออกแบบไม่เกิน 6 องศาเซลเซียส ทำให้มั่นใจได้ว่าสมการที่ใช้คำนวณหาอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดมีค่าผิดพลาดไม่เกิน 5 %

<b>Thesis Title</b>	Minimum Cost Design of High-Voltage Transformers for Microwave Oven Using Genetic Algorithms
<b>Student</b>	Mr. Winai Sittinancharoen
<b>Student ID.</b>	44061010
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2003
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr.Chaiwut Chat-uthai

### ABSTRACT

This thesis presents the development of the design of high-voltage transformers for microwave oven having minimum cost by using the genetic algorithms , which have rated 500 - 1,000 W , primary voltage 100-230 V and frequency 50/60 Hz. The temperature-rise of windings can be defined as the constraint in the optimal design process. The transformers are constructed by using standard EI-core type 50RM800. The optimal structure of transformer, ei core and windings, can be obtained according to the objective of the design. The cross-section area of core, window area of winding and current density of primary and secondary windings are defined to be the design variables. The transformer constructions can be evaluated by the optimization techniques based on the genetic algorithms using the program developed from Visual Basic. The results show that the genetic algorithms can reduce the cost of high-voltage transformers, define the temperature-rise of winding and design the high efficiency of high-voltage transformers. In this thesis, the comparisons of the results obtained from the optimal designs and those from the prototypes which are tested according to Standard UL923 and IEC-335-2-25 are illustrated. The design rated output power of microwave ovens can be obtained and the error of temperature-rise of windings are less than 6 °C (5 %)

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำ ปรึกษาเกี่ยวกับการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงและหลักการออกแบบที่เหมาะสมจาก รศ.ดร.ชัชวาลย์ ฉัตรอุทัย ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ คุณต่อพงศ์ ภูมิภาค และ คุณธีรพล โปธิพงษ์วิวัฒน์ ที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำในบางปัญหาที่เกิดขึ้น ซึ่งมีส่วนช่วยให้ผู้วิจัยเข้าใจในปัญหานั้น

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ นักศึกษาสำหรับความช่วยเหลือต่าง ๆ ที่มีให้กับผู้วิจัย

ขอขอบคุณ คุณสุพรรณิษฐ์ สิทธินันท์เจริญ ที่คอยเป็นกำลังใจ, ดูแล, เวลา, เข้าใจ พร้อมทั้งให้ความช่วยเหลือแก่ผู้วิจัยตลอดเวลา

ท้ายที่สุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ พรเทพ คุณแม่ วิไล ซึ่งเป็นผู้ให้โอกาสทางการศึกษาและกำลังใจกับผู้วิจัยตั้งแต่เริ่มต้นจนสำเร็จสมความตั้งใจ

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

วินัย สิทธินันท์เจริญ

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย .....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย .....	2
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟ.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟ .....	6
2.2.1 โครงสร้างวงจรแม่เหล็ก.....	7
2.2.2 โครงสร้างขดลวดตัวนำ.....	8
2.2.3 การคำนวณความยาวขดลวด.....	9
2.2.4 การคำนวณหาจำนวนชั้นและจำนวนรอบในแนวตั้งของขดลวด.....	10
2.2.5 ความต้านทานไฟฟ้าของขดลวด.....	11
2.3 กำลังสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า.....	11
2.3.1 กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก .....	11
2.3.2 กำลังสูญเสียในขดลวด .....	12
2.4 สมการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเบื้องต้น.....	12
2.4.1 ออกแบบโดยใช้สมการแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ.....	13
2.5 แผนผังการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยวิธีการเดิม .....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 ตัวอย่างการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยวิธีการเดิม .....	15
<b>บทที่ 3 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงให้มีราคาต่ำ.....</b>	<b>22</b>
3.1 บทนำ.....	22
3.2 พื้นฐานการออกแบบที่เหมาะสม .....	22
3.2.1 การแก้ปัญหาโดยตรงและการแก้ปัญหาวนกลับ .....	23
3.2.2 หลักการออกแบบที่เหมาะสม .....	24
3.2.2.1 กำหนดเป้าหมายการออกแบบ (design objective).....	24
3.2.2.2 กำหนดรูปแบบของปัญหา (formulation of problem).....	24
3.2.2.3 หลักการออกแบบและสังเคราะห์ (design concept and synthesis).....	25
3.2.2.4 การหาค่าที่เหมาะสม (optimization process).....	25
3.2.2.5 อภิปรายผลการออกแบบ (discussion).....	26
3.3 หลักการเบื้องต้นของการหาค่าที่เหมาะสม .....	26
3.3.1 จุดที่เหมาะสม (Optimal Point).....	27
3.3.2 การหาค่าที่เหมาะสมแบบดิเทอมีนิสติก.....	28
3.3.3 การหาค่าที่เหมาะสมแบบสโตชาสติก .....	29
3.4 หลักการออกแบบที่เหมาะสมแบบจินตคณิต.....	30
3.4.1 การเพิ่มจำนวนเซลล์ .....	30
3.4.2 การแบ่งตัวของเซลล์สืบพันธุ์.....	30
3.5 ตัวอย่างการหาค่าจุดสูงสุดของฟังก์ชันโดยใช้จินตคณิตอัลกอริธึม .....	31
3.5.1 ขั้นตอนที่ 1 Reproduction.....	34
3.5.2 ขั้นตอนที่ 2 Cross Over .....	36
3.5.3 ขั้นตอนที่ 3 Mutation.....	36
3.6 ทฤษฎีการคำนวณหาอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด .....	37
<b>บทที่ 4 ผลการออกแบบและทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง.....</b>	<b>39</b>
4.1 บทนำ.....	39
4.2 แผนผังการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง.....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง.....	40
4.4 ผลการทดสอบต้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง.....	48
4.4.1 การทดสอบสภาวะไร้โหลด.....	55
4.4.2 การทดสอบสภาวะโหลด.....	56
4.4.3 การทดสอบกำลังไฟฟ้าเอทท์พุทที่ดูบไมโครเวฟ.....	67
4.4.4 การทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด.....	68
4.5 บทสรุป.....	70
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	71
เอกสารอ้างอิง.....	76
ภาคผนวก ก. ขนาดและคุณสมบัติของลวดตัวนำ.....	79
ภาคผนวก ข. ขนาดและคุณสมบัติของแกนเหล็ก.....	81
ภาคผนวก ค. ตัวอย่างการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง ให้มีราคาต่ำโดยใช้เงินคิกอ์ลกรวิธี.....	86
ภาคผนวก ง. สัญญาณกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบของต้นแบบที่สร้างขึ้น.....	93
ภาคผนวก จ. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง.....	104
ภาคผนวก ฉ. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	109
ประวัติผู้เขียน.....	116

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อมูลลวดตัวนำของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง พิกัดกำลังไฟฟ้าของตู้อบไมโครเวฟ 700 W 120/2070 V 60 Hz.....	16
2.2 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยวิธีการเดิม พิกัดกำลังไฟฟ้าที่ตู้อบไมโครเวฟ 700 W 120/2070 60 Hz และ 850 W 230/2220 50 Hz .....	21
4.1 ข้อมูลเบื้องต้นของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่ทำการออกแบบ .....	41
4.2 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงพิกัด 700 W 120/2070 60 Hz .....	42
4.3 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงพิกัด 850 W 230/2220 50 Hz .....	43
4.4 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงพิกัด 1,000 W 220/2200 50 Hz .....	44
4.5 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงพิกัด 700 W 120/2070 60 Hz เมื่อราคาวัสดุมีการเปลี่ยนแปลง.....	45
4.6 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงพิกัด 850 W 230/2220 50 Hz เมื่อราคาวัสดุมีการเปลี่ยนแปลง.....	46
4.7 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงให้มีประสิทธิภาพสูง พิกัด 850 W 230/2220 50 Hz .....	47
4.8 การเปรียบเทียบค่าน้ำหนัก (kg) ของ โครงสร้างที่ได้จากการออกแบบ พิกัด 700 W .....	49
4.9 การเปรียบเทียบค่าน้ำหนัก (kg) ของ โครงสร้างที่ได้จากการออกแบบ พิกัด 850 W .....	50
4.10 การเปรียบเทียบค่าน้ำหนัก (kg) ของ โครงสร้างที่ได้จากการออกแบบ พิกัด 1,000 W .....	50
4.11 การเปรียบเทียบค่าน้ำหนัก (kg) ของต้นแบบประสิทธิภาพสูง พิกัด 850 W .....	50
4.12 ผลการทดสอบสถานะไร้โหลด พิกัด 700 W 120 V 60 Hz .....	55
4.13 ผลการทดสอบสถานะไร้โหลด พิกัด 850 W 230 V 50 Hz .....	56
4.14 ผลการทดสอบสถานะไร้โหลด พิกัด 1,000 W 220 V 50 Hz .....	56
4.15 ผลการทดสอบสถานะโหลด พิกัด 700 W 60 Hz .....	57
4.16 ผลการทดสอบสถานะโหลด พิกัด 850 W 50 Hz .....	57
4.17 ผลการทดสอบสถานะโหลด พิกัด 1,000 W 50 Hz .....	58
4.18 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ตู้อบไมโครเวฟ พิกัด 700 , 850 และ 1,000 W .....	67
4.19 ความสามารถในการทนอุณหภูมิเพิ่มของฉนวนแต่ละชนิด .....	69
4.20 ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดของต้นแบบต่าง ๆ .....	69

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรแรงดันสูงในตู้อบไมโครเวฟ .....	5
2.2 โครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง.....	6
2.3 โครงสร้างวงจรแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง .....	7
2.4 การตัดแกนเหล็กรูป E และ I แบบประหยัดไม่มีเศษวัสดุเหลือจากการตัด .....	7
2.5 ระบบฉนวนที่เคลือบรอบนอกของลวดตัวนำ.....	8
2.6 ลักษณะการพันขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง .....	8
2.7 ภาพตัดขวางของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง.....	9
2.8 แผนผังของขบวนการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยวิธีการเดิม.....	14
3.1 แผนผังขั้นตอนการออกแบบทางวิศวกรรม .....	22
3.2 การแก้ปัญหาโดยตรง.....	23
3.3 การแก้ปัญหาแบบย้อนกลับ .....	23
3.4 แผนผังขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสม .....	24
3.5 คำตอบของค่าต่ำสุดของฟังก์ชัน $f(x)$ เป็นจุดเดียวกับค่าสูงสุดของฟังก์ชัน $-f(x)$ .....	26
3.6 กราฟค่าของฟังก์ชันเป้าหมาย $f(x)$ บนโดเมน $x$ .....	27
3.7 แผนผังของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบคณิตศาสตร์ .....	28
3.8 แผนผังของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบจินตคณิต.....	29
3.9 กราฟสามมิติของฟังก์ชันเป้าหมาย .....	32
4.1 แผนผังของขบวนการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม.....	40
4.2 ดันแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง พิกัด 700 W ดันแบบหมายเลข 1 .....	50
4.3 ดันแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง พิกัด 700 W ดันแบบหมายเลข 2 .....	50
4.4 ดันแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง พิกัด 700 W ดันแบบหมายเลข 3 .....	50
4.5 ดันแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง พิกัด 850 W ดันแบบหมายเลข 4 .....	51
4.6 ดันแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง พิกัด 850 W ดันแบบหมายเลข 5 .....	51
4.7 ดันแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง พิกัด 850 W ดันแบบหมายเลข 6 .....	51
4.8 ดันแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง พิกัด 850 W ดันแบบหมายเลข 7 .....	52
4.9 ดันแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง พิกัด 1,000 W ดันแบบหมายเลข 9 .....	52
4.10 ดันแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง พิกัด 1,000 W ดันแบบหมายเลข 10 .....	52
4.11 ดันแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง พิกัด 1,000 W ดันแบบหมายเลข 11 .....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ดันแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง พิกัด 1,000 W ดันแบบหมายเลข 12 .....	53
4.13 ดันแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง พิกัด 850 W ดันแบบหมายเลข 17 .....	53
4.14 การต่อเครื่องมือวัดในการทดสอบแบบเปิดวงจร.....	54
4.15 วงจรการทดสอบสถานะโหลด.....	56
4.16 สัญญาณอินพุทที่ได้จากการทดสอบดันแบบหมายเลข 1 และ 2 ในสถานะทำงาน .....	59
4.17 สัญญาณเอาต์พุทที่ได้จากการทดสอบดันแบบหมายเลข 1 และ 2 ในสถานะทำงาน.....	60
4.18 สัญญาณอินพุทที่ได้จากการทดสอบดันแบบหมายเลข 5 และ 6 ในสถานะทำงาน .....	61
4.19 สัญญาณเอาต์พุทที่ได้จากการทดสอบดันแบบหมายเลข 5 และ 6 ในสถานะทำงาน.....	62
4.20 สัญญาณอินพุทที่ได้จากการทดสอบดันแบบหมายเลข 10 และ 11 ในสถานะทำงาน .....	63
4.21 สัญญาณเอาต์พุทที่ได้จากการทดสอบดันแบบหมายเลข 10 และ 11 ในสถานะทำงาน.....	64
4.22 สัญญาณอินพุทที่ได้จากการทดสอบดันแบบหมายเลข 5 และ 17 ในสถานะทำงาน .....	65
4.23 สัญญาณเอาต์พุทที่ได้จากการทดสอบดันแบบหมายเลข 5 และ 17 ในสถานะทำงาน.....	66
5.1 ราคาต้นทุนในการออกแบบโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง (ปฐมภูมิ 107.72 , ทุดิยภูมิ 130.42 และแกนเหล็ก 22.91 บาท/กิโลกรัม) .....	73
5.2 การเปรียบเทียบราคาต้นทุนในการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง เมื่อราคาวัสดุลดตัวนำเกิดการเปลี่ยนแปลง (เมื่อเทียบกับดันแบบหมายเลข 5 ) .....	74
5.3 การเปรียบเทียบราคาต้นทุนในการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง เมื่อราคาแกนเหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลง (เมื่อเทียบกับดันแบบหมายเลข 5 ) .....	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี มนุษย์ได้สร้างเครื่องอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ในชีวิตประจำวันอย่างมากมาย ตู้อบไมโครเวฟเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่กำลังจะกลายเป็นสิ่งที่จำเป็นในการประกอบอาหารซึ่งช่วยให้เราทำอาหารได้สะดวกและรวดเร็วขึ้น ดังนั้นจึงมีความพยายามที่จะพัฒนาและปรับปรุงการออกแบบส่วนประกอบต่าง ๆ ของตู้อบไมโครเวฟให้มีราคาที่ต่ำลงโดยที่ยังคงคุณลักษณะเดิม เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิต ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่ใช้สำหรับตู้อบไมโครเวฟเป็นส่วนประกอบหลักในตู้อบไมโครเวฟ จึงจำเป็นต้องลดต้นทุนการผลิตในส่วน of หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงเพื่อเพิ่มผลประกอบการ จากการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงโดยวิธีทั่วไป จะใช้วิธีลองผิดลองถูก (trial and error) จากประสบการณ์และความชำนาญของผู้ออกแบบ โดยการเปลี่ยนขนาดโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าเช่น ขนาดของแกนเหล็กและจำนวนรอบของขดลวด ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย อีกทั้งมีโอกาสที่จะไม่ได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีราคาต่ำ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำ วิธีการเชิงตัวเลขในการหาค่าที่เหมาะสม (numerical optimization method) ซึ่งเป็นการหาค่าสูงสุดหรือต่ำสุดของฟังก์ชันมาช่วยในการหาโครงสร้างที่เหมาะสมเพื่อให้ได้หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่มีราคาต่ำ

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จุดมุ่งหมายของวิทยานิพนธ์นี้คือการศึกษาแนวทางในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟให้มีราคาต่ำโดยใช้เงินดิจิทัลอิม โดยจะทำการศึกษาวิธีการหาค่าที่เหมาะสม ศึกษาการคำนวณโครงสร้างต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟได้แก่ แกนเหล็กและความยาวของขดลวด รวมถึงศึกษาวิธีการคำนวณค่าอุณหภูมิเพิ่มขณะใช้งานของขดลวดและนำมาเป็นเงื่อนไขในการออกแบบ แล้วนำผลการศึกษาที่ได้ไปสร้างโปรแกรมออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม เพื่อนำไปใช้ออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง และนำผลที่ได้จากการออกแบบไปสร้างต้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟโดยวิธีทั่วไป เมื่อผู้ออกแบบต้องการที่จะกำหนดคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้า ผู้ออกแบบจะใช้วิธีการปรับขนาดของแกนเหล็กหรือจำนวนรอบของขดลวดตามประสบการณ์ที่มีอยู่ แต่จะทราบได้อย่างไรว่าควรที่จะปรับขนาดของแกนเหล็กและความหนาแน่นของกระแสไปเท่าใดจึงจะได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีคุณลักษณะตามที่ต้องการและอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดไม่เกินพิกัด ซึ่งเป็นไปได้ยากที่จะทำการลองปรับไปจนได้ค่าที่เหมาะสม ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอแนวทางการออกแบบโดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสม โดยคาดว่าจะสามารถช่วยทำให้ได้ขนาดโครงสร้างของแกนเหล็ก และค่าความหนาแน่นของกระแสที่เหมาะสมพร้อมทั้งทำนายอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด ซึ่งจะทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟมีราคาต่ำ

### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เสนอวิธีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟให้มีราคาต่ำ โดยอาศัยทฤษฎีของการหาค่าที่เหมาะสมแบบสโตคาสติก (stochastic) เป็นการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้พื้นฐานของความน่าจะเป็น ซึ่งใช้จินตคณิตอัลกอริทึม (genetic algorithm) ในการนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมเข้ามาช่วยออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟจะนำมาใช้หาขนาดโครงสร้างของแกนเหล็กและค่าความหนาแน่นของกระแสที่เหมาะสมเพื่อให้ได้หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟที่มีราคาต่ำ

### 1.5 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตในการวิจัยของวิทยานิพนธ์นี้คือการเสนอแนวทางการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟให้มีราคาต่ำโดยใช้จินตคณิตอัลกอริทึม เพื่อออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าที่ตู้อบไมโครเวฟ 500-1,000 W แรงดันไฟฟ้าปฐมภูมิ 100-230 V ความถี่ 50/60 Hz ให้มีราคารวมต่ำภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดที่แตกต่างกันหลังการออกแบบจะนำผลที่ได้มาสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบเพื่อทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของกระบวนการออกแบบรวมถึง สมการที่ใช้ในการคำนวณโครงสร้าง พร้อมทั้งทำการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่มีการเปลี่ยนแปลงราคาของวัสดุขดลวดตัวนำ จากนั้นทำการออกแบบและทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงภายใต้เงื่อนไขของประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ ส่วนแรกเป็นการศึกษาวิธีการหาค่าที่เหมาะสมและหลักการออกแบบที่เหมาะสม ส่วนที่สองเป็นการศึกษาวิธีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟซึ่งทั้งสองส่วนมีรายละเอียดดังนี้

ส่วนแรกทำการศึกษาลักษณะและวิธีการหาค่าที่เหมาะสม โดยได้ทำการศึกษาวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบสโตชาสติก โดยใช้จินตคณิตอัลกอริทึม (genetic algorithm) จากนั้นเขียนโปรแกรมที่ใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมเพื่อนำไปออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟ

ในส่วนที่สองทำการศึกษาวิธีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟโดยการรวบรวมวิธีการออกแบบที่มีการใช้งานกันอยู่ รวมถึงวิธีการคำนวณโครงสร้างของแกนเหล็กและขดลวด จากนั้นนำมาทดสอบความแม่นยำในการคำนวณขนาดโครงสร้างโดยทำการสร้างต้นแบบจริง เมื่อได้วิธีการคำนวณโครงสร้างแล้ว จะทำการหาอุณหภูมิเพิ่มขณะใช้งานของขดลวดพร้อมทั้งกำหนดเป็นเงื่อนไขในการออกแบบ ขั้นตอนต่อไปจะทำการพิจารณาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบที่ทำให้มีราคาต่ำซึ่งได้แก่ ขนาดของแกนเหล็กและค่าความหนาแน่นของกระแส จากนั้นจะนำพารามิเตอร์เหล่านี้ไปใช้เป็นตัวแปรในการออกแบบ โดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสม หลังการออกแบบนำผลที่ได้มาสร้างต้นแบบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมการต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟและอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด

ขั้นตอนของการศึกษาในงานวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถนำเสนอได้ดังนี้

บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงโครงสร้างพื้นฐานของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟ วิธีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟแบบทั่วไป โดยได้แสดงรายละเอียดพร้อมทั้งตัวอย่างการคำนวณโครงสร้าง, น้ำหนัก และราคารวมของวัสดุลวดตัวนำกับแกนเหล็ก

บทที่ 3 เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของการหาค่าที่เหมาะสมแบบสโตชาสติก โดยใช้จินตคณิตอัลกอริทึม (genetic algorithm) พร้อมตัวอย่างการแก้ปัญหาของฟังก์ชัน โดยใช้จินตคณิตอัลกอริทึม และทฤษฎีเบื้องต้นในการคำนวณหาอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด พร้อมทั้งสภาวะการอบวานิชของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง ตลอดจนกล่าวถึงหลักการออกแบบที่เหมาะสม

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการออกแบบและทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟ พิกัดกำลังไฟฟ้าที่ตู้อบไมโครเวฟพิกัด 700 W 120/2070 V 60 Hz , 850 W 230/2220 V 50 Hz และ 1,000 W 220/2200 V 50 Hz แกนเหล็กชนิด 50RM800 ที่อุณหภูมิเพิ่มของขดลวดค่าต่าง ๆ ลวดตัวนำเป็นฉนวนคลาส R โดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบจินตคณิตอัลกอริทึมซึ่งมีเป้าหมายในการออกแบบให้ค่าราคาของวัสดุต่ำที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด พร้อมทั้งออกแบบ

หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงกรณีของการเพิ่มประสิทธิภาพ , การเปลี่ยนแปลงราคาวัสดุลดต้นทุน  
และการเปลี่ยนแปลงราคาแกนเหล็ก

บทที่ 5 เป็นการกล่าวถึงผลสรุปที่ได้จากการวิจัยที่แสดงให้เห็นว่าหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดัน  
สูงสำหรับคู่อุปไมโครเวฟที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม จะมีลักษณะของโครง  
สร้างที่แตกต่างกันไปตามพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ และมีข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพิ่มเติมเพื่อ  
เป็นแนวทางสำหรับการวิจัยที่ต่อเนื่องในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

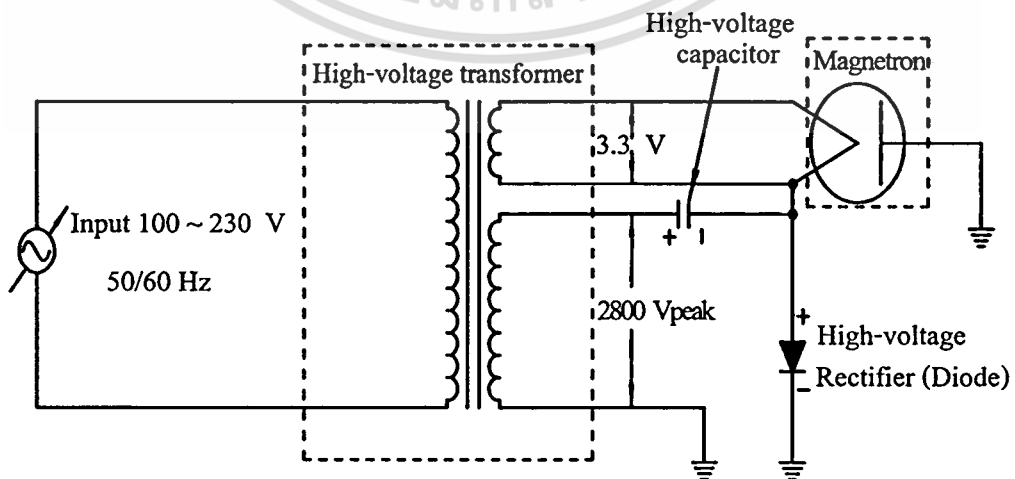
# หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟ

### 2.1 บทนำ

ตู้อบไมโครเวฟเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่กำลังจะกลายเป็นสิ่งจำเป็นในการประกอบอาหารซึ่งช่วยให้เราทำอาหารได้สะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงมีความพยายามที่จะพัฒนาและปรับปรุงการออกแบบส่วนประกอบต่าง ๆ ของตู้อบไมโครเวฟให้มีราคาต่ำลงโดยที่ยังคงคุณลักษณะเดิม เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิต โดยทั่วไปแล้วตู้อบไมโครเวฟจะมีส่วนประกอบหลักคือ วงจรแรงดันไฟฟ้าสูงซึ่งวงจรในส่วนนี้ประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก ดังนี้

- หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง (high-voltage transformer)
- ตัวเก็บประจุแรงดันสูง (high-voltage capacitor)
- วงจรแปลงไฟแรงดันสูง (high-voltage rectifier)
- แมกเนตรอน (magnetron)

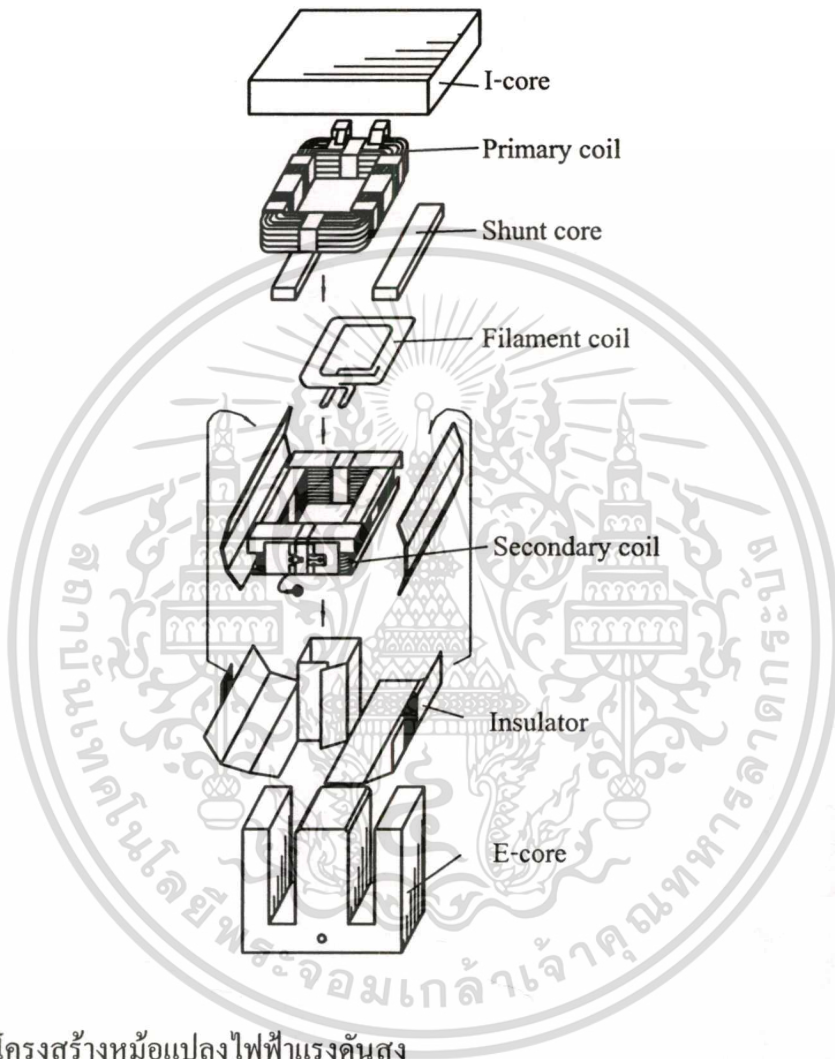
เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นที่ด้านทุติยภูมิซึ่งมีค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 2,800 โวลต์ดังแสดงในรูปที่ 2.1 แรงดันสูงที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผ่านไปยังตัวเก็บประจุแรงดันสูง และวงจรแปลงไฟแรงดันสูงซึ่งจะรวมกันเป็นวงจรปรับระดับแรงดันลบ [1] ทำให้เกิดแรงดันเอาต์พุตสูงสุดมีค่าประมาณ 5,600 โวลต์แรงดันส่วนนี้จะส่งผ่านไปยังแมกเนตรอนเพื่อทำให้แมกเนตรอนสามารถกำเนิดความถี่ขึ้นมาได้ โดยทั่วไปแล้วความถี่ที่ใช้จะมีค่าอยู่ประมาณ 2,450 เมกกะเฮิรตซ์ ซึ่งจะเห็นว่าหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงเป็นส่วนที่สำคัญในวงจรแรงดันสูงในตู้อบไมโครเวฟ



รูปที่ 2.1 วงจรแรงดันสูงในตู้อบไมโครเวฟ

## 2.2 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟ

หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟที่ใช้งานกันอยู่โดยทั่วไปมีขดลวดสามชุดพันรอบแกนเหล็กที่ทำด้วยสาร ferromagnetic เป็นแผ่นเหล็กบาง ๆ (laminated core) นำมาวางเรียงซ้อนกัน



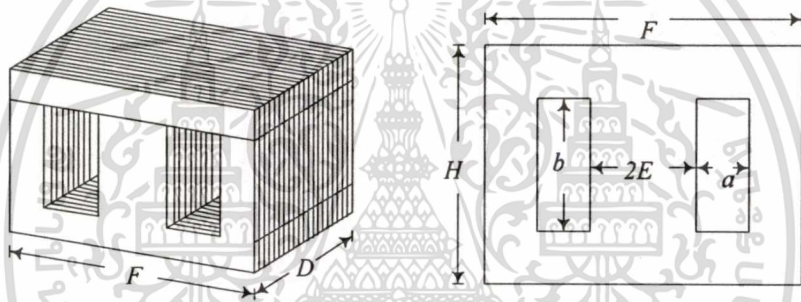
รูปที่ 2.2 โครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง

โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงจะมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 6 ส่วนดังนี้ 1) ขดลวดปฐมภูมิ 2) ขดลวดทุติยภูมิ 3) ขดลวด filament 4) แกน shunt 5) แกนแบบ E 6) แกนแบบ I ซึ่งจะเห็นได้ว่าราคาส่วนใหญ่ของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงจะอยู่ที่วัสดุขดลวดและแกนเหล็ก EI ขั้นตอนการประกอบหม้อแปลงนี้ต้องเริ่มจากการใส่ขดลวดทุติยภูมิลงในแกนแบบ E ก่อนตามด้วยขดลวด filament และแกน shunt จากนั้นทำการใส่ขดลวดปฐมภูมิดังแสดงในรูปที่ 2.2 เมื่อทำการประกอบเสร็จแล้วก็ทำการเชื่อมแกนแบบ E และแกนแบบ I ให้ติดกันด้วยการใช้แก๊สอาร์กอน

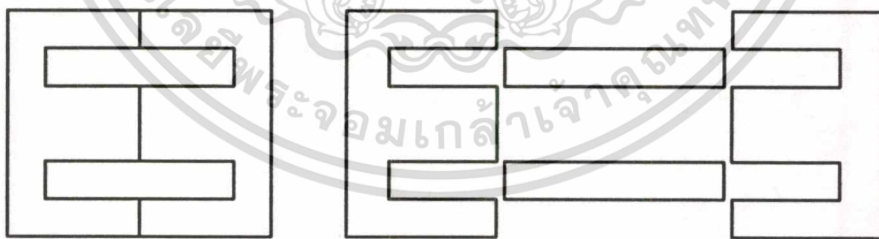
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1 โครงสร้างวงจรมแม่เหล็ก

โครงสร้างวงจรมแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟโดยทั่วไปนิยมใช้โครงสร้างเป็นแบบเซลล์แสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งเป็นการประกอบกันของแผ่นเหล็กรูป E และรูป I ขนาดขากลางของแกนเหล็กจะเป็นสองเท่าของขาข้าง เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กหลักที่เกิดขึ้นบริเวณขากลางจะแบ่งกระจายออกด้านข้างด้านละเท่า ๆ กัน ส่วนขนาดของช่องพันขลวดนั้นจะมีขนาดสัดส่วนขึ้นกับเป้าหมายของการออกแบบ [2] และลักษณะการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า แต่การออกแบบแกนเหล็กแบบไม่มีการสูญเสียวัสดุจากการตัดจะกำหนดให้ขนาดความกว้างของช่องพันขลวด ( $a$ ) เป็นครึ่งหนึ่งของขนาดขากลาง ( $2E$ ) และความสูง ( $b$ ) จะมีขนาดเป็นสามเท่าของความกว้าง ( $a$ ) ซึ่งลักษณะสัดส่วนของแกนเหล็กที่ได้จากการออกแบบนี้จะเรียกว่าแกนแบบประหยัดขนาดความกว้าง ( $F$ ) และความสูง ( $H$ ) ของแกนเหล็กจะมีสัดส่วนกันเป็น 5 ต่อ 6 แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 โครงสร้างวงจรมแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง



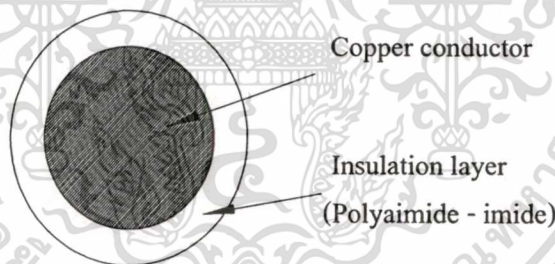
รูปที่ 2.4 การตัดแกนเหล็กรูป E และ I แบบประหยัดไม่มีเศษวัสดุเหลือจากการตัด

แกนเหล็กซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรมแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าจะทำได้ด้วยสาร ferromagnetic ซึ่งมีคุณสมบัติทางแม่เหล็กที่ดีคือ มีค่าความซึมซาบแม่เหล็กสูง เพื่อลดค่าความสูญเสียทางแม่เหล็กเนื่องจากวงฮิสเทอรีซิส (hysteresis loss) และเพื่อลดการรั่วของเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งจะทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นกระจายอยู่ในส่วนที่เป็นแกนเหล็กเท่านั้น โครงสร้างแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงแผ่นเหล็กที่ประกอบเป็นวงจรมแม่เหล็กจะเป็นแผ่นบาง ๆ มีความหนา 0.5 มม. วางเรียงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

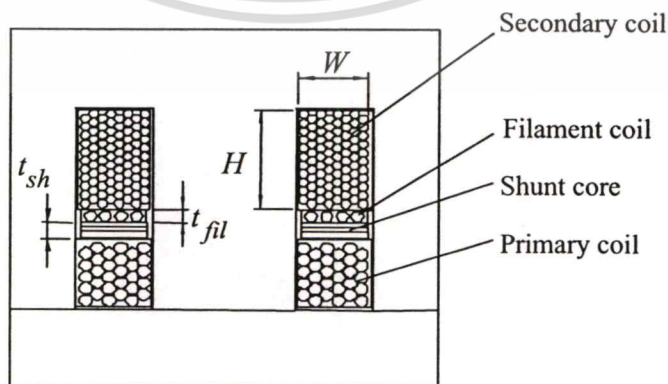
อัดซ้อนกันเพื่อเป็นการลดค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก (eddy current loss) ซึ่งค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กทั้งสองค่าเรียกว่าค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก

### 2.2.2 โครงสร้างขดลวดตัวนำ

ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงมีโครงสร้างเป็นกลุ่มลวดตัวนำพื้นที่หน้าตัดกลมทำด้วยทองแดงจำนวนสองชุดหลัก พันอยู่รอบวงจรมแม่เหล็กเดียวกันแต่ไม่มีการต่อถึงกันทางไฟฟ้า การเลือกใช้ขนาดของตัวนำขึ้นกับพิกัดกำลังไฟฟ้า แรงดันใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า, ความหนาแน่นกระแส (current density) และวิธีการระบายความร้อนรวมถึงอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด การออกแบบจะคำนวณขนาดของตัวนำที่ต้องการ แล้วนำไปเลือกขนาดตัวนำมาตรฐานจากตารางข้อมูลลวดตัวนำ ซึ่งมาตรฐานที่มีการใช้งานในปัจจุบันได้แก่ TIS, JIS, NEMA, BS, DIN และ IEC ซึ่งการเลือกระบบฉนวนที่เคลือบลวดขึ้นอยู่กับว่าต้องการให้ลวดตัวนำสามารถทนอุณหภูมิได้เท่าไร โดยทั่วไประบบฉนวนที่เคลือบรอบนอกของลวดที่ใช้สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงจะเป็น Polyamide - imide Wire ทนอุณหภูมิได้สูงถึง 220 องศาเซลเซียส [3] แสดงดังรูปที่ 2.5 และข้อมูลที่ได้จากตารางข้อมูลลวดตัวนำได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ, mm (รวมฉนวนและไม่รวมฉนวน) พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ,  $\text{mm}^2$  (หรือ  $\text{cmil}$ ) น้ำหนักของตัวนำ,  $\text{g/m}$  และความต้านทานของตัวนำ,  $\Omega/\text{km}$  (หรือ  $\Omega/\text{ความยาว}$ )



รูปที่ 2.5 ระบบฉนวนที่เคลือบรอบนอกของลวดตัวนำ



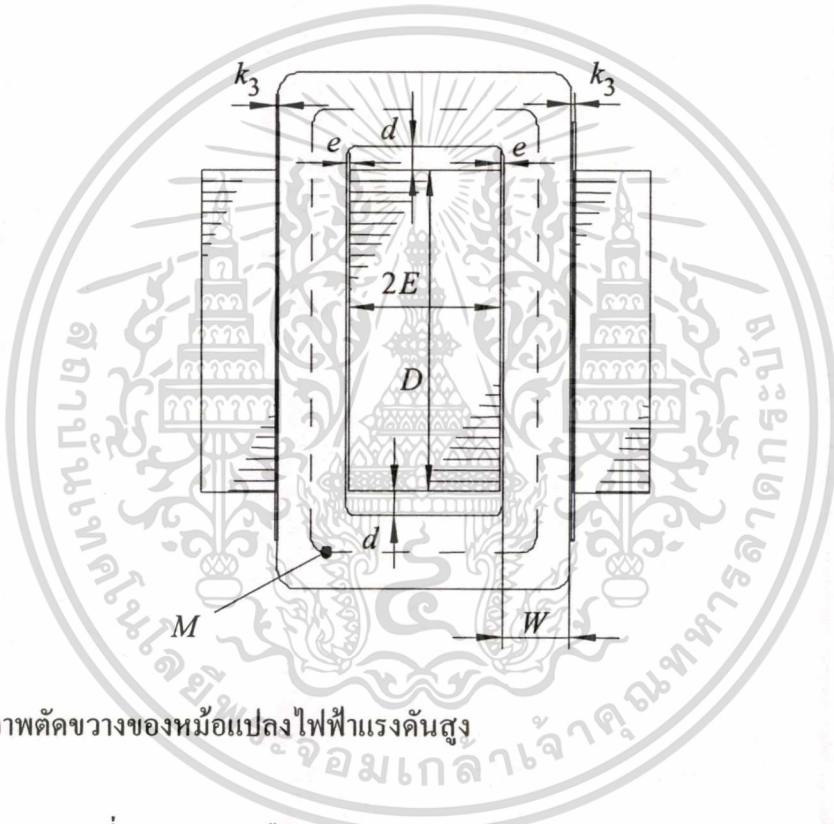
รูปที่ 2.6 ลักษณะการพันขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการพันขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟมีลักษณะการพันแบบแยกขดกันดังแสดงดังรูปที่ 2.6 เนื่องจากทางด้านขดลวดทุติยภูมิเป็นขดที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสูงไม่สามารถพันทับขดลวดปฐมภูมิได้

### 2.2.3 การคำนวณความยาวขดลวด [4]

จากรูปที่ 2.7 เป็นภาพตัดขวางของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง โดย  $M$  เป็นระยะความยาวเฉลี่ยของขดลวด ซึ่งความยาวรวมของขดลวดสามารถคำนวณได้จาก ความยาวเฉลี่ยของขดลวดคูณกับจำนวนรอบของขดลวด โดยความยาวเฉลี่ยของขดลวดนั้นสามารถกำหนดได้จาก โครงสร้างของแกนเหล็ก  $f(2E, D, e, d)$



รูปที่ 2.7 ภาพตัดขวางของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง

ความยาวเฉลี่ยของขดลวดคือผลรวมของความยาวรอบ  $f(2E, D, e, d)$  กับเส้นรอบวงของวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับระยะจากขอบในของขดลวดถึงกึ่งกลางความหนาของขดลวดคือ  $W/2$  ดังนั้นความยาวเฉลี่ยของขดลวดสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.1

$$M = 2(2E + D + 2e + 2d) + \pi W \quad (2.1)$$

จากสมการที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าความยาวเฉลี่ยของขดลวดแต่ละขดนั้นขึ้นอยู่กับระยะความยาวรอบของแกนเหล็ก กับความยาวของตัวแปร ( $e$ ) และ ( $d$ ) ซึ่งตามมาตรฐานทางการผลิตในส่วนของขดลวดปฐมภูมิใช้ 0.3 , 4.5 mm.ตามลำดับ และขดลวดทุติยภูมิใช้ 0.75 , 2 mm.ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้  $N$  เป็นจำนวนรอบของขดลวดจะได้ความยาวของขดลวด ( $l$ ) ดังนี้

$$l = M \times N \quad (2.2)$$

#### 2.2.4 การคำนวณหาจำนวนชั้นและจำนวนรอบในแนวตั้งของขดลวด

ลักษณะการพันขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงจะมีลักษณะในการพันแบบถอดประกอบคือต้องพันในเครื่องพันและหลังจากพันเสร็จแล้ว นำมาประกอบลงในแกนเหล็ก ซึ่งการพันลักษณะนี้จำเป็นต้องมีการคำนวณหาจำนวนชั้นและจำนวนรอบในแนวตั้งของขดลวดด้วย ซึ่งสมการที่ 2.3 เป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณหาจำนวนชั้น ( $Nol$ )

$$Nol = \frac{E - (e + k_3)}{Dm \times k_4} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $Dm$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางรวมฉนวนของขดลวด (mm.)

$k_3$  คือความหนาของระบบฉนวน (mm.)

$k_4$  คือตัวคูณลดตามขนาดของลวด ( 0.92 สำหรับลวดขนาด 0.24 - 0.45 mm.  
0.90 สำหรับลวดขนาด 0.50 - 1.80 mm.)

