

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบพิกัด 200 kV 10 kVA และชุดควบคุม
CONSTRUCTION OF TWO – STAGE CASCADE
TEST TRANSFORMER 200 kV 10 kVA AND CONTROL SYSTEM



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2549

การประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบพิกัด 200 kV 10 kVA และชุดควบคุม
CONSTRUCTION OF TWO – STAGE CASCADE
TEST TRANSFORMER 200 kV 10 kVA AND CONTROL SYSTEM



อาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช
รองศาสตราจารย์ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2549

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบพิกัด 200 KV 10 KVA และชุดควบคุม

ผู้จัดทำ



- 1. นายปากร ศรีธรรม
- 2. นายประสงค์ ศรีละครดี

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนาเดช)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบพิกัด 200 kV 10 kVA และชุดควบคุม

นาย ปากร	ศรีธรรม	
นาย ประสงค์	ศรีละครดี	
อ. นรเศรษฐ	พัฒนเดช	อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ. ศิริวัฒน์	โพธิเวชกุล	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2549		

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอผลการออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบต้นแบบที่ใช้ถึงเป็นฉนวนและต่อแบบขึ้นบันไดพิกัด 200 kV 10 kVA 50 Hz ซึ่งประกอบด้วยหม้อแปลงทดสอบ 100 kV 10 kVA ที่มีขดลวด 3 ชุด จำนวน 2 ตัว โดยใช้กระดาษกราฟเป็นฉนวนระหว่างชั้นขดลวด มีการใส่ซิลต์ทองแดงควบคุมแรงดันกระจายของขดลวดแรงสูง โดยใช้ท่อพีวีซีเป็นฉนวนภายนอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 นิ้ว และมีน้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนแทรกซึมและระบายความร้อนภายใน โดยหลักการทำงานและเงื่อนไขในการออกแบบถูกอธิบายดังรายละเอียดในบทความฉบับนี้ หม้อแปลงทดสอบที่ได้จัดสร้างขึ้นมามีคุณสมบัติทางไฟฟ้า คุณลักษณะทางการฉนวนและทางความร้อนตามที่ได้ออกแบบไว้ทุกประการและสอดคล้องกับข้อกำหนดตามมาตรฐานสากล นอกจากนี้แล้วได้ออกแบบสร้างชุดควบคุมการทำงานของหม้อแปลง การออกแบบสร้างหม้อแปลงและชุดควบคุมได้จัดทำขึ้นโดยมีจุดประสงค์จะนำไปใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**CONSTRUCTION OF TWO – STAGE CASCADE TEST TRANSFORMER
200 kV 10 kVA AND CONTROL SYSTEM**

Pakorn	Srithum	
Prasong	Srilakorndee	
Norasage	Pattanadech	Advisor
Assoc.Prof. Siriwat	Potivejkul	Advisor
2006		

ABSTRACT

This project presents design and construction of a test transformer of 200 kV 10 kVA 50 Hz, with two 100 kV 10 kVA oil immersed three winding type transformers. Kraft paper is used as an insulation between layers of the windings. The copper shields are inserted for controlling the voltage distribution of the high voltage winding. The insulating shell is made of PVC cylinder, that size is 24 inches. Transformer oil is used as a space insulation and cooling. The operation principles and design considerations are described in detail in this project. This designed test transformer performed very well in electrical, insulation and heat characteristic followed the design conditions and the international standards. In addition to this project presents design and construction of control circuit that use to control test transformer. This testing transformer and control will be use for testing electrical equipments in high voltage laboratory in King mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

III
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญ	III
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	XII

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย	2
1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	3
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากการทำวิจัย	3
1.7 แผนการดำเนินงานในโครงการวิศวกรรม	4

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 หม้อแปลงทดสอบ	6
2.1.1 หม้อแปลงทดสอบจะกำหนดด้วย	7
2.1.2 ขนาดแรงดันที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ	7
2.1.3 กระแสที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ	7
2.1.4 ขนาดกำลังไฟฟ้าที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ	8
2.1.5 โครงสร้างและการฉนวนหม้อแปลงทดสอบ	9
2.1.6 หม้อแปลงต่อแบบชั้นบันได	11

บทที่ 3 การออกแบบสร้างชิ้นงาน

3.1 การออกแบบแกนเหล็ก	12
3.2 การออกแบบขดลวด	21
3.2.1 การออกแบบขดลวดแรงต่ำ	21
3.2.2 การออกแบบขดลวดแรงสูง	26
3.2.3 การออกแบบขดลวดต่อควบ	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IV
สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3 การหาขนาดท่อนำสายแรงดันสูง	37
3.4 การหาขนาดอิเล็กทรอนิกส์ภายนอก	38
3.5 ซีลด์ขั้วแรงสูงและซีลด์ขั้วนิวตริล	39
3.6 การคำนวณปริมาตรน้ำมันหม้อแปลง	39
3.7 การถ่ายเทความร้อน(Heat Dissipation)	42
3.7.1 การนำความร้อน	42
3.7.2 การพาความร้อน	45
3.7.3 การแผ่รังสีความร้อน	45
3.8 การคำนวณแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์(%Z)	46
3.9 การคำนวณกระแสไฟฟ้าลัดวงจร(I_{sc})	47
3.10 กำลังไฟฟ้าลัดวงจร(S_{sc})	47
3.11 การออกแบบตัวถัง	47
3.12 การออกแบบชุดควบคุม	52
3.12.1 กำหนดฟังก์ชันการทำงานของชุดควบคุม	52
3.12.2 การหาค่าพิกัดอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในชุดควบคุม	52
3.12.3 ออกแบบวงจรชุดควบคุม	53
3.12.4 จัดทำรายการอุปกรณ์ที่ใช้ในการประกอบชุดควบคุม	55
บทที่ 4 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	56
บทที่ 5 การประกอบสร้างชิ้นงาน	62
5.1 แกนเหล็ก	62
5.1.1 การตัดเหล็ก	62
5.1.2 การเรียงเหล็ก	66
5.2 การประกอบสร้างซีลด์	69
5.2.1 ซีลด์ขั้วนิวตริล	69
5.2.2 ซีลด์ขั้วแรงสูง	70
5.3 การพันขดลวดแรงต่ำ	71
5.4 การพันขดลวดแรงสูง	73
5.5 การพันขดลวดต่อควบ	77
5.6 การสวมขดลวดลงแกนเหล็ก	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V
สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.7 การต่อขั้วสาย	81
5.8 ประกอบตัวถัง ปิดฝาและเติมน้ำมัน	85
5.9 การประกอบสร้างชุดควบคุม	87
5.9.1 การประกอบชุดมอเตอร์เข้ากับหม้อแปลงปรับแรงดัน	87
5.9.2 การประกอบแผงวงจร	88
5.9.3 การประกอบอุปกรณ์ต่างๆเข้ากับตู้	89
บทที่ 6 การทดสอบ	90
6.1 การทดสอบหม้อแปลงเดี่ยว	91
6.1.1 การวัดค่าความต้านทานฉนวน	91
6.1.2 การทดสอบหาค่าอัตราส่วนของแรงดัน	93
6.1.3 การวัดค่าความต้านทานกระแสตรงของขดลวด	94
6.1.4 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลด	96
6.1.5 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดและแรงดันลัดวงจร	98
6.1.6 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกินกระแสลัด	100
6.1.7 การทดสอบการเกิดเบรกดาวผ่านช่องว่างทรงกลม	101
6.2 การทดสอบหม้อแปลงสองตัวต่อแบบคาสเคด	102
6.2.1 ทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกินกระแสลัดเมื่อต่อคาสเคดกัน	103
6.2.2 การทดสอบการเกิดเบรกดาวผ่านช่องว่างทรงกลม เมื่อต่อคาสเคดกัน	104
6.3 การทดสอบชุดควบคุม	105
บทที่ 7 สรุปและข้อเสนอแนะ	107
7.1 สรุป	107
7.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	108
เอกสารอ้างอิง	109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VI
สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	110
ภาคผนวก ข	132
ภาคผนวก ค	147
ภาคผนวก ง	148
กิตติกรรมประกาศ	152