สมการที่ 2.3 เมื่อผลลัพธ์มีค่าไม่เป็นจำนวนเต็มต้องปัดเศษทิ้งเพื่อให้ขดลวดสามารถประกอบลงในร่องแกนเหล็กได้ ในส่วนของการคำนวณรอบในแนวตั้งของขดลวดเมื่อคำนวณหาจำนวนชั้นของขดลวดได้แล้วก็นำจำนวนรอบทั้งหมดตั้งแล้วหารด้วยจำนวนชั้นของขดลวด ดังสมการที่ 2.4

$$Not = \frac{N}{Nol} \quad (2.4)$$

สมการที่ 2.4 เมื่อผลลัพธ์มีค่าไม่เป็นจำนวนเต็มต้องปัดเศษทิ้งและบวกหนึ่ง เมื่อได้จำนวนชั้นและจำนวนรอบในแนวตั้ง ต่อไปคำนวณหาระยะความสูง ( $H$ ) และความกว้างของขดลวด ( $W$ ) ดังสมการที่ 2.5 - 2.6

$$H = Not \times Dm + \frac{Dm}{2} \quad (2.5)$$

$$W = Nol \times Dm \times k_4 \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.5 ความต้านทานไฟฟ้าของขดลวด

การหาความยาวของขดลวดในหัวข้อที่ผ่านมาจะทำให้สามารถคำนวณหาความต้านทานของขดลวดได้โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากตารางข้อมูลลวดตัวนำ ซึ่งมีความสัมพันธ์ของความต้านทานต่อระยะความยาวหรือความต้านทานต่อน้ำหนักอย่างใดอย่างหนึ่ง ความสัมพันธ์นี้จะเป็นค่าความต้านทานที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส แต่ขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายภาระอุณหภูมิภายในขดลวดจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ความต้านทานภายในขดลวดมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย [5] ดังสมการที่ 2.7

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{234.5 + t_2}{234.5 + t_1} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $R_1$  และ  $R_2$  เป็นค่าความต้านทานของขดลวดที่อุณหภูมิ  $t_1$  และ  $t_2$  ตามลำดับ

สมการที่ 2.7 นี้เป็นความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของลวดตัวนำทองแดง ซึ่งจากการที่ค่าของความต้านทานจะเพิ่มขึ้นเมื่อจ่ายภาระ ดังนั้นการออกแบบจะต้องคำนึงถึงอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วย

## 2.3 กำลังสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า

กำลังสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งประกอบด้วย

1. กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (core loss)
2. กำลังสูญเสียในขดลวด (copper loss)

### 2.3.1 กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก $P_{core}$

การสูญเสียภายในแกนเหล็กประกอบด้วย การสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวนภายในแกนเหล็ก และการสูญเสียที่เกิดจากวงฮิสเทอรีซิส ซึ่งการสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวนเป็นผลที่เกิดจากการเหนี่ยวนำภายในแกนเหล็กที่วางอยู่ในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก โดยมีแกนเหล็กเป็นตัวนำ ส่วนการสูญเสียที่เกิดจากวงฮิสเทอรีซิส เกิดจากการที่เมื่อแกนเหล็กได้รับแรงเคลื่อนแม่เหล็กจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นตามลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก เมื่อลดระดับแรงเคลื่อนแม่เหล็กลงเส้นแรงแม่เหล็กที่สร้างขึ้นไม่ลดลงตามแนวทางเดิมแต่จะเหลือค้ำอยู่ภายในแกนเหล็กค่าหนึ่ง โดยปริมาณจะขึ้นอยู่กับความถี่ของระบบ ไฟฟ้าและคุณลักษณะของสารที่ใช้ทำแกนเหล็ก

สารแม่เหล็กที่ใช้ทำแกนเหล็กจะเลือกใช้สารที่มีส่วนผสมของซิลิกอนสูงและพยายามทำให้มีคุณสมบัติการสูญเสียในแกนเหล็กน้อยที่สุด โดยการทำให้มีคุณสมบัติในการซึมซาบแม่เหล็กสูง การกำหนดคุณสมบัติของสารแม่เหล็กแต่ละชนิดเพื่อการออกแบบคำนวณจำเป็นต้องอาศัยเส้น

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรค่าต่าง ๆ เช่น ความหนาของแผ่นเหล็ก ความถี่ ชนิดของสาร และแนวของการรีดแผ่นเหล็ก เป็นต้น

โดยทั่วไปเหล็กแผ่นที่นำมาประกอบเป็น โครงสร้างวงจรมแม่เหล็กจะมีกรรมวิธีการผลิต 2 วิธี คือ ชนิดรีดแผ่นเหล็กร้อนและรีดแผ่นเหล็กเย็น [6]

ชนิดรีดแผ่นเหล็กร้อนที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรมจะมีค่าความซึมซาบได้ของสารแม่เหล็ก ตลอดทุกแนวของแผ่นทุกทิศทางที่พิจารณาจะมีขนาดใกล้เคียงกัน

ชนิดรีดเย็น แผ่นเหล็กชนิดนี้ตามแนวรีดจะมีความซึมซาบของสารแม่เหล็กสูงกว่าแบบแรกมากและค่าการสูญเสียในแกนเหล็กก็จะมีค่าต่ำกว่าด้วย ประมาณ 2 เท่า เหล็กชนิดนี้ก่อนการนำมาใช้หลังจากการรีดต้องนำไปอบลดความเค้นในเนื้อเหล็กกลึง ซึ่งกรรมวิธีการอบใช้อุณหภูมิประมาณ 750 องศาเซลเซียสแล้วลดอุณหภูมิลงช้า ๆ แต่เหล็กชนิดนี้มีข้อเสียคือถ้านำมาตัดเฉียงแนวรีด(ไม่ตรงตามแนวรีด) ค่าของความซึมซาบแม่เหล็กจะลดลงอย่างมาก 10 - 20 เท่าและค่าการสูญเสียของแกนเหล็กจะเพิ่มขึ้นอย่างมากอีกด้วย

### 2.3.2 กำลังสูญเสียในขดลวด $P_{cu}$

กำลังสูญเสียในขดลวดเป็นค่าสูญเสียที่เกิดจากความร้อนในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งสามารถคำนวณได้จากกระแสที่ไหลผ่านขดลวดและความต้านทานของขดลวดนั้น ปริมาณกระแสที่ไหลผ่านจะขึ้นอยู่กับพิกัดของการจ่ายภาระ การหาค่ากำลังสูญเสียในขดลวดจะพิจารณาได้ดังนี้

$$P_{cu} = I_p^2 R_p + I_s^2 R_s \quad (2.8)$$

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

ตามปกติหม้อแปลงไฟฟ้าจะทำงานจ่ายภาระที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นการสูญเสียในขดลวดซึ่งเกิดจากความต้านทานและกระแสจะมีการเปลี่ยนแปลงตามภาระ ส่วนการสูญเสียในแกนเหล็กซึ่งขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของแกนเหล็กจะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามภาระ

## 2.4 สมการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเบื้องต้น

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าโดยทั่วไปนั้นจะพิจารณาจากพิกัดกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า ความถี่ ความหนาแน่นกระแสและคุณลักษณะของแกนเหล็กที่ใช้งาน การออกแบบจะใช้วิธีการพิจารณาตัวแปรในสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำดังสมการที่ 2.9

$$V = \sqrt{2\pi f N B A_c} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $V$  เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวดด้านที่พิจารณา,  $V$   
 $f$  เป็นความถี่ของระบบไฟฟ้า, Hz  
 $N$  เป็นจำนวนรอบของขดลวดที่พิจารณา  
 $B$  เป็นความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก, Wb / m<sup>2</sup>  
 $A_c$  เป็นพื้นที่หน้าตัดของวงจรมแม่เหล็ก, m<sup>2</sup>

#### 2.4.1 ออกแบบโดยใช้สมการแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ

โครงสร้างหลักของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟจะประกอบไปด้วย โครงสร้างของแกนเหล็กและโครงสร้างของขดลวดตัวนำ จากสมการที่ 2.5 ซึ่งเป็นสมการแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ เมื่อจัดสมการใหม่คั้งสมการที่ 2.10 จะเห็นได้ว่าเทอมด้านซ้ายเป็นอัตราส่วนของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อจำนวนรอบเป็นเทอมที่แสดงถึงโครงสร้างของขดลวดตัวนำส่วนเทอมด้านขวาเป็นเทอมที่แสดงถึงโครงสร้างแกนเหล็ก

$$\frac{V}{N} = \sqrt{2\pi f B A_c} \quad (2.10)$$

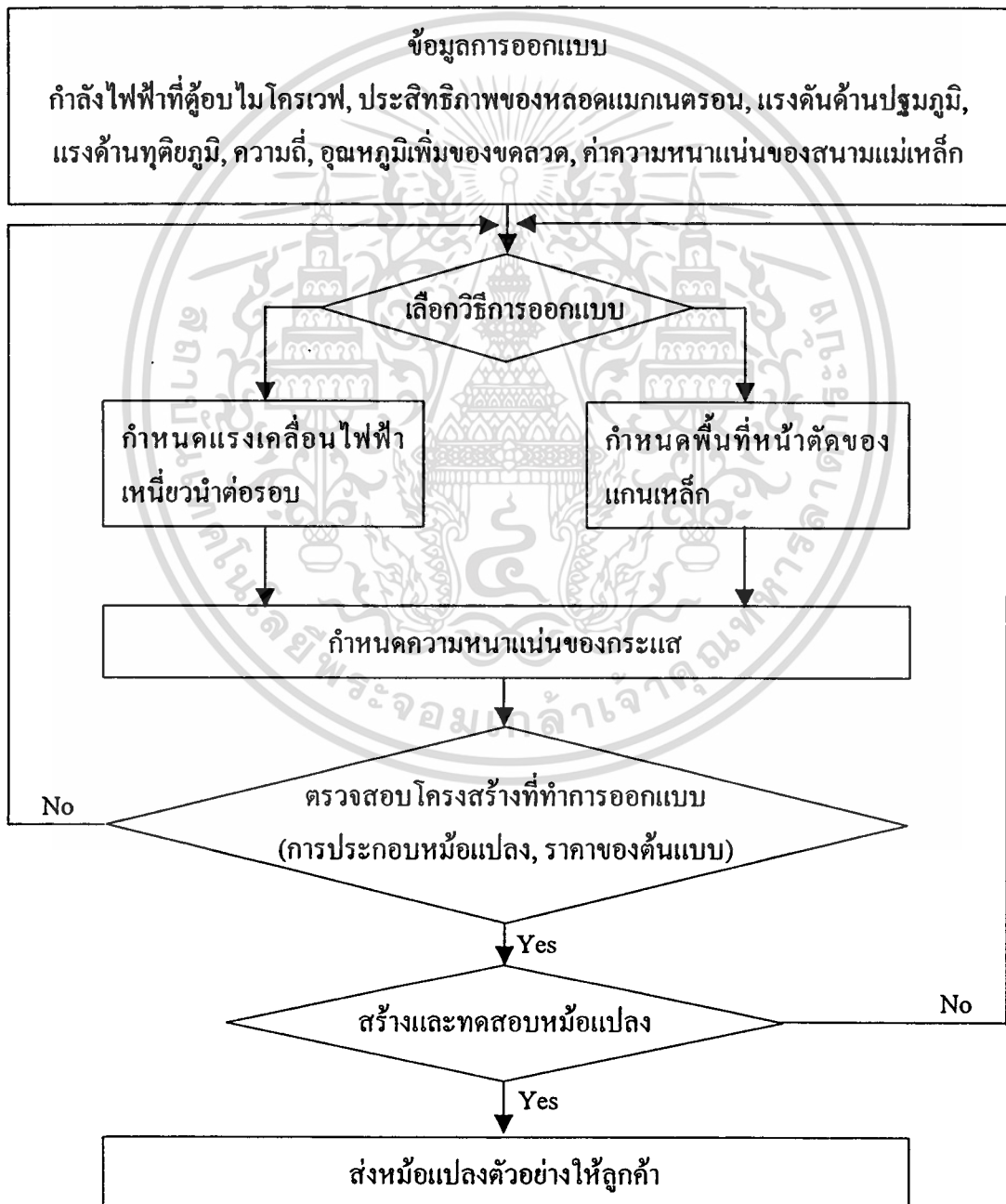
จากโครงสร้างของแกนเหล็กที่เป็นการเรียงอัดซ้อนกันของแผ่นเหล็กซิลิกอน โดยทั่วไปจะมีช่องว่างระหว่างแผ่นอยู่เล็กน้อย ดังนั้นปริมาตรและรูปร่างภายนอกกับปริมาตรของเนื้อแกนเหล็กจริงจึงไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงกำหนดค่า  $s.f.$  (Stacking factor) เป็นอัตราส่วนปริมาตรเหล็กจริงต่อปริมาตรภายนอกเมื่อซ้อนกัน ค่าอัตราส่วน  $s.f.$  นี้จะมีค่าน้อยกว่าหนึ่งเสมอ โดยทั่วไปค่าอัตราส่วน  $s.f.$  ของแกนเหล็กแต่ละชนิดจะต่างกันออกไปตามวิธีการผลิต การฉาบผิวหน้าและการอัดแกน ดังนั้นจากสมการที่ 2.10 จะเปลี่ยนเป็น

$$\frac{V}{N} = \sqrt{2\pi f B A_c s.f.} \quad (2.11)$$

จากสมการที่ 2.11 เมื่อกำหนดค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อจำนวนรอบและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ต้องการ ทำให้ทราบพื้นที่หน้าตัดของวงจรมแม่เหล็ก การพิจารณาเลือกใช้แกนเหล็กจากขนาดของแกนเหล็กมาตรฐานเพื่อประกอบเป็นวงจรมแม่เหล็ก จำเป็นต้องพิจารณาพื้นที่ช่องว่างพันขดลวดด้วย โดยจะต้องมีพื้นที่เพียงพอสำหรับการวางกลุ่มขดลวดทั้ง 2 ชุด ซึ่งพื้นที่ที่ต้องการในการพันขดลวดพิจารณาได้จาก จำนวนรอบของตัวนำ ความหนาแน่นกระแสของลวดตัวนำ

## 2.5 แผนผังการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยวิธีการเดิม

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟด้วยวิธีการเดิม ขั้นตอนแรกของการออกแบบเป็นข้อมูลการออกแบบเมื่อได้ข้อมูลการออกแบบครบถ้วนแล้ว กำหนดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อรอบ หรือกำหนดพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก ถัดมากำหนดค่าความหนาแน่นของกระแส และตรวจสอบโครงสร้างที่ทำการออกแบบว่าเป็นที่น่าพอใจหรือไม่ เมื่อพอใจแล้วก็จะทำการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่ทำการออกแบบไว้ เพื่อทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ และทดสอบหาอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดทั้งสองหากยังไม่เป็นที่น่าพอใจก็จะทำการเริ่มต้นการออกแบบใหม่ ดังรูปที่ 2.8



เอกสารรูปที่ 2.8 แผนผังของขบวนการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยวิธีการเดิม ซึ่งประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 ตัวอย่างการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยวิธีการเดิม

ในส่วนนี้จะเป็นการแสดงตัวอย่างการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยวิธีการเดิม พิกัดกำลังไฟฟ้าของคู่อบไมโครเวฟ 700 W 120/2070 V 60 Hz  $B_{\max} = 2.10$  T อุณหภูมิเพิ่มของขดลวดทั้งสองไม่เกิน 155 องศาเซลเซียส และผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง พิกัดกำลังไฟฟ้าของคู่อบไมโครเวฟ 850 W 230/2220 V 50 Hz  $B_{\max} = 2.00$  T อุณหภูมิเพิ่มของขดลวดทั้งสองไม่เกิน 155 องศาเซลเซียส

โดยกำหนดให้ใช้แกนเหล็ก 50RM800 ความหนา 0.5 mm. มีความหนาแน่น  $7850 \text{ kg/m}^3$  ราคาแกนเหล็ก 22.91 บาท/ กิโลกรัม ราคาขดลวดปฐมภูมิ 107.72 บาท/กิโลกรัม ราคาขดลวดปฐมภูมิ 130.42 บาท/กิโลกรัม

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับคู่อบไมโครเวฟพิกัดกำลังไฟฟ้าของคู่อบไมโครเวฟ 700 W 120/2070 V 60 Hz ประสิทธิภาพของหลอดแมกเนตรอน 92.5 % อุณหภูมิเพิ่มของขดลวดทั้งสองไม่เกิน 155 องศาเซลเซียส

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อรอบ

ในการกำหนดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อรอบในการกำหนดขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ออกแบบ ซึ่งในครั้งแรกกำหนดให้ใช้  $V/N = 0.95$  โวลต์/รอบ

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดความหนาแน่นของกระแส

ซึ่งในการกำหนดความหนาแน่นของกระแสนี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดทั้งสอง จากประสบการณ์ของผู้ออกแบบจะกำหนดความหนาแน่นของกระแสทางด้านปฐมภูมิ  $9.5 \text{ A/mm}^2$ , ทูติภูมิ  $10.0 \text{ A/mm}^2$  เมื่อกำหนดความหนาแน่นของกระแสแล้วก็จะได้ขนาดลวดตัวนำทั้ง 2 ด้าน จากตารางขนาดตัวนำ (ภาคผนวก ก.) จะได้ข้อมูลลวดตัวนำดังตารางที่ 2.1

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กจากสมการที่ 2.11

$$A_c = \frac{V}{N \times \sqrt{2\pi} \times 60 \times 2.10 \times 0.97} \times 10^{-6} \text{ mm}^2$$

จากขั้นตอนที่ 1  $V/N = 0.95$  โวลต์/รอบ จะได้

$$A_c = 1,749.51 \text{ mm}^2$$

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลลวดตัวนำของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง พิกัดกำลังไฟฟ้าของ  
ตู้อบไมโครเวฟ 700 W 120/2070 V 60 Hz

	ตัวนำด้านปฐมภูมิ	ตัวนำด้านทุติยภูมิ
พิกัดกระแส (A)	8.250	0.535
พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	0.8659	0.0531
เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm.)	1.05	0.26
เส้นผ่านศูนย์กลางรวมฉนวน (mm)	1.152	0.302
น้ำหนักต่อความยาว (g/m)	7.701	0.472
ความต้านทานต่อความยาว (ohm/km)	19.908	334.8
ราคา (บาท/kg)	107.72	130.42

ขั้นตอนที่ 4 หาจำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ

$$N_p = \frac{V_p}{V/N} = \frac{120}{0.95} = 126.31 \quad \text{รอบ ปรับเป็น 126 รอบ}$$

$$N_s = \frac{V_s}{(V/N) \times 0.96} = \frac{2070}{0.95 \times 0.96} = 2269.7 \quad \text{รอบ ปรับเป็น 2270 รอบ}$$

ขั้นตอนที่ 5 เลือกขนาดของแกนเหล็ก (ภาคผนวก ข)

การเลือกขนาดของแกนเหล็กจะพิจารณาพื้นที่ช่องว่างพันขดลวด โดยจะต้องมีพื้นที่เพียงพอที่ลวดตัวนำต้องการ

จากประสบการณ์ผู้ออกแบบจะเลือกแกนเหล็ก เลือกแกนเหล็ก # EI-76.2 ซึ่งมีพื้นที่ช่องว่างพันขดลวดเท่ากับ 483.87 mm<sup>2</sup> และมีขนาดความกว้างของแกนกลาง 25.4 mm. ดังนั้นต้องใช้แกนเหล็กจำนวน 138 แผ่นมาเรียงซ้อนกัน

ทำการคำนวณว่าแกนเหล็กที่เลือกขนาดมาสามารถพันขดลวดลงในแกนเหล็กได้หรือไม่  
ขั้นตอนที่ 5.1 คำนวณหาจำนวน ชั้นและจำนวนรอบในแนวตั้งของขดลวดปฐมภูมิ

$$N_{olp} = \frac{E - e - k_3}{Dm \times k_4} = \frac{12.7 - 0.3 - 0.4}{1.152 \times 0.9} = 11.57 \quad \text{ปรับเป็น 11 ชั้น}$$

$$N_{otp} = \frac{N_p}{N_{olp}} = \frac{126}{11} = 11.45 \quad \text{ปรับเป็น 12 รอบในแนวตั้ง}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาความสูงของขดลวดปฐมภูมิ ( $H_p$ )

$$H_p = N_{tp} \times Dm_p + \frac{Dm_p}{2} = 12 \times 1.152 + \frac{1.152}{2} = 14.4 \text{ mm.}$$

ขั้นตอนที่ 5.2 กำหนดหาจำนวน ชั้นและจำนวนรอบในแนวตั้งของขดลวดทุติยภูมิ

$$N_{ots} = \frac{3E - t_{sh} - t_{fil} - H_p - 2k_{3p} - 2k_{3s}}{Dm_s} = \frac{38.1 - 3.0 - 1.3 - 14.4 - 2 \times 0.4 - 2 \times 0.65}{0.302}$$

= 57.28 ปรับเป็น 57 รอบในแนวตั้ง

$$N_{ols} = \frac{N_s}{N_{ots}} = \frac{2270}{57} = 39.82 \text{ ปรับเป็น 40 ชั้น}$$

หาความกว้างของขดลวดทุติยภูมิ ( $W_s$ )

$$W_s = N_{ols} \times Dm_s \times k_4 = 40 \times 0.302 \times 0.92 = 11.11 \text{ mm.}$$

ขั้นตอนที่ 5.3 ทำการตรวจสอบว่าขดลวดสามารถประกอบลงในแกนเหล็กได้หรือไม่

โดยทำการพิจารณาว่าความกว้างของขดลวดทุติยภูมิ ( $W_s$ ) รวมกับความหนาของระบบฉนวนเกินกว่าช่องว่างแกนเหล็กหรือไม่ดังนี้

$$W_s + k_3 + e \leq E$$

$$11.11 + 0.65 + 0.75 \leq 12.7$$

จะเห็นว่าพจน์ทางซ้ายมีค่าน้อยกว่า 12.7 แสดงว่าหม้อแปลงที่ทำการออกแบบโดยใช้แกนเหล็ก ขนาด # 76.2 สามารถประกอบขดลวดลงในแกนเหล็กได้ ถ้ามีค่ามากกว่า 12.7 แสดงว่าไม่สามารถประกอบขดลวดลงในแกนเหล็กได้ ซึ่งต้องย้อนไปขั้นตอนที่ 5 ใหม่โดยทำการเลือกแกนเหล็กที่มีขนาดใหญ่กว่าเดิม

### ขั้นตอนที่ 6 คำนวณน้ำหนักแกนเหล็ก

จากโครงสร้างของแกนเหล็กดังรูปที่ 2.3 และขนาดของแกนเหล็กที่เลือกใช้สามารถคำนวณน้ำหนักของแกนเหล็กได้จากผลคูณของปริมาตรแกนเหล็กปริมาตร ( $V_{core}$ ) และความหนาแน่นของสารที่ใช้ ซึ่งสามารถแสดงการคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ปริมาตรแกนเหล็ก } V_{core} = 24E^2 D \times 10^{-6} = 24 \times 12.7^2 \times 69 \times 10^{-6} = 0.26709 \text{ m}^3$$

$$\text{น้ำหนักแกนเหล็ก } We_{core} = V_{core} \times \sigma = 0.26709 \times 7.85 = 2.0966 \text{ kg.}$$

### ขั้นตอนที่ 7 คำนวณน้ำหนักขดลวด ( $We_{cu}$ )

น้ำหนักของขดลวดสามารถคำนวณหาได้จากผลคูณของจำนวนรอบกับความยาวเฉลี่ยต่อรอบของขดลวด จากสมการที่ 2.1-2.2 สามารถคำนวณหาความยาวเฉลี่ยต่อรอบของขดลวดได้ดังนี้

ความยาวเฉลี่ยต่อรอบของขดลวดปฐมภูมิ

$$M_p = 2(2E + D + 2e + 2d) + \pi W = 247.08 \text{ mm.}$$

ความยาวเฉลี่ยต่อรอบของขดลวดทุติยภูมิ

$$M_s = 2(2E + D + 2e + 2d) + \pi W = 234.71 \text{ mm.}$$

ความยาวของขดลวดปฐมภูมิ  $l_p = M_p \times N_p \times 10^{-3} = 31.13 \text{ m.}$

ความยาวของขดลวดทุติยภูมิ  $l_s = M_s \times N_s \times 10^{-3} = 532.79 \text{ m.}$

น้ำหนักขดลวดด้านปฐมภูมิ  $We_{cup} = 7.701 \times l_p \times 10^{-3} = 0.2397 \text{ kg.}$

น้ำหนักขดลวดด้านทุติยภูมิ  $We_{cus} = 0.472 \times l_s \times 10^{-3} = 0.2515 \text{ kg.}$

### ขั้นตอนที่ 8 คำนวณค่าความสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า ( $P_f$ )

ความสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยความสูญเสียในแกนเหล็กและความสูญเสียในขดลวด

ความสูญเสียในแกนเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{core} = p_c We_{core} = 18 \times 2.0966 = 37.7 \text{ W}$$

ความต้านทานในขดลวดค้ำานปฐมภูมิที่ 20 องศาเซลเซียส

$$R_{20p} = l_p \times 19.908 \times 10^{-3} = 31.13 \times 19.908 \times 10^{-3} = 0.6197 \text{ ohm}$$

ความต้านทานในขดลวดค้ำานปฐมภูมิที่ 155 องศาเซลเซียส

$$R_{155p} = R_{20p} \times \left( \frac{234.5 + 155}{234.5 + 20} \right) = 0.9484 \text{ ohm}$$

ความต้านทานในขดลวดค้ำานทุติยภูมิที่ 20 องศาเซลเซียส

$$R_{20s} = l_s \times 322.8 \times 10^{-3} = 532.79 \times 322.8 \times 10^{-3} = 171.9 \text{ ohm}$$

ความต้านทานในขดลวดค้ำานทุติยภูมิที่ 155 องศาเซลเซียส

$$R_{155s} = R_{20s} \times \left( \frac{234.5 + 155}{234.5 + 20} \right) = 263.1 \text{ ohm}$$

ความสูญเสียในขดลวดปฐมภูมิ  $P_{cup} = I_p^2 R_{155p} = 8.25^2 \times 0.9484 = 64.6 \text{ W}$

ความสูญเสียในขดลวดทุติยภูมิ  $P_{cus} = I_s^2 R_{155s} = 0.535^2 \times 263.1 = 75.3 \text{ W}$

ความสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า

$$P_t = P_{core} + P_{cup} + P_{cus} = 37.7 + 64.6 + 75.3 = 177.6 \text{ W}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ขั้นตอนที่ 9 คำนวณราคาของหม้อแปลงไฟฟ้า ( $C_f$ )

ราคาแกนเหล็ก  $C_{core} = 22.91 \times We_{core} = 22.91 \times 2.0966 = 48.0$  บาท

ราคาขดลวดปฐมภูมิ  $C_{cup} = 107.72 \times We_{cup} = 107.72 \times 0.2397 = 25.8$  บาท

ราคาขดลวดทุติยภูมิ  $C_{cus} = 130.42 \times We_{cus} = 130.42 \times 0.2515 = 32.8$  บาท

ราคารวมของหม้อแปลงไฟฟ้า  $C_f = C_{core} + C_{cup} + C_{cus} = 106.6$  บาท

จากตัวอย่างการออกแบบจะได้หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่มีพิกัดกำลังและแรงดันตามที่กำหนด โดยมีน้ำหนัก และราคาตามขนาดของแกนเหล็ก จำนวนรอบของขดลวด และการเลือกใช้ค่าความหนาแน่นของกระแส ซึ่งหากจะปรับราคาให้มีค่าตามที่ต้องการจะสามารถทำได้โดยการปรับขนาดของแกนเหล็กและจำนวนรอบของขดลวด ให้ราคาถูกต้องตามที่ต้องการ ในการออกแบบโดยวิธีเดิมยังต้องทำการสร้างต้นแบบและทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดว่าผ่านตามที่ต้องการหรือไม่หากไม่ผ่านผู้ออกแบบจะทำการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของกระแสของขดลวดทั้งสองตามประสบการณ์ที่มี ในส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง พิกัดกำลังไฟฟ้าของคู่อุปไมโครเวฟ 850 วัตต์ แรงดัน 230/2220 โวลต์ ความถี่ 50 Hz  $B_{max} = 2.00$  T อุณหภูมิเพิ่มของขดลวดทั้งสองไม่เกิน 155 องศาเซลเซียส ก็สามารถออกแบบได้ในทำนองเดียวกัน

จากผลการออกแบบที่แสดงดังตารางที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าได้แก่ น้ำหนัก ราคาและค่าความสูญเสีย จะขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้ขนาดของแกนเหล็กและค่าความหนาแน่นของกระแสที่เลือกใช้ ซึ่งขนาดของแกนเหล็กนั้นสามารถกำหนดได้โดยสมการต่าง ๆ แต่จะเห็นได้ว่าสมการเหล่านี้ช่วยเพียงให้ผู้ออกแบบสามารถเริ่มออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อให้มีพิกัดกำลังและแรงดันไฟฟ้าสามารถใช้งานได้ที่ความถี่ที่กำหนดเท่านั้น โดยไม่สามารถที่จะกำหนดคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ หากผู้ออกแบบต้องการที่จะปรับคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าก็จะต้องทำการออกแบบใหม่โดยใช้ข้อมูลเดิมที่ได้จากการออกแบบนี้แล้วทดลองปรับขนาดของแกนเหล็กและค่าความหนาแน่นของกระแส จากวิธีการปรับคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้ผู้ออกแบบจะทราบได้อย่างไรว่าควรที่จะเพิ่มขนาดของแกนเหล็กและเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของกระแสไปเท่าไรจึงจะได้อุณหภูมิเพิ่มของขดลวดไม่เกินกว่าที่กำหนดและราคาเป็นที่น่าพอใจ ซึ่งเป็นได้ยากมากที่จะทำการทดลองปรับไปจนได้ค่าที่ดีที่สุด ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำหลักการและวิธีการหาค่าที่เหมาะสมเข้ามาช่วยในการหาขนาดของโครงสร้างและค่าความหนาแน่นของกระแส เพื่อที่จะทำให้ได้หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงมีราคาถูกที่สุดและอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดไม่เกินพิกัด

ตารางที่ 2.2 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยวิธีการเดิม พิกัดกำลังไฟฟ้า  
ที่คู่อุปโมโครเวฟ 700 W 120/2070 V 60 Hz และ 850 W 230/2220 V 50 Hz

	700 W	850 W		
$D$ (m.)	0.069	0.071		
$2E$ (m.)	0.0254	0.030		
ข้อมูลลวดตัวนำ	ขดปฐมภูมิ	ขดทุติยภูมิ	ขดปฐมภูมิ	ขดทุติยภูมิ
เส้นผ่านศูนย์กลางกลาง (mm.)	1.05	0.26	0.90	0.30
เส้นผ่านศูนย์กลางรวมฉนวน (mm.)	1.152	0.302	0.88	0.344
น้ำหนักต่อความยาว (g/m)	7.701	0.472	4.470	0.629
ความต้านทานต่อความยาว ( $\Omega$ /km)	19.908	334.8	35.000	254.0
ราคา (บาท/kg)	107.72	130.42	107.72	130.42
พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก ( $\text{mm}^2$ )	1752.6		2130.0	
จำนวนรอบด้านปฐมภูมิ (รอบ)	126		252	
จำนวนรอบด้านทุติยภูมิ (รอบ)	2270		2531	
ความต้านทานขดลวดปฐมภูมิ ( $\Omega$ )	0.619		2.215	
ความต้านทานขดลวดทุติยภูมิ ( $\Omega$ )	171.9		162.8	
น้ำหนักแกนเหล็ก (kg.)	2.10		3.08	
น้ำหนักขดลวดปฐมภูมิ (kg.)	0.240		0.288	
น้ำหนักขดลวดทุติยภูมิ (kg.)	0.252		0.408	
น้ำหนักรวม (kg.)	2.521		3.704	
ความสูญเสียในแกนเหล็ก (W)	37.7		51.0	
ความสูญเสียในขดลวดปฐมภูมิ(W)	64.6		91.8	
ความสูญเสียในขดลวดทุติยภูมิ(W)	75.3		92.1	
ความสูญเสียรวม (W)	177.6		234.9	
ราคาแกนเหล็ก (บาท)	48.0		70.6	
ราคาลวดตัวนำปฐมภูมิ (บาท)	25.8		31.0	
ราคาลวดตัวนำทุติยภูมิ (บาท)	32.8		53.2	
ราคารวม (บาท)	106.6		154.8	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

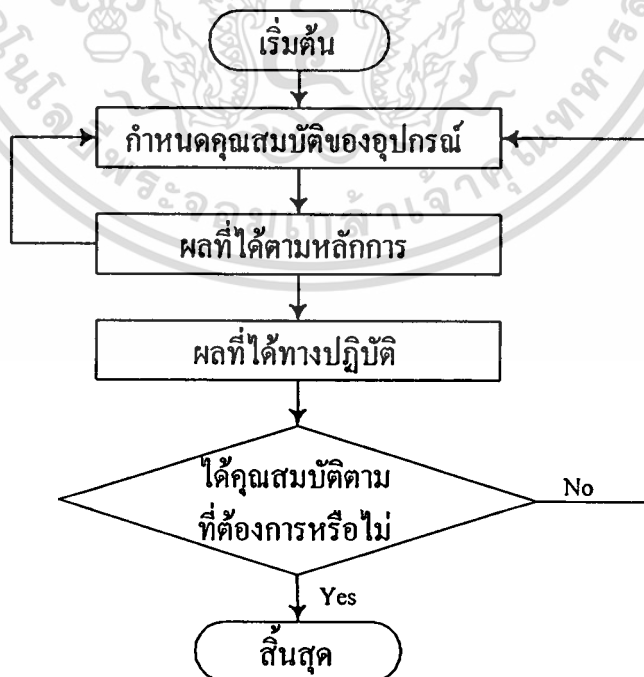
### บทที่ 3

## การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงให้มีราคาต่ำ

### 3.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้เป็นกรกล่าวถึงวิธีการหาค่าที่เหมาะสม ซึ่งเป็นวิธีการแก้ปัญหาแบบวนกลับที่นำมาใช้ช่วยออกแบบโครงสร้างหรือระบบต่าง ๆ ในงานวิศวกรรม [7] เพื่อให้ได้คำตอบตรงตามเป้าหมายและเงื่อนไขที่กำหนด ขั้นตอนหนึ่งของการออกแบบที่เหมาะสมนี้จะใช้ร่วมกันกับการหาค่าที่เหมาะสมซึ่งเป็นวิธีเชิงตัวเลขในการหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด การหาค่าที่เหมาะสมสามารถนำมาใช้ในการหาค่าสูงสุดหรือต่ำสุดก็ได้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำแนวความคิดจากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมและหลักการออกแบบที่เหมาะสมซึ่งได้มีการนำมาใช้ออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าและอุปกรณ์แม่เหล็กไฟฟ้า [8-13] เพื่อให้หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงมีราคาต่ำ โดยทั่วไปเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมมี 2 วิธีได้แก่ หลักการของเกรเดียนต์และหลักการทางพันธุศาสตร์ร่วมกับความน่าจะเป็น ซึ่งทั้งสองหลักการมีความเหมาะสมกับลักษณะของปัญหาที่แตกต่างกัน ในตอนท้ายได้แสดงวิธีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่มีราคาต่ำด้วย

### 3.2 พื้นฐานการออกแบบที่เหมาะสม [14]



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการออกแบบทางวิศวกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวความคิดโดยทั่วไปของการออกแบบทางด้านวิศวกรรมจะมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วยการกำหนดคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ต้องการออกแบบ (device specification) การพิจารณาผลที่ได้จากหลักการทางทฤษฎี (conceptual solution) การพิจารณาผลที่ได้ทางปฏิบัติ (practical solution) และการตรวจสอบคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบแล้ว จะเห็นได้ว่าการออกแบบด้วยแนวความคิดนี้ผู้ออกแบบสามารถพิจารณาเปลี่ยนแปลงแก้ไขแนวทางการออกแบบได้ระหว่างการออกแบบจนทำให้ได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ วิธีการออกแบบนี้จะเป็นการออกแบบโดยวิธีแก้ปัญหาโดยตรง ซึ่งวิธีการแก้ปัญหาที่มี 2 ลักษณะคือ การแก้ปัญหาโดยตรงและการแก้ปัญหาแบบย้อนกลับ

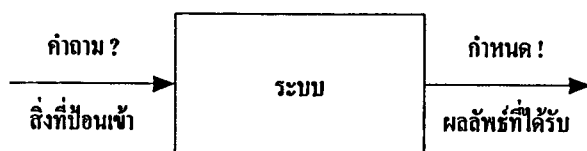
### 3.2.1 การแก้ปัญหาโดยตรงและการแก้ปัญหาแบบย้อนกลับ

การแก้ปัญหาโดยตรง (direct problem solving) คือการพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้จากระบบว่า จะเป็นอย่างไรเมื่อสิ่งที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3.2 เพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจจะสมมติว่าระบบในรูปที่ 3.2 คือ  $z = x + y$  จะเห็นว่า สิ่งที่ป้อนเข้าสู่ระบบคือ  $x$  และ  $y$  ในขณะที่ผลลัพธ์ที่ได้รับจากระบบคือ  $z$  ถ้าเรากำหนดให้  $x=10$  และ  $y=20$  เราสามารถคำนวณหาคำตอบหรือผลลัพธ์ที่ได้รับจากระบบคือ  $z = 30$



รูปที่ 3.2 การแก้ปัญหาโดยตรง

การแก้ปัญหาแบบย้อนกลับ (inverse problem solving) วิธีการแก้ปัญหาแบบนี้จะกำหนดผลลัพธ์ที่ต้องการได้จากระบบ โดยคำถามคือจะต้องป้อนสิ่งใดเข้าสู่ระบบเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามที่กำหนดเพื่อง่ายต่อการทำความเข้าใจให้พิจารณาจากรูปที่ 3.3 โดยสมมติอีกครั้งว่าถ้าระบบคือ  $z = y + x$  ถ้าเรากำหนดให้  $z=30$  เราจะมีคำถามว่า  $x$  และ  $y$  ควรจะเป็นอย่างไร ในกรณีนี้คำตอบที่เป็นไปได้มีมากกว่าหนึ่งคำตอบ ไม่ใช่เพียงคำตอบ  $x=10$  และ  $y=20$  เท่านั้น อาจจะเป็น  $x=15$  และ  $y=15$  ก็ได้ ซึ่งวิธีการแก้ปัญหาลักษณะนี้อาจจะกำหนดเงื่อนไขของสิ่งที่ป้อนเข้าก็ได้ เช่น  $0 < x, y < 20$  แนวทางการแก้ปัญหาแบบย้อนกลับนี้เป็นแนวของหลักการหาค่าที่เหมาะสม

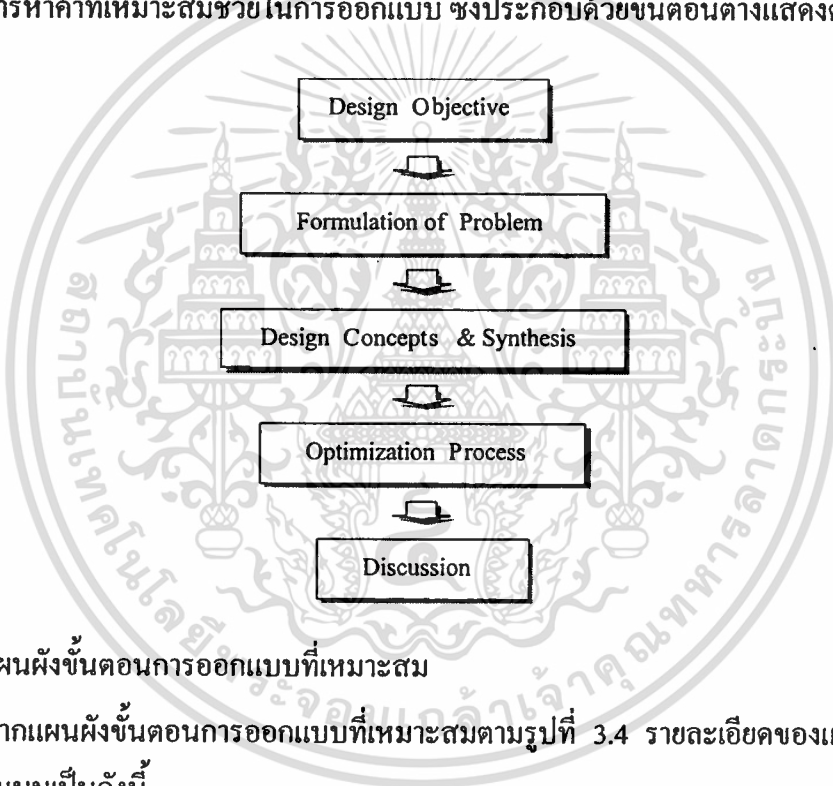


รูปที่ 3.3 การแก้ปัญหาแบบย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้กับโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 หลักการออกแบบที่เหมาะสม [14]

การออกแบบโครงสร้างหรือระบบต่าง ๆ ในงานวิศวกรรมจะมีการกำหนดเป้าหมายและเงื่อนไขขึ้นเพื่อให้ตรงกับความต้องการใช้งาน ซึ่งการออกแบบโครงสร้างหรือระบบต่าง ๆ ที่มีความซับซ้อนซึ่งจะทำให้การออกแบบด้วยแผนผังดังรูปที่ 3.1 จะเป็นไปได้ด้วยความยุ่งยากและจำเป็นต้องใช้ความรู้และประสบการณ์ของผู้ออกแบบอย่างสูง ผลลัพธ์อาจเกิดจากการลองผิดลองถูกจนกระทั่งได้ค่าที่มีความเหมาะสมตามเป้าหมายที่ต้องการซึ่งต้องเสียเวลาในการออกแบบอีกทั้งโอกาสที่จะได้ค่าที่เหมาะสมตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ก็มีความเป็นไปได้น้อยและเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงวัสดุหรือราคาของวัสดุก็จำเป็นต้องทำการลองผิดลองถูกใหม่ซึ่งทำให้เสียเวลาและต้นทุนในการสร้างต้นแบบเพื่อทดสอบ จากเหตุผลข้างต้นจึงทำให้มีการนำเสนอหลักการออกแบบที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมช่วยในการออกแบบ ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนต่างแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนผังขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสม

จากแผนผังขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสมตามรูปที่ 3.4 รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนในการออกแบบเป็นดังนี้

#### 3.2.2.1 กำหนดเป้าหมายการออกแบบ

กำหนดเป้าหมายของการออกแบบมีราคารวมของวัสดุค่า

#### 3.2.2.2 กำหนดรูปแบบของปัญหา

จากเป้าหมายที่กำหนดให้หม้อแปลงไฟฟ้ามีราคารวมของวัสดุค่า ดังนั้นจะต้องทำการศึกษาถึงส่วนที่เกี่ยวข้องกับราคาที่เกิดขึ้น ซึ่งประกอบไปด้วยราคาของขดลวดและราคาของแกนเหล็ก สามารถคำนวณได้จากผลคูณของน้ำหนักของวัสดุกับค่าราคาบาทต่อกิโลกรัมของวัสดุนั้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าการหารราคาของวัสดุที่เกิดขึ้นนั้นมีความสัมพันธ์เกี่ยวกับ โครงสร้างของแกนเหล็ก

เพราะน้ำหนักของแกนเหล็กสามารถคำนวณได้จากปริมาตรของแกนเหล็กและความหนาแน่นของวัสดุ เพราะน้ำหนักของแกนเหล็กสามารถคำนวณได้จากปริมาตรของแกนเหล็กและความหนาแน่นของวัสดุ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารที่นำมาใช้ทำแกนเหล็ก ขณะที่น้ำหนักของขดลวดก็จะคำนวณจากความยาวเฉลี่ยที่พันรอบแกนเหล็กของขดลวด

### 3.2.2.3 หลักการออกแบบและการสังเคราะห์

เมื่อออกแบบโดยใช้วัสดุชนิดเดียวกันกับที่ออกแบบไว้เดิมและจากการที่คุณลักษณะของแกนเหล็กจะเปลี่ยนแปลงไปตามโครงสร้างของแกนเหล็กดังนั้นจะเลือกให้ ขนาดโครงสร้างต่าง ๆ ของแกนเหล็ก ( $D, 2E, J_{pri}, J_{sec}$ ) เป็นตัวแปรในการออกแบบครั้งนี้ สามารถกำหนดสมการเป้าหมายได้ดังสมการที่ 3.14

*Minimize*

$$C_t(D, 2E, J_{pri}, J_{sec}) = C_{cu}(D, 2E, J_{pri}, J_{sec}) + C_{core}(D, 2E, J_{pri}, J_{sec}) \quad (3.1)$$

การออกแบบจะกำหนดให้มีเงื่อนไขเดียวกันกับการออกแบบเดิมคือขนาดแกนเหล็กที่ใช้จะต้องมีช่องพันขดลวดเพียงพอต่อความต้องการพื้นที่ของขดลวด และอุณหภูมิเพิ่มขณะใช้งานไม่เกิน พิกัดที่ตั้งไว้ ซึ่งสามารถกำหนดได้ดังสมการที่ 3.2 - 3.3

$$W_s(D, 2E, J_{pri}, J_{sec}) + k_3 + e \leq E \quad (3.2)$$

$$\Delta T_{cal} \leq \Delta T_i \quad (3.3)$$

ในส่วนของเงื่อนไขขอบเขตกำหนดดังนี้

$$0.01 \text{ m.} \leq D \leq 0.100 \text{ m.} \quad (3.4)$$

$$0.025 \text{ m.} \leq 2E \leq 0.040 \text{ m.} \quad (3.5)$$

$$5 \text{ A/mm}^2. \leq (J_{pri}, J_{sec}) \leq 20 \text{ A/mm}^2. \quad (3.6)$$

### 3.2.2.4 การหาค่าที่เหมาะสม

การออกแบบที่เหมาะสมในส่วนนี้เมื่อได้สมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบแล้วจะนำเข้าสู่กระบวนการหาค่าที่เหมาะสม ซึ่งการหาค่าที่เหมาะสมแต่ละวิธีจะมีความเหมาะสมกับลักษณะของฟังก์ชันเป้าหมายที่ต่างกันรวมถึงความสามารถของส่วนประมวลผลด้วย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2.5 อภิปรายผลการออกแบบ

ผลลัพธ์ที่ได้หลังจากกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมจะต้องมีการตรวจสอบว่ามีลักษณะเป็นตามเป้าหมายและเงื่อนไขที่กำหนดหรือไม่ ซึ่งการที่ผลลัพธ์ไม่เป็นไปตามเป้าหมายที่ต้องการนั้น อาจเกิดจากการพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่ผิดพลาดหรือสาเหตุใดก็ตามที่อาจเกิดขึ้นได้ ซึ่งไม่มีผลการออกแบบใดที่เรียกได้ว่าสำเร็จสมบูรณ์กว่าได้มีการนำเสนอและอภิปรายผลการออกแบบนั้น

### 3.3 หลักการเบื้องต้นของการหาค่าที่เหมาะสม

โดยทั่วไปการหาค่าที่เหมาะสมจะเป็นการหาค่าตัวแปรของฟังก์ชันเป้าหมาย (objective function) และเงื่อนไข (constraints function) ที่กำหนด [15] ซึ่งรูปแบบของฟังก์ชันเป้าหมายและเงื่อนไขจะแสดงดังสมการที่ 3.7 - 3.10 ดังนี้

$$\text{Minimize } F(x) \quad \text{Objective Function} \quad (3.7)$$

Subject to

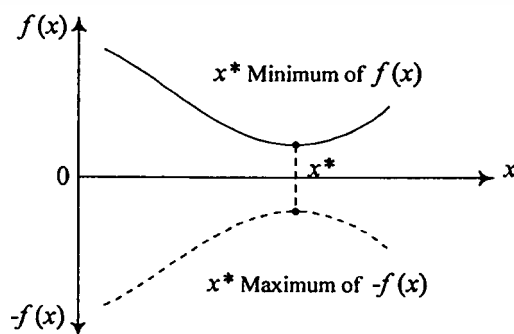
$$g_j(x) \leq 0 \quad j = 1, \dots, l \quad \text{Inequality Constraint} \quad (3.8)$$

$$h_k(x) = 0 \quad k = 1, \dots, m \quad \text{Equality Constraint} \quad (3.9)$$

$$x_i' \leq x_i \leq x_i'' \quad i = 1, \dots, n \quad \text{Side Constraint} \quad (3.10)$$

เมื่อ  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$  เป็นเวกเตอร์ของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบฟังก์ชันเป้าหมายและฟังก์ชันเงื่อนไขในการหาค่าที่เหมาะสมซึ่งอาจจะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นก็ได้

สมการที่ 3.7 เป็นสมการที่แสดงถึงฟังก์ชันเป้าหมายที่ต้องการหาค่าที่เหมาะสมซึ่งอาจเป็นการหาค่าสูงสุดหรือต่ำสุดของฟังก์ชันก็ได้ จากรูปที่ 3.5 จะเห็นได้ว่า  $x^*$  เป็นจุดต่ำสุดของฟังก์ชัน  $f(x)$  และเป็นจุดสูงสุดของฟังก์ชัน  $-f(x)$  ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันจะมีความหมายเดียวกันกับการหาค่าสูงสุดของค่าลบของฟังก์ชันนั้น [16]



รูปที่ 3.5 ค่าตอบของค่าต่ำสุดของฟังก์ชัน  $f(x)$  เป็นจุดเดียวกันกับค่าสูงสุดของฟังก์ชัน  $-f(x)$

สมการที่ 3.8 แสดงฟังก์ชันเงื่อนไขที่น้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์ (inequality constraint) ซึ่งในการออกแบบอาจจะมีเงื่อนไข กำหนดเป็นฟังก์ชันที่อยู่ในรูปของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ เพื่อให้ฟังก์ชันนั้นมีค่าที่น้อยกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนด

สมการที่ 3.9 เป็นสมการที่แสดงถึงฟังก์ชันของเงื่อนไขที่เท่ากับศูนย์ (equality constraint) ซึ่งในการออกแบบอาจจะมีเงื่อนไข กำหนดเป็นฟังก์ชันที่อยู่ในรูปของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ เพื่อให้ฟังก์ชันนั้นมีค่าเท่ากับค่าที่กำหนด

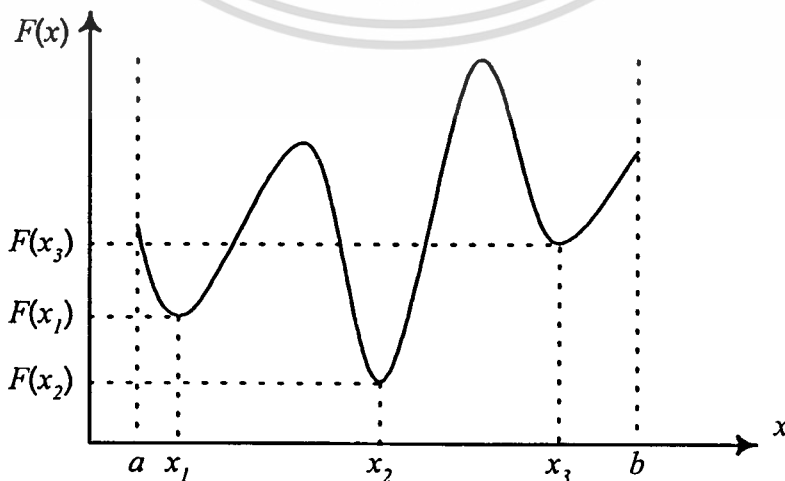
สมการที่ 3.10 เป็นสมการที่ใช้กำหนดช่วงของค่าตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเพื่อป้องกันการได้ค่าคำตอบที่เป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ

โดยทั่วไปวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบ่งได้ 2 ลักษณะคือ

1. ดิเทอร์มินิสติก เป็นการหาค่าที่เหมาะสมโดยพื้นฐานของแกรเดียน
2. สโตชาสติก เป็นการหาค่าที่เหมาะสมโดยพื้นฐานของความน่าจะเป็น

### 3.3.1 จุดที่เหมาะสม (Optimal Point)

ความหมายของจุดที่เหมาะสมสามารถถูกกำหนดได้ดังนี้ สมมติว่ามีโดเมนที่กำลังพิจารณาของตัวแปร  $x$  โดยที่  $x^*$  และ  $x^{**}$  เป็นจุดในโดเมน  $x$  นั้นด้วย จุด  $x^*$  จะถูกเรียกว่าเป็นจุดที่เหมาะสมเฉพาะที่ (local optimal point) ถ้าไม่มีจุดใดเลยในย่านใกล้เคียงที่ดีกว่าจุด  $x^*$  ขณะที่จุด  $x^{**}$  จะถูกกล่าวว่าเป็นจุดเหมาะสมที่สุดของทั้งหมด (global optimal point) ถ้าไม่มีจุดใดเลยในโดเมน  $x$  นั้นที่ดีกว่า  $x^{**}$  พิจารณารูปที่ 3.6 ซึ่งแสดงค่าของฟังก์ชันเป้าหมาย  $f(x)$  บนโดเมน  $x \in [a, b]$  เราจะเห็นว่า จุด  $x_1$ ,  $x_2$  และ  $x_3$  ทุกจุดจะเรียกว่าเป็นจุดค่าสุดเฉพาะที่เพราะเมื่อพิจารณาค่าของฟังก์ชันเป้าหมายรอบ ๆ จุดเหล่านี้แต่ละจุดแล้วจะมีค่าฟังก์ชันมากกว่าของจุดทั้งสามนั่นเอง ขณะที่จุด  $x_2$  ก็ยังเป็นจุดค่าสุดของทั้งหมดด้วย เพราะค่าของฟังก์ชันเป้าหมายที่มีค่าน้อยที่สุดอยู่ที่จุด  $x_2$  ในโดเมน  $x$



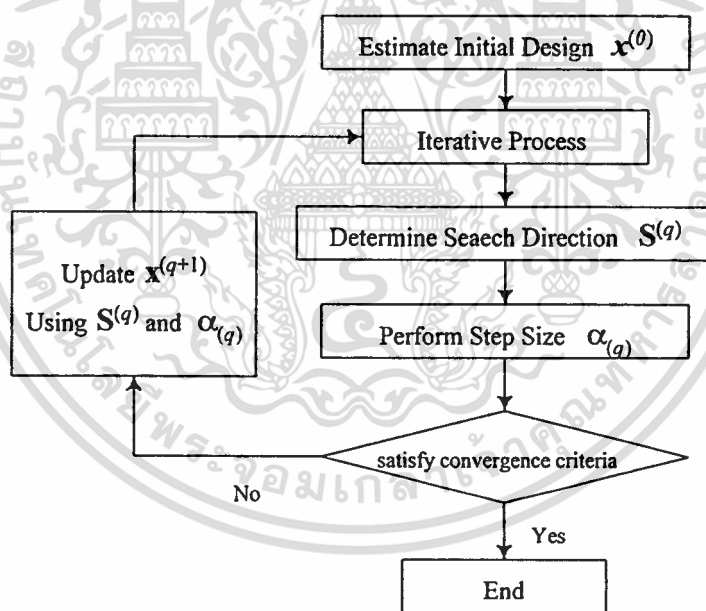
รูปที่ 3.6 กราฟค่าของฟังก์ชันเป้าหมาย  $f(x)$  บนโดเมน  $x$

### 3.3.2 การหาค่าที่เหมาะสมแบบดิเทอมีนิสติก

กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบดิเทอมีนิสติกจะอาศัยพื้นฐานของเกรเดียนต์ [17-19] โดยเริ่มจากการกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปร  $\mathbf{x}^{(0)}$  และใช้ค่าเริ่มต้นนี้หาค่าทิศทางและขนาดการลู่เข้าสู่คำตอบของฟังก์ชัน หลังจากนั้นจะมีการตรวจสอบความถูกต้องของเงื่อนไขต่าง ๆ ที่กำหนดว่าพอใจหรือไม่ หากไม่พอใจก็จะมีการหาค่าทิศทางและขนาดการลู่เข้าสู่คำตอบของฟังก์ชันซ้ำใหม่จนไปจนกว่าจะเป็นที่พอใจ ซึ่งสามารถกำหนดเป็นสมการได้ดังนี้

$$\mathbf{x}^{(q+1)} = \mathbf{x}^{(q)} + \alpha_q \mathbf{S}^{(q)} \quad (3.11)$$

เมื่อ  $q$  เป็นจำนวนของการทำซ้ำ  
 $\mathbf{S}$  เป็นเวกเตอร์ทิศทางที่ลู่เข้าสู่เป้าหมาย  
 $\alpha$  เป็นขนาดระยะในการเคลื่อนที่ไปตามทิศทางของ  $\mathbf{S}$



รูปที่ 3.7 แผนผังของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบดิเทอมีนิสติก [20]

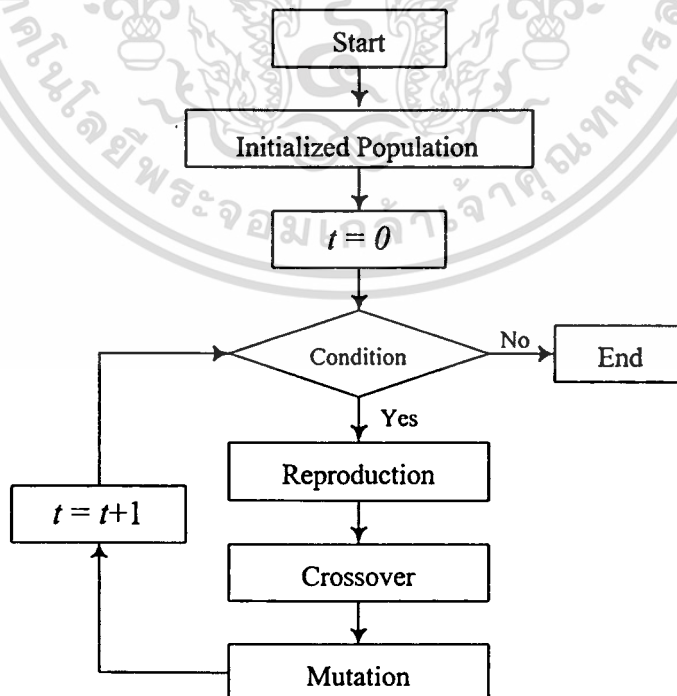
แผนผังของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบดิเทอมีนิสติกแสดงในรูปที่ 3.7 กระบวนการของการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีนี้ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอนดังนี้

1. การดำเนินการหาทิศทางของเวกเตอร์  $\mathbf{S}$  ในช่วงที่เป็นไปได้ของคำตอบ
2. กระทำการค้นหาระยะทางที่ต้องเคลื่อนที่ไป (step size) ในทิศทางของเวกเตอร์  $\mathbf{S}$
3. พิจารณาการสิ้นสุดกระบวนการเมื่อได้คำตอบที่ยอมรับได้ตามเงื่อนไข

### 3.3.3 การหาค่าที่เหมาะสมแบบสโตชาสติก

การหาค่าที่เหมาะสมแบบสโตชาสติกแบ่งออกเป็น 2 หลักการคือ Simulated Annealing และ Genetic Algorithm ซึ่งจะอธิบายหลักการของ Genetic Algorithm เท่านั้น Genetic Algorithm เป็นวิธีการหาค่าตอบโดยอาศัยการคัดเลือกตามธรรมชาติและทางพันธุกรรม [20-23] โดยการรวมกันหรือสลับเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ ของฟังก์ชันเป้าหมายซึ่งอาศัยหลักของความน่าจะเป็นเพื่อปรับปรุงความสามารถในการค้นหาค่าตอบให้ดีขึ้น การหาค่าตอบจากรุ่นหนึ่งยังรุ่นถัดไปตามวิวัฒนาการทางธรรมชาติ คำตอบรุ่นใหม่เกิดขึ้นจากการสร้างความสัมพันธ์ของโครงสร้างต่าง ๆ ที่ประกอบด้วยค่าของตัวแปรที่เหมาะสมในรุ่นก่อน ดังนั้นจึงทำให้ได้คำตอบที่ดีขึ้น ดังรูปที่ 3.8 เป็นแผนผังของกระบวนการการหาค่าที่เหมาะสมแบบจินเนติกอัลกอริทึม [23] คือ

1. การหาค่าที่เหมาะสมแบบจินเนติกค้นหาค่าตอบ โดยการกำหนดรหัสของตัวแปรจากกลุ่มของคำตอบที่เป็นไปได้
2. การหาค่าที่เหมาะสมแบบจินเนติกค้นหาค่าตอบ โดยพิจารณาจากเซตของกลุ่มคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด ไม่ได้หาค่าตอบจากคำตอบใดคำตอบหนึ่ง
3. การหาค่าที่เหมาะสมแบบจินเนติกอาศัยผลของฟังก์ชันเป้าหมายที่ดีขึ้นในการหาค่าตอบ ไม่ได้อาศัยการลูเข้าของอนุพันธ์
4. การหาค่าที่เหมาะสมแบบจินเนติกอาศัยหลักการของความน่าของการเปลี่ยนแปลงการคัดเลือกตามธรรมชาติและทางพันธุกรรม ไม่ได้ใช้หลักการคิโทมินิสติก



รูปที่ 3.8 แผนผังของกระบวนการการหาค่าที่เหมาะสมแบบจินเนติกอัลกอริทึม [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4. หลักการออกแบบที่เหมาะสมแบบจีเนติกอัลกอริธึม

เมนเดล (Mendel) บิดาแห่งวิชาพันธุศาสตร์ค้นพบว่ายีนส์ (Genes) หน่วยเก็บลักษณะทางกรรมพันธุ์เป็นตัวกำหนดลักษณะภายนอกซึ่งยีนส์หลาย ๆ ยีนส์จะเรียงตัวกันอยู่บนเส้นโครโมโซม (Chromosome) ในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตโดยจะอยู่กันเป็นคู่ ๆ ยีนส์แต่ละยีนส์จะแตกต่างกันที่ค่าลักษณะต่าง ๆ เรียกว่าแอลลีล (Allele) ซึ่งแบบต่าง ๆ ของยีนส์ที่มีแอลลีลต่างกันในแต่ละตำแหน่งยีนส์เดียวกันเรียกว่า จีโนไทป์ (Genotype) สำหรับลักษณะภายนอกที่ปรากฏออกมาให้เห็นเรียกว่า ฟีนไทป์ (Phenotype) เช่นคนจะมีโครโมโซม 23 คู่ หรือ 46 โครโมโซม ซึ่งแต่ละโครโมโซมจะประกอบด้วยยีนส์ต่าง ๆ ประมาณ 1250 ยีนส์ซึ่งประกอบไปด้วยยีนส์ลักษณะสีผม สีผิว สีตา และอื่น ๆ อีกประมาณ 1247 ลักษณะ [24]

การถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมเป็นการถ่ายทอดลักษณะต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิตที่เกิดขึ้นเมื่อมีการแบ่งตัวของเซลล์ ซึ่งมี 2 แบบคือการเพิ่มจำนวนเซลล์ และการแบ่งตัวของเซลล์สืบพันธุ์

#### 3.4.1. การเพิ่มจำนวนเซลล์

การเพิ่มจำนวนเซลล์ เป็นการแบ่งตัวแบบไมโทซิส (Mitosis) โดยโครโมโซมแต่ละตัวจะขยายตัวเพิ่มจำนวนตัวเองขึ้นเป็นสองและเยื่อหุ้มนิวเคลียส (Nucleus) จะสลายลงเพื่อดึงแยกโครโมโซมที่เพิ่มจำนวนขึ้นออกจากโครโมโซมเดิมแล้วเยื่อหุ้มนิวเคลียสจะถูกสร้างขึ้นหุ้มเซลล์ใหม่ 2 เซลล์

#### 3.4.2 การแบ่งตัวของเซลล์สืบพันธุ์

การแบ่งตัวของเซลล์สืบพันธุ์ เป็นการแบ่งตัวแบบไมโอซิส (Meiosis) โดยโครโมโซมจากเซลล์พ่อ 1 โครโมโซมและจากเซลล์แม่ 1 โครโมโซมจะเริ่มจับคู่กันที่โครโมโซมชนิดเดียวกัน ในขณะเดียวกันโครโมโซมแต่ละตัวที่มาจากทั้งพ่อและแม่ต่างก็จำลองแบบของตนเองเพิ่มขึ้นมาอีกแต่ละโครโมโซม ทำให้ได้จำนวนโครโมโซมทั้งหมดเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าและดำเนินการทางพันธุกรรมจนถึงระยะแบ่งตัว โครโมโซมพ่อพร้อมกับแบบจำลองและโครโมโซมแม่พร้อมกับแบบจำลองที่ได้จะแยกคู่ไปรวมกันเป็นสองนิวเคลียส กลายเป็นเซลล์ใหม่สองเซลล์ ซึ่งจะแบ่งตัวต่อทันที โดยแต่ละโครโมโซมพ่อจะแยกตัวออกจากแบบจำลองและโครโมโซมแม่ก็แยกตัวออกจากแบบจำลองรวมกันใหม่เป็นสี่เซลล์ใหม่

วิธีการทางพันธุศาสตร์ในระหว่างที่เกิดการแบ่งตัวของไมโอซิส นั้น โครโมโซมจะมีโอกาสแลกเปลี่ยนยีนส์บางยีนส์ซึ่งกันและกัน อันเป็นเหตุให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าคลอสโอเวอร์ (Cross over) ของลักษณะต่าง ๆ ขึ้น ซึ่งการคลอสโอเวอร์นั้นเกิดขึ้นขณะที่มีการจำลองเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบเพิ่มขึ้นและเกิดขึ้นระหว่างโครโมโซมพ่อกับโครโมโซมแม่ ไม่ใช่เกิดขึ้นกับแบบจำลอง การคลอสโอเวอร์จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะของยีนส์ต่าง ๆ ของคู่โครโมโซมพ่อกับแม่ เนื่องจากยีนส์แต่ละยีนส์ที่เรียงตัวกันบนเส้นโครโมโซมนั้นไม่ได้อยู่กันอย่างหนาแน่นรวมทั้งมีระยะห่างไม่สม่ำเสมอเพราะคุณสมบัติของยีนส์นั้นเป็น โมเลกุลของสาร โปรตีนประกอบตัวกันทางเคมี ดังนั้นช่องว่างของยีนส์จะเป็นตำแหน่งที่แตกออกมาได้เมื่อเกิดการคลอสโอเวอร์และมีการแลกเปลี่ยนยีนส์ของโครโมโซมอีกด้วย โดยจะถูกย้ายไปอยู่ที่โครโมโซมหนึ่งทั้งหมดคนนอกจากนี้ยังสามารถแยกที่ตำแหน่งอื่น ได้อีกขึ้นกับความสามารถที่จะเชื่อมกันมากน้อยเพียงใดของช่องว่างระหว่างยีนส์

ประโยชน์ที่เกิดจากการคลอสโอเวอร์คือทำให้มีโอกาสที่จะได้ลักษณะต่าง ๆ กันมาอยู่รวมกันได้หลายแบบมากขึ้น ทำให้สิ่งมีชีวิตรุ่นต่อมามีความหลากหลายขึ้นและอาจทำให้มีโอกาสเกิดสิ่งมีชีวิตที่มีลักษณะต่าง ๆ ที่เหมาะกับสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนไปเช่นกัน การเกิดเซลล์ใหม่โดยการถ่ายทอดโครโมโซมที่ไม่มีการคลอสโอเวอร์นั้น โครโมโซมใดเคยมียีนส์ลักษณะใดก็จะมีลักษณะเช่นเดิมอยู่สิ่งมีชีวิตในรุ่นต่อไปก็ยังคงมีลักษณะเช่นเดียวกัน โอกาสที่สิ่งมีชีวิตนั้นจะเจริญหรือปรับตัวให้ดีขึ้นย่อมเป็นไปได้ยากกว่าการที่มียีนส์ลักษณะใหม่เกิดขึ้น

ลักษณะต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิตจะสามารถอยู่รอดได้โดยการคัดเลือกทางธรรมชาติ โดยจะคัดเลือกจากโครโมโซมที่มีลักษณะที่ทำให้สิ่งมีชีวิตแข็งแรงเพียงพอหรือเหมาะสมต่อสภาพแวดล้อมซึ่งจะสามารถอยู่รอดและถ่ายทอดไปยังสมาชิกรุ่นต่อไป ดังนั้นการคัดเลือกของธรรมชาติเพื่อถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมเป็นเพียงส่วนประกอบของการเปลี่ยนแปลงของสิ่งมีชีวิตเท่านั้น

การเปลี่ยนแปลงลักษณะของยีนส์ไปจากเดิมที่ควรจะเป็นตามการถ่ายทอดจากโครโมโซมรุ่นก่อน เป็นสาเหตุของการเกิดลักษณะที่แปลกออกไปมากมายสำหรับสิ่งมีชีวิตหนึ่ง ๆ ซึ่งเท่าเทียมเป็นการให้โอกาสแก่ธรรมชาติในการที่จะเลือกมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงนี้เรียกว่า มิวเตชัน (Mutation) หรือการผ่าเหล่า เนื่องจากขบวนการทางวิวัฒนาการโดยธรรมชาติเองนั้นช้ามาก โอกาสที่สิ่งมีชีวิตจะปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมเป็นไปได้น้อยมาก การผ่าเหล่านั้นทุกลักษณะในยีนส์จะมีโอกาสเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมได้เท่า ๆ กัน ถ้าเปลี่ยนแล้วเหมาะกับสภาพแวดล้อมก็จะยังคงอยู่ต่อไปแต่ถ้าเปลี่ยนแล้วไม่เหมาะสมก็จะถูกคัดเลือกให้หายไป

### 3.5 ตัวอย่างการหาค่าจุดสูงสุดของฟังก์ชันโดยใช้จินเนติกอัลกอริธึม

ในส่วนนี้จะแสดงรายละเอียดการทำงานเกี่ยวกับจินเนติกอัลกอริธึม (genetic algorithms) ซึ่งเสนอโดย Michalewicz [21]

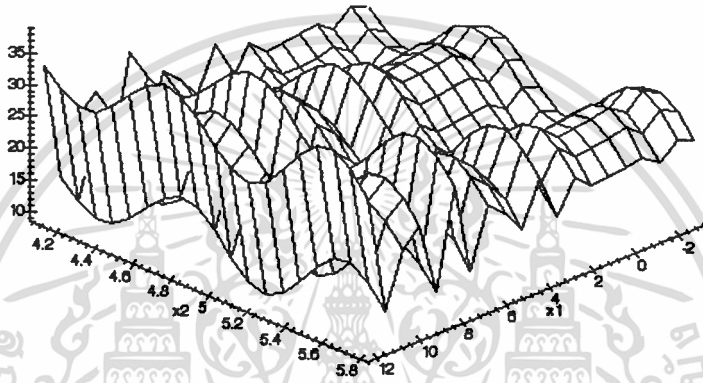
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่าที่เหมาะสมในตัวอย่างนี้เป็นการหาค่าสูงสุดของฟังก์ชัน โดยมีฟังก์ชันเป้าหมาย แสดงคังสมการที่ 3.12. สมการเงื่อนไข 3.13 และ 3.14 ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงภาพสามมิติของ ฟังก์ชันเป้าหมาย ได้ดังรูปที่ 3.9

$$\max f(x_1, x_2) = 21.5 + x_1 \sin(4\pi x_1) + x_2 \sin(20\pi x_2) \quad (3.12)$$

$$-3.0 \leq x_1 \leq 12.1 \quad (3.13)$$

$$4.1 \leq x_2 \leq 5.8 \quad (3.14)$$



รูป 3.9 กราฟสามมิติของฟังก์ชันเป้าหมาย

Initialized Population เป็นการสุ่มเซตของคำตอบในช่วงของตัวแปรที่กำหนดในรูปรหัส ของเลขฐานสอง โดยความยาวของเลขฐานสอง (จำนวนบิต) ที่แทนคำตอบของตัวแปรจะขึ้นอยู่กับ ความเที่ยงตรงของคำตอบที่ต้องการ เช่น โดเมนคำตอบของตัวแปร  $x_j$  คือ  $[a_j, b_j]$  และต้องการ ความเที่ยงตรงของคำตอบที่สนิคมตำแหน่งที่ห้า ความเที่ยงตรงที่ต้องการนี้จะขึ้นอยู่กับช่วงของโด เมนของตัวแปรแต่ละตัว ซึ่งขั้นต่ำจะแบ่งออกเป็น  $(b_j - a_j) \times 10^5$  ส่วน ดังนั้นจำนวนบิตที่ต้องการ ( $m_j$ ) สำหรับตัวแปรแต่ละตัวสามารถหาได้ดังนี้

$$2^{m_j-1} < (b_j - a_j) \times 10^5 \leq 2^{m_j} - 1 \quad (3.15)$$

ในการแปลงเซตคำตอบจากเลขฐานสองเป็นเลขฐานสิบของตัวแปร  $x_j$  สามารถหาได้คัง สมการที่ 3.16

$$x_j = a_j + decimal(substring_j) \times \frac{b_j - a_j}{2^{m_j} - 1} \quad (3.16)$$

เมื่อ  $decimal(substring_j)$  แทนค่าเลขฐานสิบของ  $substring_j$  ของตัวแปร  $x_j$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อต้องการความเที่ยงตรงของคำตอบที่ทศนิยมตำแหน่งที่ห้า จำนวนบิตที่ต้องการของตัวแปร  $x_1$  และ  $x_2$  สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\{12.1 - (-3.0)\} \times 10,000 = 151,000$$

$$2^{17} < 151,000 \leq 2^{18} - 1, \quad m_1 = 18$$

$$(5.8 - 4.1) \times 10,000 = 17,000$$

$$2^{14} < 17,000 \leq 2^{15} - 1, \quad m_2 = 15$$

$$m = m_1 + m_2 = 18 + 15 = 33$$

ผลการคำนวณได้ความยาวของไครโมโซมเท่ากับ 33 บิต สมมติเซตคำตอบให้เป็นดังนี้

$$v_j \quad 000001010100101001 \quad 101111011111110$$

จากเซตของคำตอบที่กำหนด สามารถแปลงให้อยู่ในเลขฐานสิบได้ดังนี้

	Binary Number	Decimal Number
$x_1$	000001010100101001	5417
$x_2$	101111011111110	244318

$$x_1 = -3.0 + 5417 \times \frac{12.1 - (-3.0)}{2^{18} - 1} = -2.687969$$

$$x_2 = 4.1 + 24318 \times \frac{5.8 - 4.1}{2^{15} - 1} = 5.36165$$

ทำการสุ่มเซตของคำตอบในช่วงของตัวแปรที่กำหนดในรูปรหัสของเลขฐานสอง ตามจำนวนบิตที่คำนวณได้

$$v_1 = [00000101010010100110111101111110]$$

$$v_2 = [001110101110011000000010101001000]$$

$$v_3 = [111000111000001000010101001000110]$$

$$v_4 = [10011011010010110100000010111001]$$

$$v_5 = [000010111101100010001110001101000]$$

$$v_6 = [111110101011011000000010110011001]$$

$$v_7 = [110100010011111000100110011101101]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_8 = [001011010100001100010110011001100]$$

$$v_9 = [111110001011101100011101000111101]$$

$$v_{10} = [111101001110101010000010101101010]$$

ซึ่งสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในระบบเลขฐานสิบได้เป็น

$$v_1 = [x_1, x_2] = [-2.687969, 5.361653]$$

$$v_2 = [x_1, x_2] = [0.474101, 4.170144]$$

$$v_3 = [x_1, x_2] = [10.419457, 4.66141]$$

$$v_4 = [x_1, x_2] = [6.159951, 4.109598]$$

$$v_5 = [x_1, x_2] = [-2.301286, 4.477282]$$

$$v_6 = [x_1, x_2] = [11.788084, 4.174346]$$

$$v_7 = [x_1, x_2] = [9.342067, 5.121702]$$

$$v_8 = [x_1, x_2] = [-0.330256, 4.694977]$$

$$v_9 = [x_1, x_2] = [11.671267, 4.873501]$$

$$v_{10} = [x_1, x_2] = [11.446273, 4.171908]$$

### 3.5.1 ขั้นตอนที่ 1 Reproduction

เป็นการคัดเลือกคำตอบที่มีความน่าจะเป็นที่จะทำให้ฟังก์ชันเป้าหมายและฟังก์ชันเงื่อนไขเป็นที่น่าพอใจ เริ่มต้นจาก Evaluation คือการหาคำตอบที่ทำให้ฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าเหมาะสมที่สุด (ต่ำสุดหรือสูงสุด ตามฟังก์ชันเป้าหมาย)

$$eval(v_1) = f(-2.687969, 5.361653) = 19.805119$$

$$eval(v_2) = f(0.474101, 4.170144) = 17.370896$$

$$eval(v_3) = f(10.419457, 4.66141) = 9.590546$$

$$eval(v_4) = f(6.159951, 4.109598) = 29.406122$$

$$eval(v_5) = f(-2.301286, 4.477282) = 15.686091$$

$$eval(v_6) = f(11.788084, 4.174346) = 11.900541$$

$$eval(v_7) = f(9.342067, 5.121702) = 17.958717$$

$$eval(v_8) = f(-0.330256, 4.694977) = 19.763190$$

$$eval(v_9) = f(11.671267, 4.873501) = 26.401669$$

$$eval(v_{10}) = f(11.446273, 4.171908) = 10.252480$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าโครโมโซมที่  $v_3$  จะทำให้ผลลัพธ์ของฟังก์ชันมีค่าต่ำสุด และโครโมโซมที่  $v_4$  จะทำให้ผลลัพธ์ของฟังก์ชันมีค่าสูงสุด

เมื่อได้คำตอบของฟังก์ชันแล้วทำการหา Fitness ( $F$ ) ซึ่งเป็นการหาผลรวมของคำตอบของทุกโครโมโซม

$$F = \sum_{k=1}^{pop\_size} eval(v_k)$$

$$F = \sum_{k=1}^{10} eval(v_k) = 178.135372$$

ทำการหาความน่าจะเป็นที่จะทำให้คำตอบนั้นผ่านการคัดเลือกของแต่ละโครโมโซม ( $p_k$ )

$$p_k = \frac{eval(v_k)}{F}, \quad k = 1, 2, \dots, pop\_size$$

$$p_1 = 0.111180 \quad p_2 = 0.097515 \quad p_3 = 0.053839 \quad p_4 = 0.165077 \quad p_5 = 0.088057$$

$$p_6 = 0.066806 \quad p_7 = 0.100815 \quad p_8 = 0.110945 \quad p_9 = 0.148211 \quad p_{10} = 0.057554$$

ทำการหาความน่าจะเป็นที่จะทำให้คำตอบนั้นผ่านการคัดเลือกของทุกโครโมโซม ( $q_k$ )

$$q_k = \sum_{j=1}^k p_j, \quad k = 1, 2, \dots, pop\_size$$

$$q_1 = 0.111180 \quad q_2 = 0.208695 \quad q_3 = 0.262534 \quad q_4 = 0.427611 \quad q_5 = 0.515668$$

$$q_6 = 0.582475 \quad q_7 = 0.683290 \quad q_8 = 0.794234 \quad q_9 = 0.942446 \quad q_{10} = 1.000000$$

ทำการสุ่มค่าของเลขฐาน 10 ระหว่าง 0 ถึง 1 เป็นจำนวน 10 ค่า

$$0.301431 \quad 0.322062 \quad 0.766503 \quad 0.881893 \quad 0.350871$$

$$0.583392 \quad 0.177618 \quad 0.343242 \quad 0.032685 \quad 0.197577$$

หลังจากสุ่มค่าแล้วให้นำไปตรวจสอบค่า  $q_k$  ตัวอย่างเช่น 0.301431 เป็นตัวเลขที่ได้จากการสุ่มซึ่งนำไปเปรียบเทียบกับค่า  $q_k$  แล้วปรากฏว่ามีค่ามากกว่า  $q_3$  แต่น้อยกว่า  $q_4$  ดังนั้นโครโมโซม  $v_4$  จะถูกเลือกดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 v'_1 &= [100110110100101101000000010111001] & (v_4) \\
 v'_2 &= [100110110100101101000000010111001] & (v_4) \\
 v'_3 &= [001011010100001100010110011001100] & (v_8) \\
 v'_4 &= [111110001011101100011101000111101] & (v_9) \\
 v'_5 &= [100110110100101101000000010111001] & (v_4) \\
 v'_6 &= [110100010011111000100110011101101] & (v_7) \\
 v'_7 &= [0011101011100110000000010101001000] & (v_2) \\
 v'_8 &= [100110110100101101000000010111001] & (v_4) \\
 v'_9 &= [00000101010010100110111101111110] & (v_1) \\
 v'_{10} &= [0011101011100110000000010101001000] & (v_2)
 \end{aligned}$$

### 3.5.2 ขั้นตอนที่ 2 Cross Over

เป็นการแลกเปลี่ยนรหัสของคำตอบยกตัวอย่างเช่น โครโมโซม  $v_1$  กับ  $v_2$  ทำการ Cross Over ที่ตำแหน่งบิตที่ 17 ดังนั้น โครโมโซมใหม่ทางพจนัศวามือ

$$\begin{aligned}
 v_1 &= [100110110100101101000000010111001] & v'_1 &= [100110110100101100010110011001100] \\
 v_2 &= [001011010100001100010110011001100] & v'_2 &= [001011010100001101000000010111001]
 \end{aligned}$$

### 3.5.3 ขั้นตอนที่ 3 Mutation

คือการเปลี่ยนรหัสคำตอบในตำแหน่งบิตที่ต้องการหรือจากการสุ่มโดยการเปลี่ยนจากเลขฐานสอง จากเลขหนึ่งเป็นเลขศูนย์ หรือจากเลขศูนย์เป็นเลขหนึ่ง หลังจากผ่านการ Cross Over และ Mutation แล้วจะได้เซตของคำตอบในรูปของเลขฐานสองดังข้างล่างนี้

$$\begin{aligned}
 v'_1 &= [100110110100101101000000010111001] \\
 v'_2 &= [100110110100101101000000010111001] \\
 v'_3 &= [001011010100001100010110011001100] \\
 v'_4 &= [111111001011101100011101000111101] \\
 v'_5 &= [100110110100101101000000010111001] \\
 v'_6 &= [110100010011111000100110011101101] \\
 v'_7 &= [100110110100101101000000010111001] \\
 v'_8 &= [100110110100101101000000010111001] \\
 v'_9 &= [00000101010010100110111101111110] \\
 v'_{10} &= [0011101011100110000000010101001010]
 \end{aligned}$$

จากนั้นนำคำตอบที่ได้จากเลขฐานสองแปลงเป็นเลขฐานสิบนำคำตอบที่ได้ไปแทนในฟังก์ชัน เพื่อหาเป้าหมายดังข้างนี้

$$f(6.159951, 4.109598) = 29.406122$$

$$f(6.159951, 4.109598) = 29.406122$$

$$f(-0.0330256, 4.694977) = 19.763190$$

$$f(11.907206, 4.873501) = 5.702781$$

$$f(8.02413, 4.170248) = 19.91025$$

$$f(9.342067, 5.121702) = 17.958717$$

$$f(6.159951, 4.109598) = 29.406122$$

$$f(6.159951, 4.109598) = 29.406122$$

$$f(-2.687969, 5.361653) = 19.805119$$

$$f(0.474101, 4.170248) = 17.380896$$

หลังจาก Run ผลการหาค่าสูงสุดเป็นจำนวน 1000 รุ่นของประชากรแล้วเลือกโครโมโซมที่ทำให้ฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าสูงสุด นั่นคือได้คำตอบ  $x_1 = 11.631407$  และ  $x_2 = 5.724824$  ซึ่งทำให้ฟังก์ชันเป้าหมาย มีค่าสูงสุดคือ 38.818208

### 3.6 ทฤษฎีการคำนวณหาอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด

จากการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงโดยทั่วไปจะเห็นว่ายังไม่มีการคำนวณหาอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดก่อนทำการออกแบบดังนั้นเราจึงมีความจำเป็นในการคำนวณหาอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดขณะทำการออกแบบและทฤษฎีที่ใช้เป็นแนวทางในการออกแบบ [25-27] เป็นลักษณะในรูปของการถ่ายเทความร้อนดังข้างล่างนี้

ทฤษฎีในการถ่ายเทความร้อน

$$\frac{q_x}{A} = -k \frac{dt}{dx} \quad (3.17)$$

$$\frac{q_x}{A} = -k \nabla T \quad (3.18)$$

$q_x$  กำลังของความร้อน (Watts or BTU/hr)

$A$  คือพื้นที่ในทิศทางที่สัมผัสกับความร้อน ( $m^2$  or  $ft^2$ )

$\frac{dt}{dx}$  คืออุณหภูมิเกรเดียนในทิศทาง  $x$  ( $^{\circ}K/m$  or  $^{\circ}F/ft$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สละไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$k$  คือสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อน ( $W/m^{\circ}K$  or  $Btu/hr ft^{\circ}F$ )

จากสมการที่ (3.17–3.18) ถ้าต้องการนำมาประยุกต์ใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง สำหรับตู้อบไมโครเวฟจะสามารถสร้างสมการได้ดังนี้

$$q = \frac{k_1 A_1 \Delta T}{L_1} + \frac{k_2 A_2 \Delta T}{L_2} \quad (3.19)$$

$q$  ค่าความสูญเสียของขดลวด (Watts or BTU/hr)

$A_i$  คือพื้นที่ในทิศทางที่สัมผัสกับความร้อน ( $m^2$  or  $ft^2$ )

$\Delta T$  คืออุณหภูมิเพิ่มของขดลวด ( $^{\circ}K$ )

$k_i$  คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ( $W/m^{\circ}K$  or  $Btu/hr ft^{\circ}F$ )

$L_i$  คือความหนาของระบบฉนวน

ในสมการที่ 3.19 ใช้ในการคำนวณหาอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดทั้ง 2 ด้านของหม้อแปลงแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟซึ่งต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขข้างล่างนี้

1. ระบบฉนวนที่เคลือบรอบนอกของลวดตัวนำเป็น Polymide-imide Wire
  2. ระบบฉนวนที่ห่อหุ้มขดลวดปฐมภูมิ Aramid type
  3. ระบบฉนวนที่ห่อหุ้มขดลวดทุติยภูมิ Aramid type กับ Mica (Z611H)
  4. วานิช Unsaturated Polyester Resin, สภาวะการวานิชเป็นแบบ Vacuum –700 mmHg 5 นาที
- ซึ่งแนวทางสำคัญที่จะทำให้ค่าอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดที่พิกัดมีค่าแม่นยำและเที่ยงตรง ต้องยึดสภาวะต่าง ๆ ทั้ง 4 ข้อ

## บทที่ 4

# ผลการออกแบบและทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง

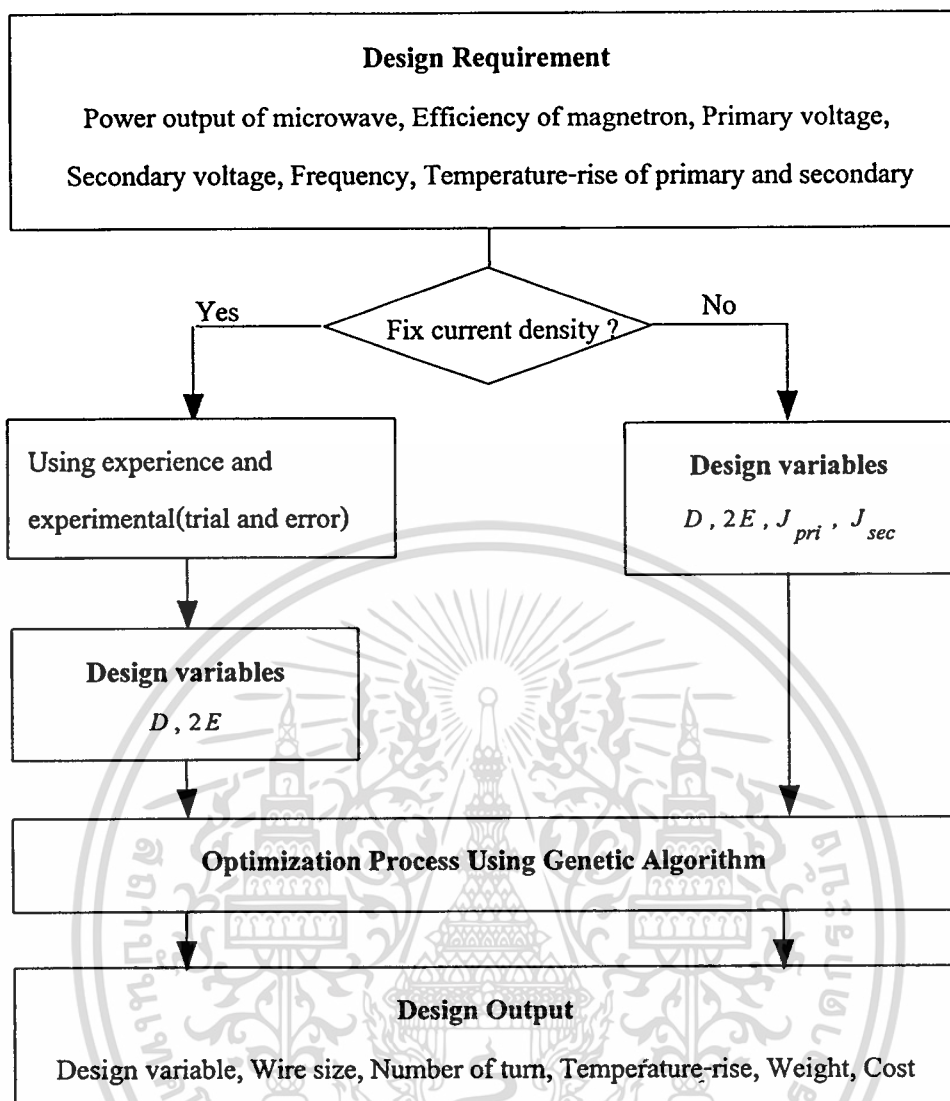
### 4.1 บทนำ

เนื้อหาในส่วนของผลการออกแบบและทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้านี้เป็นการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟให้มีราคาต่ำพิกัด 700 W 120/2070 V 60 Hz , 850 W 230/2220 V 50 Hz และ 1,000 W 220/2200 V 50 Hz แกนเหล็กชนิด 50RM800 ลวดตัวนำใช้ฉนวนคลาส R โดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบจินตคณิตโดยมีเป้าหมายให้มีราคารวมของวัสดุต่ำที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด การออกแบบจะใช้โปรแกรมที่พัฒนาโดยภาษา Visual Basic version 6.0 บนระบบปฏิบัติการ Windows 95 หรือสูงกว่า ผลจากการออกแบบที่เหมาะสมได้นำไปสร้างเพื่อหาค่าน้ำหนักจริงและทดสอบหาคุณลักษณะต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น ในการทดสอบประกอบไปด้วยการทดสอบเปิดวงจร (open circuit test) และทำการทดสอบการจ่ายภาระไฟฟ้า (load test) การทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด (temperature rise) การทดสอบหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ตู้อบไมโครเวฟรวมถึงค่าสัญญาณกำลังไฟฟ้าอินพุตและเอาต์พุต (power input, power output) ซึ่งการทดสอบเหล่านี้ทดสอบเพื่อให้แน่ใจได้ว่าวิธีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมนี้สามารถนำไปใช้ออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงได้จริง

### 4.2 แผนผังการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง

โปรแกรมการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงนี้พัฒนาขึ้นจากภาษา Visual Basic version 6.0 โดยใช้จินตคณิตอรรถวิธีในการหาค่าที่เหมาะสม ซึ่งตัวอย่างการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงให้มีราคาต่ำโดยใช้จินตคณิตอรรถวิธีสามารถศึกษาได้จากภาคผนวก ก โดยมีขั้นตอนการออกแบบแสดงแผนผังดังรูปที่ 4.1 ขั้นตอนแรกของการออกแบบจะเป็นการกำหนดคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้ารวมถึงเป้าหมายที่ต้องการออกแบบ ขั้นตอนต่อไปเลือกตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบซึ่งมีให้เลือก 2 ลักษณะดังนี้

1. แบบ 2 ตัวแปร เป็นการเลือกใช้โครงสร้างของแกนเหล็ก  $D$  และ  $2E$  เป็นตัวแปรในการออกแบบ โดยกำหนดให้  $J_{pri}$  ,  $J_{sec}$  เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ
2. แบบ 4 ตัวแปร เป็นการเลือกใช้โครงสร้างของแกนเหล็ก  $D$  ,  $2E$  และ  $J_{pri}$  ,  $J_{sec}$  เป็นตัวแปรในการออกแบบ



รูปที่ 4.1 แผนผังของขบวนการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม

หลังจากการกำหนดพารามิเตอร์และตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเข้าสู่ขบวนการหาค่าที่เหมาะสมเพื่อหาโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงตามที่ต้องการ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมจะแสดงค่าของตัวแปรที่ออกแบบ, พิกัดของลวดตัวนำ, จำนวนรอบ, น้ำหนักของแกนเหล็ก, น้ำหนักของลวดตัวนำ, ราคาแกนเหล็ก และราคาขดลวด

#### 4.3 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง

หม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบเพื่อทดสอบกำหนดให้มีพิกัด 700 W 120/2070 V 60 Hz , 850 W 230/2220 V 50 Hz และ 1,000 W 220/2200 V 50 Hz แกนเหล็กที่ใช้ในการออกแบบเป็นชนิด 50RM800 มีเป้าหมายในการออกแบบให้มีราคารวมของวัสดุต่ำภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดและประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลเบื้องต้นของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่ทำการออกแบบ

พิกัด (W)	คั่นแบบ หมายเลข	ราคาวัสดุลดตัวนำ และแกนเหล็ก (บาท/กิโลกรัม)			$B_m$ (Tesla)	$\Delta T_{pri},$ $\Delta T_{sec}$ ( $^{\circ}C$ )	A (%)	B
		ปฐมภูมิ	ทุติยภูมิ	แกนเหล็ก				
700	1	107.72	130.42	22.91	2.10	-	-	F
	2	107.72	130.42	22.91	2.10	-	-	G
	3	107.72	130.42	22.91	2.15	-	-	G
	14	250	300	22.91	2.10	160	-	G
850	4	107.72	130.42	22.91	2.00	130	-	G
	5	107.72	130.42	22.91	2.00	-	-	F
	6	107.72	130.42	22.91	2.00	150	-	G
	7	107.72	130.42	22.91	2.00	160	-	G
	8	107.72	130.42	22.91	2.00	170	-	G
	15	250	300	22.91	2.00	150	-	G
	16	107.72	130.42	22.91	1.60	-	90	G
	17	107.72	130.42	22.91	1.60	-	88	G
1,000	18	107.72	130.42	22.91	1.60	-	86	G
	9	107.72	130.42	22.91	2.00	130	-	G
	10	107.72	130.42	22.91	2.00	-	-	F
	11	107.72	130.42	22.91	2.00	150	-	G
	12	107.72	130.42	22.91	2.00	160	-	G
	13	107.72	130.42	22.91	2.00	170	-	G

หมายเหตุ : A ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง B ลักษณะการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง  
F เป็นการออกแบบตามลักษณะ โครงสร้างการผลิตของโรงงานแห่งหนึ่ง  
G เป็นการออกแบบโดยใช้เงินดัดแปลง

จากตารางที่ 1 เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงดังนี้

- คั่นแบบหมายเลข 1, 5 และ 10 เป็นการออกแบบตามลักษณะ โครงสร้างการผลิตของ  
โรงงานแห่งหนึ่ง

- คั่นแบบหมายเลข 2 และ 3 เป็นการออกแบบโดยใช้เงินดัดแปลง

- คั่นแบบหมายเลข 4, 6, 7, 8, 9, 11, 12 และ 13 เป็นการออกแบบโดยใช้เงินดัดแปลง

โดยมีอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดเป็นเงื่อนไขในการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ดัชนีแบบหมายเลข 14 และ 15 เป็นการออกแบบโดยใช้เงินดิกอัลกอริทึม โดยมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของขดลวดเป็นเงื่อนไขในการออกแบบ พร้อมทั้งราคาขดลวดตัวนำมีการเปลี่ยนแปลง

- ดัชนีแบบหมายเลข 16, 17 และ 18 เป็นการออกแบบโดยใช้เงินดิกอัลกอริทึม โดยมีประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงเป็นเงื่อนไขในการออกแบบ

ตารางที่ 4.2 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงพิกัด 700 W 120/2070 60 Hz

ดัชนีแบบหมายเลข		1	2	3
$D$	(m.)	0.069	0.058	0.056
$2E$	(m.)	0.0254	0.027	0.027
$N_{pri}$	(Turn)	126	141	143
$N_{sec}$	(Turn)	2270	2541	2600
$Dm_p$	(mm.)	1.05	1.05	1.05
$Dm_s$	(mm.)	0.26	0.26	0.26
$We_{core}$	(kg.)	2.14	1.93	1.86
$We_{cup}$	(kg.)	0.240	0.248	0.247
$We_{cus}$	(kg.)	0.256	0.262	0.264
$C_{core}$	(Baht)	49.0	44.2	42.6
$C_{cup}$	(Baht)	25.9	26.7	26.6
$C_{cus}$	(Baht)	33.4	34.2	34.4
$C_t$	(Baht)	108.3	105.1	103.6

ขดลวดปฐมภูมิ 107.72 บาท/กิโลกรัม, ขดลวดทุติยภูมิ 130.42 บาท/กิโลกรัม, แกนเหล็ก 22.91 บาท/กิโลกรัม  
ดัชนีแบบหมายเลข 1 เป็นการออกแบบตามลักษณะโครงสร้างการผลิตของโรงงานแห่งหนึ่ง ที่ค่า  $B_m = 2.10$  T พิกัด 700 W