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

vii
สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบวงจรแม่เหล็กไฟฟ้า	5
รูปที่ 2.2 หม้อแปลงแบบหุ้มด้วยฉนวนแห้ง	10
รูปที่ 2.3 หม้อแปลงแบบจุ่มน้ำมัน	10
รูปที่ 2.4 ไดอะแกรมการต่อหม้อแปลงทดสอบแบบชั้นบันได	11
รูปที่ 3.1 ภาพตัดขวางพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก	15
รูปที่ 3.2 การไหลของเส้นแรงแม่เหล็กที่การตัดแผ่นเหล็กแบบมุมฉากและมุม 45°	15
รูปที่ 3.3 ภาพก่อนและหลังการตัดมุมแกนเหล็ก	16
รูปที่ 3.4 การกำหนดความกว้างแกนเหล็กให้สามารถบรรจุลงถังได้	16
รูปที่ 3.5 ขนาดของแกนเหล็ก	17
รูปที่ 3.6 ลักษณะการพันขดลวดล้อมแกนเหล็ก	18
รูปที่ 3.7 ภาพตัดของลวดแรงต่ำ	21
รูปที่ 3.8 ภาพตัดขดลวดแรงสูง	26
รูปที่ 3.9 การพันขดลวดแรงสูงแบบเกรดตั้ง	28
รูปที่ 3.10 ภาพตัดขดลวดต่อควบ	35
รูปที่ 3.11 ภาพตัดของขดลวดตามแนวแกนเหล็ก	41
รูปที่ 3.12 ภาพตัดของขดลวดตามแนวขวางแกนเหล็ก	42
รูปที่ 3.13 พื้นที่ผิวภายนอกฉนวน	44
รูปที่ 3.14 ผลการทดสอบแรงดันวาบไฟตามผิวไฟฟ้ากระแสสลับ	48
รูปที่ 3.15 อิเล็กโทรดแรงสูงที่เหมาะสมที่ใช้กับแรงดันขนาด 100-200 kV	49
รูปที่ 3.16 ลักษณะตัวถังหม้อแปลงทดสอบที่ออกแบบ	49
รูปที่ 3.17 Power Circuit	53
รูปที่ 3.18 Control Circuit	54
รูปที่ 3.19 Drive Circuit	54
รูปที่ 4.1 การกระจายแรงดันไฟฟ้า (Electric potential) บริเวณภายในหม้อแปลง ที่แรงดันสูงสุด 100 kV	56
รูปที่ 4.2 ความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field) บริเวณท่อของซิลต์ขั้วแรงสูง ที่แรงดันสูงสุด 100 kV	57
รูปที่ 4.3 การกระจายแรงดันไฟฟ้า (Electric potential) บริเวณตัวถังหม้อแปลง ที่แรงดันสูงสุด 100 kV	58
รูปที่ 4.4 ความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field) ของบริเวณตัวถังหม้อแปลง ที่แรงดันสูงสุด 100 kV	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.5 การกระจายแรงดันไฟฟ้า (Electric potential) บริเวณตัวถังหม้อแปลง ที่แรงดันสูงสุด 200 kV	60
รูปที่ 4.6 ความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field) บริเวณตัวถังหม้อแปลง ที่แรงดันสูงสุด 200 kV	61
รูปที่ 5.1 เครื่องที่ใช้ในการตัดเหล็ก	64
รูปที่ 5.2 เหล็กม้วน M-4 หน้า 0.27 mm.	64
รูปที่ 5.3 เหล็กแผ่นที่ตัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว	64
รูปที่ 5.4 การตัดแผ่นเหล็กด้วยมือ	65
รูปที่ 5.5 การนำแกนเหล็กมาวัดขนาดเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง	65
รูปที่ 5.6 การวางแคลมป์ก่อนทำการเรียงแกนเหล็ก	66
รูปที่ 5.7 การเรียงแกนเหล็ก หน้าตัด 110 mm.	66
รูปที่ 5.8 การเรียงแกนเหล็ก หน้าตัด 80 mm	67
รูปที่ 5.9 การเรียงแกนเหล็กจริง	67
รูปที่ 5.10 การเหลื่อมกันของแกนเหล็ก	67
รูปที่ 5.11 การวัดความหนาของแกนเหล็ก	68
รูปที่ 5.12 แกนเหล็กที่เรียงเสร็จเรียบร้อยแล้ว	68
รูปที่ 5.13 การนำแคลมป์มาหนีบแกนเหล็ก	68
รูปที่ 5.14 การตัดแผ่นทองแดงเพื่อนำไปทำ shield	69
รูปที่ 5.15 การทำตัว shield นิวทรัล	69
รูปที่ 5.16 การเชื่อมตัว shield กับ ring	69
รูปที่ 5.17 shield ขั้วนิวทรัลที่เสร็จแล้ว	69
รูปที่ 5.18 การทำตัว shield แรงสูง	70
รูปที่ 5.19 การเชื่อมตัว shield แรงสูงกับ ring	70
รูปที่ 5.20 การเชื่อมตัว shield แรงสูง กับ ท่อนำสาย	70
รูปที่ 5.21 กระจาดขนวน	71
รูปที่ 5.22 mandrel ของขดลวดแรงต่ำ	71
รูปที่ 5.23 การหักสายลวด	71
รูปที่ 5.24 แกนกลางของขดลวดแรงต่ำ	72
รูปที่ 5.25 การพันขดลวดแรงต่ำ	72
รูปที่ 5.26 การพันกระจาดขนวน	72
รูปที่ 5.27 การหักสายลวดออกมา	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IX
สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.28 การพันกระดาษรองน้ำมัน	73
รูปที่ 5.29 ขดลวดแรงต่ำที่พันเสร็จเรียบร้อยแล้ว	73
รูปที่ 5.30 แกนกลางของขดลวดแรงสูง	73
รูปที่ 5.31 เตรียมพันขดลวดแรงสูง	73
รูปที่ 5.32 เริ่มพันขดลวดแรงสูง	74
รูปที่ 5.33 เริ่มพันขดลวดแรงสูงชั้นที่ 2	74
รูปที่ 5.34 การพันกระดาษ end insulation	74
รูปที่ 5.35 การพันขดลวดแรงสูง	74
รูปที่ 5.36 ขดลวดแรงสูงที่พันเสร็จเรียบร้อยแล้ว	75
รูปที่ 5.37 แบบการพันขดลวดแรงสูง	76
รูปที่ 5.38 การหักสายขดลวดต่อควบ	77
รูปที่ 5.39 ทำการพันขดลวดต่อควบ	77
รูปที่ 5.40 ขดลวดต่อควบที่พันเสร็จเรียบร้อยแล้ว	77
รูปที่ 5.41 การพันผ้ารัดขดลวดให้แน่น	77
รูปที่ 5.42 การตัดกระดาษเพื่อนำมาหุ้มshield	78
รูปที่ 5.43 การหุ้ม shield	78
รูปที่ 5.44 ขดลวดที่หุ้มเรียบร้อยแล้ว	78
รูปที่ 5.45 แบบการพันขดลวดต่อควบ	79
รูปที่ 5.46 การสวมขดลวดลงแกน	80
รูปที่ 5.47 แกนเหล็กที่ลงขดลวดเรียบร้อยแล้ว	80
รูปที่ 5.48 น็อตทองเหลือง	81
รูปที่ 5.49 ขั้วสาย	81
รูปที่ 5.50 ขั้วสายที่ยึดติดกับแผ่นแบกกะไลด์	82
รูปที่ 5.51 การต่อสาย	82
รูปที่ 5.52 กระดาษชุบน้ำพันรอบจุดต่อก่อนทำการเชื่อม	82
รูปที่ 5.53 การเชื่อมขั้วสาย	82
รูปที่ 5.54 การลองใส่ขั้วสายกับแผ่นแบกกะไลด์	83
รูปที่ 5.55 ขั้วสายที่เชื่อมเสร็จเรียบร้อยแล้ว	83
รูปที่ 5.56 การต่อสายกราวด์	83
รูปที่ 5.57 ใ้หม้อแปลงที่ต่อสายเสร็จเรียบร้อยแล้ว	83
รูปที่ 5.58 การนำใ้หม้อแปลงเข้าไปอบ	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.59 การนำไส้หม้อแปลงเข้าไปอบ	84
รูปที่ 5.60 เครื่องที่ใช้ในการอบไส้หม้อแปลง	84
รูปที่ 5.61 การนำตัวถังพีวีซีมาครอบไส้หม้อแปลง	85
รูปที่ 5.62 การใส่แหวนล็อก	85
รูปที่ 5.63 รูปหม้อแปลงก่อนการเติมน้ำมัน	85
รูปที่ 5.64 ห้องสุญญากาศ	85
รูปที่ 5.65 การเติมน้ำมันในห้องสุญญากาศ	86
รูปที่ 5.66 รูปที่เติมน้ำมันเสร็จเรียบร้อยแล้ว	86
รูปที่ 5.67 การใส่แผ่นแบกกะไลต์เข้ากับขั้วสาย	86
รูปที่ 5.68 หม้อแปลงที่เสร็จเรียบร้อยแล้ว	86
รูปที่ 5.69 มอเตอร์ใช้ขับหม้อแปลงปรับแรงดัน	87
รูปที่ 5.70 มอเตอร์เมื่อประกอบเข้ากับหม้อแปลงปรับแรงดัน	87
รูปที่ 5.71 ทำการประกอบแผงวงจรควบคุม(1)	88
รูปที่ 5.72 ทำการประกอบแผงวงจรควบคุม(2)	88
รูปที่ 5.73 แผงวงจรที่ทำการประกอบเสร็จแล้ว	88
รูปที่ 5.74 ทำการประกอบแผงวงจรเข้ากับตู้	89
รูปที่ 5.75 แผงหน้าปัดของตู้เมื่อประกอบเสร็จแล้ว	89
รูปที่ 6.1 หม้อแปลงที่เคยประกอบสร้างไว้แล้วก่อนหน้านี้	90
รูปที่ 6.2 หม้อแปลงที่ประกอบสร้างขึ้นใหม่	90
รูปที่ 6.3 วงจรการทดสอบความต้านทานฉนวนระหว่างขดลวดแรงต่ำกับขดลวดแรงสูง	91
รูปที่ 6.4 การทดสอบค่าความต้านทานฉนวน	91
รูปที่ 6.5 วงจรการทดสอบหาค่าอัตราส่วนของแรงดัน	93
รูปที่ 6.6 การทดสอบหาค่าอัตราส่วนของแรงดันโดยใช้เครื่อง MULTI-AMP 820130	93
TRANSFORMER RATIO METER	
รูปที่ 6.7 วงจรการวัดค่าความต้านทานกระแสตรงของขดลวด	95
รูปที่ 6.8 การวัดค่าความต้านทานกระแสตรงของขดลวด	95
รูปที่ 6.9 วงจรการวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลด	96
รูปที่ 6.10 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลดใช้เครื่อง	97
YOKOGAWA 2533 DIGITAL POWER METER	
รูปที่ 6.11 วงจรการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดและแรงดันลัดวงจร	98

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 6.12 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดและแรงดันลัดวงจรใช้เครื่อง YOKOGAWA YEW 2533 DIGITAL POWER METER	98
รูปที่ 6.13 วงจรทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกินกระแสสลับ	100
รูปที่ 6.14 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกินกระแสสลับ ใช้เครื่อง YOKOGAWA 2533 DIGITAL POWER METER	100
รูปที่ 6.15 วงจรทดสอบการเกิดเบรกดาว์นผ่านช่องว่างทรงกลม	101
รูปที่ 6.16 การทดสอบการเกิดเบรกดาว์นผ่านช่องว่างทรงกลม	101
รูปที่ 6.17 ยกหม้อแปลงวางซ้อนกัน	102
รูปที่ 6.18 ทำการต่อคาสเคดกัน	102
รูปที่ 6.19 วงจรการทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกินกระแสสลับเมื่อต่อคาสเคดกัน	103
รูปที่ 6.20 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกินกระแสสลับเมื่อต่อคาสเคดกัน	103
รูปที่ 6.21 วงจรทดสอบการเกิดเบรกดาว์นผ่านช่องว่างทรงกลมเมื่อต่อคาสเคดกัน	104
รูปที่ 6.22 การทดสอบการเกิดเบรกดาว์นผ่านช่องว่างทรงกลมเมื่อต่อคาสเคดกัน	104

XII

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แสดงตารางการดำเนินงาน	4
ตารางที่ 2.1 แสดงกระแสสูงสุดที่ใช้ทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าความถี่ต่ำเมื่อทดสอบด้วยแรงดัน 100 kV	8
ตารางที่ 2.2 แสดงค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุฉนวนและอุปกรณ์ไฟฟ้า	9
ตารางที่ 3.1 ค่ากำหนดของหม้อแปลงทดสอบที่ออกแบบ	13
ตารางที่ 3.2 รูปลักษณะของแกนเหล็ก	20
ตารางที่ 3.3 รูปลักษณะของขดลวดแรงต่ำ	25
ตารางที่ 3.4 รูปลักษณะของขดลวดแรงสูง	33
ตารางที่ 3.5 รูปลักษณะของขดลวดต่อควบ	37
ตารางที่ 3.6 ขนาดของท่อนำสายแรงดันสูงที่ได้จากการคำนวณ	38
ตารางที่ 3.7 ขนาดท่อนำสาย	38
ตารางที่ 3.8 ขนาดของอิเล็กโทรดซีลด์ภายนอกที่ได้จากการคำนวณจากสมการ 3.27	40
ตารางที่ 3.9 ขนาดซีลด์ซีวแรงสูงและซีลด์ซีวนิวทรัลที่ได้จากการคำนวณจากสมการ 3.27	40
ตารางที่ 5.1 แสดงจำนวนแผ่นเหล็กซิลิคอนตามขนาดและรูปร่าง	62
ตารางที่ 5.2 แสดงจำนวนแผ่นเหล็กซิลิคอนตามขนาดและรูปร่าง	63
ตารางที่ 6.1 ผลการทดสอบค่าความต้านทานของฉนวน	92
ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบหาอัตราส่วนแรงดัน	94
ตารางที่ 6.3 ค่าความต้านทานกระแสตรงของขดลวด	96
ตารางที่ 6.4 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลด	97
ตารางที่ 6.5 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดและแรงดันลัดวงจร อุณหภูมิขณะทดสอบ 32.4 °C	99
ตารางที่ 6.6 รูปลค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิห้องทดสอบ และ 75 °C	99
ตารางที่ 6.7 ผลการทดสอบการใช้งานของหม้อแปลง	102
ตารางที่ 6.8 ผลการทดสอบการใช้งานของหม้อแปลงเมื่อต่อคาสเกตกัน	105
ตารางที่ 7.1 ค่าพิกัดของหม้อแปลงทดสอบ	107
ตารางที่ 7.2 ผลการทดสอบฟังก์ชันการทำงานของชุดควบคุม	108

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หม้อแปลงทดสอบเป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับจ่ายแรงดันทดสอบกระแสสลับความถี่ต่ำ เพื่อใช้ในการทดสอบวัสดุและอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงก่อนนำไปติดตั้งใช้งานในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ซึ่งอุปกรณ์ต่างๆที่ติดตั้งในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูงมีโอกาสได้รับแรงดันเกินทั้งที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างกะทันหัน หม้อแปลงไฟฟ้าก็เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าแรงสูงชนิดหนึ่งซึ่งอาจเกินแรงดันเกินต่อตัวหม้อแปลงได้ดังนั้นการทดสอบหม้อแปลงให้ได้ตามมาตรฐานจึงต้องมีการทดสอบแรงดันเกินระดับพิกัดแรงดันของหม้อแปลงด้วย ซึ่งจำเป็นต้องใช้หม้อแปลงทดสอบซึ่งมีคุณสมบัติจ่ายแรงดันได้สูงที่พิกัดกำลังต่ำ

จากการที่ทางบริษัท Thai Trafo Manufacturing CO.,LTD เป็นผู้ผลิตหม้อแปลงทั้งหม้อแปลงกำลังและหม้อแปลงจำหน่ายซึ่งหม้อแปลงทุกใบต้องผ่านการทดสอบแรงดันเกินชั่วขณะ จึงมีความจำเป็นต้องใช้หม้อแปลงทดสอบที่สามารถจ่ายแรงดันได้สูง ซึ่งหม้อแปลงทดสอบนี้ไม่มีจำหน่ายภายในประเทศต้องสั่งนำเข้าจากต่างประเทศและมีราคาสูง ทางบริษัทและภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จึงมีความร่วมมือออกแบบและประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบ 200 kV 10 kVA และชุดควบคุมขึ้นเพื่อนำหม้อแปลงทดสอบมาใช้ที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อใช้ในการเรียนการสอนและทำการวิจัยเกี่ยวกับไฟฟ้าแรงสูงของนักศึกษาระดับปริญญาตรี บัณฑิตศึกษา อาจารย์ และนักวิจัยรวมทั้งบริการการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงชนิดต่างๆให้กับภาครัฐและเอกชน และบริษัท Thai Trafo Manufacturing CO.,LTD สามารถนำแบบของหม้อแปลงทดสอบดังกล่าวมาประกอบสร้างเพื่อนำมาใช้งานที่บริษัทต่อไปหรือเป็นประโยชน์ในการซ่อมบำรุงหม้อแปลงทดสอบที่มีอยู่

1.2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าได้เคยมีการออกแบบสร้างหม้อแปลงทดสอบแบบถังโลหะและแบบถังฉนวน แบบมีขดลวด 3 ชุด 2 ตัวที่คล้ายกันซึ่งมีพิกัด 100 kV 5 kVA และสามารถต่อกันแบบชั้นบันไดโดยวางซ้อนกันจะได้แรงดันสูงเพิ่มขึ้นเป็น 200 kV และพิกัดกำลังไฟฟ้า 10 kVA โดยใช้ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 cm ทำเป็นฉนวนภายนอกและใช้น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนภายใน

1.3 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบแบบ cascade พิกัด 200 kV 10 kVA เพื่อนำมาใช้ที่ห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังสำหรับการศึกษา ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงของนักศึกษาระดับปริญญาตรี บัณฑิตศึกษา อาจารย์ และนักวิจัย
2. จากแบบการสร้างหม้อแปลง บริษัท Thai Trafo Manufacturing CO.,LTD สามารถนำแบบหม้อแปลงทดสอบดังกล่าวไปสร้างเพื่อใช้ในโรงงานรวมทั้งใช้เป็นแนวทางในการซ่อมบำรุงรักษาหม้อแปลงทดสอบที่มีอยู่เดิมที่เป็นของต่างประเทศ
3. เพื่อให้ให้นักศึกษาที่ทำวิจัยสามารถออกแบบและประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบได้และเรียนรู้การทำงานจริงในโรงงานอุตสาหกรรม

1.4 ขอบเขตและข้อกำหนดในงานวิจัย

1. ทำการออกแบบสร้างหม้อแปลงทดสอบแบบถังฉนวนที่พิกัด 100 kV 10kVA จากนั้นนำมาทำการทดสอบกับหม้อแปลงที่ได้ทำการประกอบสร้างเสร็จแล้วก่อนหน้านี้เป็นพิกัด 200 kV 10 kVA โดยอ้างอิงการออกแบบและประกอบสร้างในส่วนต่างๆ จากมาตรฐาน

ASTM D877-87 (89) [2]

ASTM D924-82(90) [3]

BS 4653 [4]

DIN 51353 [5]

DIN 7733 [6]

IEC 76-1 [7]

IEC 76-2 [8]

IEC 76-3 [9]