ดัชนีแบบหมายเลข 2 เป็นการออกแบบโดยใช้เงินดิกอัลกอริทึม ที่ค่า  $B_m = 2.10$  T พิกัด 700 W

ดัชนีแบบหมายเลข 3 เป็นการออกแบบโดยใช้เงินดิกอัลกอริทึม ที่ค่า  $B_m = 2.15$  T พิกัด 700 W

จากตารางที่ 4.2 เป็นผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟ พิกัด 700 W จะเห็นว่าดัชนีแบบจากการออกแบบโดยใช้เงินดิกอัลกอริทึม ดัชนีแบบหมายเลข 2 และ 3 จะใช้จำนวนรอบของขดลวดที่มากกว่าดัชนีแบบหมายเลข 1 แต่ไม่ได้หมายความว่าดัชนีแบบหมายเลข 2 และ 3 จะใช้วัสดุขดลวดตัวนำที่เพิ่มขึ้นมากมายทั้งนี้เพราะว่าโครงสร้างของแกนเหล็กที่ออกแบบจะมีขนาดที่เล็กลงกว่าเดิม และราคาวัสดุรวมของดัชนีแบบหมายเลข 2 มีราคาลดลงกว่าดัชนีแบบของโรงงานอยู่ 3.2 บาท และเมื่อเพิ่มค่า  $B_m$  ในการออกแบบ (ดัชนีแบบหมายเลข 3) จะทำให้ราคารวมของวัสดุมีค่าลดลงมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับดัชนีแบบของโรงงาน (ดัชนีแบบหมายเลข 1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงพิกัด 850 W 230/2220 50 Hz

ต้นแบบหมายเลข		4	5	6	7	8
$D$	(m.)	0.065	0.071	0.066	0.059	0.0556
$2E$	(m.)	0.032	0.030	0.030	0.032	0.0318
$J_{pri}$	(A/mm <sup>2</sup> )	8.695	10.544	10.519	11.902	12.139
$J_{sec}$	(A/mm <sup>2</sup> )	7.952	8.658	8.502	9.812	10.377
$\Delta T_{pri}$	(°C)	128.1	-	148.5	159.6	167.8
$\Delta T_{sec}$	(°C)	128.4	-	146.2	158.5	169.1
$N_{pri}$	(Turn)	255	252	268	281	298
$N_{sec}$	(Turn)	2561	2531	2692	2822	2993
$Dm_p$	(mm.)	0.90	0.80	0.80	0.75	0.75
$Dm_s$	(mm.)	0.32	0.30	0.30	0.28	0.27
$We_{core}$	(kg.)	3.09	3.00	2.79	2.85	2.66
$We_{cup}$	(kg.)	0.376	0.300	0.307	0.274	0.282
$We_{cus}$	(kg.)	0.457	0.402	0.418	0.352	0.336
$C_{core}$	(Baht)	70.8	68.7	63.9	65.3	60.9
$C_{cup}$	(Baht)	40.5	32.3	33.1	29.5	30.4
$C_{cus}$	(Baht)	59.6	52.4	54.5	45.9	43.8
$C_t$	(Baht)	170.9	153.4	151.5	140.7	135.1

ขดลวดปฐมภูมิ 107.72 บาท/กิโลกรัม, ขดลวดทุติยภูมิ 130.42 บาท/กิโลกรัม, แกนเหล็ก 22.91 บาท/กิโลกรัม

ต้นแบบหมายเลข 4 เป็นการออกแบบโดยใช้เงินคิกอัสกริม กำหนดอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด

ไม่เกิน 130 องศาเซลเซียส พิกัด 850 W

ต้นแบบหมายเลข 5 เป็นการออกแบบตามลักษณะโครงสร้างการผลิตของโรงงานแห่งหนึ่ง พิกัด 850 W

ต้นแบบหมายเลข 6 เป็นการออกแบบโดยใช้เงินคิกอัสกริม กำหนดอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด

ไม่เกิน 150 องศาเซลเซียส พิกัด 850 W

ต้นแบบหมายเลข 7 เป็นการออกแบบโดยใช้เงินคิกอัสกริม กำหนดอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด

ไม่เกิน 160 องศาเซลเซียส พิกัด 850 W

ต้นแบบหมายเลข 8 เป็นการออกแบบโดยใช้เงินคิกอัสกริม กำหนดอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด

ไม่เกิน 170 องศาเซลเซียส พิกัด 850 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงพิกัด 1,000 W 220/2200 50 Hz

ต้นแบบหมายเลข	9	10	11	12	13
$D$ (m.)	0.062	0.065	0.063	0.0595	0.063
$2E$ (m.)	0.035	0.035	0.035	0.035	0.032
$J_{pri}$ (A/mm <sup>2</sup> )	8.926	10.217	10.158	11.324	12.831
$J_{sec}$ (A/mm <sup>2</sup> )	7.542	8.704	8.674	9.254	9.672
$\Delta T_{pri}$ (°C)	129.8	-	147.1	158.1	169.0
$\Delta T_{sec}$ (°C)	128.9	-	149.2	158.3	168.2
$N_{pri}$ (Turn)	235	225	232	244	252
$N_{sec}$ (Turn)	2434	2331	2403	2528	2610
$Dm_p$ (mm.)	0.95	0.90	0.90	0.85	0.80
$Dm_s$ (mm.)	0.34	0.32	0.32	0.31	0.31
$We_{core}$ (kg.)	3.58	3.75	3.64	3.43	3.30
$We_{cup}$ (kg.)	0.444	0.396	0.392	0.360	0.326
$We_{cus}$ (kg.)	0.584	0.515	0.510	0.485	0.487
$C_{core}$ (Baht)	82.0	85.9	83.4	78.6	75.6
$C_{cup}$ (Baht)	47.8	42.7	42.2	38.8	35.1
$C_{cus}$ (Baht)	76.2	67.2	66.5	63.3	63.5
$C_t$ (Baht)	206.0	195.8	192.1	180.7	174.2

ขดลวดปฐมภูมิ 107.72 บาท/กิโลกรัม, ขดลวดทุติยภูมิ 130.42 บาท/กิโลกรัม, แกนเหล็ก 22.91 บาท/กิโลกรัม

ต้นแบบหมายเลข 9 เป็นการออกแบบโดยใช้เงินตักอัคริธิม กำหนดคณภูมิเพิ่มของขดลวด

ไม่เกิน 130 องศาเซลเซียส พิกัด 1000 W

ต้นแบบหมายเลข 10 เป็นการออกแบบตามลักษณะโครงสร้างการผลิตของโรงงานแห่งหนึ่ง

ต้นแบบหมายเลข 11 เป็นการออกแบบโดยใช้เงินตักอัคริธิม กำหนดคณภูมิเพิ่มของขดลวด

ไม่เกิน 150 องศาเซลเซียส พิกัด 1000 W

ต้นแบบหมายเลข 12 เป็นการออกแบบโดยใช้เงินตักอัคริธิม กำหนดคณภูมิเพิ่มของขดลวด

ไม่เกิน 160 องศาเซลเซียส พิกัด 1000 W

ต้นแบบหมายเลข 13 เป็นการออกแบบโดยใช้เงินตักอัคริธิม กำหนดคณภูมิเพิ่มของขดลวด

ไม่เกิน 170 องศาเซลเซียส พิกัด 1000 W

จากตารางที่ 4.3 และ 4.4 ซึ่งเป็นผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบ

ไมโครเวฟพิกัด 850 และ 1000 W เมื่อเปรียบเทียบราคาของการออกแบบระหว่างการออกแบบ

โดยใช้เงินตักอัคริธิมกับการออกแบบตามลักษณะโครงสร้างการผลิตของโรงงานแห่งหนึ่ง จะ

ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เห็นว่าราคารวมของวัสดุมีค่าลดลงมากขึ้นเมื่อเรากำหนดคุณสมบัติเพิ่มของขดลวดที่เพิ่มมากขึ้น แต่ถ้าเรากำหนดคุณสมบัติเพิ่มของขดลวดให้ลดลงจะทำให้ราคารวมของวัสดุมีค่ามากขึ้น ซึ่งจะเห็นว่าการกำหนดคุณสมบัติเพิ่มของขดลวดจะส่งผลโดยตรงกับราคารวมของวัสดุ การที่ราคารวมของวัสดุต้นแบบหมายเลข 6 มีราคาลดลงจากต้นแบบหมายเลข 5 เพียง 2.0 บาทหรือ 1.3% และราคารวมของวัสดุต้นแบบหมายเลข 11 มีราคาลดลงจากต้นแบบหมายเลข 10 เพียง 3.7 บาทหรือ 1.9% เนื่องจากการกำหนดคุณสมบัติของขดลวดใกล้เคียงกันพร้อมทั้งราคา บาท/กิโลกรัมของวัสดุยังใช้ค่าเดียวกันในการออกแบบ

ตารางที่ 4.5 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงพิกัด 700 W 120/2070 60 Hz เมื่อราคาวัสดุมีการเปลี่ยนแปลง

ต้นแบบหมายเลข		1	14
$D$	(mm.)	0.069	0.075
$2E$	(mm.)	0.0254	0.0255
$J_{pri}$	(A/mm <sup>2</sup> )	9.527	11.781
$J_{sec}$	(A/mm <sup>2</sup> )	10.076	10.951
$\Delta T_{pri}$	(°C)	-	156.6
$\Delta T_{sec}$	(°C)	-	156.4
$N_{pri}$	(Turn)	126	114
$N_{sec}$	(Turn)	2270	2054
$Dm_p$	(mm.)	1.05	0.95
$Dm_s$	(mm.)	0.26	0.25
$We_{core}$	(kg.)	2.14	2.31
$We_{cup}$	(kg.)	0.240	0.184
$We_{cus}$	(kg.)	0.256	0.215
$C_{core}$	(Baht)	49.0	52.9
$C_{cup}$	(Baht)	60.0	46.0
$C_{cus}$	(Baht)	76.8	64.5
$C_t$	(Baht)	185.8	163.4

ขดลวดปฐมภูมิ 250 บาท/กิโลกรัม, ขดลวดทุติยภูมิ 300 บาท/กิโลกรัม, แกนเหล็ก 22.91 บาท/กิโลกรัม

ต้นแบบหมายเลข 1 เป็นการออกแบบตามลักษณะโครงสร้างการผลิตของโรงงานแห่งหนึ่ง พิกัด 700 W

ต้นแบบหมายเลข 14 เป็นการออกแบบโดยใช้เงินดิกอัลกอริธึม กำหนดคุณสมบัติเพิ่มของขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่ง ไม่เกิน 160 องศาเซลเซียส พิกัด 700 W เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงพิกัด 850 W 230/2220 50 Hz  
เมื่อราคาของวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงไป

ต้นแบบหมายเลข		5	15
$D$	(mm.)	0.071	0.088
$2E$	(mm.)	0.030	0.0296
$J_{pri}$	(A/mm <sup>2</sup> )	10.544	10.721
$J_{sec}$	(A/mm <sup>2</sup> )	8.658	9.312
$\Delta T_{pri}$	(°C)	-	146.3
$\Delta T_{sec}$	(°C)	-	148.8
$N_{pri}$	(Turn)	252	202
$N_{sec}$	(Turn)	2531	2029
$Dm_p$	(mm.)	0.80	0.80
$Dm_s$	(mm.)	0.30	0.29
$We_{core}$	(kg.)	3.00	3.64
$We_{cup}$	(kg.)	0.300	0.2685
$We_{cus}$	(kg.)	0.402	0.3272
$C_{core}$	(Baht)	68.7	83.4
$C_{cup}$	(Baht)	75.0	67.3
$C_{cus}$	(Baht)	120.6	98.1
$C_t$	(Baht)	264.3	248.8

ขดลวดปฐมภูมิ 250 บาท/กิโลกรัม, ขดลวดทุติยภูมิ 300 บาท/กิโลกรัม, แกนเหล็ก 22.91 บาท/กิโลกรัม  
ต้นแบบหมายเลข 5 เป็นการออกแบบตามลักษณะโครงสร้างการผลิตของโรงงานแห่งหนึ่ง พิกัด 850 W  
ต้นแบบหมายเลข 15 เป็นการออกแบบโดยใช้เงินตักอัลกอริธึม กำหนดอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด  
ไม่เกิน 150 องศาเซลเซียส พิกัด 850 W

จากตารางที่ 4.5 และ 4.6 จะเห็นว่าถ้าทางบริษัทผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงประสบ  
ปัญหาวัสดุขาดตัวนำขาดแคลนและจำเป็นต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศทำให้ราคาขาดตัวนำสูงขึ้น ถ้า  
ทำการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าใหม่ (ต้นแบบหมายเลข 14 และ 15) มีราคาลดลงจากต้นแบบตาม  
ลักษณะโครงสร้างการผลิตของโรงงานแห่งหนึ่ง (ต้นแบบหมายเลข 1 และ 5 ตามลำดับ) ที่มากขึ้น  
ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถึงแม้ว่าราคาของวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงไปการออกแบบโดยใช้เงินตักอัลกอริธึม  
ก็ยังสามารถหาโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่เหมาะสมกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและพัฒนา โดยผู้จัดทำให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงให้มีประสิทธิภาพสูง

พิกัด 850 W 230/2220 50 Hz

ต้นแบบหมายเลข		16	17	18
$D$	(m.)	0.103	0.095	0.088
$2E$	(m.)	0.035	0.035	0.035
$J_{pri}$	(A/mm <sup>2</sup> )	4.083	4.712	5.333
$J_{sec}$	(A/mm <sup>2</sup> )	4.416	5.146	5.690
$N_{pri}$	(Turn)	185	199	221
$N_{sec}$	(Turn)	1850	1990	2210
$Dm_p$	(mm.)	1.20	1.10	1.05
$Dm_s$	(mm.)	0.42	0.39	0.37
$We_{core}$	(kg.)	5.90	5.44	5.04
$We_{cup}$	(kg.)	0.649	0.553	0.525
$We_{cus}$	(kg.)	0.729	0.672	0.584
$C_{core}$	(Baht)	135.1	124.6	115.5
$C_{cup}$	(Baht)	69.9	59.6	56.6
$C_{cus}$	(Baht)	95.1	87.6	76.2
$C_t$	(Baht)	300.1	271.8	248.3
$P_{core}$	(W)	47.2	43.5	39.4
$P_{cup}$	(W)	24.1	34.8	48.3
$P_{cus}$	(W)	30.8	45.6	61.4
$P_{total}$	(W)	102.1	123.9	149.1
$P_{in}$	(W)	1027.1	1048.9	1074.1
$P_{out}$	(W)	925	925	925
$Efficiency$	(%)	90.1	88.2	86.1

ขดลวดปฐมภูมิ 107.72 บาท/กิโลกรัม, ขดลวดทุติยภูมิ 130.42 บาท/กิโลกรัม, แกนเหล็ก 22.91 บาท/กิโลกรัม

ต้นแบบหมายเลข 16 เป็นการออกแบบโดยใช้เงินคิกอัลกอริธึม กำหนดประสิทธิภาพ

ของหม้อแปลงไฟฟ้าไม่ต่ำกว่า 90% พิกัด 850 W

ต้นแบบหมายเลข 17 เป็นการออกแบบโดยใช้เงินคิกอัลกอริธึม กำหนดประสิทธิภาพ

ของหม้อแปลงไฟฟ้าไม่ต่ำกว่า 88% พิกัด 850 W

ต้นแบบหมายเลข 18 เป็นการออกแบบโดยใช้เงินคิกอัลกอริธึม กำหนดประสิทธิภาพ

ของหม้อแปลงไฟฟ้าไม่ต่ำกว่า 86% พิกัด 850 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.7 เป็นผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงให้มีราคาต่ำภายใต้เงื่อนไขประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงไม่ต่ำกว่า 86 % , 88 % และ 90 % ซึ่งจะเห็นว่าหม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบมามีประสิทธิภาพสูงกว่าเงื่อนไขเพียงเล็กน้อย ก็เนื่องจากการเพิ่มประสิทธิภาพของหม้อแปลงจำเป็นต้องลดค่าความสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงลง ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของกระแสมีค่าต่ำลงแต่จะต่ำลงไปเท่าใดก็ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขว่า ค่าความสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำให้ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าผ่านเงื่อนไขหรือยัง ถ้ายังไม่ผ่านก็จำเป็นต้องหาโครงสร้างใหม่ให้ประสิทธิภาพของหม้อแปลงผ่านเงื่อนไข ซึ่งการออกแบบนี้เราก็กำหนดจุดมุ่งหมายให้หม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบมามีราคาต่ำด้วย ดังนั้นผลการออกแบบจึงมีค่าความหนาแน่นของกระแสที่ต่ำและราคารวมของวัสดุที่สูงกว่าต้นแบบอื่น แต่ที่ราคารวมของวัสดุต่ำที่สุดสำหรับการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่มีประสิทธิภาพตามเงื่อนไขที่ระบุไว้ ต้นแบบหมายเลข 16 กำหนดประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง ไม่สามารถสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงได้เนื่องจากติดปัญหาเรื่อง โครงสร้างและพื้นที่ในการติดตั้งหม้อแปลงเข้ากับตู้อบไมโครเวฟ ดังนั้นจึงทำการสร้างและทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงหมายเลข 17 ซึ่งกำหนดประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงไม่ต่ำกว่า 88 %

#### 4.4 ผลการทดสอบต้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบจินตคณิตวิธีใหม่ เป็นวิธีการเชิงตัวเลขที่นำมาใช้ออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงให้มีราคาต่ำ ในกระบวนการออกแบบได้มีการรวบรวมสมการที่ใช้ในการคำนวณโครงสร้างแกนเหล็กและขดลวดจากแหล่งข้อมูลต่าง ๆ เช่น ตำราจากต่างประเทศ [28] บทความจากวารสาร [29-30] และจากประสบการณ์ของผู้ออกแบบ ดังนั้นเพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องในทางปฏิบัติของวิธีการออกแบบและสมการที่ใช้คำนวณโครงสร้างต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้า จะนำผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงจากตารางที่ 4.2 - 4.7 มาสร้างต้นแบบเพื่อทดสอบ คุณลักษณะต่าง ๆ ที่คำนวณได้จากการออกแบบซึ่งได้ทำการสร้างต้นแบบทั้งหมด 12 ต้นแบบ ดังนี้

- พิกัด 700 W ต้นแบบหมายเลข 1 , ต้นแบบหมายเลข 2 และต้นแบบหมายเลข 3 เป็นการออกแบบลักษณะ 2 ตัวแปร โดยไม่มีการคำนวณหาอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด.
- พิกัด 850 W ต้นแบบหมายเลข 4 , ต้นแบบหมายเลข 5 , ต้นแบบหมายเลข 6 และต้นแบบหมายเลข 7 เป็นการออกแบบลักษณะ 4 ตัวแปร โดยมีอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดเป็นเงื่อนไข
- พิกัด 1,000 W ต้นแบบหมายเลข 9 , ต้นแบบหมายเลข 10 , ต้นแบบหมายเลข 11 และ ต้นแบบหมายเลข 12 เป็นการออกแบบลักษณะ 4 ตัวแปร โดยมีอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดเป็นเงื่อนไข

- พิกัด 850 W ดันแบบหมายเลข 17 เป็นการออกแบบลักษณะ 4 ตัวแปร โดยมีประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่สูงขึ้นเป็นเงื่อนไจ

ดันแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4.2 ถึง 4.13 ตามลำดับโดยการทดสอบจะทำการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าได้แก่

- การทดสอบสภาวะไร้โหลด
- การทดสอบหาค่าลิ่งไฟฟ้าอินพุทของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง
- การทดสอบหาค่าลิ่งไฟฟ้าเอาต์พุทของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง
- การทดสอบหาค่าลิ่งไฟฟ้าของคู่อุปไมโครเวฟ
- การทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด

ในการสร้างดันแบบ ได้มีการชั่งน้ำหนักของขดลวดและแกนเหล็กที่ใช้ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมการต่าง ๆ ที่ใช้คำนวณโครงสร้างของขดลวดและแกนเหล็กจากตารางที่ 4.8-4.11 แสดงให้เห็นว่าจากโครงสร้างที่ได้ทำการออกแบบค่าน้ำหนักที่สร้างขึ้นจะมีค่าใกล้เคียงกับน้ำหนักที่คำนวณได้จากการออกแบบคือผิดพลาดไม่เกิน 3 % ดังนั้นทำให้สรุปได้ว่าสมการที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างสามารถนำมาสร้างดันแบบได้จริง

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่าน้ำหนัก(kg)ของโครงสร้างที่ได้ออกแบบ พิกัด 700 W

ดันแบบหมายเลข	1		2		3
	ดันแบบ	ออกแบบ	ดันแบบ	ออกแบบ	ดันแบบ
ขดลวดปฐมภูมิ	0.240	0.248	0.246	0.247	0.246
ผิดพลาด (%)	-	-0.8		-0.4	
ขดลวดทุติยภูมิ	0.256	0.262	0.264	0.264	0.263
ผิดพลาด (%)	-	0.7		-0.5	
แกนเหล็ก	2.14	1.93	1.97	1.86	1.88
ผิดพลาด (%)	-	2.2		0.9	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่าน้ำหนัก(kg)ของ โครงสร้างที่ได้ออกแบบ พิกัด 850 W

ต้นแบบหมายเลข	4		5	6		7	
	ออกแบบ	ต้นแบบ	ต้นแบบ	ออกแบบ	ต้นแบบ	ออกแบบ	ต้นแบบ
ขดลวดปฐมภูมิ	0.376	0.378	0.300	0.307	0.302	0.274	0.270
ผิดพลาด (%)	0.5		-	-1.5		-1.5	
ขดลวดทุติยภูมิ	0.457	0.454	0.402	0.418	0.418	0.352	0.355
ผิดพลาด (%)	-0.7		-	0.00		0.9	
แกนเหล็ก	3.09	3.15	3.00	2.79	2.85	2.85	2.87
ผิดพลาด (%)	1.9		-	2.2		0.7	

ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่าน้ำหนัก(kg)ของ โครงสร้างที่ได้ออกแบบ พิกัด 1,000 W

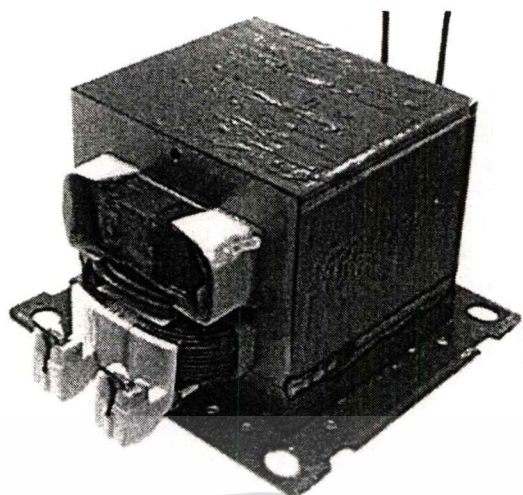
ต้นแบบหมายเลข	9		10	11		12	
	ออกแบบ	ต้นแบบ	ต้นแบบ	ออกแบบ	ต้นแบบ	ออกแบบ	ต้นแบบ
ขดลวดปฐมภูมิ	0.444	0.448	0.396	0.392	0.389	0.360	0.358
ผิดพลาด (%)	0.9		-	-0.8		-0.6	
ขดลวดทุติยภูมิ	0.584	0.581	0.515	0.510	0.514	0.485	0.488
ผิดพลาด (%)	-0.5		-	0.8		0.6	
แกนเหล็ก	3.58	3.65	3.75	3.64	3.69	3.43	3.48
ผิดพลาด (%)	2.0		-	1.4		1.5	

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบค่าน้ำหนัก(kg)ของต้นแบบประสิทธิภาพสูง พิกัด 850 W

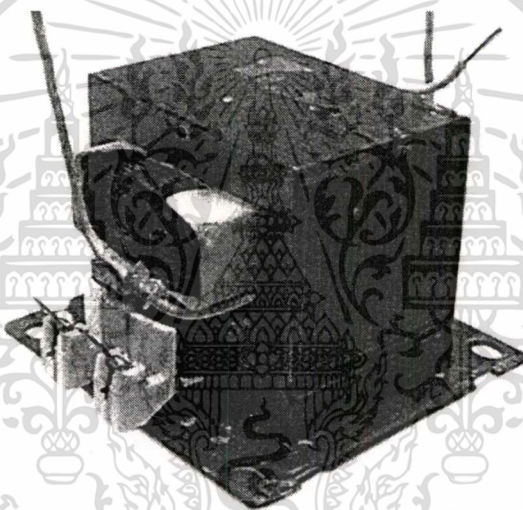
ต้นแบบหมายเลข	17	
	ออกแบบ	ต้นแบบ
ขดลวดปฐมภูมิ	0.553	0.565
ผิดพลาด (%)	2.2	
ขดลวดทุติยภูมิ	0.672	0.688
ผิดพลาด (%)	2.4	
แกนเหล็ก	5.44	5.45
ผิดพลาด (%)	0.2	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

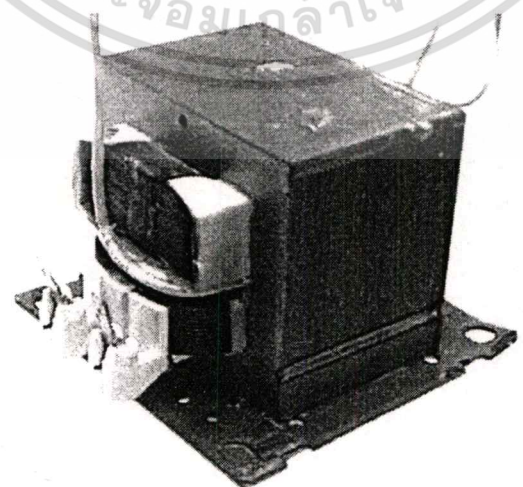
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ดันแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง พิกัด 700 W ดันแบบหมายเลข 1

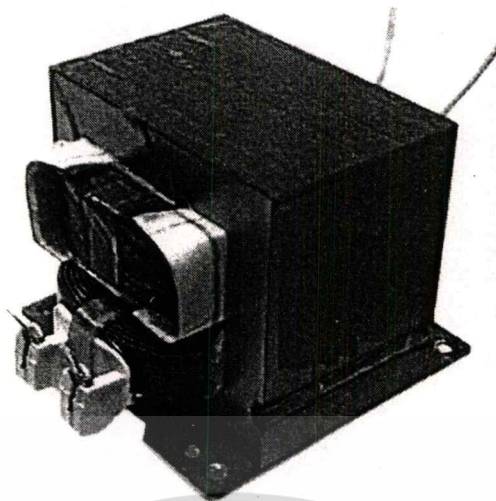


รูปที่ 4.3 ดันแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง พิกัด 700 W ดันแบบหมายเลข 2

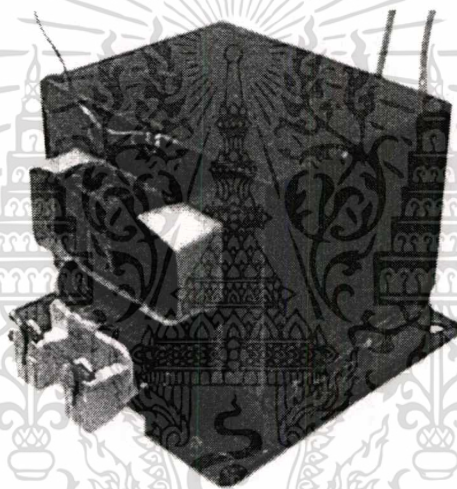


รูปที่ 4.4 ดันแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง พิกัด 700 W ดันแบบหมายเลข 3

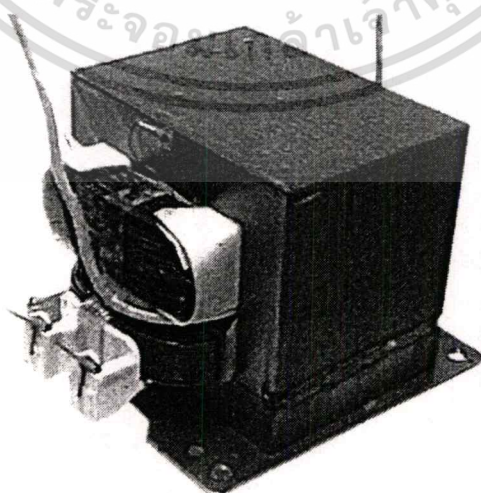
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ต้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง พิกัด 850 W ต้นแบบหมายเลข 4

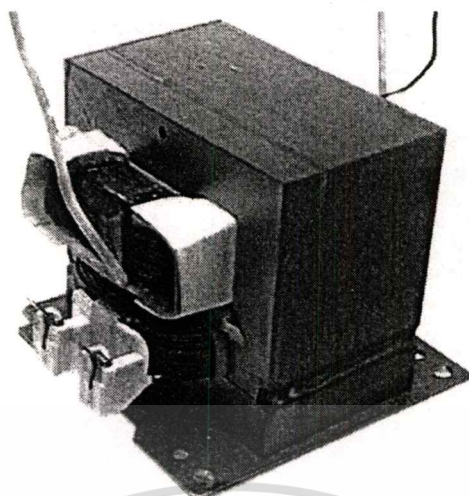


รูปที่ 4.6 ต้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง พิกัด 850 W ต้นแบบหมายเลข 5

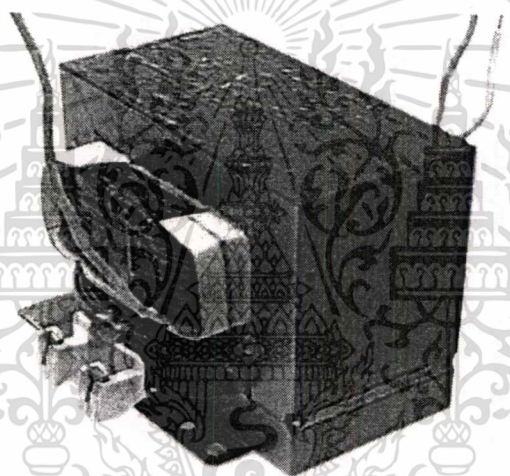


รูปที่ 4.7 ต้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง พิกัด 850 W ต้นแบบหมายเลข 6

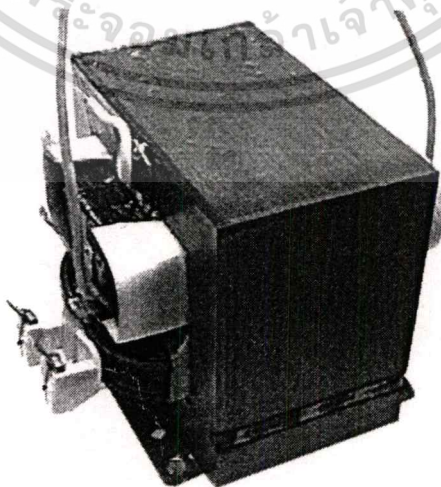
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ดันแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง พิกัด 850 W ดันแบบหมายเลข 7

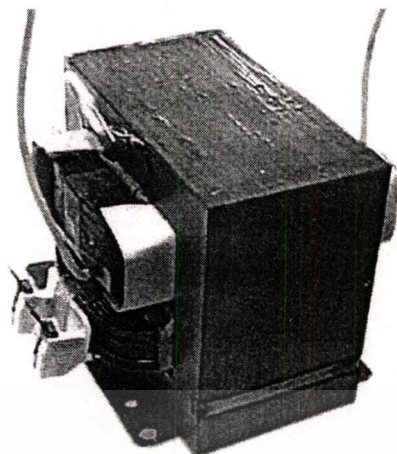


รูปที่ 4.9 ดันแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง พิกัด 1000 W ดันแบบหมายเลข 9



รูปที่ 4.10 ดันแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง พิกัด 1000 W ดันแบบหมายเลข 10

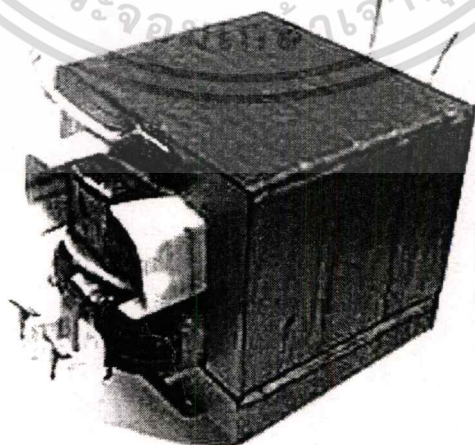
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ต้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง พิกัด 1000 W ต้นแบบหมายเลข 11



รูปที่ 4.12 ต้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง พิกัด 1000 W ต้นแบบหมายเลข 12



รูปที่ 4.13 ต้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง พิกัด 850 W ต้นแบบหมายเลข 17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.1 การทดสอบสภาวะไร้โหลด

การทดสอบสามารถกระทำได้โดยการเปิดวงจรของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงด้านแรงดันสูง (เรียกว่าขดลวดทุติยภูมิ) ข่ายแรงดันและความถี่ไฟฟ้าตามพิกัดเข้าสู่ขดลวดอีกด้านหนึ่ง (เรียกว่าขดลวดปฐมภูมิ) เครื่องมือวัดต่าง ๆ จะต่ออยู่ทางด้านปฐมภูมิในตำแหน่งดังรูปที่ 4.14 ขณะทดสอบขดลวดด้านทุติยภูมิซึ่งเปิดวงจรอยู่จะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดจึงไม่มีความสูญเสียจากขดลวดด้านนี้เกิดขึ้น ส่วนกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดทางด้านปฐมภูมิเป็นกระแสที่ทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กขึ้นในวงจรแม่เหล็ก และฟลักซ์แม่เหล็กนี้จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวดทั้งสอง ซึ่งกระแสที่ไหลผ่านขดลวดทางด้านปฐมภูมิขณะทดสอบนี้เรียกว่ากระแสกระตุ้น ปริมาณของกระแสกระตุ้นนี้จะขึ้นกับชนิดของแกนเหล็กและน้ำหนักของแกนเหล็กที่ใช้



รูปที่ 4.14 การต่อเครื่องมือวัดในการทดสอบแบบเปิดวงจร

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบสภาวะไร้โหลด พิกัด 700 W 120 V 60 Hz

ต้นแบบหมายเลข	1	2	3
No-load input current (A)	5.00	4.68	5.25
No-load input power (W)	53.7	51.3	60.9
No-load secondary voltage (V)	2071	2070	2075
No-load filament voltage (V)	3.65	3.65	3.67
ขดลวดปฐมภูมิที่ 20 °C ( $\Omega$ )*	0.625	0.649	0.630
ขดลวดทุติยภูมิที่ 20 °C ( $\Omega$ )*	169.5	185.1	177.6

\* DC resistance measurement

จากตารางที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าในสภาวะไร้โหลด กระแสและกำลังไฟฟ้าของต้นแบบหมายเลข 3 มีค่าสูงกว่าต้นแบบของโรงงานเนื่องจากการออกแบบกำหนดให้ใช้ค่า  $B_m$  สูงกว่า ซึ่งเป็นไปตามคุณสมบัติของแกนเหล็กแต่ก็ยังคงสามารถจ่ายค่าแรงดันด้านทุติยภูมิได้เช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบสภาวะไร้โหลด พิกัด 850 W 230 V 50 Hz

ต้นแบบหมายเลข	4	5	6	7	17
No-load input current (A)	2.32	2.21	2.29	2.10	0.89
No-load input power (W)	51.5	50	49	50	44
No-load secondary voltage (V)	2226	2220	2220	2215	2230
No-load filament voltage (V)	3.47	3.55	3.68	3.53	3.43
ขดลวดปฐมภูมิที่ 20 °C ( $\Omega$ )*	1.985	2.198	2.248	2.349	1.217
ขดลวดทุติยภูมิที่ 20 °C ( $\Omega$ )*	152.1	161.1	163.2	177.9	93.9

\* DC resistance measurement

ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบสภาวะไร้โหลด พิกัด 1,000 W 220V 50 Hz

ต้นแบบหมายเลข	9	10	11	12
No-load input current (A)	2.95	3.02	2.85	2.80
No-load input power (W)	55.8	56.4	55.1	54.4
No-load secondary voltage (V)	2205	2198	2195	2195
No-load filament voltage (V)	3.21	3.28	3.25	3.15
ขดลวดปฐมภูมิที่ 20 °C ( $\Omega$ )*	1.528	1.612	1.693	1.824
ขดลวดทุติยภูมิที่ 20 °C ( $\Omega$ )*	119.3	132.1	134.8	140.2

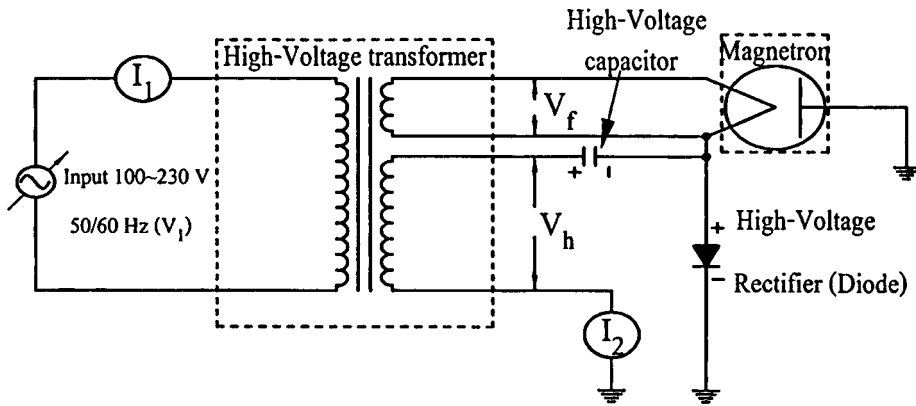
\* DC resistance measurement

จากตารางที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าในสภาวะไร้โหลดกระแสและกำลังไฟฟ้าของต้นแบบหมายเลขต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากทุกต้นแบบออกแบบที่ค่า  $B_m$  เดียวกันยกเว้นต้นแบบหมายเลข 17 จะเห็นว่ากระแสและกำลังไฟฟ้ามีน้อยกว่าต้นแบบอื่นเนื่องจากต้นแบบหมายเลข 17 ออกแบบที่ค่า  $B_m$  น้อยกว่าต้นแบบอื่นซึ่งเป็นไปตามคุณสมบัติของแกนเหล็ก จากตารางที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าในสภาวะไร้โหลดกระแสและกำลังไฟฟ้าของต้นแบบหมายเลขต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากทุกต้นแบบออกแบบที่ค่า  $B_m$  เดียวกัน แต่ก็ยังคงจ่ายแรงดันค้ำทุติยภูมิได้เช่นเดียวกัน

#### 4.4.2 การทดสอบสภาวะโหลด

การทดสอบสภาวะโหลดสามารถกระทำได้โดยการต่อวงจรเข้ากับคู่อุปโมโครเวฟดังแสดงดังรูปที่ 4.15 เพื่อทดสอบหากระแสไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้า, กำลังไฟฟ้าอินพุท และ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุทของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 วงจรการทดสอบสภาวะโหลด

ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบสภาวะโหลด พิกัด 700 W 60 Hz

ต้นแบบหมายเลข	1	2	3
Input voltage , $V_1(V)^*$	120.6	120.5	120.4
Input current , $I_1 (A)^*$	8.265	8.249	8.61
Secondary current , $I_2 (A)^*$	0.542	0.549	0.521
Secondary voltage, $V_h (V)^*$	2254	2229	2124
Input power (W)*	929.0	937.0	966.0
Transformer output power (W)*	752.8	762.0	768.1
Transformer efficiency (%)	81.03	81.32	79.51
Power factor	0.93	0.94	0.93

\*ใช้ Digital oscilloscope DL 1540C/1540CL (YOKOGAWA)

ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบสภาวะโหลด พิกัด 850 W 50 Hz

ต้นแบบหมายเลข	4	5	6	7	17
Input voltage , $V_1(V)^*$	229.7	229.6	229.6	229.5	229.8
Input current , $I_1 (A)^*$	5.15	5.240	5.305	5.270	4.71
Secondary current , $I_2 (A)^*$	0.602	0.612	0.612	0.617	0.615
Secondary voltage, $V_h (V)^*$	2528	2517	2512	2508	2521
Input power (W)*	1140	1160	1181.5	1178	1046
Transformer output power (W)*	930.3	926.2	924.3	924	928.5
Transformer efficiency (%)	81.6	79.8	78.2	78.4	88.8
Power factor	0.96	0.96	0.97	0.97	0.97

\*ใช้ Digital oscilloscope DL 1540C/1540CL (YOKOGAWA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบสภาวะโหลด พิกัด 1,000 W 50 Hz

คืนแบบหมายเลข	9	10	11	12
Input voltage , $V_1$ (V)*	219.8	220.1	219.9	220.1
Input current , $I_1$ (A)*	6.36	6.47	6.51	6.595
Secondary current , $I_2$ (A)*	0.699	0.699	0.703	0.705
Secondary voltage, $V_h$ (V)*	2505	2493	2511	2494
Input power (W)*	1346	1357.5	1363	1374
Transformer output power (W)*	1083	1079	1084	1075
Transformer efficiency (%)	80.5	79.5	79.5	78.2
Power factor	0.96	0.95	0.95	0.95

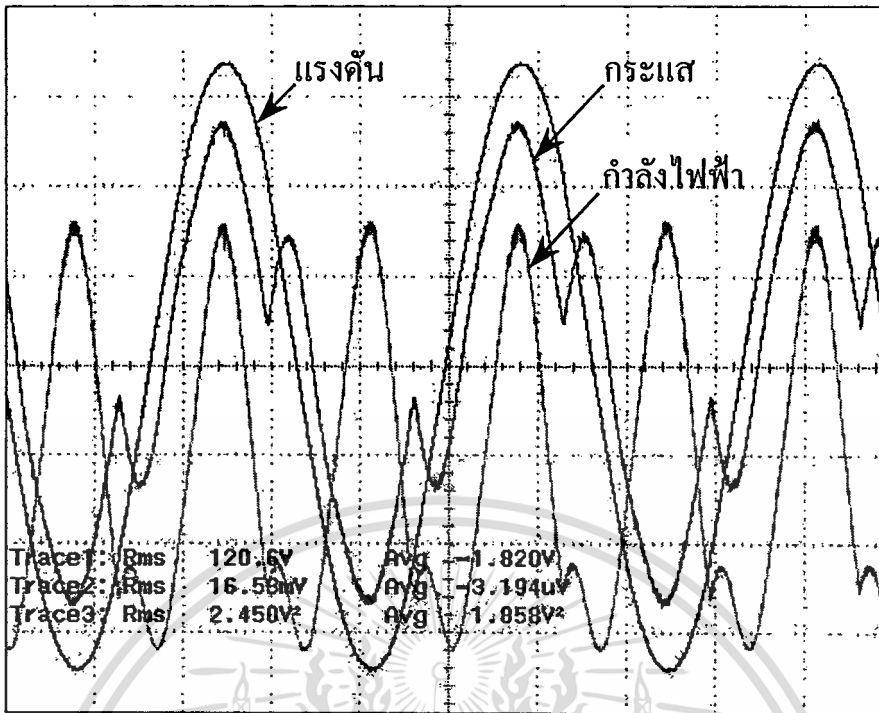
\*ใช้ Digital oscilloscope DL 1540C/1540CL (YOKOGAWA)

จากตารางที่ 4.15 ซึ่งเป็นการทำงานในสภาวะเต็มพิกัดจะเห็นว่าค่าความสูญเสียของคืนแบบหมายเลข 3 มีค่ามากที่สุด จากตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบสภาวะโหลด ซึ่งเป็นการทดสอบโดยต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง เข้ากับตู้อบไมโครเวฟแล้ววัดค่ากำลังไฟฟ้าอินพุทและเอาต์พุทของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงโดยใช้ Digital oscilloscope DL 1540C/1540CL (YOKOGAWA) เพื่อที่จะหาประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง จะพบว่าถ้าอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดมีค่าน้อยก็จะทำให้ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าสูงขึ้น เนื่องจากว่าค่าความสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าน้อยลง ซึ่งจากค่ากำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุทของหม้อแปลงไฟฟ้าทุกคืนแบบยังคงมีค่าใกล้เคียงกับพิกัดที่ออกแบบไว้ แต่กำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุทของคืนแบบที่มีค่าอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดที่น้อยจะมีค่ากำลังไฟฟ้าอินพุทที่น้อยกว่าคืนแบบที่มีค่าอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดที่มาก เนื่องจากว่าทุกคืนแบบต้องการกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุทที่พิกัดเดียวกัน แต่ค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าของคืนแบบอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดที่น้อยกว่า จะมีค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าน้อยตามด้วย ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้กำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุทมีค่าน้อยลง ในส่วนของคืนแบบหมายเลข 17 ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าสูงขึ้นและใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบไว้ จากตารางที่ 4.17 เป็นผลการทดสอบสภาวะโหลด พิกัด 1,000 W ก็เช่นเดียวกับ ตารางที่ 4.16

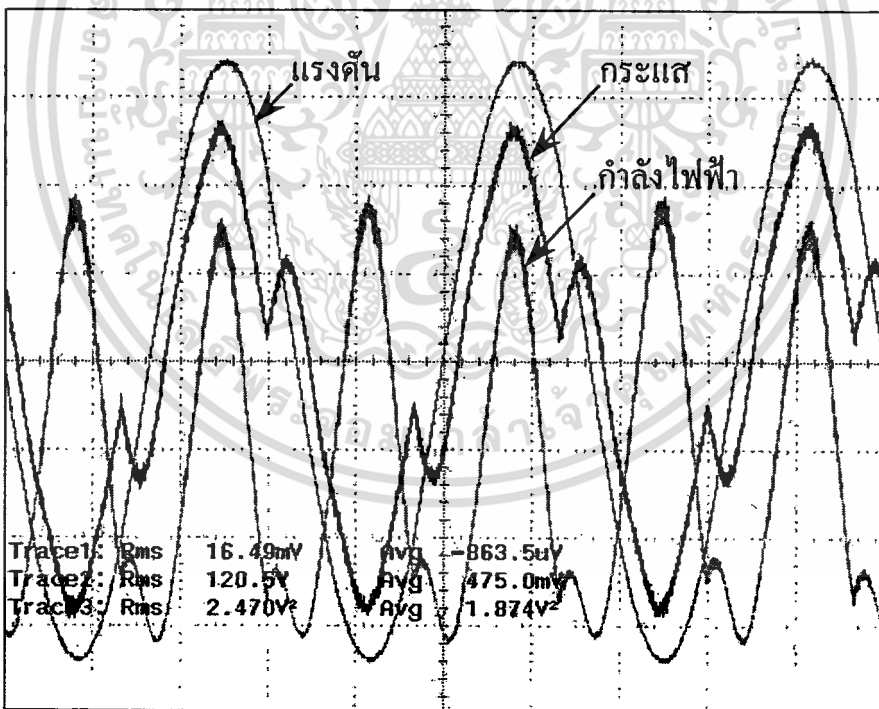
จากรูปที่ 4.16 ถึง 4.21 จะเห็นว่ารูปคลื่นสัญญาณอินพุทและเอาต์พุทของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่ออกแบบ โดยใช้จินตคณิตออลกอริธึมมีรูปคลื่นสัญญาณที่ใกล้เคียงกับคืนแบบของโรงงาน จากรูปที่ 4.22 ถึง 4.23 ซึ่งเป็นสัญญาณอินพุทและเอาต์พุทของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง จะเห็นว่าสัญญาณของกระแสจะมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่น้อยกว่าคืนแบบของโรงงานเนื่องจากคืนแบบหมายเลข 17 ออกแบบที่ค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่น้อยกว่าคืนแบบของ

โรงงาน ส่วนสัญญาณอินพุทและเอาต์พุทของคืนแบบอื่น ๆ ที่ได้สร้างขึ้นอยู่ในภาคผนวก

ไม่ว่าการณ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



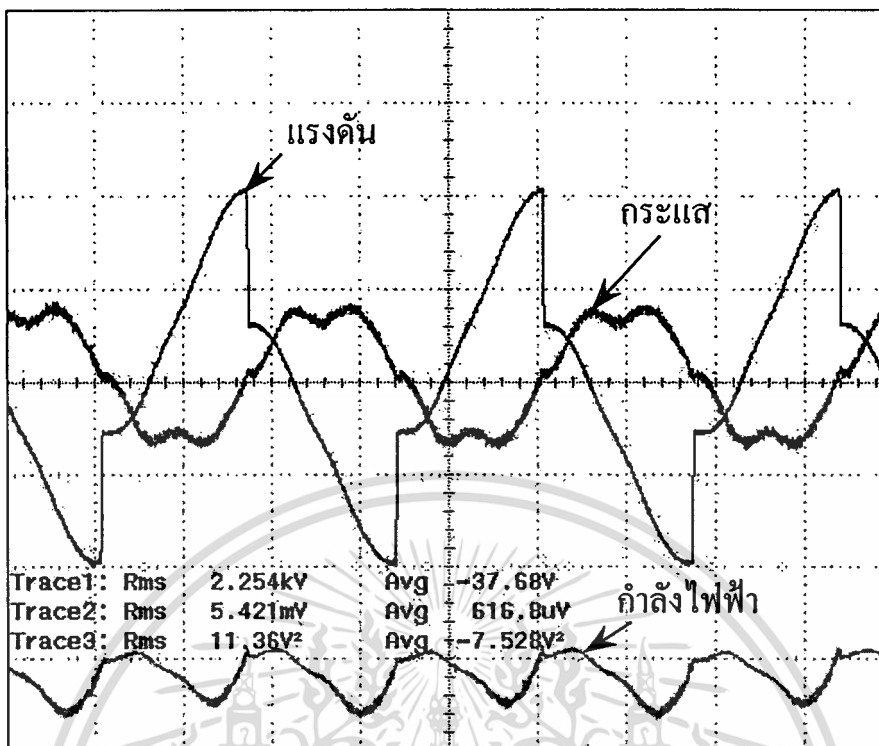
ข)

รูปที่ 4.16 สัญญาณอินพุตที่ได้จากการทดสอบต้นแบบหมายเลข 1 และ 2 ในสภาวะทำงาน

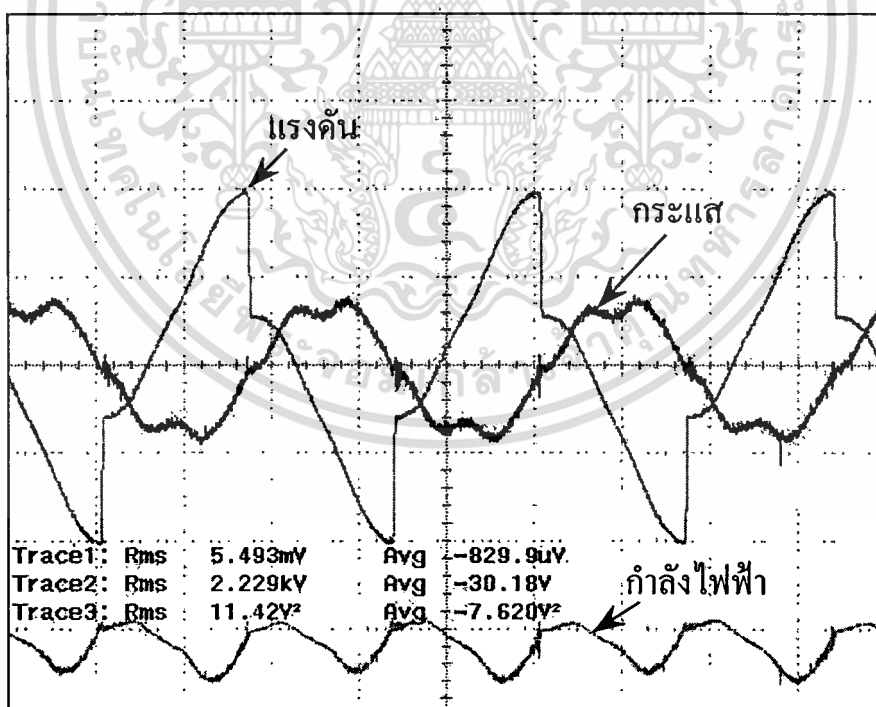
ก) ต้นแบบหมายเลข 1  $V_1 = 120.6 \text{ V}$ ,  $I_1 = 8.265 \text{ A}$ ,  $W_{\text{input}} = 929 \text{ W}$

ข) ต้นแบบหมายเลข 2  $V_1 = 120.5 \text{ V}$ ,  $I_1 = 8.249 \text{ A}$ ,  $W_{\text{input}} = 937 \text{ W}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



ข)

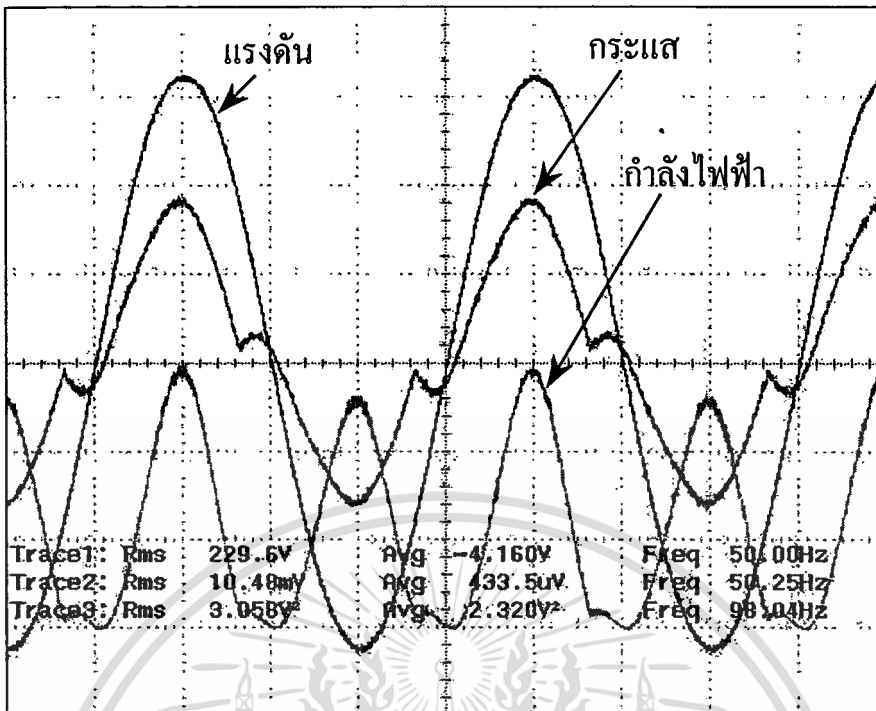
รูปที่ 4.17 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบต้นแบบหมายเลข 1 และ 2 ในสภาวะทำงาน

ก) ต้นแบบหมายเลข 1  $V_h = 2254 \text{ V}$ ,  $I_2 = 0.542 \text{ A}$ ,  $W_{\text{output}} = 752.8 \text{ W}$

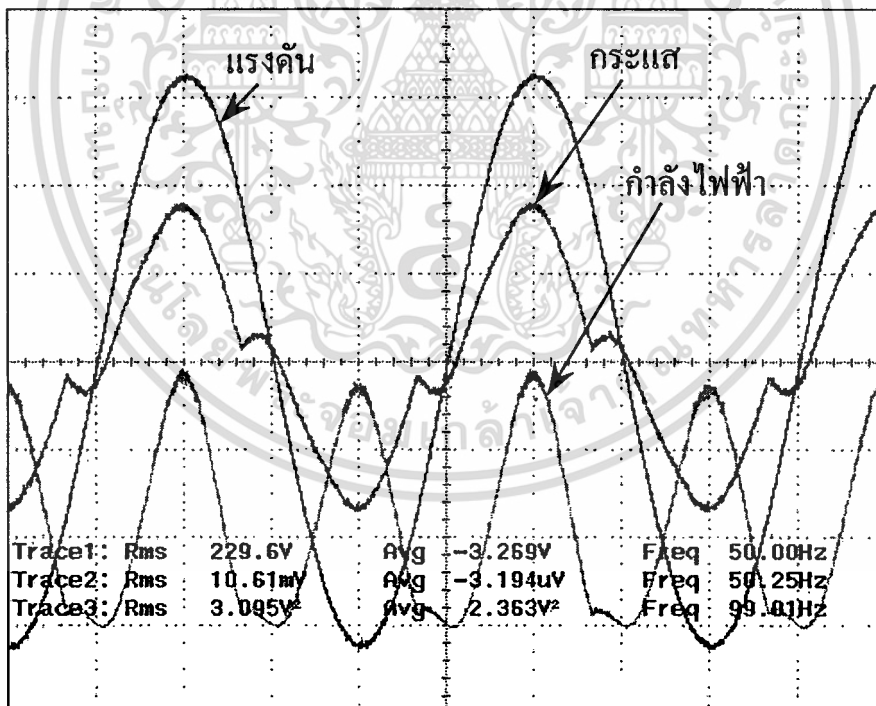
ข) ต้นแบบหมายเลข 2  $V_h = 2229 \text{ V}$ ,  $I_2 = 0.549 \text{ A}$ ,  $W_{\text{output}} = 762 \text{ W}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



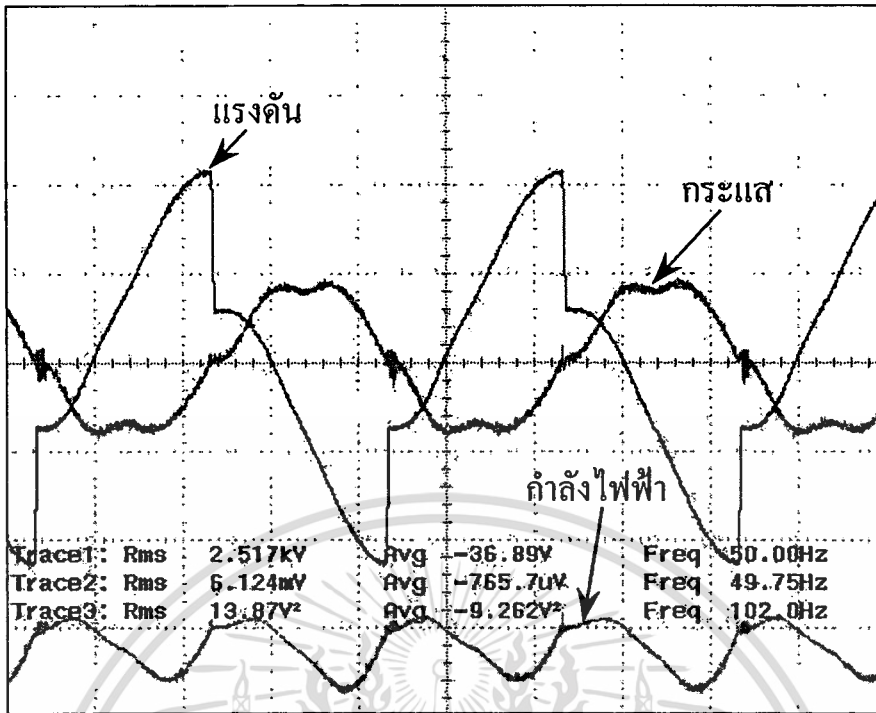
ข)

รูปที่ 4.18 สัญญาณอินพุตที่ได้จากการทดสอบต้นแบบหมายเลข 5 และ 6 ในสภาวะทำงาน

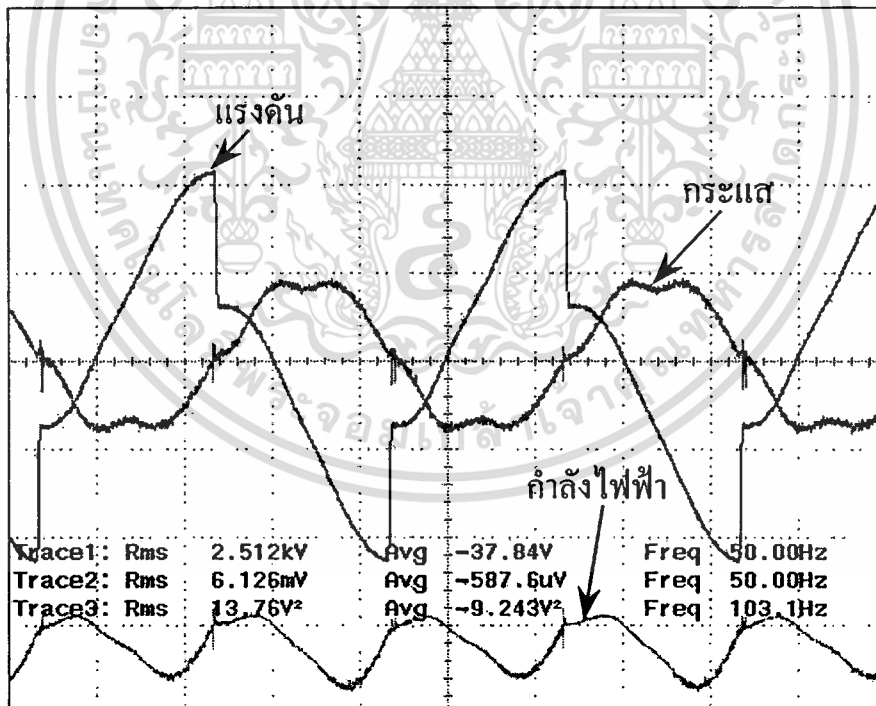
ก) ต้นแบบหมายเลข 5  $V_1 = 229.6 \text{ V}$ ,  $I_1 = 5.240 \text{ A}$ ,  $W_{\text{input}} = 1160 \text{ W}$

ข) ต้นแบบหมายเลข 6  $V_1 = 229.6 \text{ V}$ ,  $I_1 = 5.305 \text{ A}$ ,  $W_{\text{input}} = 1181.5 \text{ W}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



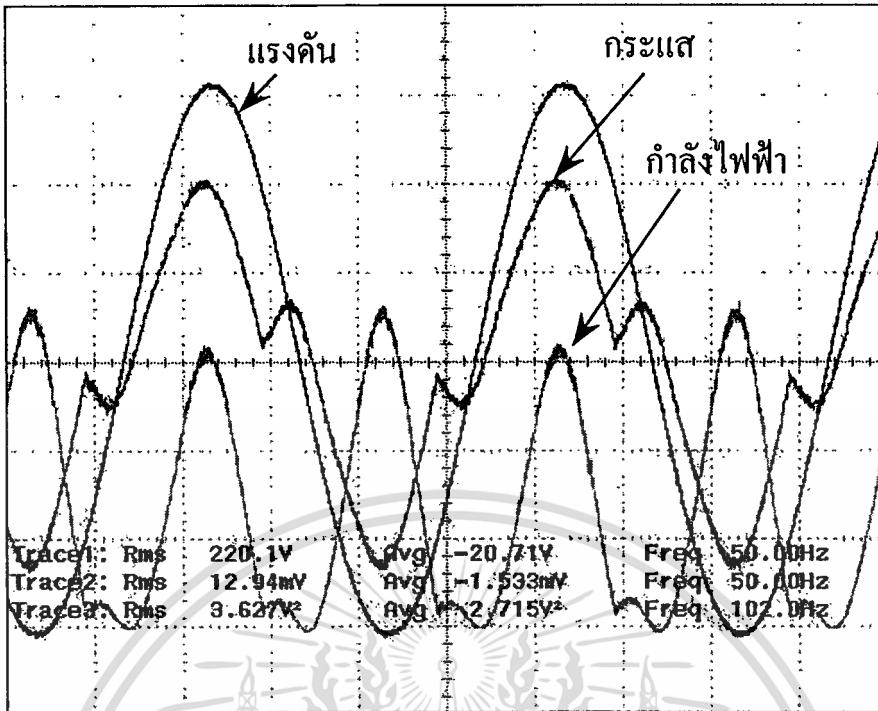
ข)

รูปที่ 4.19 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบต้นแบบหมายเลข 5 และ 6 ในสภาวะทำงาน

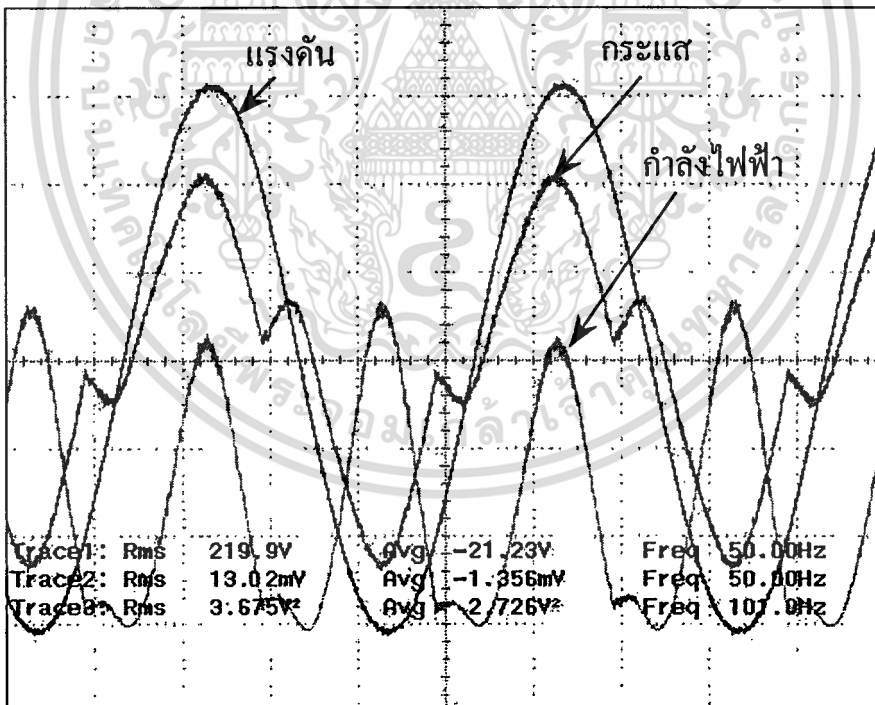
ก) ต้นแบบหมายเลข 5  $V_h = 2517$  V,  $I_2 = 0.612$  A,  $W_{\text{output}} = 926.2$  W

ข) ต้นแบบหมายเลข 6  $V_h = 2512$  V,  $I_2 = 0.612$  A,  $W_{\text{output}} = 924.3$  W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



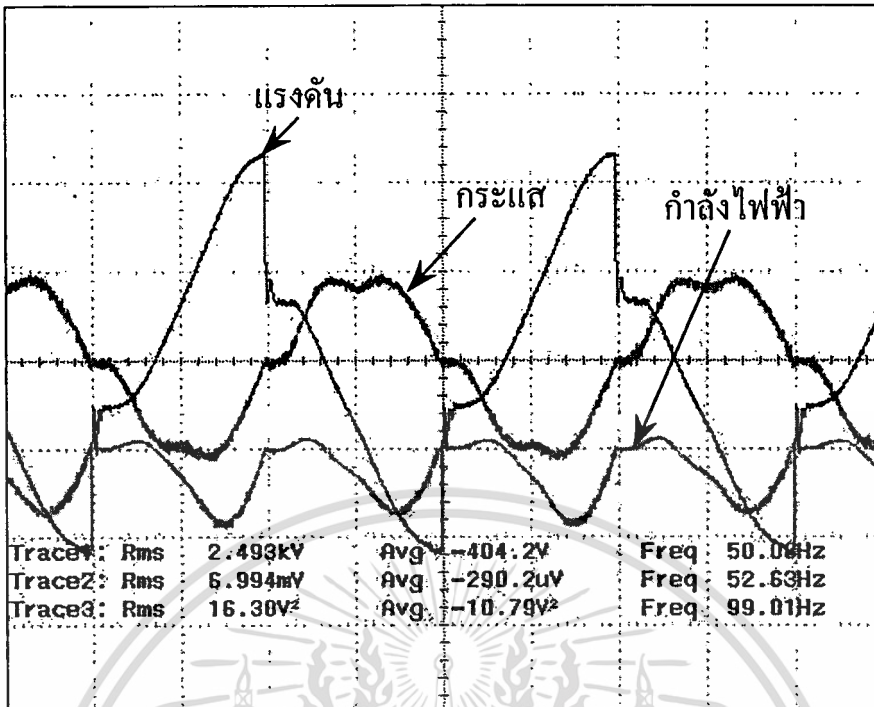
ข)

รูปที่ 4.20 สัญญาณอินพุตที่ได้จากการทดสอบต้นแบบหมายเลข 10 และ 11 ในสภาวะทำงาน

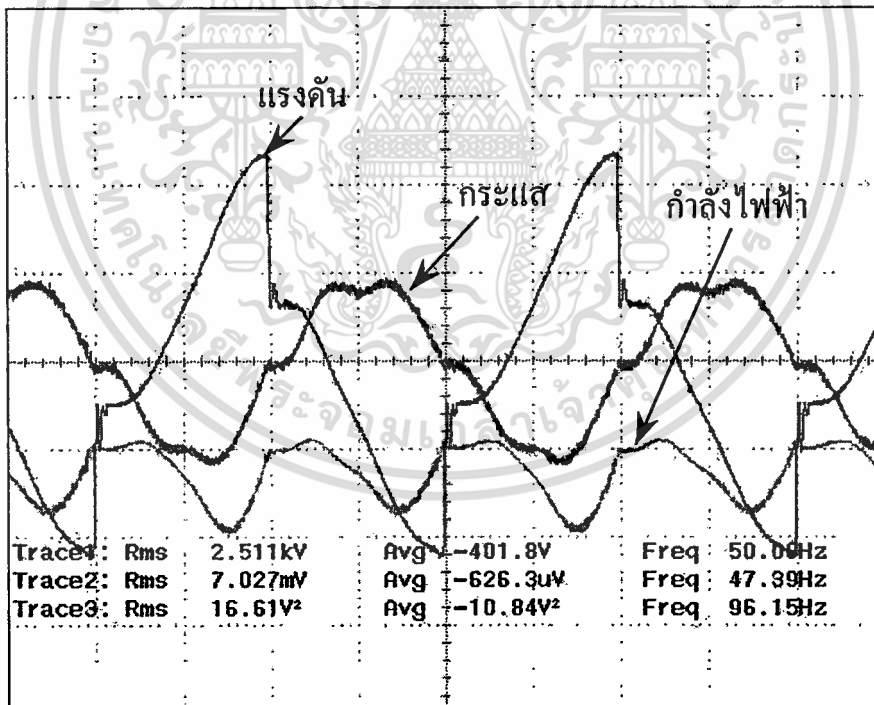
ก) ต้นแบบหมายเลข 10  $V_1 = 220.1 \text{ V}$ ,  $I_1 = 6.47 \text{ A}$ ,  $W_{\text{input}} = 1357.5 \text{ W}$

ข) ต้นแบบหมายเลข 11  $V_1 = 219.9 \text{ V}$ ,  $I_1 = 6.51 \text{ A}$ ,  $W_{\text{input}} = 1363 \text{ W}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



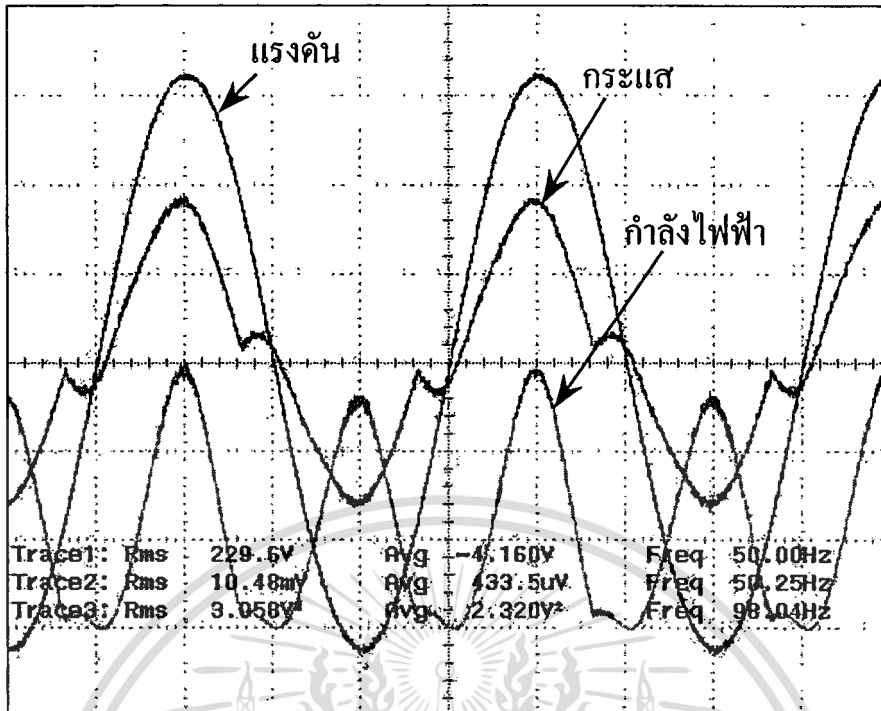
ข)

รูปที่ 4.21 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบต้นแบบหมายเลข 10 และ 11 ในสภาวะทำงาน

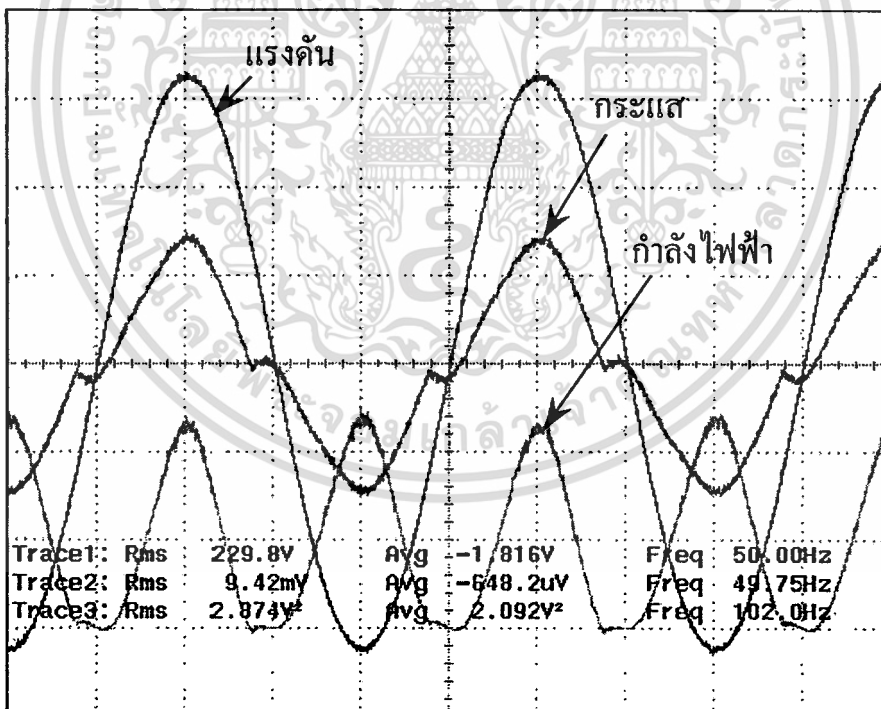
ก) ต้นแบบหมายเลข 10  $V_h = 2493$  V,  $I_2 = 0.699$  A,  $W_{\text{output}} = 1079$  W

ข) ต้นแบบหมายเลข 11  $V_h = 2511$  V,  $I_2 = 0.703$  A,  $W_{\text{output}} = 1084$  W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



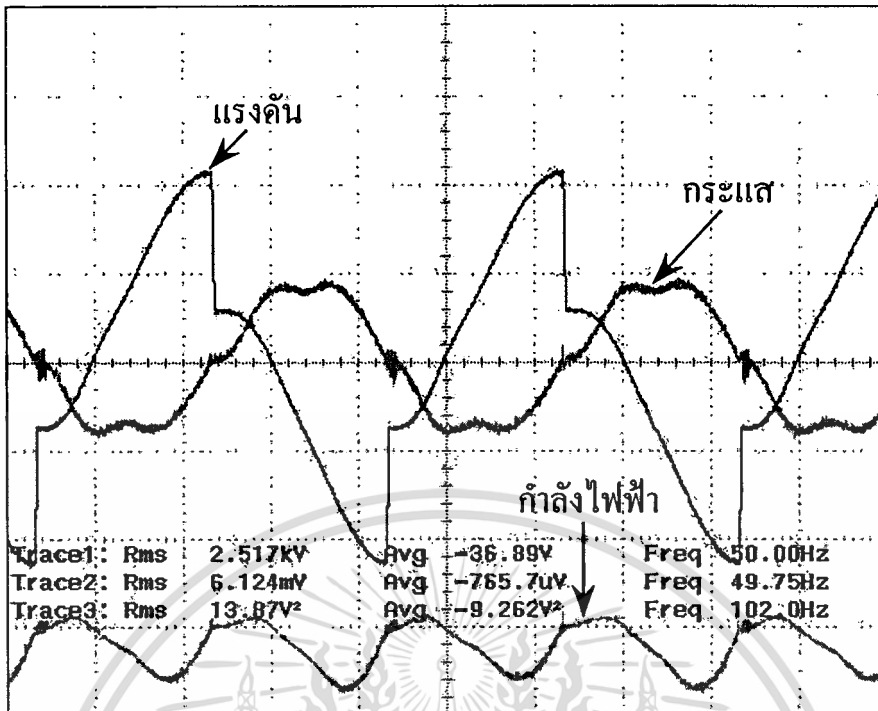
ข)

รูปที่ 4.22 สัญญาณอินพุตที่ได้จากการทดสอบคั่นแบบหมายเลข 5 และ 17 ในสภาวะทำงาน

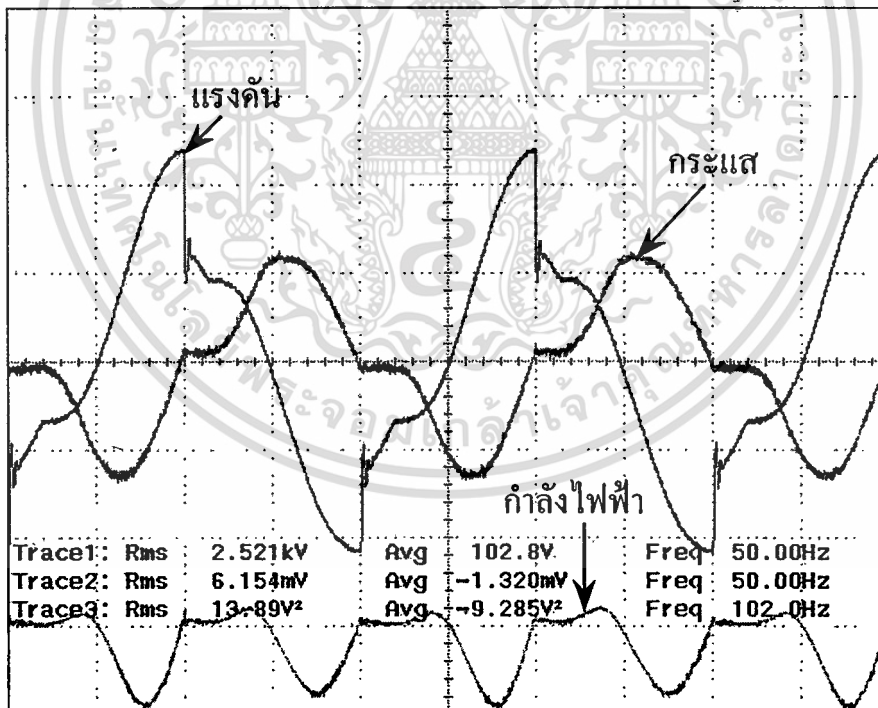
ก) คั่นแบบหมายเลข 5  $V_1 = 229.6 \text{ V}$ ,  $I_1 = 5.240 \text{ A}$ ,  $W_{\text{input}} = 1160 \text{ W}$

ข) คั่นแบบหมายเลข 17  $V_1 = 229.8 \text{ V}$ ,  $I_1 = 4.710 \text{ A}$ ,  $W_{\text{input}} = 1046 \text{ W}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



ข)

รูปที่ 4.23 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบต้นแบบหมายเลข 5 และ 17 ในสถานะทำงาน

ก) ต้นแบบหมายเลข 5  $V_h = 2517$  V,  $I_2 = 0.612$  A,  $W_{\text{output}} = 926.2$  W

ข) ต้นแบบหมายเลข 17  $V_h = 2521$  V,  $I_2 = 0.615$  A,  $W_{\text{output}} = 928.5$  W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.3 การทดสอบหาค่าลึงไฟฟ้าเอาท์พุทที่ตู้อบไมโครเวฟ

เป็นการทดสอบว่าค่าลึงไฟฟ้าภายในตู้อบไมโครเวฟได้พิกัดตามที่กำหนดหรือไม่ ซึ่งอาศัยสมการที่ 4.1 ตามมาตรฐาน IEC-335-2-25 [30] เป็นสมการที่ใช้คำนวณหาค่าลึงไฟฟ้าที่ตู้อบไมโครเวฟจากการทดสอบโดยวัดอุณหภูมิของน้ำดังนี้

$$P = \frac{4.187 \times M_w \times (T_2 - T_1) + 0.55 \times M_c (T_2 - T_0)}{t} \quad (4.1)$$

$P$  เป็นค่าลึงไฟฟ้าของตู้อบไมโครเวฟ (W)

$M_w, M_c$  เป็นมวลของน้ำและบีกเกอร์ (g) ตามลำดับ

$T_0, T_1$  และ  $T_2$  เป็นอุณหภูมิของห้อง อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ และอุณหภูมิของน้ำ

หลังจากการทดสอบเสร็จสิ้น ( $^{\circ}\text{C}$ ) ตามลำดับ

$t$  เป็นเวลาที่ใช้ในการทดสอบค่าลึงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่น้ำ โดยไม่คิดเวลาที่

แมกเนตรอนเริ่มทำงาน (วินาที)

ตารางที่ 4.18 ผลการทดสอบค่าลึงไฟฟ้าที่ตู้อบไมโครเวฟ พิกัด 700 , 850 และ 1000 W

พิกัด(W)	ต้นแบบหมายเลข	$T_0$	$T_1$	$T_2$	ค่าลึงไฟฟ้าที่ตู้อบไมโครเวฟ (W)
700	1	26.4	10.2	20.3	696
	2	25.3	10.1	20.2	701
	3	25.0	9.9	20.0	702
850	4	25.3	9.9	20.0	858
	5	26.2	10.1	20.2	853
	6	26.5	10.0	20.1	851
	7	26.6	9.9	20.0	850
	17	26.9	9.9	20.1	857
1000	9	27.1	9.8	20.0	1007
	10	26.4	9.9	20.0	1001
	11	25.4	10.1	20.1	999
	12	25.6	10.0	20.0	996

จากตารางที่ 4.18 จะเห็นว่าพิกัดค่าลึงไฟฟ้าที่ตู้อบไมโครเวฟที่ได้จากการทดสอบใกล้เคียงกับพิกัดที่ระบุไว้ ทำให้ตู้อบไมโครเวฟสามารถจ่ายค่าลึงไฟฟ้าได้ตามที่ระบุไว้

#### 4.4.4 การทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด

ความสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งในแกนเหล็กและในขดลวดขณะจ่ายภาระจะเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานความร้อนทำให้อุณหภูมิของแกนเหล็กและขดลวดเพิ่มสูงขึ้น อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นนี้จะเป็นอันตรายต่อฉนวนของขดลวดหากสูงเกินกว่าที่ฉนวนจะทนได้ ซึ่งอุณหภูมิที่ฉนวนแต่ละชนิดสามารถทนได้แสดงดังตารางที่ 4.19 โดยวิธีการวัดค่าอุณหภูมิเพิ่มจะกระทำโดยการวัดค่าความแตกต่างของความต้านทานในขดลวดจากอุณหภูมิปกติและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสูงสุดแล้วนำมาคำนวณหาค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งวิธีการวัดค่าความต้านทานตามมาตรฐาน UL 923 [31] สามารถทำได้ดังนี้

1. วัดค่าความต้านทานภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าและอุณหภูมิแวดล้อมขณะเริ่มทดสอบ
2. ใส่น้ำจำนวน 1 ลิตรลงในบีกเกอร์ แล้วนำไปไว้ในตู้อบไมโครเวฟ
3. ต่อหม้อแปลงไฟฟ้าเข้ากับตู้อบไมโครเวฟจากนั้นจ่ายภาระที่พิกัด
4. หลังจากตู้อบไมโครเวฟทำงานเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ให้ปลดแหล่งจ่ายไฟออกเพื่อให้ตู้อบไมโครเวฟหยุดทำงาน พร้อมกับใส่น้ำลงในบีกเกอร์เดิมอีก 1 ลิตร หลังจากนั้น 1 นาทีให้ทำการจ่ายแหล่งจ่ายไฟเข้าที่ตู้อบไมโครเวฟ เพื่อให้ตู้อบไมโครเวฟทำงานอีกครั้งหนึ่ง
5. หลังจากตู้อบไมโครเวฟทำงานเป็นเวลาอีก 1 ชั่วโมง รวมเป็นเวลาทั้งสิ้น 2 ชั่วโมงให้ปลดแหล่งจ่ายไฟออกพร้อมกับวัดค่าความต้านทานของขดลวดทั้ง 2 และบันทึกอุณหภูมิแวดล้อม หลังจากทดสอบเสร็จ
6. นำค่าความต้านและอุณหภูมิที่บันทึกได้นำไปคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ตู้อบไมโครเวฟโดยใช้สมการที่ 4.2 จะได้ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในขดลวด

$$\Delta T = \frac{R}{r}(k + T_3) - (k + T_4) \quad (4.2)$$

$\Delta T$  เป็นอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_3$  อุณหภูมิของห้องขณะเริ่มทำการทดสอบ ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_4$  อุณหภูมิของห้องขณะการทดสอบเสร็จ ( $^{\circ}\text{C}$ )

$r$  เป็นค่าความต้านทานของขดลวดขณะเริ่มทำการทดสอบ (โอห์ม)

$R$  เป็นค่าความต้านทานของขดลวดขณะทดสอบเสร็จสิ้น (โอห์ม)

$k$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของขดลวด (ทองแดง = 234.5, อลูมิเนียม = 225)

ตารางที่ 4.19 ความสามารถในการทนอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของฉนวนแต่ละชนิด

Item	Insulation Class	Method of determination	Limit of Temperature rise(°C)
Winding coil on transformer	105(A)	Thermocouple	65
		Resistance	75
	130(B)	Thermocouple	85
		Resistance	95
	155(F)	Thermocouple	110
		Resistance	120
	180(H)	Thermocouple	125
		Resistance	135
	200(N)	Thermocouple	140
		Resistance	150
	220(R)	Thermocouple	155
		Resistance	165

ตารางที่ 4.20 ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของขดลวด ของฉนวนแบบต่าง ๆ

ฉนวนแบบหมายเลข	ฉนวน	อุณหภูมิเพิ่มขึ้นของขดลวด (องศาเซลเซียส)			
		Primary Winding		Secondary Winding	
		ออกแบบ	ทดสอบ	ออกแบบ	ทดสอบ
700 W	1	-	146.4	-	153.8
	2	-	152.2	-	159.0
	3	-	157.2	-	161.1
850 W	4	128.1	122.3	128.4	131.0
	5	-	151.2	-	144.2
	6	148.5	153.4	146.2	148.2
	7	159.6	164.2	158.5	163.5
	17	-	72.8	-	84.9
1,000 W	9	129.8	134.1	128.9	129.4
	10	-	148.2	-	152.2
	11	147.1	151.1	149.2	154.4
	12	158.1	163.5	158.3	162.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากหน่วยงานต้นทาง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแสดงดังตารางที่ 4.20 ซึ่งจากผลการทดสอบจะเห็นว่าอุณหภูมิที่เพิ่มของขดลวด ของคั่นแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่ได้จากการออกแบบและทดสอบมีค่าผิดพลาดประมาณ 6 องศาเซลเซียส ทำให้มั่นใจได้ว่าสมการที่ใช้ในการคำนวณหาอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดสามารถนำไปเป็นเงื่อนไขได้จริง

#### 4.5 บทสรุป

จากผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟ พิกัด 700 W 120/2070 V 60 Hz , 850 W 230/2220 V 50 Hz และ 1,000 W 220/2200 V 50 Hz โดยมีเป้าหมายให้มีราคารวมของวัสดุต่ำกว่าได้เงื่อนไขของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดและประสิทธิภาพที่สูงขึ้น จากผลการออกแบบได้นำมาสร้างคั่นแบบเพื่อทดสอบหาคุณลักษณะต่าง ๆ ได้แก่การทดสอบสถานะไร้โหลด , สถานะโหลด , กำลังไฟฟ้าอินพุทของหม้อแปลงไฟฟ้า , กำลังไฟฟ้าเอาต์พุทของหม้อแปลงไฟฟ้า , กำลังไฟฟ้าเอาต์พุทที่ตู้อบไมโครเวฟ และการทดสอบหาอุณหภูมิเพิ่มขณะใช้งานที่พิกัดของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง

ผลการทดสอบสถานะไร้โหลด จะเห็นว่ากระแสและกำลังไฟฟ้าของคั่นแบบหมายเลข 17 มีค่าน้อยเนื่องจากคั่นแบบหมายเลข 17 ออกแบบที่ค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่น้อยกว่าคั่นแบบอื่น แต่ยังคงจ่ายแรงดันค้ำนทุติยภูมิได้เช่นเดียวกัน

ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าอินพุทและเอาต์พุทของหม้อแปลงไฟฟ้า จากการทดสอบจะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุทของหม้อแปลงไฟฟ้าที่พิกัดต่าง ๆ ยังคงมีค่าใกล้เคียงกันส่วนกำลังไฟฟ้าอินพุทจะมีค่าแตกต่างกันออกไปโดยที่ถ้ากำหนดอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดให้มีค่าน้อยลงก็จะทำให้กำลังไฟฟ้าอินพุทมีค่าน้อยลงด้วยเนื่องจากค่าความสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้ามี่ค่าน้อยลง ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ดีขึ้น

จากผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าเอาต์พุทที่ตู้อบไมโครเวฟ จะเห็นว่าหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัดต่าง ๆ สามารถจ่ายโหลดที่พิกัดของตู้อบไมโครเวฟได้ใกล้เคียงกับพิกัดที่ตั้งไว้

ในส่วนของการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด จากผลการทดสอบจะเห็นว่าอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดจากการคำนวณและทดสอบมีค่าใกล้เคียงกันทำให้มั่นใจได้ว่าสมการที่ใช้ในการคำนวณหาอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดสามารถนำไปใช้งานได้จริงภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้เสนอวิธีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงโดยอาศัยทฤษฎีของการหาค่าที่เหมาะสมแบบจินตคณิตอวกาศ เพื่อออกแบบให้ได้หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่มีราคาต่ำ พร้อมทั้งสามารถคำนวณหาอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด และนำมาเป็นเงื่อนไขในการออกแบบ วิธีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่ใช้กันโดยทั่วไป จะอาศัยประสบการณ์ของผู้ออกแบบเป็นหลัก ซึ่งถ้าผู้ออกแบบขาดประสบการณ์ในการออกแบบเป็นไปได้ยากมากที่จะสามารถออกแบบได้ตามที่ลูกค้ากำหนด หรืออาจจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาที่นาน เนื่องจากหลังจากการออกแบบแล้วจำเป็นต้องสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงเพื่อทดสอบหาค่าลึงไฟฟ้าเข้าที่ทุกที่ดูอบไมโครเวฟ และทดสอบหาอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด ว่าเกินกว่าที่ลูกค้ากำหนดหรือไม่หากยังไม่เป็นที่น่าพอใจก็จะทำการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงใหม่จนกว่าผลการทดสอบเป็นที่น่าพอใจ ถึงแม้ว่าจะสามารถออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงได้แล้วก็ตามหากลูกค้าต้องการหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยที่ต้นทุนราคาต่ำสุด หรือถ้าราคาวัสดุลวดตัวนำเกิดการเปลี่ยนแปลงไป ผู้ออกแบบที่อาศัยประสบการณ์ในการออกแบบจะทราบได้อย่างไรว่าควรปรับเปลี่ยนขนาด โครงสร้างของแกนเหล็กและขดลวดอย่างไรที่ทำให้ความต้องการของผู้ซื้อหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงพอใจและผู้ผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงมีผลกำไรสูงสุด ก็จะต้องทำการออกแบบโดยใช้วิธีลองผิดลองถูกซึ่งขึ้นกับประสบการณ์ของผู้ออกแบบเช่น การปรับขนาดของแกนเหล็ก  $D, 2E$  หรือปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นของกระแส  $J_{pri}, J_{sec}$  ที่ใช้ แต่เป็นไปได้ยากที่ผู้ออกแบบจะทราบได้ว่าควรที่จะปรับขนาดของแกนเหล็ก และค่าความหนาแน่นของกระแสเป็นเท่าใด จึงจะได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีคุณลักษณะตามที่ผู้สั่งซื้อต้องการ ซึ่งวิธีนี้จะพบว่าทำให้เสียเวลาในการออกแบบและอาจจะสูญเสียโอกาสในการทำธุรกิจสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงพิศคนั้น เนื่องจากผู้ออกแบบยังไม่สามารถออกแบบได้ตามที่ผู้สั่งซื้อได้ทันตามกำหนดเวลาเพราะจำเป็นต้องสร้างและทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง ให้มีอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดไม่เกินกว่าที่ผู้สั่งซื้อกำหนด ซึ่งเป็นไปได้ยากมากที่ผู้ออกแบบที่อาศัยประสบการณ์จากการทำงานอย่างเดียวยังจะสามารถออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงได้ตามความต้องการของลูกค้า ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอทฤษฎีการหาค่าที่เหมาะสมแบบจินตคณิตอวกาศและทฤษฎีเบื้องต้นของการถ่ายเทความร้อน นำมาประยุกต์รวมกันเพื่อหาโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่มีราคาต่ำพร้อมทั้งสามารถคำนวณหาอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแล้วนำมาเป็นเงื่อนไขในการออกแบบได้ เพื่อที่จะทำให้ได้หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่มีคุณลักษณะตามที่ผู้สั่งซื้อต้องการ โดยในการออกแบบจะเลือกใช้โครงสร้างของแกนเหล็ก ( $D, 2E$ ) และค่าความหนาแน่นของกระแสทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ ( $J_{pri}, J_{sec}$ ) เป็นตัวแปรของการออกแบบซึ่งแบ่งเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่แบบ 2 และ 4 ตัวแปรภาษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการออกแบบและทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงแบบ 2 ตัวแปร  $D, 2E$  พิกัด 700 W 120/2270 V 60 Hz แกนเหล็กชนิด 50RM800 จำนวน 3 ดันแบบ คือดันแบบหมายเลข 1, ดันแบบหมายเลข 2 และดันแบบหมายเลข 3 จะเห็นว่าดันแบบหมายเลข 2 มีราคาลดลงจากดันแบบหมายเลข 1 อยู่ 3.2 บาทหรือประมาณ 3% และดันแบบหมายเลข 3 มีราคาลดลงจากดันแบบหมายเลข 1 อยู่ 4.7 บาทหรือประมาณ 4.3% จะเห็นว่าราคาถูกลงเพียงเล็กน้อยแต่ไม่ได้หมายความว่าไม่มีประโยชน์ ซึ่งในความเป็นจริงสำหรับการทำธุรกิจเกี่ยวกับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟจะมียอดการผลิตเฉลี่ยต่อหนึ่งพิกัดของตู้อบไมโครเวฟประมาณ 50,000 - 300,000 ตัว ซึ่งหมายความว่าถ้านำดันแบบหมายเลข 2 มาใช้แทนดันแบบหมายเลข 1 เท่ากับจะทำให้บริษัทผู้ผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงมีผลกำไรสูงขึ้นอีก 160,000 - 960,000 บาท และในดันแบบหมายเลข 3 ก็เช่นเดียวกันแต่ดันแบบหมายเลข 3 ออกแบบโดยเพิ่มค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กขึ้นอีก 0.05 เทสลา จากผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดจะเห็นว่าดันแบบหมายเลข 3 มีอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดสูงที่สุด แต่ก็ยังไม่เกินกว่ามาตรฐาน UL923 กำหนดไว้