IEC 641-3-1 (type B.2.1, B.3.1, B.4.1) [10]

JIS C3202 [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอก. 82-2527 ลวดทองแดงกลมตันเคลือบโพลีไวนิลฟอร์มัล [12]

JIS C-2305 (class 2) Insulation Paper/Press board [13]

2. ใช้โปรแกรมไฟไนต์เม้นท์ในการวิเคราะห์การกระจายและความเครียดของสนามไฟฟ้าในแต่ละจุดของหม้อแปลงทดสอบ
3. ทำการทดสอบการใช้งานของหม้อแปลงตามมาตรฐานข้างต้น
4. ทำการออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมการทำงานของหม้อแปลงทดสอบ

1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีการออกแบบสร้างหม้อแปลงทดสอบ
2. ออกแบบสร้างหม้อแปลงทดสอบ
3. ปรับปรุงแบบที่ออกแบบสร้างให้สอดคล้องกับวัสดุและเครื่องมือที่ได้รับการสนับสนุนจากภาคอุตสาหกรรม
4. ดำเนินการจัดสร้างหม้อแปลงทดสอบ
5. ทำการทดสอบหม้อแปลงทดสอบที่จัดสร้างขึ้นและปรับปรุงให้หม้อแปลงทดสอบมีคุณสมบัติสอดคล้องกับมาตรฐานสากล

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากการทำวิจัย

1. ได้หม้อแปลงทดสอบแบบ cascade พิกัด 200 KV 10 KVA เพื่อนำมาใช้ที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์และนักวิจัย สามารถที่จะศึกษาและทำการวิจัยเกี่ยวกับปรากฏการณ์ไฟฟ้าแรงสูงเพื่อทำให้เกิดองค์ความรู้ที่แท้จริง
3. สถาบันสามารถบริการทดสอบทางด้านไฟฟ้าแรงสูงให้กับภาครัฐและเอกชนได้เป็นอย่างดีซึ่งในปัจจุบันห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงที่สมบูรณ์และมีความสามารถให้บริการทดสอบหรือคำแนะนำแก่ผู้ประกอบการในประเทศไทยยังมีอยู่น้อยมาก
4. นักศึกษาที่ทำวิจัยได้ความรู้จากการได้ออกแบบหม้อแปลงทดสอบและได้รับประสบการณ์จากการปฏิบัติงานในโรงงาน
5. จากแบบการสร้างหม้อแปลงบริษัท Thai Trafo Manufacturing CO.,LTD สามารถนำแบบหม้อแปลงทดสอบ ดังกล่าว ไปสร้างเพื่อใช้ในโรงงานต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7 แผนการดำเนินงานในโครงการวิศวกรรม

ตารางที่ 1.1 แสดงตารางการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	2549										2550		
	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1.ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการออกแบบและการประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบและมาตรฐานต่าง ๆ	■												
2.ศึกษาการใช้โปรแกรมไฟในอิลิมেন্ট	■												
3. ประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบ			■	■	■	■	■	■	■	■			
4. ทำการทดสอบและนำหม้อแปลงทดสอบมาต่อกันแบบชั้นบันได							■	■	■	■			
5.ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุม							■	■	■	■			
6.ทำการออกแบบชุดควบคุม									■	■			
7.ทำการประกอบสร้างชุดควบคุม											■	■	
8.ทำการทดสอบชุดควบคุม												■	■
9.สรุปและจัดทำปริญญาบัตร							■	■	■	■	■	■	■

■ การดำเนินงานที่กำหนดไว้

□ การดำเนินงานจริง

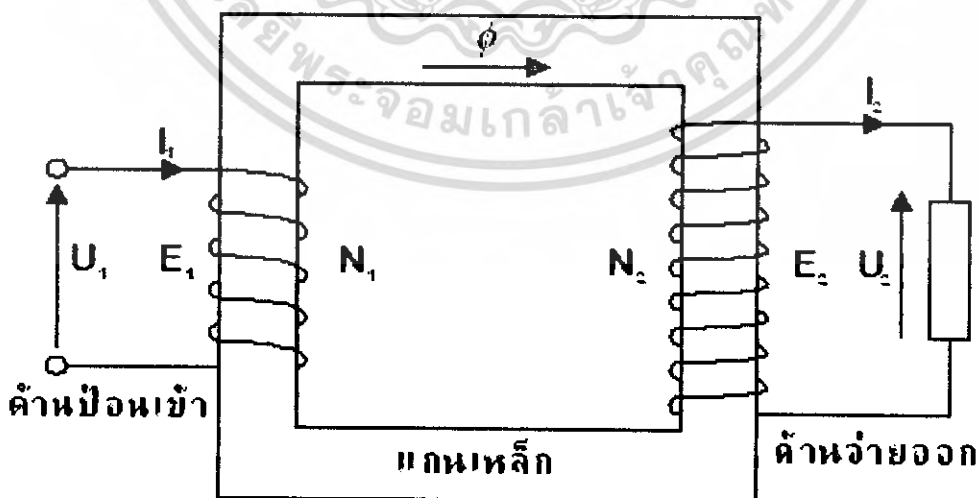
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากแรงดันระดับหนึ่งไปยังแรงดันอีกระดับหนึ่ง อาจสูงขึ้นหรือต่ำลง หรือเท่าเดิมก็ได้ เช่น หม้อแปลงขดลวดแยก หลักการทำงานของหม้อแปลงจะอาศัยการเหนี่ยวนำของขดลวด ที่อยู่ในสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ส่วนประกอบที่สำคัญของหม้อแปลง ประกอบด้วย แกนเหล็กเป็นทางเดิน ของฟลักซ์แม่เหล็ก และมีขดลวดสองชุด ชุดหนึ่งเป็นด้านป้อนแรงดันเข้า อีกชุดหนึ่งเป็นด้านจ่ายแรงดันออก พันอยู่บนแกนเหล็ก ดังรูปที่ 2.1 นอกจากแกนเหล็กและขดลวดแล้ว ก็ยังมีฉนวนซึ่งถือเป็นส่วนประกอบสำคัญในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทุกชนิด [14]

- กำหนดให้ ϕ คือ ฟลักซ์แม่เหล็ก
 N_1 คือ จำนวนรอบขดลวดด้านป้อนเข้า
 N_2 คือ จำนวนรอบขดลวดด้านจ่ายออก
 U_1 คือ แรงดันที่ป้อนเข้า
 U_2 คือ แรงดันที่จ่ายออก
 E_1 คือ แรงดันที่เหนี่ยวนำด้านป้อนเข้า
 E_2 คือ แรงดันที่เหนี่ยวนำด้านจ่ายออก
 I_1 คือ กระแสด้านป้อนเข้า
 I_2 คือ กระแสด้านจ่ายออก



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบวงจรแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำบนขดลวดเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์

$$e(t) = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

เมื่อป้อนแรงดันกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ให้กับขดลวดทางด้านกำลังไฟฟ้าเข้า จะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กเป็นรูปคลื่นไซน์ด้วย

$$\phi(t) = \phi_{\max} \sin \omega t \quad (2.2)$$

ฉะนั้นแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดอีกชุดหนึ่งด้านจ่ายกำลังไฟฟ้าออก เปลี่ยนไปตามเวลา คือ

$$e(t) = -N\omega \phi_{\max} \cos \omega t \quad (2.3)$$

จะเห็นว่าแรงดันเหนี่ยวนำ $e(t)$ จะนำหน้าเส้นฟลักซ์แม่เหล็ก $\phi(t)$ เป็นมุมทางไฟฟ้า $90^\circ (= \pi/2)$ แรงดันเหนี่ยวนำค่า r.m.s. คือ

$$E = \frac{2}{\sqrt{2}} \pi f N \phi_{\max} \quad (2.4)$$

$$E = 4.44 f N \phi_{\max} \quad (2.5)$$

โดยที่ $\phi_{\max} = B_{\max} A$

จะได้สมการพื้นฐานของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดของหม้อแปลงคือ

$$E = 4.44 f N B_{\max} A \quad (2.6)$$

2.1 หม้อแปลงทดสอบ

หม้อแปลงทดสอบเป็นหม้อแปลงที่ใช้สร้างแรงดันสูงสำหรับการทดสอบวัสดุ ฉนวนหรืออุปกรณ์ที่จะนำไปใช้ในระบบส่งจ่ายแรงสูง โดยทั่วไปจะเป็นแบบเฟสเดียวมีกำลังไฟฟ้าต่ำเมื่อเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแต่มีแรงดันสูง แรงดันทางด้านจ่ายออกจะขึ้นกับแรงดันทางด้านป้อนเข้าซึ่งจะใช้หม้อแปลงปรับแรงดัน (Regulator) [14]

2.1.1 หม้อแปลงทดสอบจะกำหนดด้วย

- 1) แรงดันที่ป้อนเข้า (V_i) และแรงดันที่จ่ายออก (V_o)
- 2) กระแสที่ป้อนเข้า (I_i) และกระแสที่จ่ายออก (I_o)
- 3) กำลังไฟฟ้าที่กำหนดของหม้อแปลง (S)
- 4) แรงดันลัดวงจร (Short circuit voltage, E_{sc}) เมื่อเกิดควาบไฟตามผิวหรือเบรกคาวานที่วัสดุทดสอบ
- 5) ระดับแรงดันที่โคโรนาเริ่มเกิด (Corona inception voltage level)
- 6) ความถี่ (f)

2.1.2 ขนาดแรงดันที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ

การกำหนดขนาดแรงดันของหม้อแปลงทดสอบ ขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันทดสอบสูงสุดที่มีโอกาสจะใช้ อย่างน้อยที่สุดจะต้องสูงกว่าค่าแรงดันคงทนอยู่ได้ของวัสดุทดสอบ ที่ใช้กับระบบแรงดันที่กำหนดให้ ซึ่งแรงดันที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบควรจะสูงกว่าแรงดันทดสอบประมาณ 10-20%

ทางด้านแรงดันป้อนเข้าของหม้อแปลงทดสอบด้านแรงดันต่ำ ควรเลือกกำหนดตามระบบแรงดันที่มีให้ เช่น 220 V หรือ 380 V หรือ 500 V ในกรณีที่หม้อแปลงทดสอบมีกำลังสูงๆ เช่น 500 kVA ขึ้นไป แรงดันป้อนเข้าอาจสูงถึง 2,000 V หรือ 3,000 V

รูปคลื่นแรงดันทดสอบกระแสสลับที่เปลี่ยนไปตามเวลา $U(t)$ อาจจะแตกต่างไปจากรูปคลื่นไซน์ได้ ฉะนั้นลักษณะของแรงดันทดสอบอาจอธิบายได้ด้วยค่ายอด และค่า r.m.s. ซึ่งหาได้จากสมการที่ (2.7)

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \quad (2.7)$$

เมื่อ T คือ เวลาช่วงคาบของแรงดันรูปคลื่นแรงดันนี้อาจแตกต่างไปจากรูปคลื่นไซน์ได้ไม่เกิน 5% ของค่ายอดรูปคลื่นพื้นฐาน

2.1.3 กระแสที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ

กระแสที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ ขึ้นอยู่กับวัสดุทดสอบ กล่าวคือ วัสดุทดสอบบางชนิดใช้กระแสมาก บางชนิดใช้กระแสน้อย ฉะนั้นหม้อแปลงทดสอบจะต้องสามารถจ่ายกระแสให้กับวัสดุทดสอบได้ ตัวอย่างกระแสสูงสุดที่ใช้ทดสอบดังแสดงในตารางที่ 2.1 [14]

ตารางที่ 2.1 แสดงกระแสสูงสุดที่ใช้ทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าความถี่ต่ำเมื่อ
ทดสอบด้วยแรงดัน 100 kV

วัสดุฉนวนและอุปกรณ์ไฟฟ้า	ค่าความจุไฟฟ้า (pF)	กระแสที่ใช้ในการทดสอบสูงสุด
ลูกถ้วยฉนวนธรรมดา	10 – 100	5.03 mA
ปลอกฉนวนตัวนำ	150 – 400	20.12 mA
หม้อแปลงกระแส	200 – 600	30.16 mA
อุปกรณ์วัดแรงดัน (Voltage Divider)	50 - 500	25.13 mA
เคเบิลแรงสูง (ต่อ 1 เมตร)	150 – 300	15.08 mA

2.1.4 ขนาดกำลังไฟฟ้าที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ

การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของวัสดุหรืออุปกรณ์ จะต้องทดสอบโดยการติดตั้งให้เหมือนหรือใกล้เคียงกับสภาพการใช้งานจริง แรงดันควรเป็นรูปคลื่นไซน์ อุปกรณ์หรือวัสดุฉนวนทั้งหลายในด้านไฟฟ้าแรงสูง อาจถือได้ว่ามีลักษณะเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า คือ มีค่าเก็บประจุ ฉะนั้นโผลดของหม้อแปลงทดสอบจึงเป็นแบบตัวเก็บประจุ กระแสจึงเป็นแบบเก็บประจุ (Capacitive Current) หากการฉนวนไม่ดีพอทนต่อแรงดันไม่ได้ก็จะเกิดเบรกดาวน์ สปราร์ค เจาะทะลุ ลัดวงจร กระแสลัดวงจรจะต้องสูงมากพอ เพื่อให้สามารถสังเกตเห็นความบกพร่องของการฉนวนได้ชัดเจน แต่กำลังไฟฟ้ลัดวงจรไม่ควรสูงจนเกินไป เพราะจะทำให้เกิดการระเบิดได้ ฉะนั้น กำลังของหม้อแปลงและกำลังไฟฟ้าลัดวงจรต้องให้สอดคล้องกัน

ความจุทางไฟฟ้าหรือค่าเก็บประจุ ที่เป็นโผลดของหม้อแปลง ประกอบด้วย ความจุทางไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ อุปกรณ์วัด และสายต่อ รวมทั้งค่าความจุไฟฟ้า สเตรย์ (stray capacitance) ฉะนั้นกำลังไฟฟ้าที่จะต้องใช้ในการทดสอบจะคำนวณได้จากสมการ

$$S = \omega C U_t^2 \quad (2.8)$$

$$S = 2\pi f C U_t^2 \times 10^{-9} \text{ kVA} \quad (2.9)$$

โดย S คือ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ (kVA)

C คือ ค่าความจุไฟฟ้ารวม เป็น (pF)

U_t คือ แรงดันทดสอบ เป็น (kVrms)

f คือ ความถี่ของแรงดัน เป็น (Hz)

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุฉนวนและอุปกรณ์ไฟฟ้า

วัสดุฉนวนและอุปกรณ์ไฟฟ้า	ค่าความจุไฟฟ้า(pF)
-ลูกถ้วยฉนวนธรรมดา	10 - 100
-ปลอกฉนวนค้ำฟ้า	150 - 400
-หม้อแปลงกระแส	200 - 600
-เคเบิลแรงสูง(ต่อความยาว 1 เมตร)	150 - 300
-หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 1 MVA	\approx 1,000
100 MVA	\approx 10,000
-อุปกรณ์วัดแรงดัน(voltage divider)	50 - 500
-สายต่อวงจรแรงสูง(ต่อเมตร)	5 - 15

กำลังไฟฟ้าที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ ควรจะต้องมีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าที่จะต้องป้อนให้กับโหลด คือ จะต้องคำนึงถึงแฟคเตอร์ปลอดภัย(safety factor) ด้วย เพื่อให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงทดสอบใช้ได้ยาวนานๆ ค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบอาจประมาณได้จากตารางที่ 2.2 [14]

2.1.5 โครงสร้างและการฉนวนหม้อแปลงทดสอบ

หม้อแปลงทดสอบโดยทั่วไปเป็นเฟสเดียว ประกอบด้วยขดลวด 2 ขด คือ ขดป้อนแรงดันเข้า(ด้านแรงต่ำ) และขดจ่ายแรงดันออก(ด้านแรงสูง) ขดลวดทั้งสองจะพันอยู่บนแกนเหล็ก ดังที่กล่าวแล้ว ปัญหาสำคัญของหม้อแปลงทดสอบที่นอกเหนือไปจากหม้อแปลงธรรมดา คือ การฉนวน ถ้าแรงดันไม่เกิน 100 kV การฉนวนอาจเป็นแบบแห้ง หรือหุ้มขดลวดและแกนเหล็กด้วยสารสังเคราะห์ได้ เช่น อีพ็อกซี หม้อแปลงที่มีแรงดันสูงขึ้น ขดลวดแต่ละขดรับแรงดัน 50 kV ถึง 100 kV การฉนวนจะเป็นกระดาษชุบน้ำมัน แกนเหล็กและขดลวดจะจุ่มอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง ที่บรรจุอยู่ในถังโลหะหรือถังฉนวน [14]

1. แบบหุ้มด้วยฉนวนแห้ง

แกนเหล็กจะต่อลงดิน ขดลวดแรงต่ำจะพันติดกับแกนเหล็ก ขดลวดแรงสูงจะพันทับขดลวดแรงต่ำ นั่นคือ ขดลวดแรงสูงจะอยู่ห่างแกนเหล็ก ขดลวดรอบที่มีแรงดันสูงขึ้นก็จะอยู่ห่างจากแกนเหล็กหรือส่วนที่ต่อลงดินมากขึ้น การฉนวนจะเพิ่มขึ้นตามแรงดัน

2. แบบจุ่มน้ำมัน

ขดลวด แกนเหล็ก และส่วนประกอบทั้งหมดจะจุ่มอยู่ในน้ำมัน ซึ่งบรรจุอยู่ในถังโลหะหรือถังฉนวน ในกรณีที่ใช้ถังโลหะต้องใช้ปลอกฉนวนนำสายแรงสูงออกมาจนถึง ถ้าใช้ตัวถังฉนวนจะไม่ต้องใช้ปลอกฉนวนนำสายออกด้านนอก