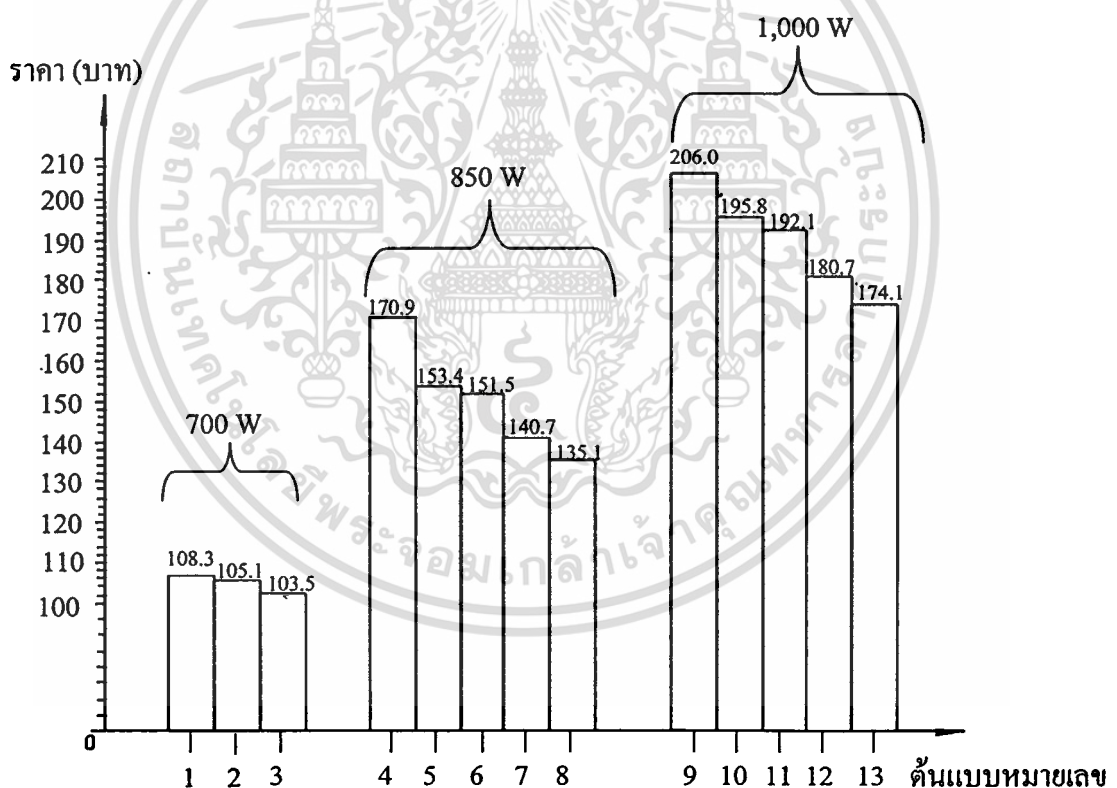
ผลการออกแบบและทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงแบบ 4 ตัวแปร  $D, 2E, J_{pri}, J_{sec}$  พิกัด 850 W 230/2220 V 50 Hz โดยมีอุณหภูมิเพิ่มเป็นเงื่อนไขและราคาของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลง (ปฐมภูมิ 107.72 บาท/กิโลกรัม, ทติภูมิ 130.42 บาท/กิโลกรัม, แกนเหล็ก 22.91 บาท/กิโลกรัม) จำนวน 5 ดันแบบ คือดันแบบหมายเลข 4, 5, 6, 7 และ 8 เมื่อกำหนดอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดน้อยกว่าดันแบบตามลักษณะโครงสร้างการผลิตของโรงงานจะเห็นว่าราคาของดันแบบหมายเลข 4 มีราคาเพิ่มมากขึ้นกว่าดันแบบหมายเลข 5 อยู่ 17.5 บาทหรือประมาณ 11.4 % เนื่องจากในการกำหนดอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดให้น้อยลงจำเป็นต้องลดค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าลงทำให้ค่าความหนาแน่นของกระแสลดลงเมื่อความหนาแน่นของกระแสลดลงแสดงว่าต้องใช้ขนาดลวดตัวนำที่ใหญ่ขึ้น ทำให้น้ำหนักลวดเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ราคาสูงขึ้น แต่ก็สามารถมั่นใจได้ว่าดันแบบหมายเลข 4 มีราคาในการสร้างดันแบบต่ำที่สุดสำหรับอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดที่กำหนดเป็นเงื่อนไข สำหรับดันแบบหมายเลข 6, 7 และ 8 มีราคาลดลงจากดันแบบหมายเลข 5 อยู่ 1.9 บาท (ประมาณ 1.2 %), 12.7 บาท(ประมาณ 8.3 %), และ 18.3 บาท (ประมาณ 11.9 %) ตามลำดับจะเห็นว่าราคาของวัสดุที่ใช้ในการสร้างดันแบบมีราคาถูกลงมากขึ้นเมื่อกำหนดอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดที่มากขึ้นเนื่องจากในการกำหนดอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดให้มากขึ้นทำให้ค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าความหนาแน่นของกระแสเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของกระแสเพิ่มขึ้นจะใช้ขนาดลวดตัวนำที่เล็กลง ทำให้น้ำหนักลวดที่ใช้ลดลงส่งผลให้ราคาในการสร้างลดลง จากผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ตู้อบไมโครเวฟและทดสอบหาอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดจะเห็นว่าดันแบบดังกล่าว สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ใกล้เคียงกับพิกัดที่ผู้สั่งซื้อหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงต้องการ ในส่วนการทดสอบหาอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดจะเห็นว่าดันแบบต่าง ๆ มีค่าผิดพลาดจากการคำนวณไม่เกิน 6 องศาเซลเซียส ทำให้มั่นใจได้ว่าสมการที่ใช้คำนวณหาอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดมีค่าผิดพลาดไม่เกิน 5% และผลการออกแบบและทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันสูงพิกัด 1,000 W 220/2200 V 50Hz โดยมีอุณหภูมิเพิ่มเป็นเงื่อนไขและราคาของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลง(ปฐมภูมิ 107.72 บาท/กิโลกรัม, ทุติภูมิ 130.42 บาท/กิโลกรัม, แกนเหล็ก 22.91 บาท/กิโลกรัม) จำนวน 5 ดันแบบ คือดันแบบหมายเลข 9, 10, 11, 12 และ 13 ก็เช่นเดียวกันและสามารถพิจารณาราคาต้นทุนในการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงของดันแบบต่าง ๆ ดังรูปที่ 5.1

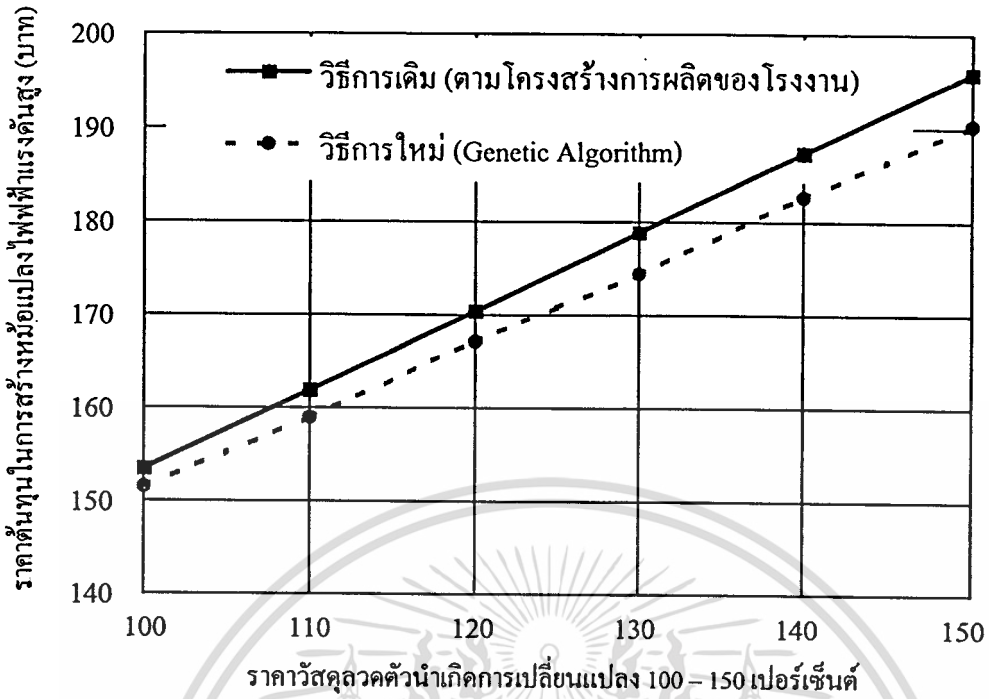
เมื่อวัสดุลดตัวนำเกิดการขาดแคลนบริษัทผู้ผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงจำเป็นต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศทำให้ราคาวัสดุเพิ่มสูงขึ้น (ปฐมภูมิ 250 บาท/กิโลกรัม, ทุติภูมิ 300 บาท/กิโลกรัม) ถ้าบริษัททำการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าใหม่โดยใช้จินตคณิตกริธีมจะเห็นว่าราคาค้นทุนในการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงจะลดลงดังดันแบบหมายเลข 14 และ 15

จากผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงให้มีประสิทธิภาพสูงจะเห็นว่าราคาจะสูงมากขึ้นเมื่อกำหนดประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ดังดันแบบหมายเลข 16, 17 และ 18 และจากผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดพบว่าอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดที่น้อยลงเนื่องจากค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงมีค่าลดต่ำลง

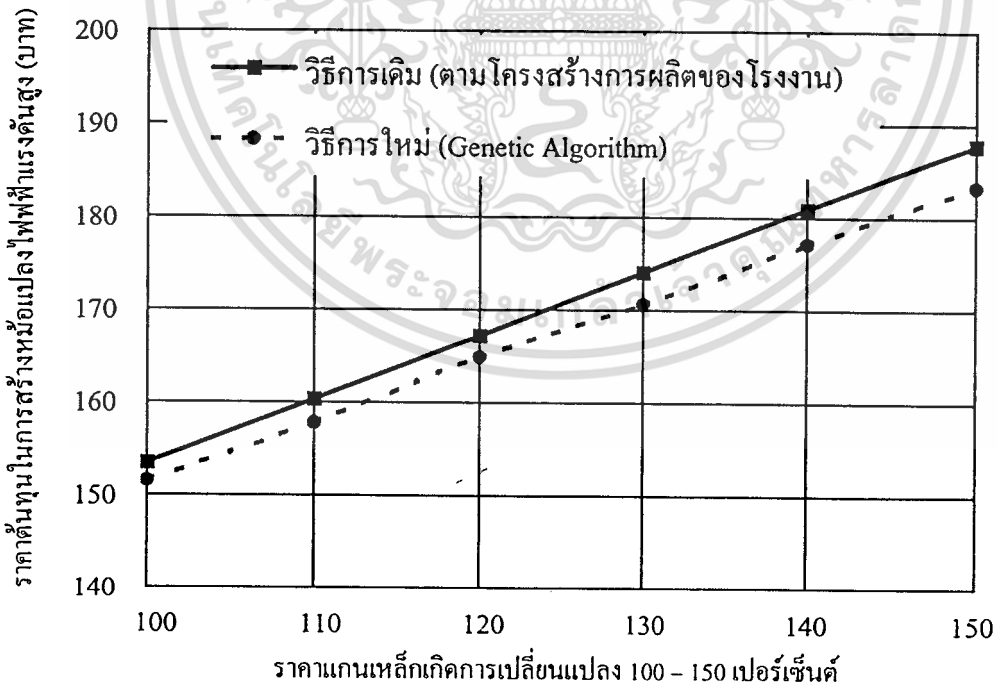


รูปที่ 5.1 ราคาต้นทุนในการออกแบบโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง (ปฐมภูมิ 107.72 , ทุติภูมิ 130.42 และแกนเหล็ก 22.91 บาท/กิโลกรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบราคาต้นทุนในการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง เมื่อราคาวัสดุวัตถุดิบเกิดการเปลี่ยนแปลง (เมื่อเทียบกับต้นแบบหมายเลข 5)



รูปที่ 5.3 การเปรียบเทียบราคาต้นทุนในการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง เมื่อราคาแกนเหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลง (เมื่อเทียบกับต้นแบบหมายเลข 5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.2 เมื่อราคาวัสดุลดตัวนำเกิดการเปลี่ยนแปลงไป (แกน X คือ ราคาวัสดุลดตัวนำ เกิดการเปลี่ยนแปลงไป 100 – 150 เปอร์เซ็นต์ , แกน Y คือ ราคาต้นทุนในการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง) จะเห็นว่าการออกแบบโดยใช้เงินดักอัตราริธีมยังคงมีราคาต้นทุนในการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่ต่ำกว่าต้นแบบของโรงงาน (ต้นแบบหมายเลข 5) ประมาณ 1.3 – 2.8 %

จากรูปที่ 5.3 เมื่อราคาแกนเหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลงไป (แกน X คือ ราคาแกนเหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลงไป 100 – 150 เปอร์เซ็นต์ , แกน Y คือราคาต้นทุนในการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง) จะเห็นว่าการออกแบบโดยใช้เงินดักอัตราริธีมยังคงมีราคาต้นทุนในการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่ต่ำกว่าต้นแบบของโรงงาน (ต้นแบบหมายเลข 5) ประมาณ 1.3 – 2.4 %

จากผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง ซึ่งกำหนดเป้าหมายในการออกแบบคือราคาต้นทุนในการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงมีราคาต่ำสุด ภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดที่กำหนด หรือประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้าที่สูงขึ้น ทำให้เห็นได้ว่าวิธีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงโดยใช้เงินดักอัตราริธีม สามารถออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงให้มีราคาต่ำภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดได้ นอกจากการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการออกแบบแล้วเมื่อราคาวัสดุลดตัวนำหรือราคาแกนเหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลงไป ( บาท/กิโลกรัม ) การออกแบบโดยใช้เงินดักอัตราริธีมยังสามารถออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงให้มีราคาต่ำกว่าต้นแบบของโรงงานได้ ผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบสามารถนำไปสร้างต้นแบบได้ และผลจากการทดสอบต้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่สร้างขึ้นจะเห็นได้ว่าสามารถนำไปใช้งานได้ตามที่ออกแบบไว้พร้อมทั้งผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดเป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ จากที่กล่าวมาทั้งหมดนี้สรุปได้ว่าการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงให้มีราคาต่ำโดยใช้เงินดักอัตราริธีมสามารถออกแบบได้ตามเป้าหมายและเงื่อนไขที่ตั้งไว้

ในส่วนข้อเสนอแนะสำหรับการออกแบบ เนื่องจากการคำนวณหาอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดในงานวิจัยนี้ยังจำเป็นต้องคงที่ระบบการอบวานิช และระบบฉนวนในการห่อหุ้มขดลวด ดังนั้นหากสามารถหาวิธีการคำนวณอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด โดยวิเคราะห์ความร้อนในรูปของระบบโครงตาข่าย [27] ก็ไม่จำเป็นต้องคงที่ระบบการอบวานิช และระบบฉนวน พร้อมทั้งทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบลักษณะแกนเหล็กรูปร่างใหม่และชนิดแกนเหล็กที่เปลี่ยนแปลงไป

สำหรับหลักการหาค่าที่เหมาะสมแบบเงินดักอัตราริธีมยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสิ่งที่อยู่รอบตัวเราได้เช่น ออกแบบระบบระบายความร้อนว่าออกแบบลักษณะใดที่มีการระบายความร้อนดีที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด, ออกแบบรูปทรงของรตัวรูปทรงใดมีแรงต้านทานลมน้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขของความแข็งแรง, ออกแบบระบบการติดตั้งโคมไฟว่าตำแหน่งใดให้ปริมาณแสงมากที่สุดในบริเวณที่ต้องการ ซึ่งการที่จะนำหลักการหาค่าที่เหมาะสมแบบเงินดักอัตราริธีมไปใช้ออกแบบสิ่งต่าง ๆ ได้นั้น ผู้ออกแบบจำเป็นต้องศึกษาหลักการหาค่าที่เหมาะสมตลอดจนอัตราริธีมของเงินดักอย่างท่องแท้ เมื่อผู้ออกแบบเข้าใจทฤษฎีแล้วก็สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบสิ่งที่ต้องการได้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] J. C. Gallawa, **Introduction to the High Voltage System Used in Microwave Ovens; The Voltage Doubler Circuit Used In Microwave Oven High Voltage System**, <http://www.gallawa.com/microtech>, Copyright 1989-2002.
- [2] Eric Lowdon. **Practical Transformer Design Handbook**. 2nd Ed. TAB BOOK. Inc. 1989.
- [3] Catalog of Thai Hitachi Enamel Standard , February 2000
- [4] McLyman, Colonel William T. **Transformer and Inductor Design Handbook**. New York : Marcel Dekker, Inc. 1988.
- [5] Nasar S.A. **Electromechanics and Electric Machines**. 2nd Ed. New York : Jonh Wiley & Sons, Inc. 1983.
- [6] พีรศักดิ์ วรสุนทรโรสถ. **เครื่องจักรไฟฟ้า 1**. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตพระนครเหนือ. 2523.
- [7] Ramamoorthy M. **Computer-Aided Design of Electrical Equipment**. New Delhi : Afliated East-West Press PVT . 1987.
- [8] Petkov R. "Optimum design of a high-power, high-frequency transformer." *IEEE Trans. on Power Electronics.*, vol. 11, no. 1, January 1996. Pp. 33-42.
- [9] Barba P.D., Navarra P., Savini A. and Sikora R. "Optimum Design of Iron-Core Electromagnets." *IEEE Trans. on Magnetics.*, vol. 26, no. 2, March 1990. pp. 646-649.
- [10] Kang M., Enjeti P.N. and Pitel I.J. "Analysis and Design of Electronic Transformers for Electric Power Distribution System." *Proc. IEEE-IASAM, New Orleans, USA, Oct 1997.* pp. 1689-1694.
- [11] Vandelac J.P., Ziogas P.D. "A Novel Approach for Minimizing High-Frequency Transformer Copper Losses." *IEEE Trans. on Power Electronics.*, vol. 3, on. 3, July 1988. Pp. 266-277.
- [12] Hurley W.G., Wolfle W.H. and Breslin J.G. "Optimized Transformer Design: Inclusive of High-Frequency Effects." *IEEE Trans. on Power Electronics.*, vol. 13, no. 4, July 1998. pp. 651-659.
- [13] Ngo Khai D.T., Alley R.P., Yerman A.J. and Kuo M.H. "Design Issues for the Transformer in a Low-Voltage Power Supply with High Efficiency and High Power Density." *IEEE Trans. on Power Electronics.*, vol. 7, no. 3, July 1992. pp. 592-600.

- [14] Chaiwut Chat-uthai. "The Development of Non-Linear Constrained Optimisation Methods Applied to Electromagnetic Devices." Ph.D.Thesis of the University of London and for the Diploma of Membership of Imperial College. 1995.
- [15] Ashok D. Belegundu., Tirupathi R. Chandrupatla. **Optimization Concepts and Applications in Engineering.** New Jersey : Prentice-Hall, Inc. 1999.
- [16] S.S. Rao. **Optimization Theory and Applications.** 2<sup>nd</sup> Ed. New Delhi : Wiley Eastern, 1994.
- [17] Garret N. Vanderplaats. **Numerical Optimization Techniques for Engineering Design with Applications.** New York : McGraw-Hill, Inc. 1984.
- [18] Panos Y. Papalambros., Douglass J. Wilde. **Priciples of Optimal Design Modeling and Computation.** New York : Cambridge University Press. 1988.
- [19] Stephen G. Nash., Ariela Sofer. **Liner and Nonlinear Programming.** International Editions. Singapore : McGraw-Hill. Inc. 1996.
- [20] ชีรพล โพธิ์พงษ์วิวัฒน์ 2545 , “ การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม” , วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [21] Zbigniew Michalewicz. **Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs.** 3<sup>rd</sup> Ed. New York : Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 1996.
- [22] Mitsuo Gen., Runwei Cheng. **Genetic Algorithms & Engineering Design.** New York : John Wiley & Sons, Inc. 1996.
- [23] David E. Goldberg. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning.** Reading, Massachusetts : Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1989.
- [24] กาญจน์ วงศ์วิภาพร 2541, “การจัดตารางสอนของโรงเรียนแบบอัตโนมัติโดยจีเนติก อัลกอริทึม” , วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ บัณฑิตวิทยาลัย , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [25] Fran P.Incropera and David P.De Witt , **Fundamentals of Heat and Mass Transfer,** Singapore, 1990.
- [26] James R. Welty et.al, **Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer,** Singapore, 1984.
- [27] John H,Lienhard, **A Heat Transfer Textbook,** Second Edition, United States of America, 1987.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [28] Members of the Staff of the Department of Electrical Engineering Massachusetts Institute of Technology. **Magnetic Circuits and Transformers**. New York : John Wiley & Sons, Inc. 1954.
- [29] P.N. Murgatroyd. “Optimal designs for multilayer air-cored toroidal inductors with circular windows.” IEE Proc., Vol. 135, Pt.B, No. 5, September 1988. Pp202-209.
- [30] P.N. Murgatroyd. “The Brooks inductor: a study of optimal solenoid cross-sections.” IEE Proceedings., Vol. 133, Pt.B, No. 5, September 1986. pp. 309-314.
- [31] IEC 335-2-25 Part 2 :Particular Requirements For Microwave Oven, Third edition, 1993.
- [32] UL 923 Standard for Microwave Cooking Appliances, Fourth Edition, November, 1995.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

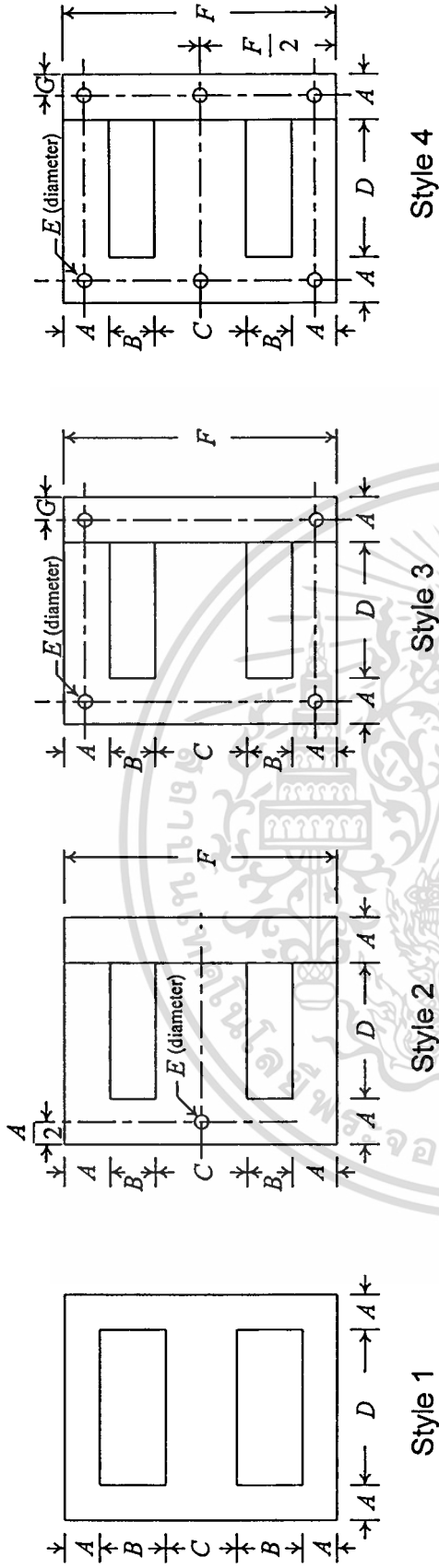
ตารางที่ ก.1 ขนาดและคุณสมบัติของลวดตัวนำ

DIA (mm)	AEW	UEW/PEW	sq. mm.	g/m	L ohm/km	kg/ohm
2.60		2.728	5.309292	47.21000	3.280	14.39000
2.30		2.422	4.154756	36.95000	4.191	8.81000
2.00		2.118	3.141593	27.94000	5.543	5.04000
1.80		1.914	2.544690	22.63000	6.913	3.27000
1.70		1.814	2.269801	20.19000	7.595	2.66000
1.60		1.721	2.010619	17.88000	8.743	2.05000
1.50		1.612	1.767146	15.71000	9.756	1.61000
1.40		1.508	1.539380	13.69000	11.200	1.00000
1.30		1.408	1.327323	11.80000	12.990	0.90800
1.20		1.304	1.130973	10.06000	15.560	0.64700
1.10		1.204	0.950332	8.45000	18.540	0.45600
1.00	1.062	1.102	0.785398	6.98000	22.400	0.31600
0.95	1.008	1.038	0.708822	6.30500	24.320	0.25900
0.90	0.956	0.986	0.636173	5.65600	27.660	0.20400
0.85	0.904	0.934	0.567450	5.04200	30.380	0.16600
0.80	0.852	0.882	0.502655	4.47000	35.000	0.12800
0.75	0.798	0.830	0.441786	3.92900	39.030	0.10100
0.70	0.746	0.776	0.384845	3.42200	45.720	0.07500
0.65	0.694	0.724	0.331831	2.95100	53.020	0.05600
0.60	0.644	0.672	0.282743	2.51400	62.230	0.04000
0.55	0.592	0.620	0.237583	2.11300	74.040	28.50000
0.50	0.542	0.560	0.196350	1.74600	89.580	19.50000
0.45	0.49	0.508	0.159043	1.41400	111.800	12.60000
0.40	0.439	0.456	0.125664	1.11790	141.400	7.91000
0.37	0.407	0.424	0.107521	0.95600	161.500	5.92000
0.35	0.387	0.402	0.096211	0.85550	184.700	4.63000
0.32	0.357	0.372	0.080425	0.71520	221.000	3.24000
0.30	0.337	0.352	0.070686	0.63000	254.000	2.48000
0.29	0.324	0.340	0.066052	0.58740	269.100	2.18000
0.28	0.314	0.330	0.061575	0.55000	294.100	1.87000
0.27	0.304	0.320	0.057256	0.51000	316.600	1.61000
0.26	0.294	0.310	0.053093	0.47210	334.800	1.41000
0.25	0.284	0.298	0.049087	0.44000	370.200	1.19000
0.24	0.274	0.288	0.045239	0.41000	402.200	1.02000
0.23	0.264	0.278	0.041548	0.36950	427.800	0.86400
0.22	0.252	0.266	0.038013	0.34000	480.100	0.70800
0.21	0.241	0.256	0.034636	0.31000	522.800	0.55930
0.20	0.231	0.246	0.031416	0.27940	565.700	0.49400
0.19	0.221	0.236	0.028353	0.25000	640.600	0.39000
0.18	0.211	0.226	0.025447	0.22630	693.400	0.32600
0.17	0.199	0.214	0.022698	0.21000	803.200	0.26100
0.16	0.189	0.204	0.020106	0.17880	883.900	0.20200
0.15	0.177	0.192	0.017671	0.15710	1006.000	0.15600
0.14	0.167	0.182	0.015394	0.13690	1155.000	0.11850
0.13	0.157	0.172	0.013273	0.11800	1325.000	0.08900
0.12	0.147	0.162	0.011310	0.10060	1572.000	0.06390
0.11	0.135	0.150	0.009503	0.08450	1876.000	0.04500
0.10	0.125	0.140	0.007854	0.06980	2263.000	0.03080
0.09	0.113		0.006362	0.05656	2762.000	0.02040
0.08	0.103		0.005027	0.04471	3500.000	0.01270
0.07	0.091		0.003848	0.03422	4578.000	0.00740
0.06	0.081		0.002827	0.02514	6223.000	0.00400
0.05	0.069		0.001963	0.01746	8960.000	0.00195
0.04	0.056		0.001257	0.01118	14000.000	0.00080

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ ข.1 ขนาดของแกนเหล็กที่มีการใช้งานในปัจจุบัน

Lamination	Style	Units	Dimensions						
			A	B	C	D	E	F	G
EE 2425	1	in	1/8	1/4	1/4	1/2			
		mm	3.2	6.4	6.4	12.7			
EE 2627	1	in	3/16	1/4	3/8	11/16			
		mm	4.8	6.4	9.5	17.5			
EI-76.2	2	in	1/2	1/2	1	1 1/2		3	
		mm	12.7	12.7	25.4	38.1		76.2	
EI-81	2	in	17/32	17/32	1 1/16	1 19/32		3 3/16	
		mm	13.5	13.5	27	40.5		81	
EI-85.8	2	in	9/16	9/16	1 1/8	1 11/16		3 3/8	
		mm	14.3	14.3	28.6	42.9		85.8	
EI-90	2	in	19/32	19/32	1 3/16	1 25/32		3 9/16	
		mm	15	15	30	45		90	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

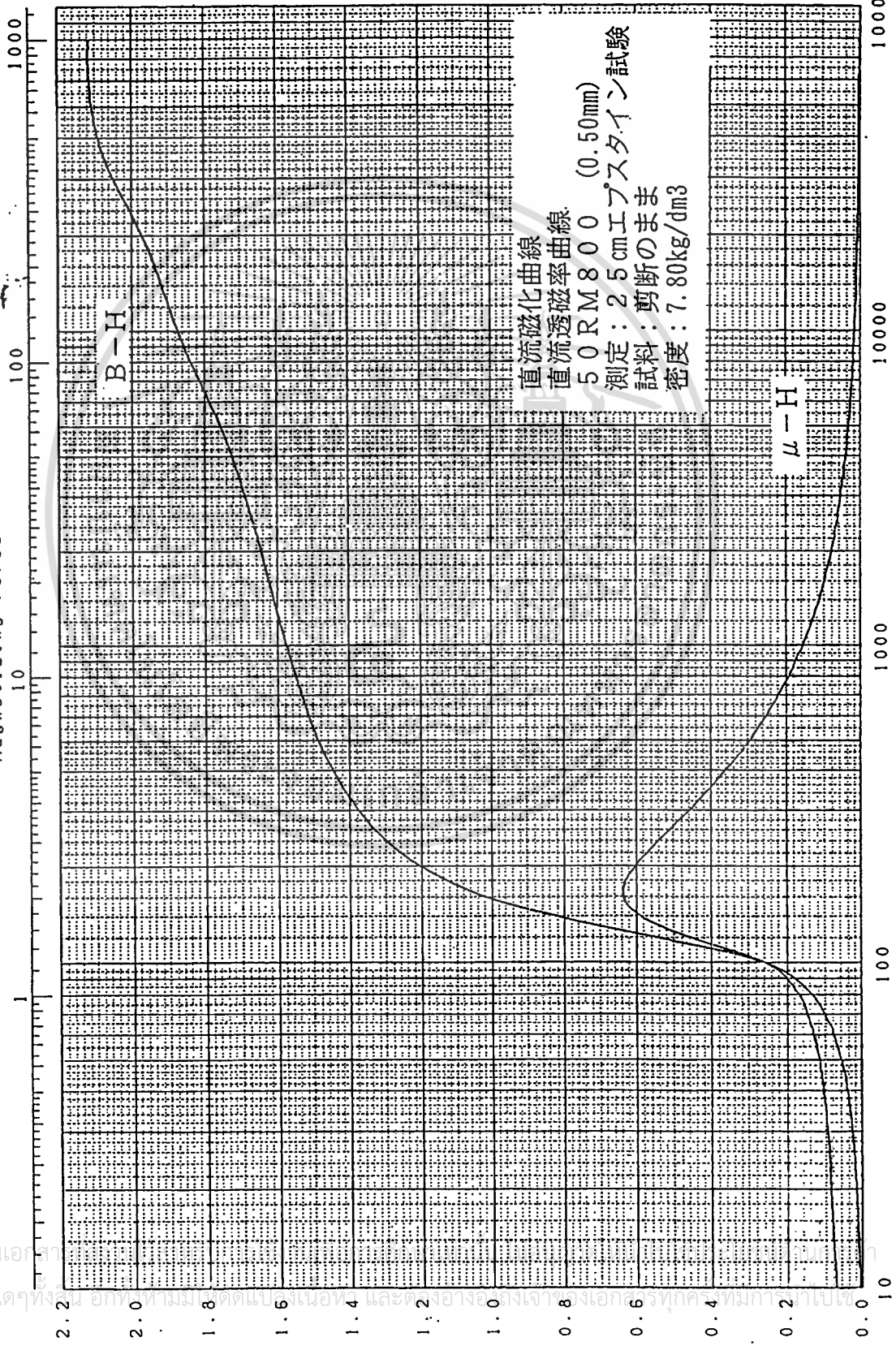
ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Lamination	Style	Units	Dimensions									
			A	B	C	D	E	F	G			
EI-96	2	in	5/8	5/8	1 1/4	1 7/8	1/16	3 3/4				
		mm	16	16	32	48	1.6	96				
EI-105	2	in	11/16	11/16	1 3/8	2 1/16	1/16	4 1/8				
		mm	17.5	17.5	35	52.5	1.6	105				
EI-114	2	in	3/4	3/4	1 1/2	2 1/4	1/16	4 1/2				
		mm	19	19	38	57	1.6	114				
EI-1 3/8	3	in	11/16	11/16	1 3/8	2 1/16	7/32	3 3/4			5/16	
		mm	17.5	17.5	34.9	52.4	5.6	104.8			8.7	
EI-1 1/2	3	in	3/4	3/4	1 1/2	2 1/4	7/32	4 1/2			3/8	
		mm	19.1	19.1	38.1	57.2	5.6	114.3			9.5	
EI-1 3/4	3	in	7/8	7/8	1 3/4	2 5/8	9/32	5 1/4			7/16	
		mm	22.2	22.2	44.4	66.7	7.1	133.4			11.1	
EI-19	3	in	7/8	1 3/4	1 3/4	3	17/64	7			7/16	
		mm	22.2	44.4	44.4	76.2	6.7	177.8			11.1	
EI-2	3	in	1	1	2	3	5/16	6			5/16	
		mm	25.4	25.4	50.8	76.2	7.9	152.4			7.9	
EI-2 1/4	4	in	1 1/8	1 1/8	2 1/4	3 3/8	5/16	6 3/4			5/16	
		mm	28.6	28.6	57.2	85.7	7.9	171.5			7.9	
EI-2 1/2	4	in	1 1/4	1 1/4	2 1/2	3 3/4	25/64	7 1/2			3/8	
		mm	31.8	31.8	63.5	95.3	9.9	190.5			9.5	
EI-3	4	in	1 1/2	1 1/2	3	4 1/2	3/8	9			3/8	
		mm	38.1	38.1	76.2	114.3	9.5	228.6			9.5	
EI-4	4	in	2	2	4	6	13/32	12			7/16	
		mm	50.8	50.8	101.6	152.4	10.3	304.8			11.1	
EI-5	4	in	2 1/2	2 1/2	5	7 1/2	35/64	15			9/16	
		mm	63.5	63.5	127	190.5	13.9	381			14.3	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

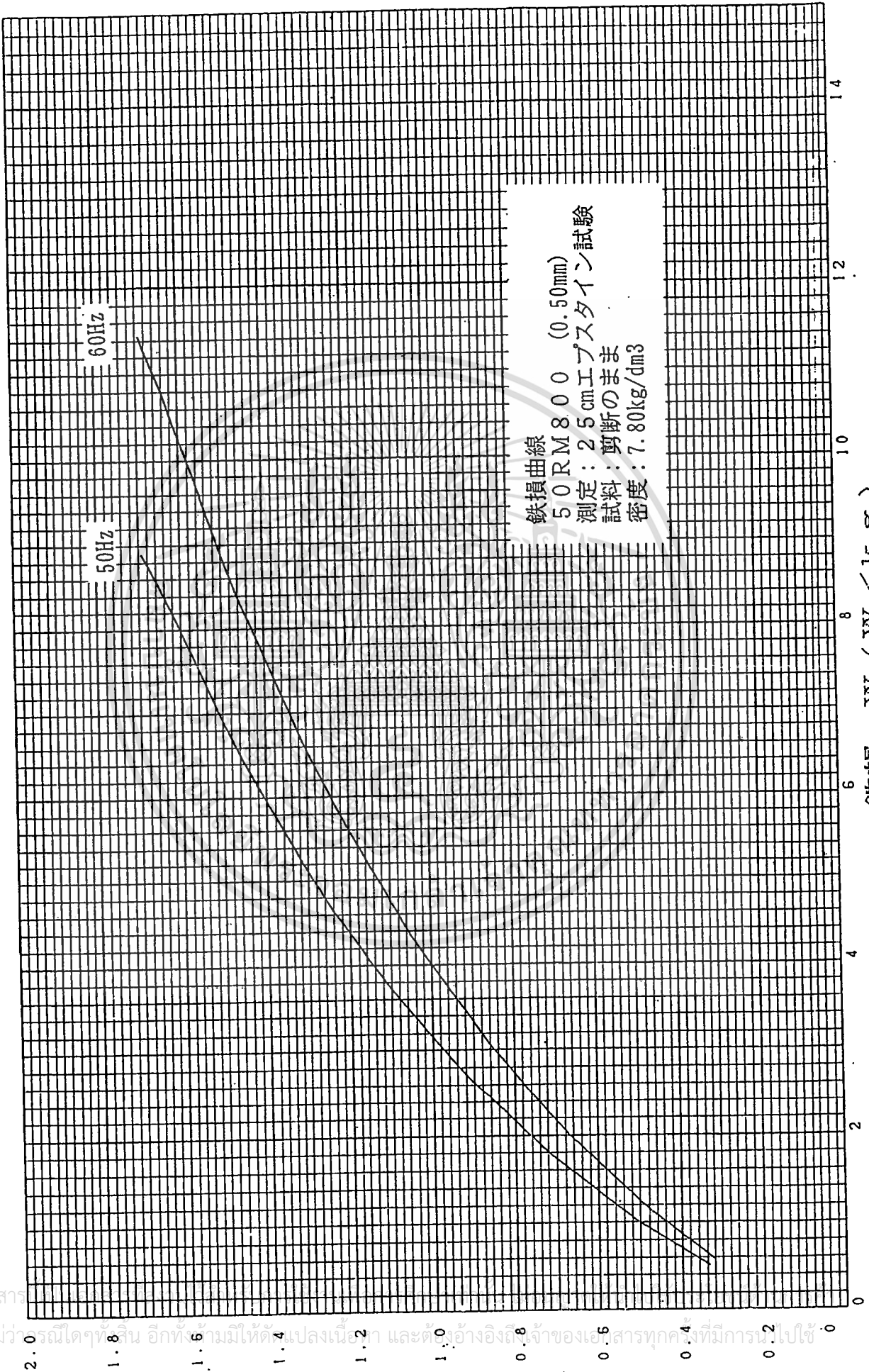
《 直 流 磁 化 特 性 試 験 》

磁化力  $H$  (Oe)  
Magnetizing Force



磁化力  $H$  (A/m)  
Magnetizing Force

鉄損曲線



เอกสาร

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม อีกที่งานมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตัวอย่างการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงให้มีราคาต่ำโดยใช้เงินดิกอัลกอริธึม

ในตัวอย่างนี้เป็นการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง พิกัด 850 W 230/2220 V โดยมีเป้าหมายในการออกแบบคือราคาต้นทุนในสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงให้มีราคาต่ำโดยใช้หลักการหาค่าที่เหมาะสมแบบเงินดิกอัลกอริธึมซึ่งได้นำเสนอในขั้นตอนของเงินดิกอัลกอริธึม โดยมีฟังก์ชันเป้าหมายแสดงดังสมการที่ (ก.1) สมการเงื่อนไขขอบเขต (ก.2)– (ก.4) ตามลำดับ

สมการเป้าหมาย (Minimum Cost)

$$C_t(D, 2E, J_{pri}, J_{sec}) = C_{cu}(D, 2E, J_{pri}, J_{sec}) + C_{core}(D, 2E, J_{pri}, J_{sec}) \quad (ก.1)$$

สมการเงื่อนไขขอบเขต

$$0.01 \text{ m.} \leq D \leq 0.100 \text{ m.} \quad (ก.2)$$

$$0.025 \text{ m.} \leq 2E \leq 0.040 \text{ m.} \quad (ก.3)$$

$$5 \text{ A/mm}^2 \leq (J_{pri}, J_{sec}) \leq 20 \text{ A/mm}^2. \quad (ก.4)$$

Initialized Population เป็นการสุ่มเซตของคำตอบในช่วงของตัวแปรที่กำหนดในรูปรหัสของเลขฐานสอง โดยความยาวของเลขฐานสอง (จำนวนบิต) ที่แทนคำตอบของตัวแปรจะขึ้นอยู่กับความเที่ยงตรงของคำตอบที่ต้องการ เช่น โดเมนคำตอบของตัวแปร  $x_j$  คือ  $[a_j, b_j]$  และต้องการความเที่ยงตรงของคำตอบที่ทศนิยมตำแหน่งที่ห้า ความเที่ยงตรงที่ต้องการนี้จะขึ้นอยู่กับช่วงของโดเมนของตัวแปรแต่ละตัว ซึ่งขั้นต่ำจะแบ่งออกเป็น  $(b_j - a_j) \times 10^5$  ส่วน ดังนั้นจำนวนบิตที่ต้องการ ( $m_j$ ) สำหรับตัวแปรแต่ละตัวสามารถหาได้ดังนี้

$$2^{m_j-1} < (b_j - a_j) \times 10^5 \leq 2^{m_j} - 1 \quad (ก.5)$$

ในการแปลงเซตคำตอบจากเลขฐานสองเป็นเลขฐานสิบของตัวแปร  $x_j$  สามารถหาได้ดังสมการที่ (ก.6)

$$x_j = a_j + decimal(substring_j) \times \frac{b_j - a_j}{2^{m_j} - 1} \quad (ก.6)$$

เมื่อ  $decimal(substring_j)$  แทนค่าเลขฐานสิบของ  $substring_j$  ของตัวแปร  $x_j$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อต้องการความเที่ยงตรงของคำตอบที่ทศนิยมตำแหน่งที่ห้า จำนวนบิตที่ต้องการของตัวแปร  $D$ ,  $2E$ ,  $J_{pri}$  และ  $J_{sec}$  สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ตัวแปร } D \quad (0.100 - 0.010) \times 10,000 = 900$$

$$2^9 < 900 \leq 2^{10} - 1, \quad m_1 = 10$$

$$\text{ตัวแปร } 2E \quad (0.040 - 0.025) \times 10,000 = 150$$

$$2^7 < 150 \leq 2^8 - 1, \quad m_2 = 8$$

$$\text{ตัวแปร } J_{pri} \quad (20 - 5) \times 10,000 = 150,000$$

$$2^{17} < 150,000 \leq 2^{18} - 1, \quad m_3 = 18$$

$$\text{ตัวแปร } J_{sec} \quad (20 - 5) \times 10,000 = 150,000$$

$$2^{17} < 150,000 \leq 2^{18} - 1, \quad m_4 = 18$$

$$m = m_1 + m_2 + m_3 + m_4$$

ผลการคำนวณ ได้ความยาวของโครโมโซมเท่ากับ 54 บิต สมมติเซตคำตอบให้เป็นดังนี้

$$v_j \quad 0001011101 \ 10100011 \ 010001110011001010 \ 100011010101010101$$

จากเซตของคำตอบที่กำหนด สามารถแปลงให้อยู่ในเลขฐานสิบได้ดังนี้

	Binary Number	Decimal Number
$D$	0001011101	93
$2E$	10100011	163
$J_{pri}$	010001110011001010	72,906
$J_{sec}$	100011010101010101	144,725

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการหาค่าตัวแปร  $D$ ,  $2E$ ,  $J_{pri}$  และ  $J_{sec}$  โดยใช้สมการที่ (ก.6)

$$D = 0.010 + 93 \times \frac{0.100 - 0.010}{2^{10} - 1} = 0.018181$$

$$2E = 0.025 + 163 \times \frac{0.040 - 0.025}{2^8 - 1} = 0.034588$$

$$J_{pri} = 5 + 72,906 \times \frac{15 - 5}{2^{18} - 1} = 7.781153$$

$$J_{sec} = 5 + 144,725 \times \frac{15 - 5}{2^{18} - 1} = 10.520841$$

ทำการสุ่มเซตของคำตอบในช่วงของตัวแปรที่กำหนดในรูปรหัสของเลขฐานสอง ตามจำนวนบิตที่คำนวณได้คือ 54 บิต ซึ่งจะทำการสุ่มเพื่อแสดงตัวอย่างประกอบจำนวน 5 โครโมโซมดังข้างล่างนี้

$$\begin{aligned} v_1 &= [0001011101 \ 10100011 \ 010001110011001010 \ 100011010101010101] \\ v_2 &= [1001011001 \ 10000011 \ 100001110001001010 \ 000101010101000101] \\ v_3 &= [0101010101 \ 01100101 \ 011101010011101000 \ 000011000101010111] \\ v_4 &= [0111011101 \ 10100011 \ 000100110011001010 \ 10000000000010111] \\ v_5 &= [1001011101 \ 10000011 \ 011001010011001010 \ 000111010101000101] \end{aligned}$$