โดย 1 : แกนเหล็ก

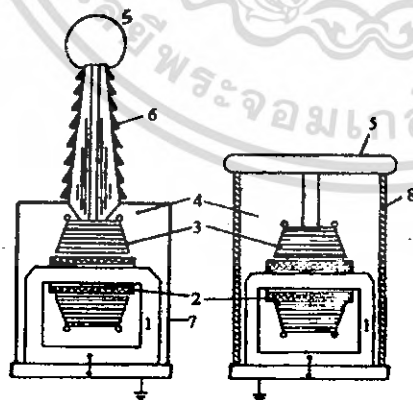
2 : ขดลวดแรงต่ำ

3 : ขดลวดแรงสูง

4 : ฉนวนแห้ง เช่น อีพ็อกซี

5 : ปลายั่วแรงสูง

รูปที่ 2.2 หม้อแปลงแบบหุ้มด้วยฉนวนแห้ง



โดย 1 : แกนเหล็ก

2 : ขดลวดแรงต่ำ

3 : ขดลวดแรงสูง

4 : น้ำมันหม้อแปลง

5 : ปลายั่วแรงสูง

6 : ปลอกฉนวนตัวนำ

7 : ถังโลหะ

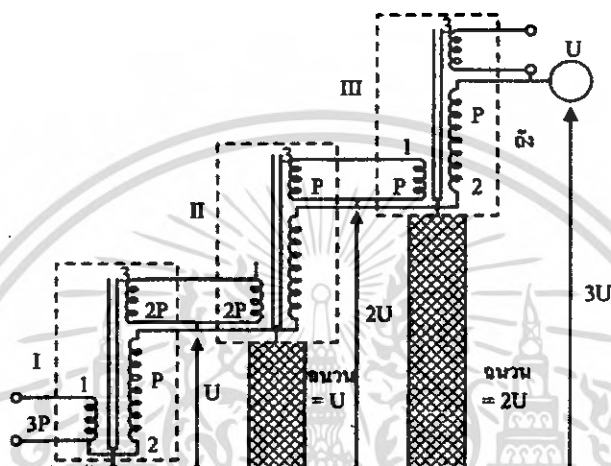
8 : ถังฉนวน

รูปที่ 2.3 หม้อแปลงแบบจุ่มน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.6 หม้อแปลงต่อแบบชั้นบันได

ในกรณีที่ต้องการใช้แรงดันสูงขึ้นไป มักจะใช้หลายๆ ตัวมาต่อเสริมกันเรียกว่า ต่อแบบชั้นบันได การต่อแบบชั้นบันไดจะต้องใช้หม้อแปลงแบบที่มีขดลวด 3 ขด ประกอบด้วย ขดลวดแรงต่ำ ขดลวดแรงสูง และขดลวดค่อควบ(coupling winding) การฉนวนหม้อแปลงเมื่อ ต่อแบบชั้นบันได 3 ชั้น แสดงดังรูปที่ 2.4 [14]



รูปที่ 2.4 ไดอะแกรมการต่อหม้อแปลงทดสอบแบบชั้นบันได

บทที่ 3

การออกแบบสร้างชิ้นงาน

การออกแบบสร้างหม้อแปลงทดสอบแบบขั้วบันไดขนาดพิกัด 100 kV 10 kVA มีขดลวด 3 ชุด คือ ขดลวดแรงดันต่ำ ขดลวดแรงสูง และขดลวดค่อควบ ซึ่งมีค่าที่กำหนดดังแสดงในตารางที่ 3.1

3.1 การออกแบบแกนเหล็ก

แกนเหล็กเป็นโครงสร้างหลักของหม้อแปลง ทำหน้าที่เป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก จะประกอบขึ้นจากแผ่นเหล็กบาง ซึ่งแต่ละแผ่นจะฉาบด้วยสารที่เป็นฉนวนไฟฟ้านำมาอัดซ้อนกัน เรียกว่า แกนเหล็กลามิเนต (laminated sheet steel) เพื่อลดการสูญเสียในแกนเหล็ก อันเนื่องมาจากกระแสไหลวนในเนื้อแกนเหล็ก ซึ่งแกนเหล็กนี้ได้มีการผสมซิลิคอนประมาณ 3-5% การผสมซิลิคอนเข้าไปเพื่อให้ความต้านทานของแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้นเพื่อลดกระแสไหลวนและเพิ่มค่า μ ของแผ่นเหล็ก และวางรอบฮิสเตอร์ซิลิคอนลง นั่นคือลดกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก และลดกระแสสร้างแม่เหล็ก

เนื่องจากรูปคลื่นของแรงดันทดสอบต้องใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์มากที่สุด ดังนั้นค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก (B_m) จะต้องอยู่ในย่านเชิงเส้น ค่า (B_m) ของเหล็กชนิด M-4 เข้าใกล้ย่านอิ่มตัวประมาณ 1.6 Wb/m^2 ในการออกแบบจึงเลือกค่า (B_m) เท่ากับ 1.4 Wb/m^2 ซึ่งพื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็กสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2

$$E = 4.44fNB_m A_m F_s \quad (3.1)$$

$$\therefore A_m = \frac{\left(\frac{E}{N}\right)}{4.44fB_m F_s} \quad (3.2)$$

- โดย E คือ ค่า r.m.s. ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวด (V)
 N คือ จำนวนรอบของการพันขดลวด (รอบ)
 F คือ ความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ (Hz)
 B_m คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก Maximum flux density (Tesla) หรือ (Wb/m^2)
 A_m คือ พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก (m^2)
 F_s คือ Stacking factor (0.97)

ตารางที่ 3.1 ค่ากำหนดของหม้อแปลงทดสอบที่ออกแบบ

ค่าพิกัด	หม้อแปลง 1 ตัว	เมื่อต่อขั้วบนโค 2 ชั้น
กำลังไฟฟ้า S_n , kVA	10	10
แรงดันป้อนเข้า(แรงดันต่ำ) U_1 , V	220	220
แรงดันจ่ายออก(แรงดันสูง) U_2 , kV	100	200
กระแสป้อนเข้า I_1 , A	45.45	45.45
กระแสจ่ายออก I_2 , A	0.1	0.05
แรงดันต่อควม U_3 , V	220	220
กระแสต่อควม I_3 , A	-	22.73
จำนวนเฟส	1	1
ความถี่	50	50

การหาขนาดแกนเหล็กจะต้องมีการกำหนด ค่า E/N ขึ้นมาในที่นี้กำหนดให้มีค่า 3.5 ซึ่งค่านี้เป็นค่าที่ทำให้ได้ขนาดของแกนเหล็กและขดลวดมีขนาดที่เหมาะสมกันหลังจากที่ได้มีการออกแบบในพิกัดนี้มาแล้วหลายครั้ง

*Stacking factor = 0.97 เป็นค่าเฉพาะของเหล็กชนิด M-4

แทนค่าในสมการ (3.2)

$$A_m = \frac{3.5}{4.44 \times 50 \times 1.4 \times 0.97}$$

$$\therefore A_m = 11,609.55 \text{ mm}^2$$

เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก

$$\phi = B_m \times A_m \times F_s \quad (3.3)$$

แทนค่าในสมการ (3.3)

$$\phi = 1.4 \times 11609.55 \times 10^{-6} \times 0.97$$

$$\phi = 0.016 \text{ Wb}$$

การออกแบบหน้าตัดของแกนเหล็กอาจจะทำเป็นหลายชั้น คือ รูปสี่เหลี่ยมอัดภายในวงกลม เพื่อให้สามารถใช้พื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงขึ้นกว่าพื้นที่หน้าตัดวงที่เป็นสี่เหลี่ยม และเหตุผลทางกายภาพในการพันขดลวดให้มีลักษณะเป็นวงกลมได้ง่ายขึ้น ลดการเสียดสีระหว่างขดลวดกับแกนเหล็ก และเมื่อขณะใช้งานจะเกิดแรงระหว่างขดลวดก็จะไม่ทำให้ขดลวดเสียรูป การออกแบบหน้าตัดแกนเหล็กแบบหลายชั้นเพื่อให้มีประสิทธิภาพการใช้พื้นที่สูงสุดสามารถคำนวณได้ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์แต่การออกแบบหน้าตัดแกนเหล็กให้มีหลายชั้น

จะทำให้มีความยุ่งยากในการตัดและเรียงแกนเหล็กมากขึ้น ดังนั้นจึงเลือกที่จะเรียงแกนเหล็กเพียง 2 ชั้น

การออกแบบแกนเหล็กต้องคำนึงถึงขนาดความกว้างของแผ่นเหล็กที่สามารถตัดได้ในเชิงการผลิต ซึ่งความหนาของแกนเหล็ก M-4 มีขนาด 0.27 mm แกนเหล็กเป็นแบบ core type มีพื้นที่ภาคตัดขวางเป็นแบบสี่เหลี่ยม 2 ชั้น บรรจุอยู่ในวงกลมโดยเลือกใช้หน้าเหล็กชั้นที่ 1 (a) เป็น 110 mm และชั้นที่ 2 (b) เป็น 80 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.1 แกนเหล็กแบบ 2 ชั้นนี้จะให้ค่าแฟคเตอร์พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กในวงกลม (F_c) เป็น

$$F_c = 76.8\%$$

F_c มาจากการคำนวณเปรียบเทียบย้อนกลับ
เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนแม่เหล็กหาได้จากสมการที่ (3.4)

$$\frac{\pi}{4} \times D^2 = \frac{A_m}{F_c} \quad (3.4)$$

โดย D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางผ่านกลางของวงกลม

A_m คือ พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก มีหน่วยเป็น mm^2

F_c คือ Factor พื้นที่หน้าตัดในวงกลม

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad D &= \sqrt{(A_m \times 4) / (\pi \times F_c)} \\ &= \sqrt{(11609.55 \text{ mm}^2) / (\pi \times 0.768)} \\ &= 138.77 \text{ mm} \end{aligned} \quad (3.5)$$

ความหนาของแกนเหล็กชั้นที่ 1

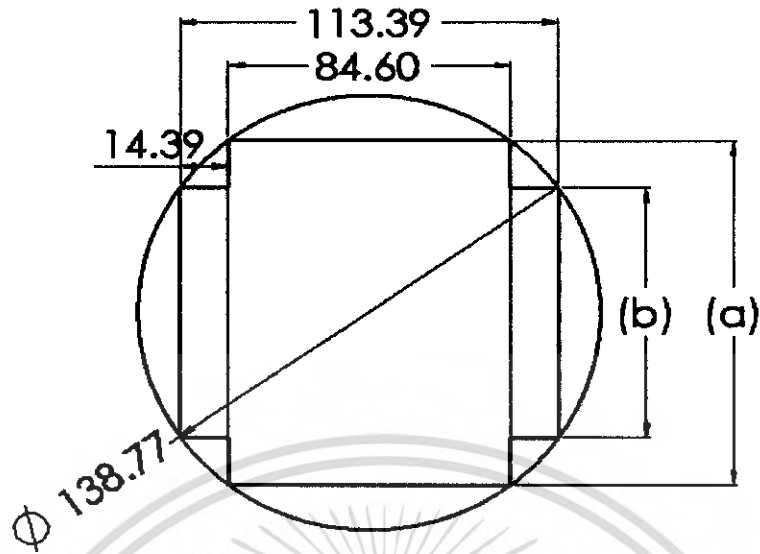
$$\begin{aligned} d_1 &= \sqrt{D^2 - a^2} \\ &= \sqrt{138.77^2 - 110^2} \\ &= 84.6 \text{ mm} \end{aligned} \quad (3.6)$$

ความหนาของแกนเหล็กชั้นที่ 2

$$\begin{aligned} d_2 &= \frac{\sqrt{D^2 - b^2} - d_1}{2} \\ &= \frac{\sqrt{138.77^2 - 80^2} - 84.6}{2} \\ &= 14.39 \text{ mm} \end{aligned} \quad (3.7)$$

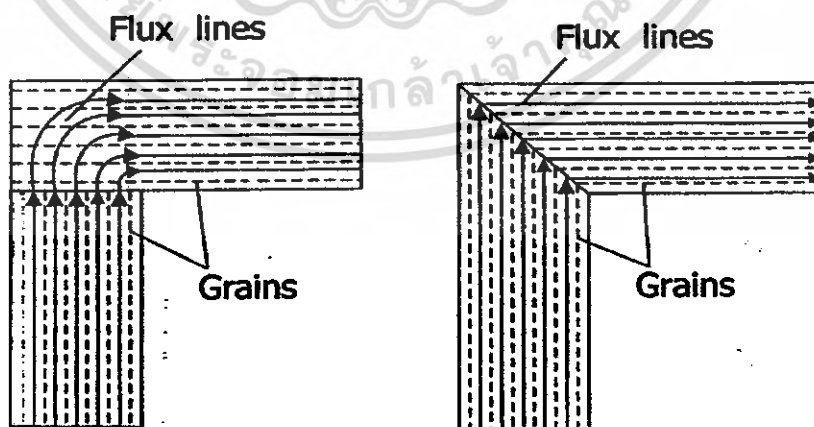
ดังนั้นจะได้ภาพตัดขวางของพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กดังรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

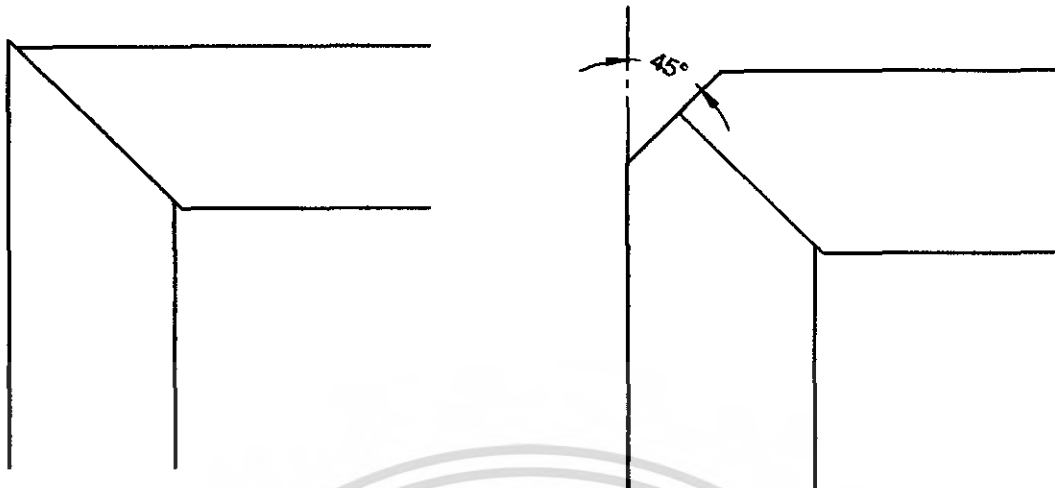


รูปที่ 3.1 ภาพตัดขวางพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

การเรียงแกนเหล็กแบบต่อกันเป็นมุมฉากจะทำให้การไหลของเส้นแรงแม่เหล็กไม่สะดวก เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กวิ่งข้ามรอยต่อของแผ่นเหล็ก และการที่เส้นแรงแม่เหล็กข้ามแผ่นเหล็กจากแผ่นหนึ่งไปอีกแผ่นหนึ่งเส้นแรงแม่เหล็กจะไหลในทิศทางตั้งฉากกับการเรียงตัวของเกรนเหล็ก ซึ่งทิศทางนี้แผ่นเหล็กจะมีค่าสภาพซึมซับแม่เหล็ก(μ) เป็นหนึ่งในสิบถึงหนึ่งในเจ็ดเท่าของทิศทางที่เกรนของเหล็กเรียงตัวอยู่ ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กจะกลับทิศทาง การไหลเป็นผลให้ค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กและกระแสทำแม่เหล็กสูงขึ้น การแก้ปัญหานี้จะทำโดยตัดแผ่นเหล็กเป็นมุม 45° ซึ่งจะทำให้การไหลของเส้นแรงแม่เหล็กสะดวกขึ้น ลดค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กและลดค่ากระแสทำแม่เหล็ก [1]



รูปที่ 3.2 การไหลของเส้นแรงแม่เหล็กที่การตัดแผ่นเหล็กแบบมุมฉากและมุม 45°

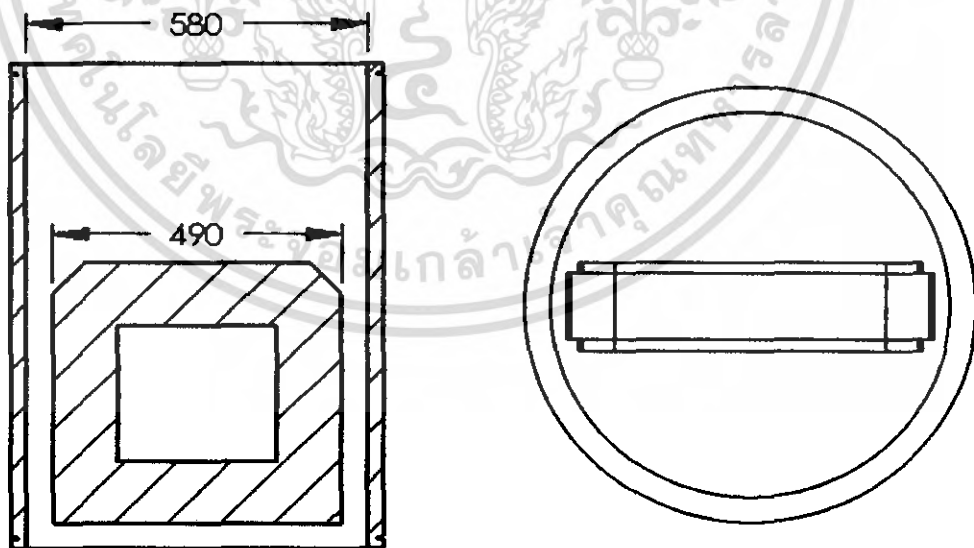


(ก) ไม่มีการตัดมุมแกนเหล็ก

(ข) มีการตัดมุมแกนเหล็กเพื่อลดความเครียด
สนามไฟฟ้า

รูปที่ 3.3 ภาพก่อนและหลังการตัดมุมแกนเหล็ก

แกนเหล็กด้านบน (Top yoke) จะเป็นที่สำหรับสวมขดลวด เนื่องจากจะสามารถนำสายไฟแรงสูงออกมาใช้งานได้ง่าย มุมของแกนเหล็กด้านบนจะอยู่ใกล้กับขดลวดแรงสูงจึงจะทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงในบริเวณนี้ ดังนั้นต้องทำการตัดมุมของแกนเหล็กดังในรูปที่ 3.3 (ข) เพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้า