ทำการแปลงเป็นเลขฐานสิบแล้วนำไปหาค่า  $D$ ,  $2E$ ,  $J_{pri}$  และ  $J_{sec}$  ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} v_1 &= [D, 2E, J_{pri}, J_{sec}] = [0.018181, 0.034588, 7.781153, 10.520841] \\ v_2 &= [D, 2E, J_{pri}, J_{sec}] = [0.062873, 0.032705, 10.276280, 5.832713] \\ v_3 &= [D, 2E, J_{pri}, J_{sec}] = [0.040000, 0.030941, 9.579180, 5.481836] \\ v_4 &= [D, 2E, J_{pri}, J_{sec}] = [0.051964, 0.034588, 5.749842, 10.000896] \\ v_5 &= [D, 2E, J_{pri}, J_{sec}] = [0.063225, 0.032705, 8.953033, 6.145214] \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ขั้นตอนที่ 1 Reproduction

เป็นการคัดเลือกคำตอบที่มีความน่าจะเป็นที่จะทำให้อิงค์ชั้นเป้าหมายและอิงค์ชั้นเงื่อนไขที่น่าพอใจ เริ่มต้นจาก Evaluation คือการหาคำตอบที่ทำให้อิงค์ชั้นเป้าหมายมีค่าเหมาะสมที่สุด (ต่ำสุดหรือสูงสุด ตามอิงค์ชั้นเป้าหมาย).

$$eval(v_1) = f(0.018181, 0.034588, 7.781153, 10.520841) = 178.215482$$

$$eval(v_2) = f(0.062873, 0.032705, 10.276280, 5.832713) = 185.225436$$

$$eval(v_3) = f(0.040000, 0.030941, 9.579180, 5.481836) = 195.587364$$

$$eval(v_4) = f(0.051964, 0.034588, 5.749842, 10.000896) = 192.347852$$

$$eval(v_5) = f(0.063225, 0.032705, 8.953033, 6.145214) = 220.354618$$

จะเห็นว่าโครโมโซมที่  $v_1$  จะทำให้ผลลัพธ์ของอิงค์ชั้นมีค่าต่ำสุด และโครโมโซมที่  $v_5$  จะทำให้ผลลัพธ์ของอิงค์ชั้นมีค่าสูงสุด

เมื่อได้คำตอบของอิงค์ชั้นแล้วทำการหา Fitness ( $F$ ) ซึ่งเป็นการหาผลรวมของคำตอบของทุกโครโมโซม

$$F = \sum_{k=1}^{pop\_size} eval(v_k)$$

$$F = \sum_{k=1}^5 eval(v_k) = 971.730752$$

ทำการหาความน่าจะเป็นที่จะทำให้อิงค์ชั้นนั้นผ่านการคัดเลือกของแต่ละโครโมโซม ( $p_k$ )

$$p_k = \frac{eval(v_k)}{F}, \quad k = 1, 2, \dots, pop\_size$$

$$p_1 = 0.183400$$

$$p_2 = 0.190613$$

$$p_3 = 0.201277$$

$$p_4 = 0.197943$$

$$p_5 = 0.226765$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการหาความน่าจะเป็นที่ทำให้คำตอบนั้นผ่านการคัดเลือกของทุกโครโมโซม ( $q_k$ )

$$q_k = \sum_{j=1}^k p_j, \quad k = 1, 2, \dots, pop\_size$$

$$q_1 = 0.183400 \quad q_2 = 0.374013$$

$$q_3 = 0.575290 \quad q_4 = 0.773233$$

$$q_5 = 1.000000$$

ทำการสุ่มค่าของเลขฐาน 10 ระหว่าง 0 ถึง 1 เป็นจำนวน 5 ค่า

0.201431      0.422062      0.166503      0.781893      0.4850871

หลังจากสุ่มค่าแล้วให้นำไปตรวจสอบค่า  $q_k$  ตัวอย่างเช่น 0.201431 เป็นตัวเลขที่ได้จากการสุ่ม ซึ่งนำไปเปรียบเทียบกับค่า  $q_k$  แล้วปรากฏว่ามีค่ามากกว่า  $q_1$  แต่น้อยกว่า  $q_2$  ดังนั้นโครโมโซม  $v_2$  จะถูกเลือกดังนี้

$$v'_1 = [1001011001 \ 10000011 \ 100001110001001010 \ 000101010101000101] \quad (v_2)$$

$$v'_2 = [0101010101 \ 01100101 \ 011101010011101000 \ 000011000101010111] \quad (v_3)$$

$$v'_3 = [0001011101 \ 10100011 \ 010001110011001010 \ 100011010101010101] \quad (v_1)$$

$$v'_4 = [1001011101 \ 10000011 \ 011001010011001010 \ 000111010101000101] \quad (v_5)$$

$$v'_5 = [0101010101 \ 01100101 \ 011101010011101000 \ 000011000101010111] \quad (v_3)$$

## ขั้นตอนที่ 2 Cross Over

เป็นการแลกเปลี่ยนรหัสของคำตอบยกตัวอย่างเช่น โครโมโซม  $v_1$  กับ  $v_2$  ทำการ Cross Over ที่ตำแหน่งบิตที่ 21

$$v_1 = [1001011001 \ 10000011 \ 100001110001001010 \ 000101010101000101]$$

$$v_2 = [0101010101 \ 01100101 \ 011101010011101000 \ 000011000101010111]$$

เมื่อทำการ Cross Over แล้วจะได้โครโมโซมดังนี้

$$v'_1 = [1001011001 \ 10000011 \ 100001110001001000 \ 000011000101010111]$$

$$v'_2 = [0101010101 \ 01100101 \ 011101010011101010 \ 000101010101000101]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ขั้นตอนที่ 3 Mutation

คือการเปลี่ยนรหัสคำตอบในตำแหน่งบิตที่ต้องการหรือจากการสุ่ม โดยการเปลี่ยนจากเลขฐานสอง จากเลขหนึ่งเป็นเลขศูนย์ หรือจากเลขศูนย์เป็นเลขหนึ่ง หลังจากผ่านการ Cross Over และ Mutation แล้วจะได้เซตของคำตอบในรูปของเลขฐานสองดังข้างล่างนี้

$$v_1 = [1001011001 \ 10000011 \ 100001110001001000 \ 010011000101010111]$$

$$v_2 = [0101010101 \ 01100101 \ 011101010011101010 \ 010101010101000101]$$

$$v_3 = [0101011101 \ 10100011 \ 010001110011001010 \ 010111010101000101]$$

$$v_4 = [1000011101 \ 10000011 \ 011001010011001010 \ 100011010101010101]$$

$$v_5 = [0101010101 \ 01100101 \ 011101010011101000 \ 010011000101010111]$$

จากนั้นนำคำตอบที่ได้จากเลขฐานสองแปลงเป็นเลขฐานสิบนำคำตอบที่ได้ไปแทนในฟังก์ชันเพื่อหาเป้าหมายดังข้างนี้

$$f(0.062873, 0.032705, 10.276204, 7.981845) = 162.254618$$

$$f(0.040000, 0.030941, 9.579256, 8.332722) = 175.156845$$

$$f(0.040703, 0.034588, 7.781153, 8.645224) = 179.258797$$

$$f(0.057595, 0.032705, 8.953033, 10.520841) = 157.586921$$

$$f(0.040000, 0.030941, 9.579180, 7.981845) = 178.489723$$

หลังจาก Run ผลการหาค่าสูงสุดเป็นจำนวน 100,000 รุ่นของประชากรแล้วเลือกโครโมโซมที่ทำให้ฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าต่ำสุดนั้นคือได้คำตอบ

$$D = 0.067871 \text{ m}$$

$$2E = 0.029785 \text{ m}$$

$$J_{pri} = 10.715472 \text{ A/mm}^2$$

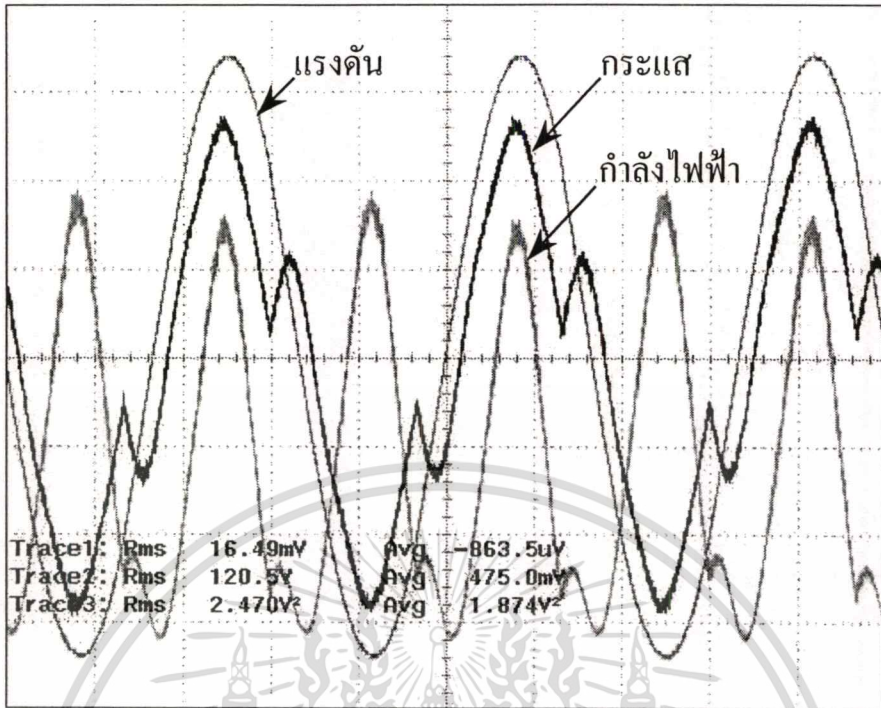
$$J_{sec} = 8.605472 \text{ A/mm}^2$$

ซึ่งทำให้ฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าต่ำสุดคือ 150.7 บาท

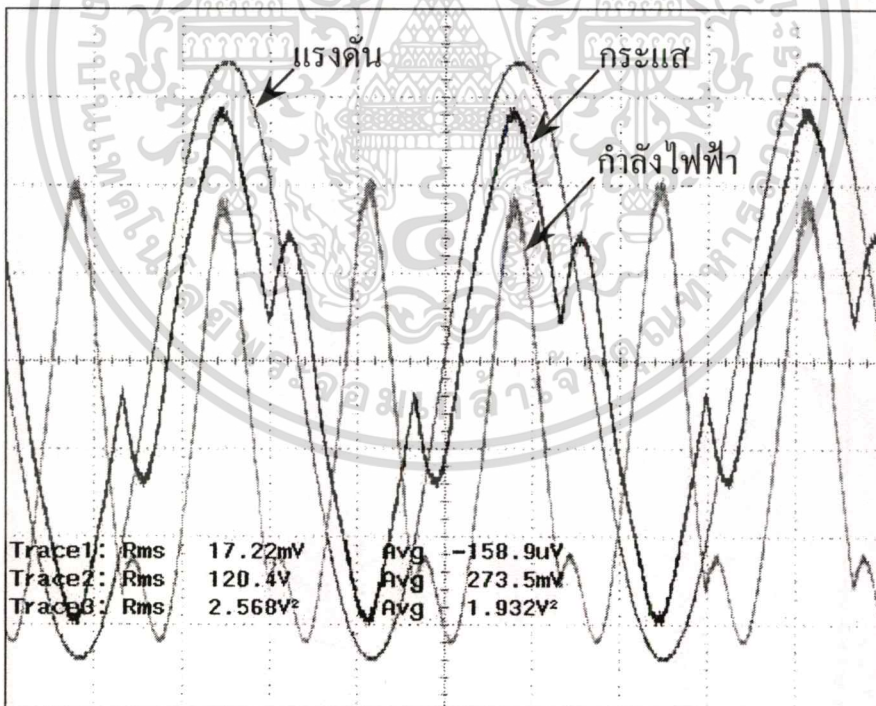
หมายเหตุ : ตัวอย่างที่นำเสนอนี้ยังไม่รวมการนำฟังก์ชันเงื่อนไขของการประกอบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง และฟังก์ชันเงื่อนไขของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดมาเกี่ยวข้องด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



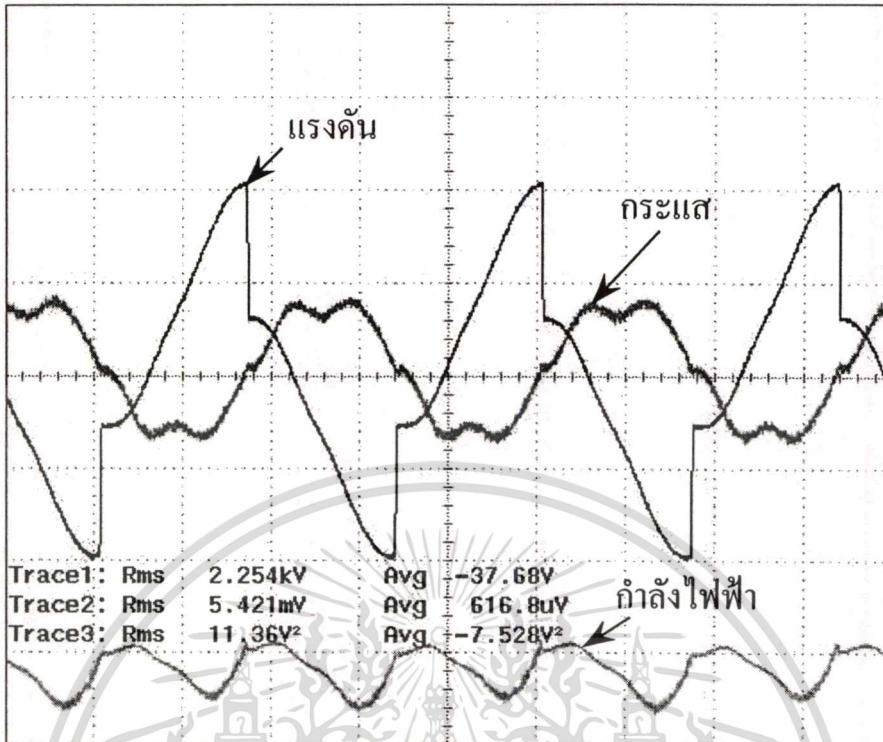
ข)

รูปที่ ง.1 สัญญาณอินพุตที่ได้จากการทดสอบต้นแบบหมายเลข 1 และ 3 ในสภาวะทำงาน

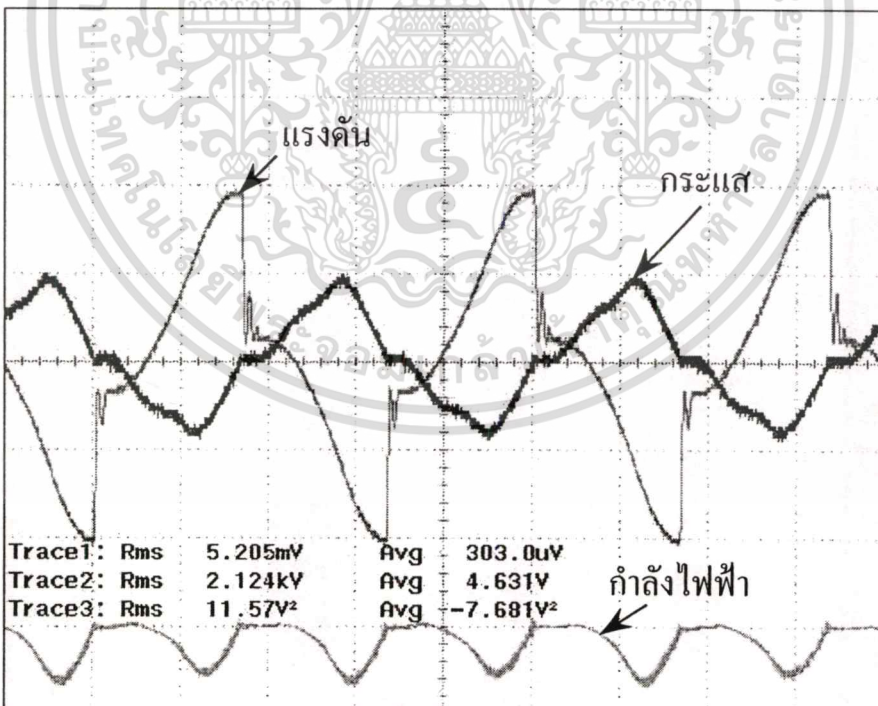
ก) ต้นแบบหมายเลข 1  $V_1 = 120.6 \text{ V}$ ,  $I_1 = 8.265 \text{ A}$ ,  $W_{\text{input}} = 929 \text{ W}$

ข) ต้นแบบหมายเลข 3  $V_1 = 120.4 \text{ V}$ ,  $I_1 = 8.610 \text{ A}$ ,  $W_{\text{input}} = 966 \text{ W}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



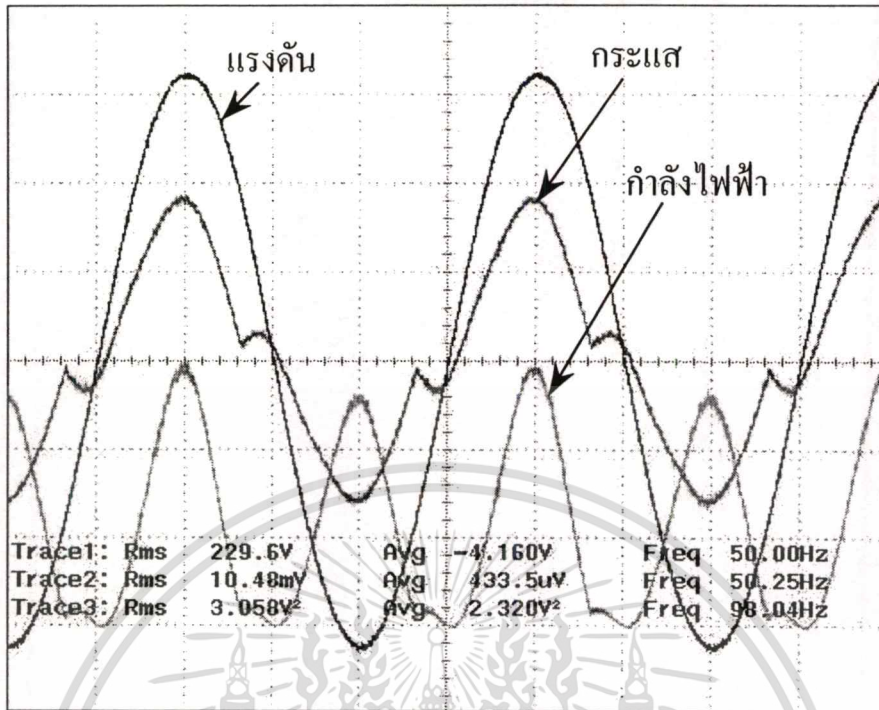
ข)

รูปที่ ๖.๒ สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบต้นแบบหมายเลข 1 และ 3 ในสภาวะทำงาน

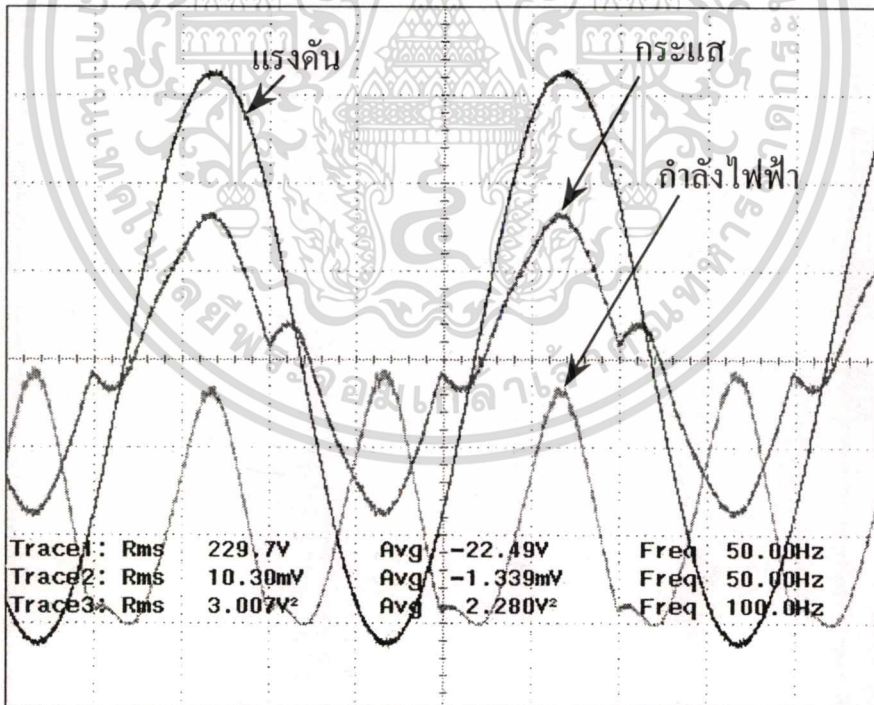
ก) ต้นแบบหมายเลข 1  $V_h = 2254 \text{ V}$ ,  $I_2 = 0.542 \text{ A}$ ,  $W_{\text{output}} = 752.8 \text{ W}$

ข) ต้นแบบหมายเลข 3  $V_h = 2124 \text{ V}$ ,  $I_2 = 0.521 \text{ A}$ ,  $W_{\text{output}} = 768.1 \text{ W}$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



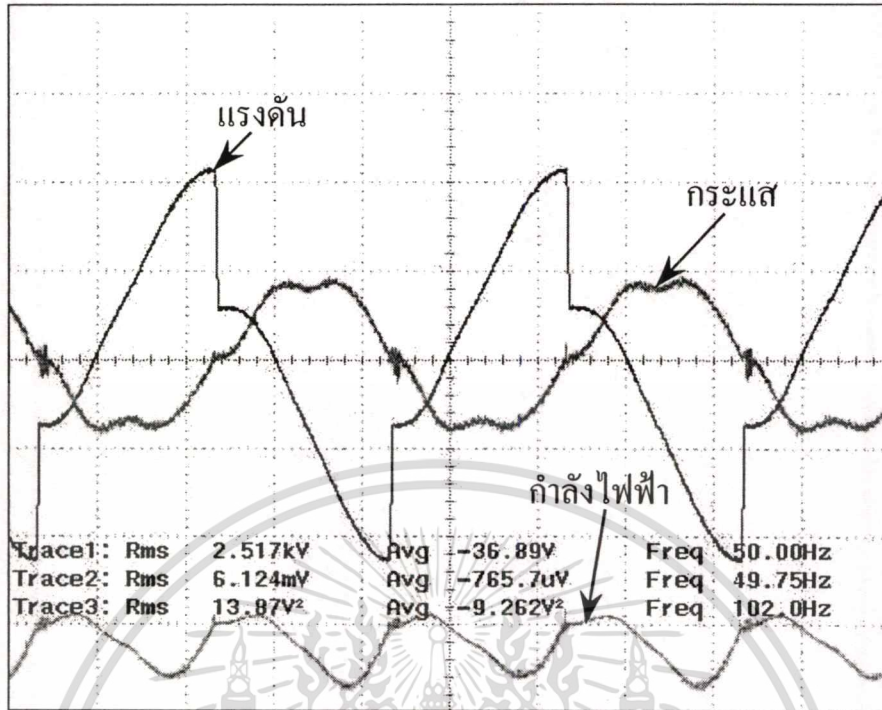
ข)

รูปที่ ง.3 สัญญาณอินพุตที่ได้จากการทดสอบต้นแบบหมายเลข 5 และ 4 ในสภาวะทำงาน

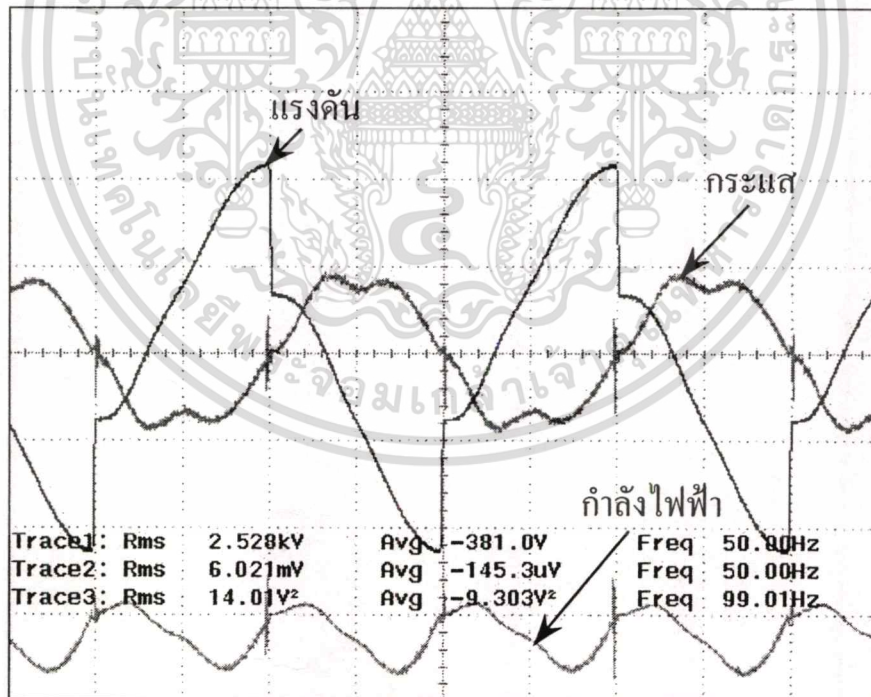
ก) ต้นแบบหมายเลข 5  $V_1 = 229.6 \text{ V}$ ,  $I_1 = 5.240 \text{ A}$ ,  $W_{\text{input}} = 1160 \text{ W}$

ข) ต้นแบบหมายเลข 4  $V_1 = 229.7 \text{ V}$ ,  $I_1 = 5.15 \text{ A}$ ,  $W_{\text{input}} = 1140 \text{ W}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



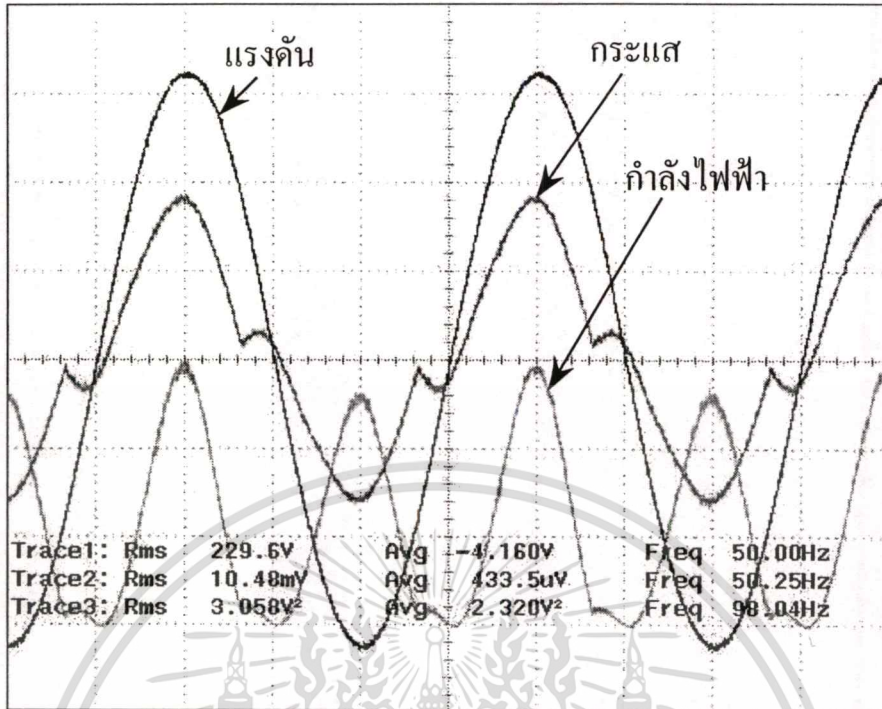
ข)

รูปที่ ๓.๔ สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบต้นแบบหมายเลข 5 และ 4 ในสภาวะทำงาน

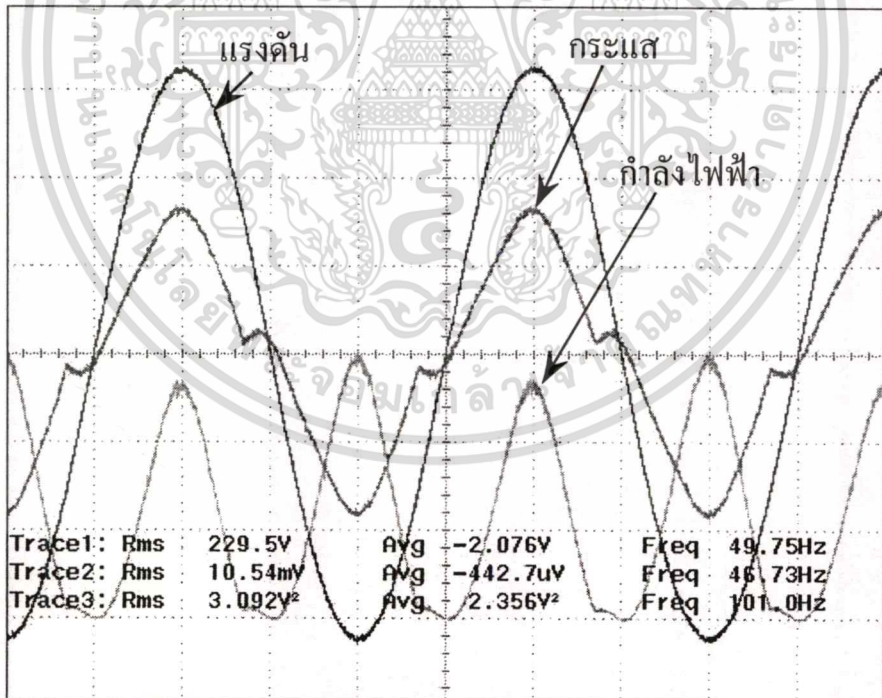
ก) ต้นแบบหมายเลข 5  $V_h = 2517$  V,  $I_2 = 0.612$  A,  $W_{\text{output}} = 926.2$  W

ข) ต้นแบบหมายเลข 4  $V_h = 2528$  V,  $I_2 = 0.602$  A,  $W_{\text{output}} = 930.3$  W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



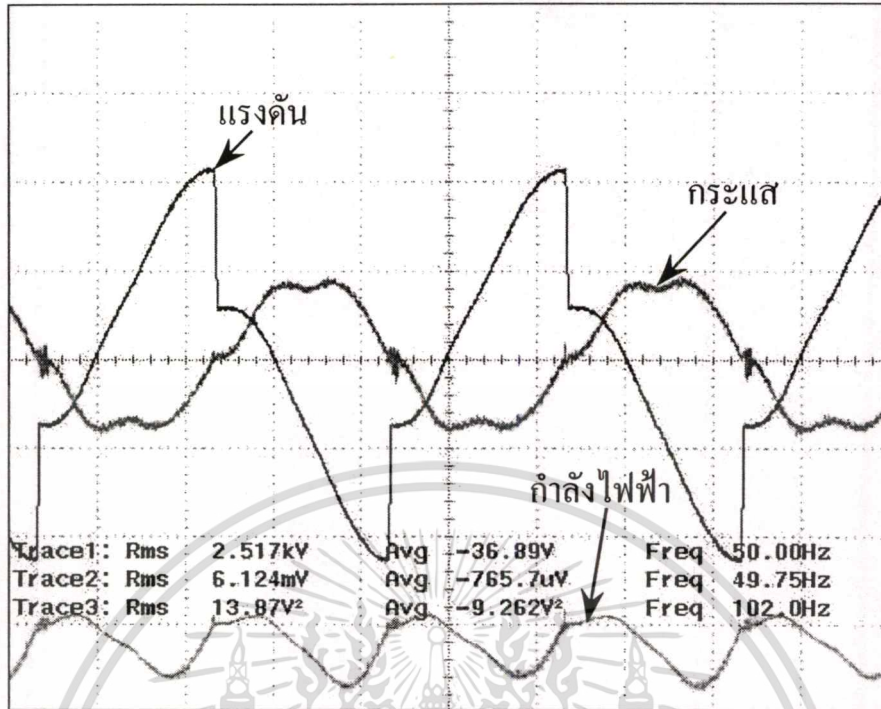
ข)

รูปที่ ๓.5 สัญญาณอินพุตที่ได้จากการทดสอบต้นแบบหมายเลข 5 และ 7 ในสภาวะทำงาน

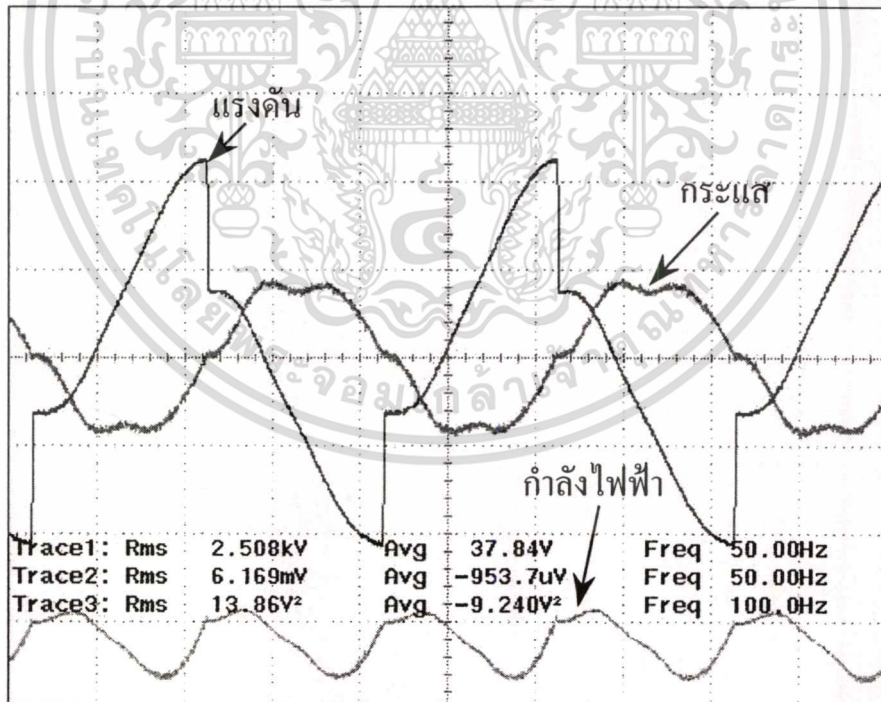
ก) ต้นแบบหมายเลข 5  $V_1 = 229.6 \text{ V}$ ,  $I_1 = 5.240 \text{ A}$ ,  $W_{\text{input}} = 1160 \text{ W}$

ข) ต้นแบบหมายเลข 7  $V_1 = 229.5 \text{ V}$ ,  $I_1 = 5.270 \text{ A}$ ,  $W_{\text{input}} = 1178 \text{ W}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



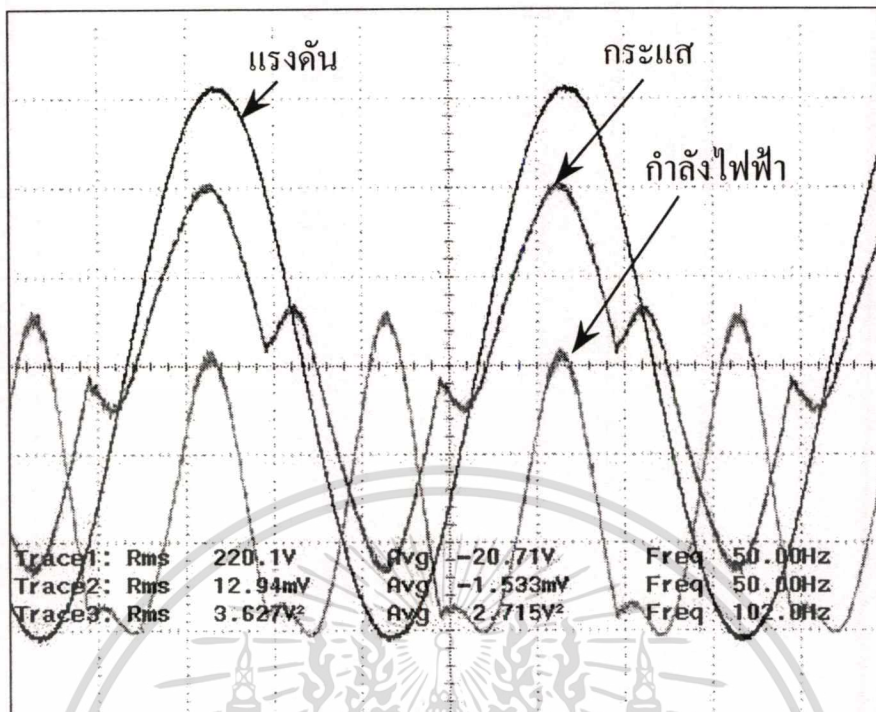
ข)

รูปที่ ๖.๖ สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบต้นแบบหมายเลข 5 และ 7 ในสภาวะทำงาน

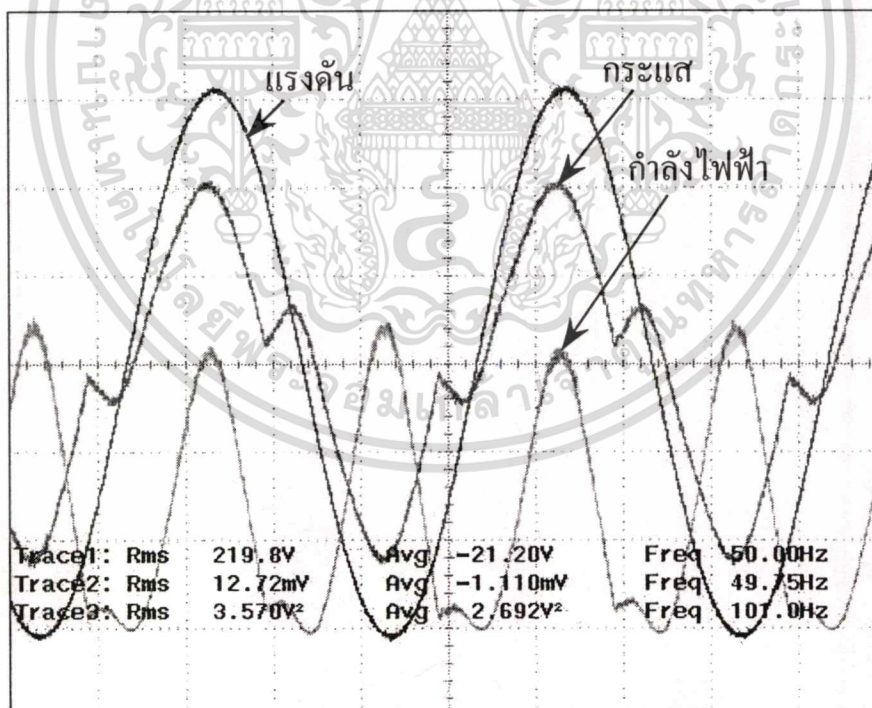
ก) ต้นแบบหมายเลข 5  $V_h = 2517$  V,  $I_2 = 0.612$  A,  $W_{\text{output}} = 926.2$  W

ข) ต้นแบบหมายเลข 7  $V_h = 2508$  V,  $I_2 = 0.617$  A,  $W_{\text{output}} = 924$  W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



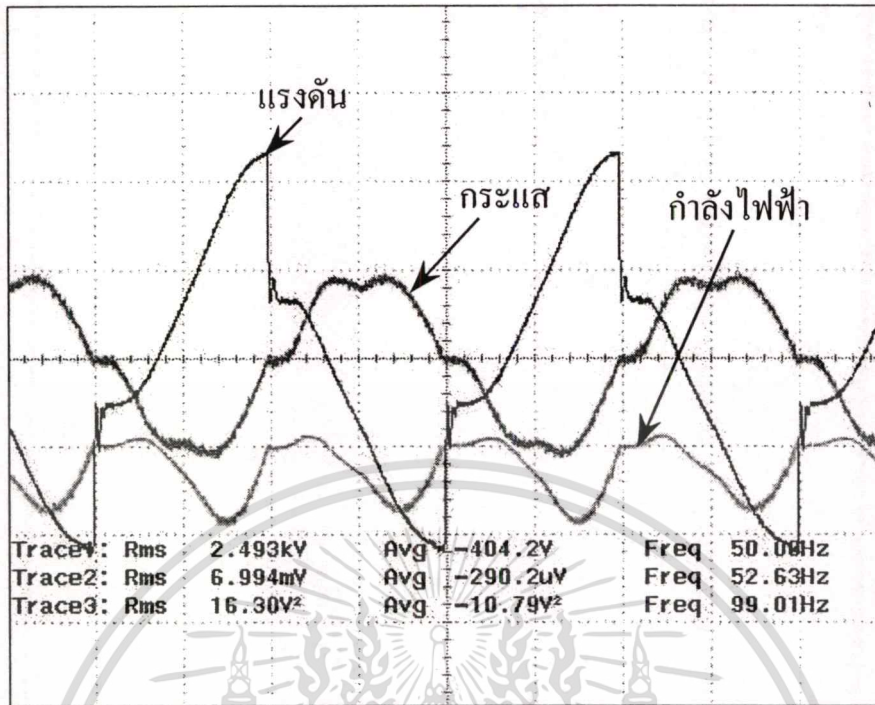
ข)

รูปที่ ง.7 สัญญาณอินพุตที่ได้จากการทดสอบต้นแบบหมายเลข 10 และ 9 ในสถานะทำงาน

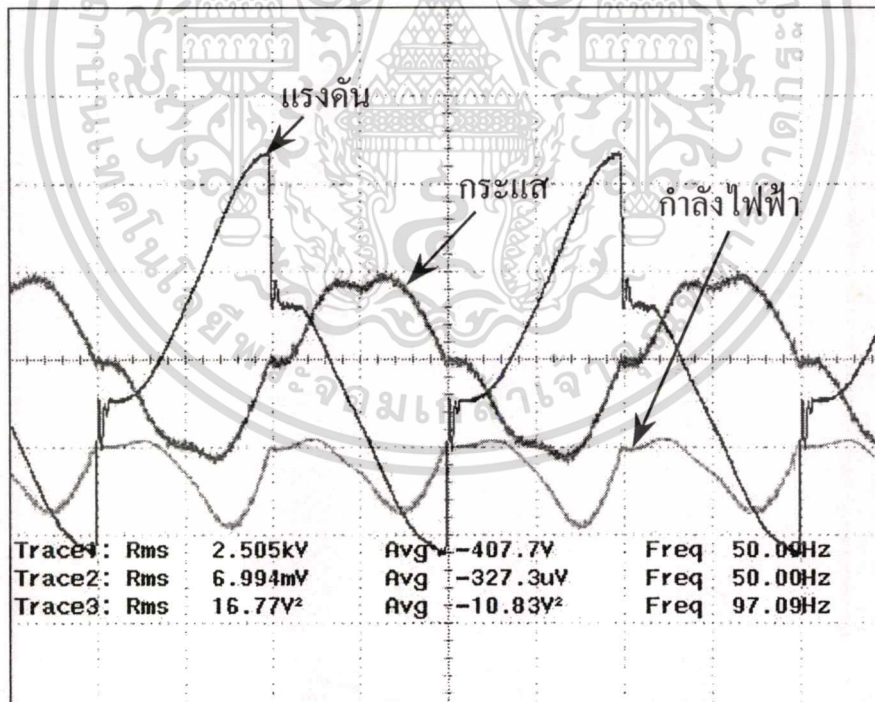
ก) ต้นแบบหมายเลข 10  $V_1 = 220.1 \text{ V}$ ,  $I_1 = 6.470 \text{ A}$ ,  $W_{\text{input}} = 1357.5 \text{ W}$

ข) ต้นแบบหมายเลข 9  $V_1 = 219.8 \text{ V}$ ,  $I_1 = 6.360 \text{ A}$ ,  $W_{\text{input}} = 1346 \text{ W}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



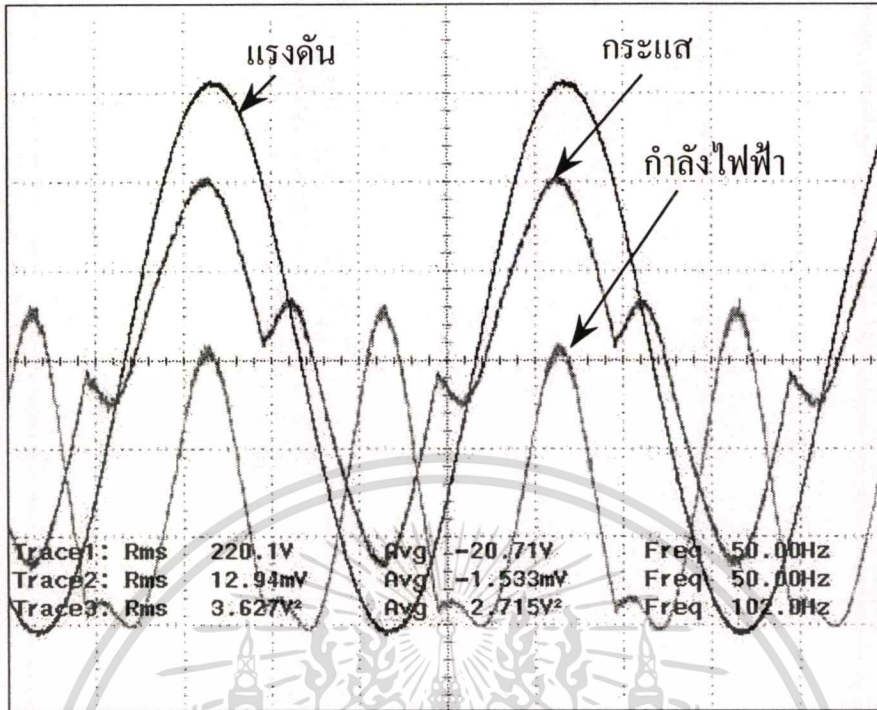
ข)

รูปที่ ง.8 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบต้นแบบหมายเลข 10 และ 9 ในสภาวะทำงาน

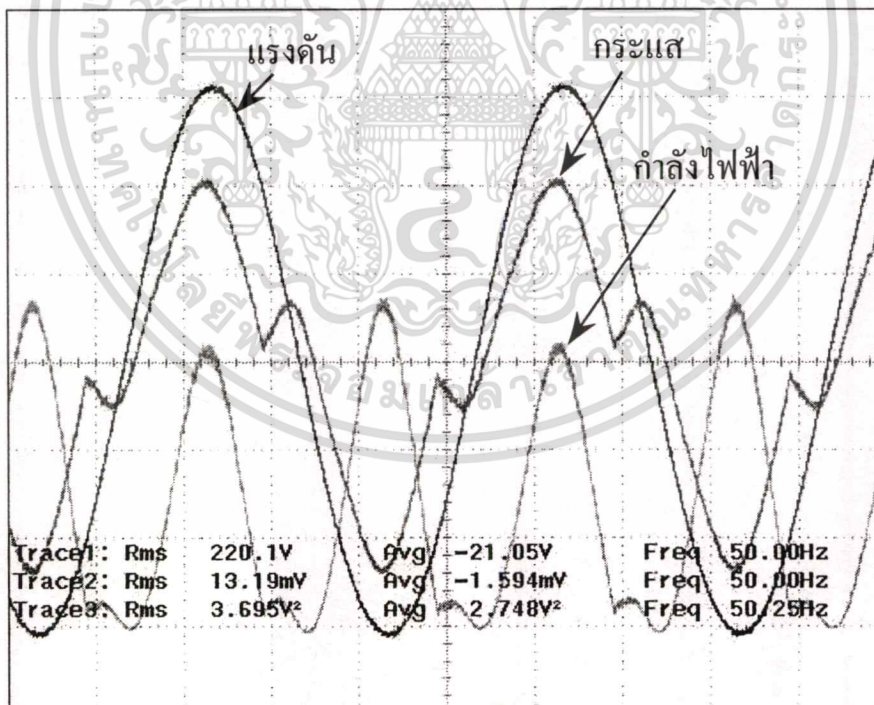
ก) ต้นแบบหมายเลข 10  $V_h = 2493$  V,  $I_2 = 0.699$  A,  $W_{\text{output}} = 1079$  W

ข) ต้นแบบหมายเลข 9  $V_h = 2505$  V,  $I_2 = 0.699$  A,  $W_{\text{output}} = 1083$  W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



ข)

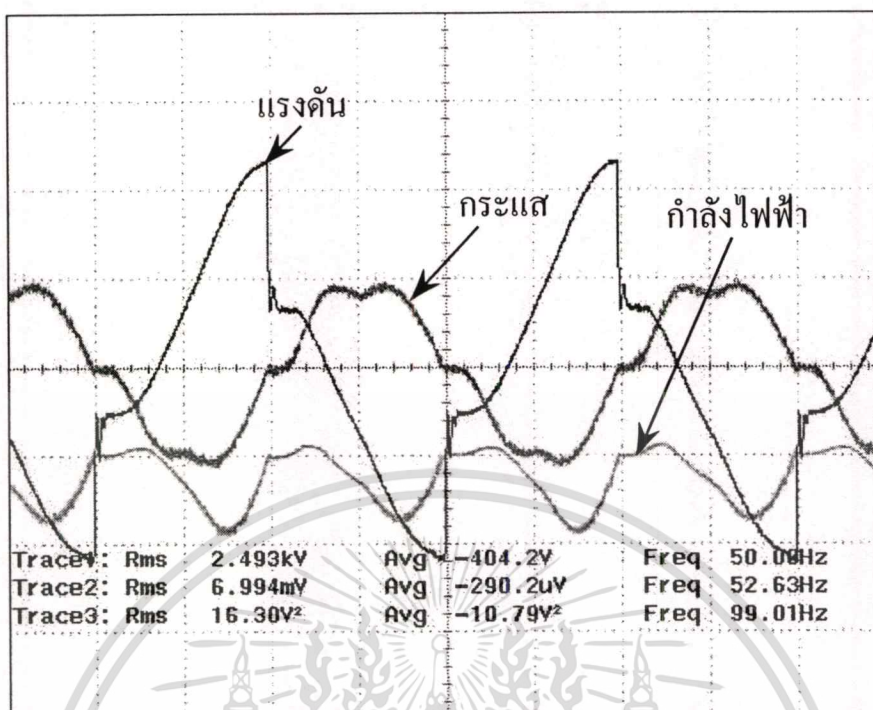
รูปที่ ๙ สัญญาณอินพุตที่ได้จากการทดสอบต้นแบบหมายเลข 10 และ 12 ในสภาวะทำงาน

ก) ต้นแบบหมายเลข 10  $V_1 = 220.1 \text{ V}$ ,  $I_1 = 6.470 \text{ A}$ ,  $W_{\text{input}} = 1357.5 \text{ W}$

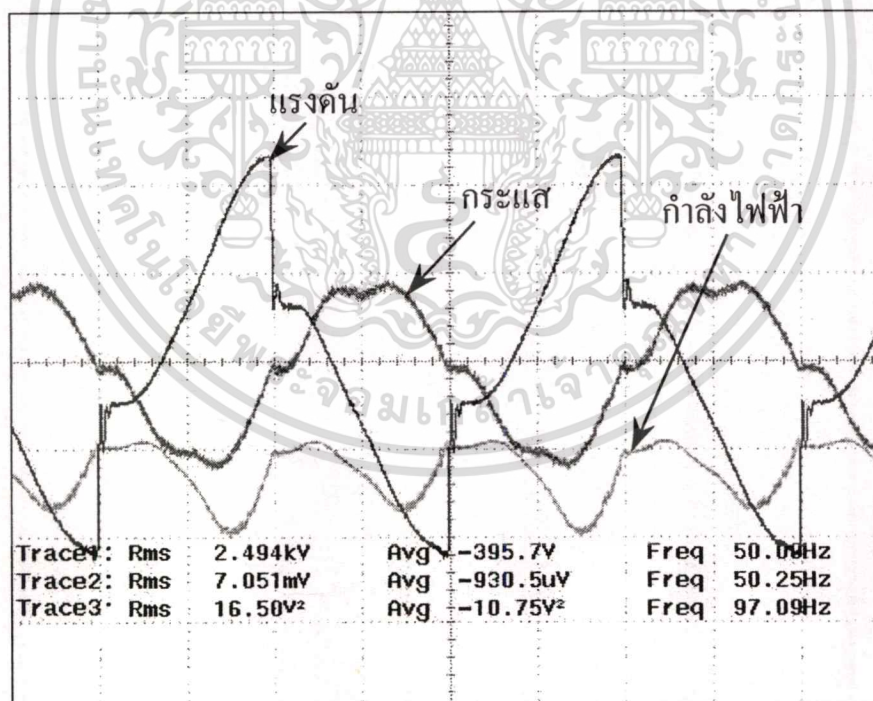
ข) ต้นแบบหมายเลข 12  $V_1 = 220.1 \text{ V}$ ,  $I_1 = 6.595 \text{ A}$ ,  $W_{\text{input}} = 1374 \text{ W}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



ข)


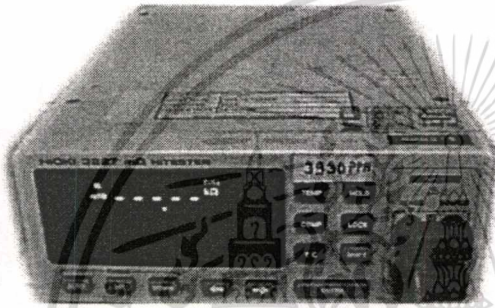
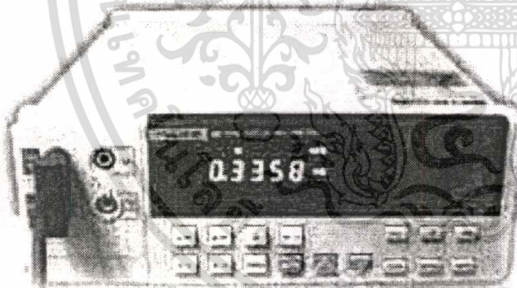

รูปที่ ง.10 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบต้นแบบหมายเลข 10 และ 12 ในสภาวะทำงาน

ก) ต้นแบบหมายเลข 10  $V_h = 2493$  V,  $I_2 = 0.699$  A,  $W_{\text{output}} = 1079$  W

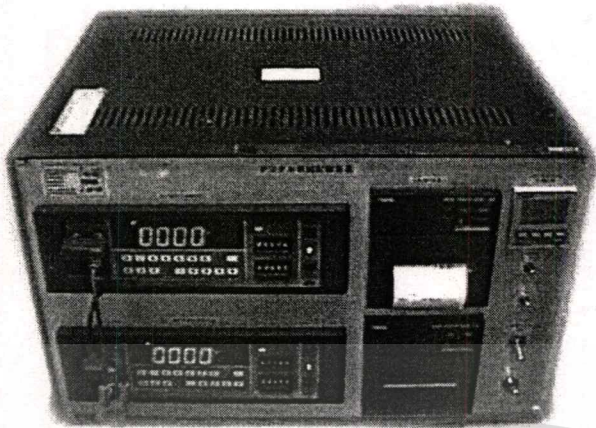
ข) ต้นแบบหมายเลข 12  $V_h = 2494$  V,  $I_2 = 0.705$  A,  $W_{\text{output}} = 1075$  W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



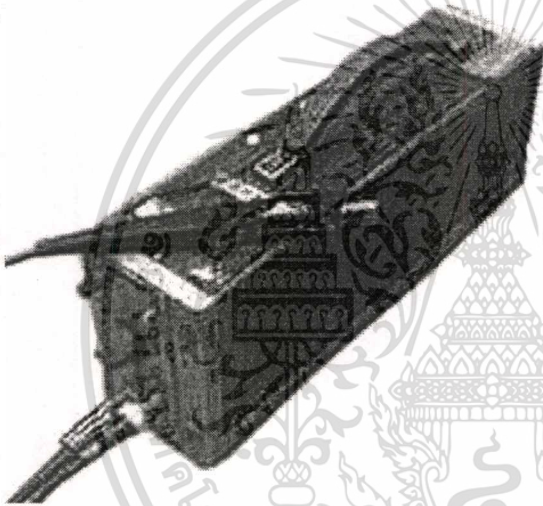
	<p><b>POWER HITESTER</b></p> <p>HIOKI 3332</p>
	<p><b>mΩ HITESTER</b></p> <p>HIOKI 3227</p>
	<p><b>MULTIMETER</b></p> <p>FLUKE 45</p>
	<p><b>PORTABLE POTENTIAL TRANSFORMER</b></p> <p>YOKOGAWA 2261</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**DIGITAL OHM METER**

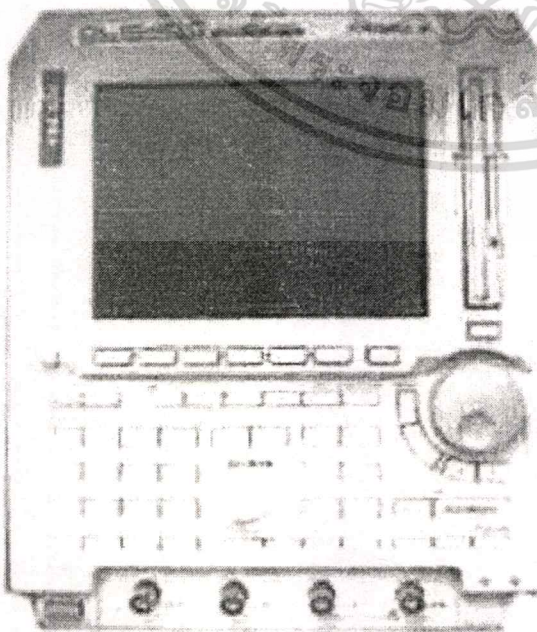
TSURUGA 3563



**CURRENT PROBE**

**AMPLIFIER**

TEKTONIX AM503



**DIGITAL OSSCILLOSCOPE**

YOKOGAWA DL1540C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคลากรใช้งานที่อาคารเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านนอก

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**HIGH VOLTAGE PROBE**

IWATSU HV-P30



**VARIABLE VOLTAGE  
TRANSFORMER**

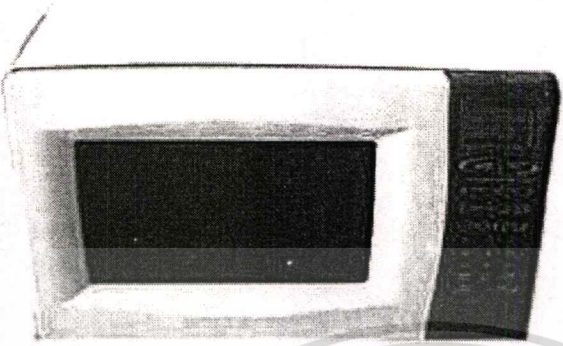

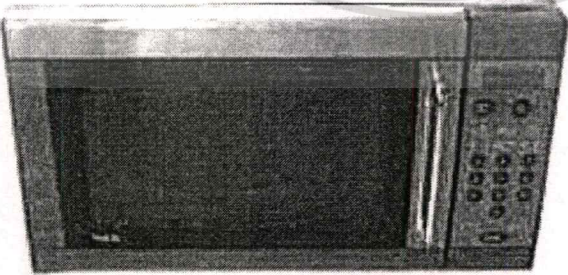
MATSUMAGA SD-2650



**AC POWER SUPPLY**

KIKUSUI PCR6000W<sup>2</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	<p><b>MICROWAVE OVEN</b></p> <p>700 W</p>
	<p><b>MICROWAVE OVEN</b></p> <p>850 W</p>
	<p><b>MICROWAVE OVEN</b></p> <p>1,000 W</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# การประชุมวิชาการ ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 25



## 25th Electrical Engineering Conference (EECON - 25)

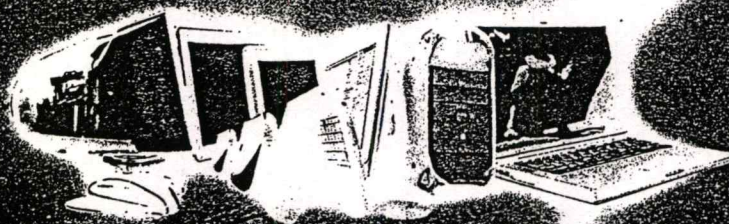


21-22 พฤศจิกายน 2545  
ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

สาขาบทความ

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)

ดำเนินการจัดการประชุมโดย  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



# การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟให้มีราคาต่ำโดยใช้วิธีอัลกอริทึมพันธุ

## Minimum Cost Design of High-Voltage Transformers for Microwave Oven Using Genetic Algorithm

วิรัช สิทธิรัตน์เจริญ\* ชัชวาลิ ฉัตรอุทัย\* ต่อพงศ์ ภูมิภาค\*\*

\* ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

\*\* ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพมหานคร 10530

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาโปรแกรมออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟให้มีราคาต่ำโดยใช้วิธีอัลกอริทึมพันธุ ตัวแปรในการออกแบบกำหนดให้เป็นขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กและขนาดพื้นที่หน้าตัดของช่องว่างพันขดลวดโดยจะพิจารณาผลที่เกิดขึ้นจากการเลือกใช้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเหล็กในการออกแบบ ในบทความนี้นำเสนอผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงโดยใช้แกนเหล็ก EI มาตรฐานชนิด 50RM800 สำหรับตู้อบไมโครเวฟขนาด 700 W, 120/2000 V, 60 Hz จากผลการออกแบบโครงสร้างใหม่พบว่าหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีราคาวิศวกรรมต่ำลงประมาณ 2 - 4 % เมื่อเปรียบเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ผลิตจากโรงงาน นอกจากนี้ยังมีการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบตามมาตรฐาน UL923 และ IEC-335-2-25

### Abstract

This paper proposes the development of the design program of a high-voltage transformer for microwave oven having minimum cost by using the genetic algorithm. The cross-section area of core and window area of winding are defined to be the design variables and the effect of chosen design values of magnetic flux density are also determined. In this paper, three constructions of high-voltage transformer using standard EI-core type 50RM800 for microwave oven 700 W, 120/2000 V, 60 Hz are presented. The results show that the optimum cost of transformer constructions can be reduced about 4% compared to those from the factory. Furthermore, the electrical characteristics of design transformers are tested according to Standard UL923 and IEC-335-2-25 and also illustrated.

**Keyword:** genetic algorithms, high-voltage transformer, microwave oven, minimum cost design, optimization methods.

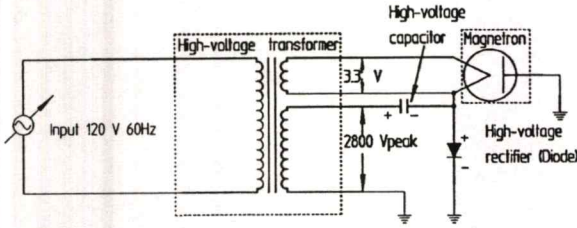
### 1. บทนำ

ด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี มนุษย์ได้สร้างเครื่องอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ในชีวิตประจำวันอย่างมากมาย ตู้อบไมโครเวฟเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่กำลังจะกลายเป็นสิ่งที่จำเป็นในการประกอบอาหารซึ่งช่วยให้เราทำอาหารได้สะดวกและรวดเร็วขึ้น ดังนั้นจึงมีความพยายามที่จะพัฒนาและปรับปรุงการออกแบบส่วนประกอบต่าง ๆ ของตู้อบไมโครเวฟให้มีราคาต่ำลงโดยที่ยังคงคุณลักษณะเดิม เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิต โดยทั่วไปแล้วตู้อบไมโครเวฟจะมีส่วนประกอบหลักคือ วงจรแรงดันไฟฟ้าสูงซึ่งวงจรในส่วนนี้ประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก ดังนี้

- หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง (high-voltage transformer)
- ตัวเก็บประจุแรงดันสูง (high-voltage capacitor)
- วงจรแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง (high-voltage rectifier)
- แมกเนตรอน (magnetron)

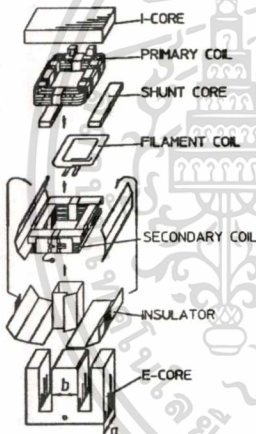
เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นที่ด้านทุติยภูมิซึ่งจะมีค่าแรงดันสูงสุดประมาณ 2800 โวลต์ซึ่งแสดงในรูปที่ 1 แรงดันสูงที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผ่านไปยังตัวเก็บประจุแรงดันสูง และวงจรแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงซึ่งจะรวมกันเป็นวงจรปรับระดับแรงดันลบ [1] ทำให้เกิดแรงดันเอาต์พุตสูงสุดมีค่าประมาณ 5600 โวลต์ แรงดันส่วนนี้จะส่งผ่านไปยังแมกเนตรอนเพื่อทำให้แมกเนตรอนสามารถกำเนิดความถี่ขึ้นมาได้ โดยทั่วไปความถี่ที่ใช้จะมีค่าอยู่ประมาณ 2450 เมกกะเฮิรตซ์ ซึ่งจะเห็นว่าหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงนี้เป็นส่วนที่สำคัญในวงจรแรงดันสูงในตู้อบไมโครเวฟ

บทความนี้นำเสนอแนวความคิดใหม่ในการออกแบบในส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่ใช้กับตู้อบไมโครเวฟขนาด 700 วัตต์ให้มีโครงสร้างที่เหมาะสม โดยมีเป้าหมายในการออกแบบคือทำให้มีราคาวิศวกรรมที่ต่ำลง (minimum cost design) ด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้วิธีอัลกอริทึมพันธุ (genetic algorithm) ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบราคาของวัสดุที่ใช้, น้ำหนักขดลวด, น้ำหนักแกนเหล็ก และคุณลักษณะทางไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่ผลิตจากโรงงานกับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่ออกแบบโดยใช้วิธีอัลกอริทึมพันธุซึ่งจะใช้แกนเหล็กในการออกแบบชนิดเดียวกันคือ แบบ EI มาตรฐาน ชนิด 50RM800 [2]



รูปที่ 1 วงจรแรงดันสูงในตู้ไมโครเวฟ

โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 6 ส่วนดังนี้ 1) ขดลวดปฐมภูมิ 2) ขดลวดทุติยภูมิ 3) ขดลวด filament 4) แกน shunt 5) แกนแบบ E 6) แกนแบบ I ซึ่งจะเห็นได้ว่าราคาส่วนใหญ่ของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงจะอยู่ที่วัสดุขดลวดและแกนเหล็ก EI ขั้นตอนการประกอบหม้อแปลงนี้ต้องเริ่มจากการใส่ขดลวดทุติยภูมิลงในแกนแบบ E ก่อนตามด้วยขดลวด filament และแกน shunt จากนั้นทำการใส่ขดลวดปฐมภูมิดังแสดงในรูปที่ 2 เมื่อทำการประกอบเสร็จแล้วก็ทำการเชื่อมแกนแบบ E และแกนแบบ I ให้ติดกันด้วยการใช้แก๊สอาร์กอน



รูปที่ 2 ส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง

## 2. วิธีการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้อัลกอริทึมพันธุ

วิธีการหาค่าที่เหมาะสมเป็นการหาค่าตัวแปรของฟังก์ชันเป้าหมาย (objective function) และฟังก์ชันเงื่อนไข (constraint functions) ที่กำหนดให้ ซึ่งรูปแบบของฟังก์ชันสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 1

$$F_{objective}(a,b) \quad 0.03 \leq a \leq 0.300 \text{ m}, \quad 0.01 \leq b \leq 0.100 \text{ m} \quad (1)$$

$$Fitness = \frac{1}{1 + F_{objective}} \quad (2)$$

เมื่อตัวแปร  $a$  กำหนดให้เป็นความหนาของแกนแบบ E และ  $b$  เป็นความกว้างของแกนกลางแบบ E โดยสมการเป้าหมายจะจัดให้อยู่ในรูปตัวแปรของ  $a$  และ  $b$  ซึ่งจะต้องมีการกำหนดขอบเขตของตัวแปรในการออกแบบเพื่อที่จะป้องกันปัญหาที่จะเกิดขึ้นจากการได้ค่าคำตอบของตัวแปรที่เป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ

ขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้อัลกอริทึมพันธุ [3] เริ่มต้นจากการสุ่มค่าของคำตอบในช่วงของตัวแปรที่กำหนดในรูปห้สของเลขฐาน เมื่อได้ค่าคำตอบแล้วนำไปตรวจสอบกับเงื่อนไขหากไม่เป็นที่พอใจจะนำคำตอบเหล่านี้เข้าสู่กระบวนการ 3 ขั้นตอน คือ

1. การคัดเลือกคำตอบที่มีความน่าจะเป็นที่จะทำให้ฟังก์ชันเป้าหมายและเงื่อนไขเป็นที่พอใจ (reproduction)
2. การแลกเปลี่ยนรหัสของคำตอบที่ผ่านการคัดเลือก (cross over)
3. การเปลี่ยนรหัสคำตอบ (mutation)

สมการที่ 2 เป็นเงื่อนไขในการพิจารณาการสิ้นสุดกระบวนการ ดังนั้นในวิธีอัลกอริทึมพันธุจะเป็นการหาค่าที่ดีที่สุดของสมการที่ (1) หรือเป็นการค่ามากที่สุดของสมการที่ (2) ข้อดีของการใช้วิธีอัลกอริทึมพันธุ คือ ไม่มีการหาค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชัน (gradient) ไม่ขึ้นอยู่กับค่าเริ่มต้นที่ใช้ในการประมวลผล และผลที่ได้จะเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด (global optimum)

## 3. การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง

บทความนี้กำหนดเป้าหมายของการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง [4-5] ที่ใช้ในตู้ไมโครเวฟให้มีราคาวัสดุรวมทั้งค่าลงโดยที่ยังคงมีคุณลักษณะทางไฟฟ้าใกล้เคียงกับแบบเดิมซึ่งสามารถตรวจสอบได้จาก การทดสอบโดยการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าของตู้ไมโครเวฟ

$$P = \frac{4.187 \times M_w \times (T_2 - T_1) + 0.55 \times M_c (T_2 - T_0)}{t} \quad (3)$$

$P$  เป็นกำลังไฟฟ้าของตู้ไมโครเวฟ (W),  $M_w$ ,  $M_c$  เป็นมวลของน้ำและบีกเกอร์ (g) ตามลำดับ  $T_0$ ,  $T_1$  และ  $T_2$  เป็นอุณหภูมิของห้องอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ และอุณหภูมิของน้ำหลังจากการทดสอบเสร็จสิ้น ( $^{\circ}\text{C}$ ) ตามลำดับ  $t$  เป็นเวลาที่ใช้ในการทดสอบกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่น้ำโดยไมควิเวลาที่แมกเนตรอนเริ่มทำงาน (วินาที) สมการที่ (3) ใช้ในการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่สามารถทำให้ตู้ไมโครเวฟจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ตามต้องการ สมการที่ (4) ใช้ในการคำนวณหาค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นขณะใช้งานของขดลวดทั้งสองด้าน

$$\Delta T = \frac{R}{r} (k + T_3) - (k + T_4) \quad (4)$$

โดย  $\Delta T$ ,  $T_3$ ,  $T_4$  เป็นอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นขณะใช้งาน อุณหภูมิของห้องขณะเริ่มทำการทดสอบและอุณหภูมิของห้องขณะการทดสอบเสร็จ ( $^{\circ}\text{C}$ ) ตามลำดับ  $r$ ,  $R$  เป็นค่าความต้านทานของขดลวดขณะเริ่มทำการทดสอบและขณะการทดสอบเสร็จสิ้น (โอห์ม) ตามลำดับ  $k$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของขดลวด (ทองแดง = 234.5, อลูมิเนียม = 225)

ในการหาราคารวมของวัสดุที่ใช้ในการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง สามารถพิจารณาได้จาก การคำนวณหาราคาของขดลวดด้านปฐมภูมิ ( $C_p$ ) และด้านทุติยภูมิ ( $C_s$ ) ดังสมการที่ (5)

$$C_p = W_{e_p} \times \beta_p, \quad C_s = W_{e_s} \times \beta_s \quad (5)$$

เมื่อ  $\beta_p, \beta_s$  เป็นราคาของวัสดุขดลวดค้ำานปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิต่อหน่วยน้ำหนัก (บาทต่อกิโลกรัม) ตามลำดับ  $W_{ep}, W_{es}$  เป็นน้ำหนักของขดลวดค้ำานปฐมภูมิและทุติยภูมิที่ออกแบบ (กิโลกรัม) ตามลำดับ โดยที่น้ำหนักของขดลวดสามารถคำนวณได้จากการหาความยาวของลวดที่ใช้ทั้งหมดคูณกับค้ำาน้ำหนัก (กิโลกรัม) ต่อกิโลเมตร สำหรับการค้ำานวณหาค่าราคาแกนเหล็ก ( $C_l$ ) ที่ออกแบบพิจารณาได้จากสมการที่ (6) ซึ่งน้ำหนักของแกนเหล็ก ( $W_{el}$ ) สามารถคำนวณได้จากปริมาตรของแกนเหล็กที่ใช้คูณกับค้ำาคความหนาแน่นของแกนเหล็ก (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$$C_l = W_{el} \times \beta_l \quad (6)$$

เมื่อ  $\beta_l$  เป็นราคาวัสดุแกนเหล็กที่ใช้ต่อหน่วยน้ำหนัก (บาทต่อกิโลกรัม) ดังนั้นฟังก์ชันเป้าหมายสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (7)

$$F(a, b) = C_p + C_s + C_l \quad (7)$$

เมื่อกำหนดฟังก์ชันเป้าหมายแล้วในขั้นตอนสุดท้ายจะต้องทำการตรวจสอบว่าโครงสร้างที่ออกแบบนี้สามารถประกอบได้หรือไม่โดยใช้สมการที่ (8) ซึ่งถ้ามีค่า  $\leq \frac{b}{2}$  แสดงว่าสามารถประกอบได้ โดยที่  $Nols$  เป็นจำนวนชั้นของขดลวดทุติยภูมิ,  $K_1$  เป็นแฟกเตอร์ของการพันขดลวด,  $D_s$  เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอกของเส้นลวด และ  $K_2$  เป็นความหนาของระบบฉนวน

$$Nols \times K_1 \times D_s + K_2 \leq \frac{b}{2} \quad (8)$$

#### 4. ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง

ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟขนาด 700 W เพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีราคาของวัสดุรวมต่ำลง จะใช้หลักการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีอัลกอริทึมพันธุ ซึ่งเป็นโปรแกรมที่พัฒนาโดยใช้ภาษา Visual Basic บทความนี้ได้ทำการออกแบบทั้งหมด 3 ค้ำานแบบโดยใช้แกนเหล็กชนิดเคียวกัน (50RM800) และใช้ขนาดรวมทั้งชนิดของลวดค้ำาน้ำหนักเช่นเดียวกัน ดังนี้

ค้ำานแบบหมายเลข 1 เป็นการออกแบบตามลักษณะโครงสร้างในการผลิตของโรงงานแห่งหนึ่งโดยใช้ค้ำาคความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเหล็ก ( $B_m$ ) เท่ากับ 2.10 Tesla

ค้ำานแบบหมายเลข 2 เป็นการออกแบบโดยใช้วิธีอัลกอริทึมพันธุที่ค่า  $B_m$  เท่ากับ 2.10 Tesla (ใช้ค่าเดียวกับค้ำานแบบหมายเลข 1)

ค้ำานแบบหมายเลข 3 เป็นการออกแบบโดยใช้วิธีอัลกอริทึมพันธุที่ค่า  $B_m$  เท่ากับ 2.15 Tesla (เพิ่มค่า  $B_m$  โดยแกนเหล็กยังไม่อิ่มตัวมาก)

ผลการออกแบบโครงสร้างขดลวดและแกนเหล็กของค้ำานแบบต่าง ๆ ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักที่เกี่ยวข้องกับราคาแสดงได้ดังตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าจากการใช้วิธีอัลกอริทึมพันธุ ค้ำานแบบหมายเลข 2 และ 3 จะใช้จำนวนรอบของขดลวดที่มากกว่าค้ำานแบบหมายเลข 1 แต่ไม่ได้หมายความว่าค้ำานแบบหมายเลข 2 และ 3 จะต้องใช้วัสดุลวดค้ำาน้ำหนักเพิ่มขึ้น

มากมายทั้งนี้เพราะโครงสร้างของแกนเหล็กที่ออกแบบจะมีขนาดที่เล็กลงกว่าเดิม (ค่า  $a$  ลดลงมากกว่าในขณะที่ค่า  $b$  เพิ่มขึ้นเล็กน้อย)

ตารางที่ 1 ผลการออกแบบค้ำานแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง

ค้ำานแบบหมายเลข	1	2	3
ขดลวดปฐมภูมิ (รอบ)	126	141	143
ขดลวดทุติยภูมิ (รอบ)	2270	2541	2600
$a$ (เมตร)	0.069	0.058	0.056
$b$ (เมตร)	0.0254	0.027	0.027

ขนาดลวดค้ำาน้ำหนัก: ค้ำานปฐมภูมิ I-AEW 1.05, ค้ำานทุติยภูมิ I-AEW 0.26

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบค้ำาน้ำหนัก (กิโลกรัม) ของโครงสร้างที่ได้จากการออกแบบกับค้ำานแบบที่สร้างขึ้น

ค้ำานแบบหมายเลข	1		2		3	
	ค้ำานแบบ	ออกแบบ	ค้ำานแบบ	ออกแบบ	ค้ำานแบบ	ออกแบบ
ขดลวดปฐมภูมิ	0.240	0.248	0.246	0.247	0.246	0.246
ผิดพลาด (%)	-		0.8		0.4	
ขดลวดทุติยภูมิ	0.256	0.262	0.264	0.264	0.263	0.263
ผิดพลาด (%)	-		0.7		0.5	
แกนเหล็ก	2.14	1.93	1.97	1.86	1.88	1.88
ผิดพลาด (%)	-		2.2		0.9	

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบราคาวัสดุ (บาท) ของโครงสร้างค้ำานแบบของโรงงาน (1) กับค้ำานแบบที่สร้างขึ้นโดยใช้วิธีอัลกอริทึมพันธุ (2) และ (3)

ค้ำานแบบหมายเลข	1	2	3
ขดลวดปฐมภูมิ	25.85	26.50	26.50
ขดลวดทุติยภูมิ	33.40	34.43	34.30
แกนเหล็ก	48.93	45.22	43.12
ราคาวัสดุรวม	108.18	106.15	103.92
ราคาวัสดุรวมลดลง (%)	-	1.9	3.9

ลวดค้ำาน้ำหนัก: ปฐมภูมิ 107.72 บาทต่อกิโลกรัม ทุติยภูมิ 130.42 บาทต่อกิโลกรัม

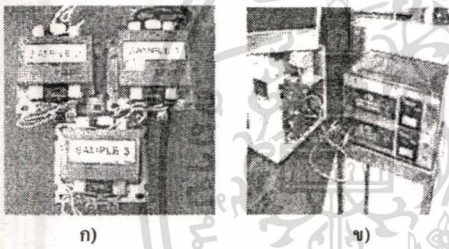
แกนเหล็ก: 50RM800 22.91 บาทต่อกิโลกรัม

ในการสร้างค้ำานแบบได้มีการชั่งน้ำหนักของขดลวดและแกนเหล็กที่ใช้เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมการต่าง ๆ ที่ใช้คำนวณโครงสร้างของขดลวดและแกนเหล็ก จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าจากโครงสร้างของค้ำานแบบหมายเลข 2 และ 3 ค้ำาน้ำหนักของค้ำานแบบที่สร้างขึ้นจะมีค่าใกล้เคียงกับค้ำาน้ำหนักที่คำนวณได้จากการออกแบบ (ผิดพลาด < 3 %) ดังนั้นสมการที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างสามารถนำมาสร้างค้ำานแบบได้จริง ตารางที่ 3 แสดงให้เห็นถึงราคาวัสดุของโครงสร้างค้ำานแบบที่ได้ออกแบบโดยใช้วิธีอัลกอริทึมพันธุเปรียบเทียบกับค้ำานแบบที่ออกแบบจากโรงงาน จะเห็นได้ว่าราคาวัสดุรวมของค้ำานแบบหมายเลข 2 จะลดลงกว่าโรงงาน 2.03 บาท (1.9 %) และค้ำานแบบหมายเลข 3 จะลดลงกว่าโรงงาน

4.26 บาท (3.9 %) ซึ่งทำให้สรุปได้ว่าการออกแบบด้วยวิธีการนี้สามารถทำให้ต้นทุนการผลิตในส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงลดลงได้จริง โดยที่ไม่ได้ใช้วิธีการออกแบบโดยการลองผิดลองถูกซึ่งต้องขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ออกแบบเป็นอย่างมาก จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าการออกแบบโดยใช้วิธีอัลกอริทึมพันธุ จะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างคั้นแบบทั้งจำนวนรอบของขดลวดและขนาดแกนเหล็กที่ใช้ในเวลาเดียวกันเพื่อทำให้ได้ราคาวัสดุรวม (ลวดค้วนำและแกนเหล็ก) ที่ลดลง

5. ผลการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้า

เพื่อการตรวจสอบว่าหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่ออกแบบนี้มีคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่สามารถใช้งานกับตู้อบไมโครเวฟได้โดยจะต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ตามที่ออกแบบ ดังนั้นจึงทำการทดสอบคั้นแบบในสภาวะต่าง ๆ โดยต้องจรงรูปที่ 1 คั้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่สร้างขึ้นและอุปกรณ์สำหรับการทดสอบหาอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของขดลวดแสดงดังรูปที่ 3 ผลการทดสอบในสภาวะต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4 ถึง 6 สัญลักษณ์แรงคั้น, กระแสและกำลังไฟฟ้าที่วัดได้แสดงดังรูปที่ 4 ถึง 6



รูปที่ 3 ก) คั้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง  
ข) อุปกรณ์สำหรับการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของขดลวด

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบสภาวะไร้โหลด (no-load) ที่ 120 V, 60 Hz

คั้นแบบหมายเลข	1	2	3
No-load input current (A)	5.00	4.68	5.25
No-load input power (W)	53.70	51.30	60.90
No-load secondary voltage (V)	2071	2070	2075
No-load filament voltage (V)	3.65	3.65	3.67
ขดลวดปฐมภูมิที่ 20 °C (Ω)*	0.625	0.649	0.630
ขดลวดทุติยภูมิที่ 20 °C (Ω)*	169.5	185.1	177.6

\* DC resistance measurement

จากตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่าในสภาวะไร้โหลด (no-load) กระแสและกำลังไฟฟ้าของคั้นแบบหมายเลข 3 มีค่าสูงกว่าคั้นแบบของโรงงาน เนื่องจากในการออกแบบกำหนดให้ใช้ค่า  $B_m$  สูงกว่าซึ่งเป็นไปตามคุณสมบัติของแกนเหล็กแต่ยังคงสามารถจ่ายค่าแรงคั้นด้านทุติยภูมิได้เช่นเดียวกัน จากตารางที่ 5 ซึ่งเป็นการทำงานในสภาวะเต็มพิกัดจะเห็นว่าค่าสูญเสียของคั้นแบบหมายเลข 3 จะมีค่ามากที่สุด แต่กำลังไฟฟ้าที่ได้จากตู้อบไมโครเวฟของทั้ง 3 คั้นแบบยังมีค่าใกล้เคียงกัน (ประมาณ 700 W)

คุณลักษณะสำคัญที่สุดในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟคือการพิจารณาผลของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของขดลวดจากตารางที่ 6 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของขดลวดขณะใช้งานของคั้นแบบหมายเลข 2 และ 3 จะมีค่าสูงกว่าคั้นแบบของโรงงานไม่มากนัก อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของคั้นแบบทั้ง 2 (160 °C) ยังคงไม่เกินกว่าที่มาตรฐาน UL923 [6] ได้กำหนดไว้ (165 °C)

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบในสภาวะโหลด (on-load) ที่ 60 Hz

คั้นแบบหมายเลข	1	2	3
Input voltage, $V_1$ (V)*	120.6	120.5	120.4
Input current, $I_1$ (A)*	8.265	8.249	8.61
Secondary current, $I_2$ (A)*	0.542	0.549	0.521
Plate current (A)	0.250	0.248	0.238
Secondary voltage, $V_h$ (V)*	2254	2229	2124
Filament voltage (V)	3.19	3.35	3.28
Input power (W)*	929.0	937.0	966.0
Transformer output power (W)*	752.8	762.0	768.1
Transformer efficiency (%)	81.03	81.32	79.51
Power factor	0.93	0.94	0.93
Microwave output power (W)**	696.3	701.2	701.6

\* ใช้ Digital oscilloscope DL 1540C/1540CL (YOKOGAWA)

\*\* ตามมาตรฐาน IEC-335-2-25 [7] โดยใช้สมการที่ (3)

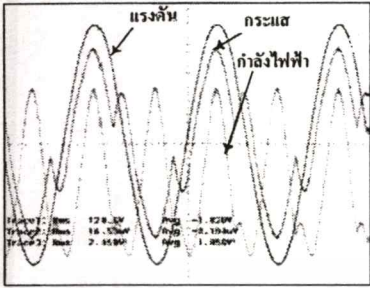
ตารางที่ 6 ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม (°C) ขณะใช้งานตามมาตรฐาน UL923 [6] ขดลวดอุณหภูมิเพิ่มไม่เกิน 165 °C โดยใช้สมการที่ (4)

คั้นแบบหมายเลข	1	2	3
ขดลวดปฐมภูมิ	146.4	152.2	157.2
ขดลวดทุติยภูมิ	153.8	159.0	161.1
แกนเหล็ก	93.2	97.8	98.8

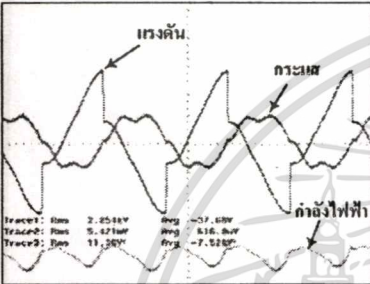
6. บทสรุปและข้อเสนอแนะ

จากผลการออกแบบและทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟโดยใช้วิธีอัลกอริทึมพันธุซึ่งเป็นการนำเสนอแนวทางที่ทำให้มีราคาวัสดุรวมที่ลดลงโดยใช้ตัวแปรการออกแบบคือค่า  $a, b$  สามารถทำให้ได้โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีราคาวัสดุรวมลดลงสรุปได้ว่าผลการออกแบบที่ได้จากวิธีการในบทความนี้สามารถนำไปใช้สร้างและใช้งานได้จริง ผลลัพธ์ที่ได้นี้จะทำให้ต้นทุนของการผลิตลดลงประมาณ 2 % และ 4% สำหรับคั้นแบบหมายเลข 2 และ 3 ตามลำดับ โดยที่ยังคงมีคุณลักษณะทางไฟฟ้าได้ตามที่กำหนดไว้คือ ตู้อบไมโครเวฟสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ตามพิกัด 700 W อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงเรื่องอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นขณะใช้งานซึ่งยังคงอยู่ในมาตรฐาน UL 923 แต่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนี้มีค่าสูงกว่าคั้นแบบของโรงงาน ดังนั้นในงานวิจัยที่จะพัฒนาต่อไปจะมุ่งเน้นถึงวิธีการที่จะลดค่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นขณะใช้งานซึ่งจะ

เกี่ยวข้องกับการกำหนดค่า  $B_m$  ที่ใช้ในการออกแบบโดยจะพัฒนาให้ค่า  $B_m$  ใช้เป็นตัวแปรร่วมในการออกแบบด้วย



ก)

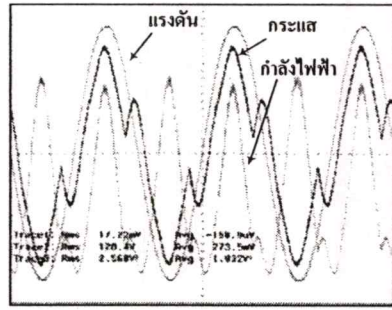


ข)

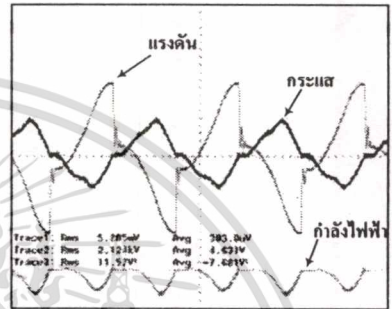
รูปที่ 4 สัญญาณที่ได้จากการทดสอบต้นแบบหมายเลข 1 ในสภาวะทำงาน

ก) input  $V_1 = 120.6 \text{ V}$ ,  $I_1 = 8.265 \text{ A}$ ,  $W_{\text{input}} = 929 \text{ W}$

ข) output  $V_h = 2254 \text{ V}$ ,  $I_2 = 0.542 \text{ A}$ ,  $W_{\text{output}} = 752.8 \text{ W}$



ก)



ข)

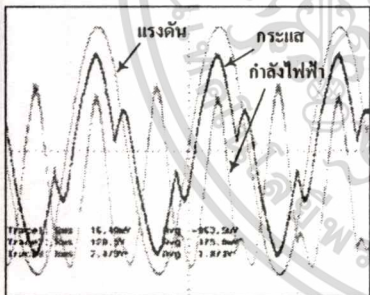
รูปที่ 6 สัญญาณที่ได้จากการทดสอบต้นแบบหมายเลข 3 ในสภาวะทำงาน

ก) input  $V_1 = 120.4 \text{ V}$ ,  $I_1 = 8.61 \text{ A}$ ,  $W_{\text{input}} = 966 \text{ W}$

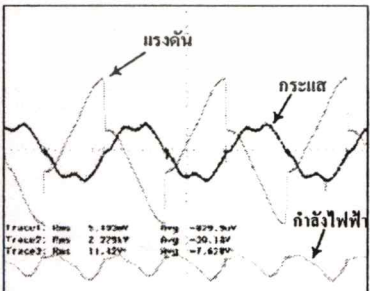
ข) output  $V_h = 2124 \text{ V}$ ,  $I_2 = 0.521 \text{ A}$ ,  $W_{\text{output}} = 768.1 \text{ W}$

### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. C. Gallawa, *Introduction to the High Voltage System Used in Microwave Ovens; The Voltage Doubler Circuit Used In Microwave Oven High Voltage System*, <http://www.gallawa.com/microtech>, Copyright 1989-2002.
- [2] Kawasaki Steel Corporation, *Magnet Steel Sheet*, Sep. 2000.
- [3] Z. Michalewicz, *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, New York: Springer-Verlag, 1996.
- [4] Colonel Wm. T. Mclyman, *Transformer and Inductor Design Handbook*, New York, 1978.
- [5] ชีรพล โทษพงษ์วิวัฒน์, วีระศักดิ์ วงศ์วิวัฒน์ และชัชวาลย์ ฉัตรอุทัย, "การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กประสิทธิภาพสูงโดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม" *การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24 กรุงเทพมหานคร*, หน้า 287-292, 2544.
- [6] *UL 923 Standard for Microwave Cooking Appliances*, Fourth Edition, November, 1995.
- [7] *IEC 335-2-25 Part 2 :Particular Requirements For Microwave Oven*, Third edition, 1993.



ก)



ข)

รูปที่ 5 สัญญาณที่ได้จากการทดสอบต้นแบบหมายเลข 2 ในสภาวะทำงาน

ก) input  $V_1 = 120.5 \text{ V}$ ,  $I_1 = 8.249 \text{ A}$ ,  $W_{\text{input}} = 937 \text{ W}$

ข) output  $V_h = 2229 \text{ V}$ ,  $I_2 = 0.549 \text{ A}$ ,  $W_{\text{output}} = 762 \text{ W}$

## ประวัติผู้เขียน

นายวินัย สิทธินันท์เจริญ เกิดเมื่อวันที่ 15 เดือนมกราคม พ.ศ. 2521 ที่อำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา ปีการศึกษา 2539 สำเร็จการศึกษาประกาศนียบัตรวิชาชีพ แผนกวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง จากวิทยาลัยเทคนิคฉะเชิงเทรา และปีการศึกษา 2543 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากศูนย์กลางสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล

กรกฎาคม 2543 – ปัจจุบัน (2546) เริ่มทำงานในบริษัทไทยตาบู้ อิเล็กทริก จำกัด ตำแหน่งวิศวกรออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

มิถุนายน 2544 เริ่มศึกษาต่อระดับปริญญาโทสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ขณะศึกษามีผลงานวิจัยทางวิชาการได้รับการยอมรับตีพิมพ์และเข้าร่วมนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 25 เรื่องการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับตู้อบไมโครเวฟให้มีราคาต่ำโดยใช้วิธีอัลกอริทึมพันธุ