(ก) ภาพตัดด้านหน้า

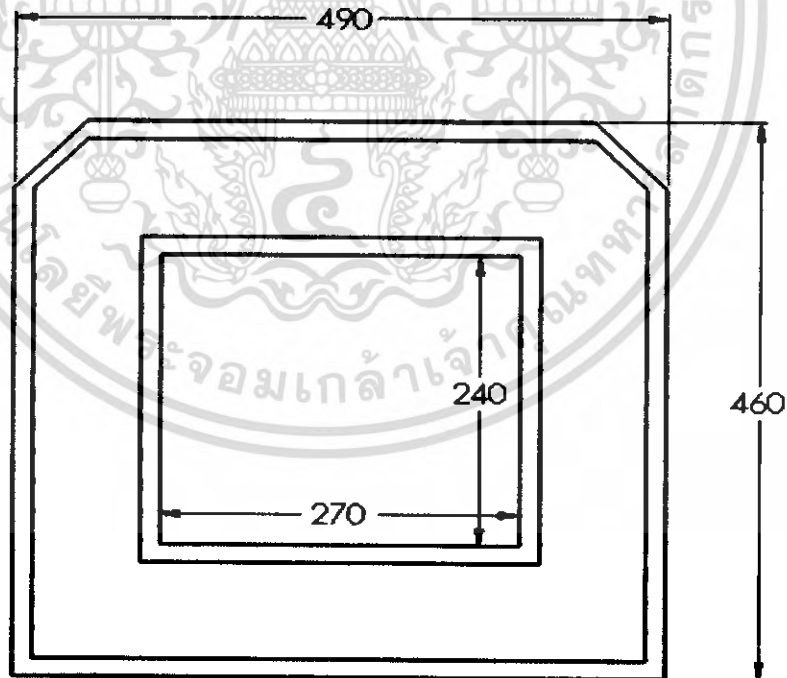
(ข) ด้านบน

รูปที่ 3.4 การกำหนดความกว้างแกนเหล็กให้สามารถบรรจุลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

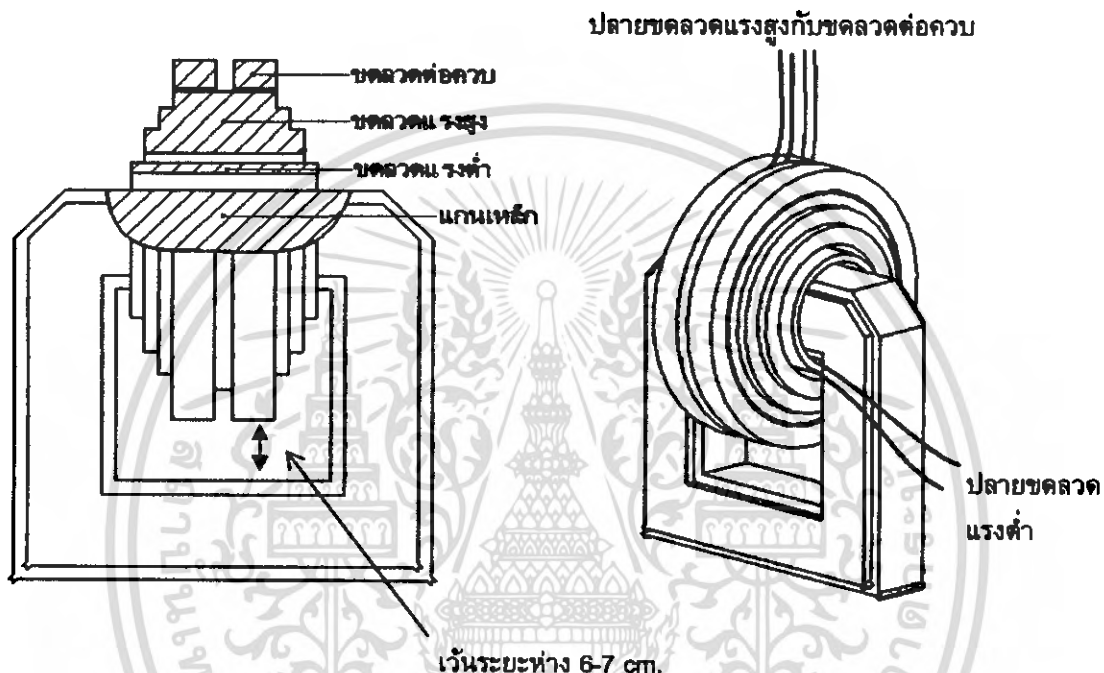
ความกว้างของแกนเหล็กจะขึ้นอยู่กับขนาดของตัวถังซึ่งจะใช้ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 580 mm. เนื่องจากในการออกแบบได้ออกแบบให้หม้อแปลงวางซ้อนกันดังนั้นจึงควรจะใช้ท่อ PVC 8.5 ซึ่งมีความหนา 25.4 ± 1.3 mm. เพื่อให้สามารถรองรับแรงทางกลที่เกิดขึ้นจากการวางซ้อนกัน ในที่นี้จะกำหนดความกว้างของแกนเหล็กที่ 490 mm. เพื่อให้สามารถบรรจุแกนเหล็กลงในถังได้พอดี

ความสูงของแกนเหล็กจะขึ้นอยู่กับความหนาของขดลวดซึ่งจากการคำนวณรัศมีวงนอกสุดของขดลวดจะมีค่า 215.5 mm. ความต่างศักย์สูงสุดของขดลวดด้านล่างเมื่อเทียบกับแกนเหล็กมีค่าประมาณ $100 \text{ kV}_{\text{rms}}$ จากภาคผนวก ข.19 ความคงทนต่อสนามไฟฟ้าสูงสุดภายในน้ำมันหม้อแปลงมีค่า $30 \text{ kV}_{\text{rms}}/\text{mm}$ ในคอนแรกเมื่อคิดค่า safety factor 150% จะได้ค่า $15 \text{ kV}_{\text{rms}}/\text{mm}$ แต่จากการสอบถามข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตได้มีการออกแบบไว้ที่ $3 \text{ kV}_{\text{rms}}/\text{mm}$ เนื่องจากในการผลิตอาจจะมีฝุ่นละอองต่างๆเข้าไปปะปนอยู่กับน้ำมันจึงทำให้ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ในน้ำมันลดลง ดังนั้นระยะห่างระหว่างแกนเหล็กกับขดลวดควรจะมีค่าไม่ต่ำกว่า 23.6 mm. แต่เนื่องจากในการออกแบบต้องการให้เกิดโคโรนาน้อยที่สุดเพราะต้องการยืดอายุการใช้งานของหม้อแปลง อีกทั้งในเชิงการผลิตจะมีขีดจำกัดในการตัดแผ่นเหล็กได้เป็นขนาดเลขที่ลงตัว จึงได้เผื่อระยะไว้ประมาณ 6-7 cm. ดังในรูปที่ 3.5 ดังนั้นจะได้ความสูงของแกนเหล็กมีค่า 460 mm.



รูปที่ 3.5 ขนาดของแกนเหล็ก

แกนเหล็กที่ใช้เป็นแบบคอร์ (core type transformer) ซึ่งมีลักษณะการพันขดลวดเป็นแบบพันล้อมแกนเหล็ก และเนื่องจากแกนเหล็กของหม้อแปลงจะถูกต่อลงดิน ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการฉนวนจะทำการพันขดลวดแรงต่ำไว้ด้านใน และพันขดลวดแรงสูงทับขดลวดแรงต่ำ และในที่นี้ จะมีการพันขดลวดต่อควมทับขดลวดแรงสูงเพื่อส่งกำลังไฟฟ้าไปยังหม้อแปลงด้วยบนดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ลักษณะการพันขดลวดล้อมแกนเหล็ก

ความยาวรอบเฉลี่ยของแกนเหล็ก (l_{FE})

$$l_{FE} = (2 \times 350) + (2 \times 380)$$

$$l_{FE} = 1,460 \text{ mm}$$

ปริมาตรแกนเหล็ก
ก่อนถูกตัด

$$V_{Cl} = A_m \times F_c \times l_{FE} \tag{3.8}$$

$$V_{Cl} = 11,609.55 \times 10^{-2} \times 0.97 \times 146$$

$$V_{Cl} = 16,441.44 \text{ cm}^3$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังถูกตัด

$$V_{c2} = \text{ปริมาตรก่อนถูกตัด} - \text{ปริมาตรที่ถูกตัด} \quad (3.9)$$

$$\text{ปริมาตรที่ถูกตัด} = \left\{ \left[\frac{1}{2} \times (\text{ความกว้างหน้าเหล็กใหญ่}/2)^2 \right. \right. \quad (3.10)$$

× ความหนาของแกนเหล็กชั้นที่ 1]

$$+ \left[\frac{1}{2} \times (\text{ความกว้างหน้าเหล็กเล็ก}/2)^2 \times 2 \right.$$

× ความหนาของแกนเหล็กชั้นที่ 2] × 2 × 0.97

$$= \left\{ \left[\frac{1}{2} \times (110/2)^2 \times 84.6 \right] + \left[\frac{1}{2} \times (80/2)^2 \times 2 \times 14.4 \right] \right\}$$

$$\times 2 \times 0.97$$

$$= 292.94 \text{ cm}^3$$

จะได้ $V_{c2} = 16,441.44 - 292.94$

$$V_{c2} = 16,148.5 \text{ cm}^3$$

น้ำหนักแกนเหล็กคิดจากความหนาแน่น 7.65 g/cm^3 (ภาคผนวก ข.1)

$$W_c = V_{c2} \times \text{Density} \quad (3.11)$$

$$W_c = \frac{16,148.5 \times 7.65}{1,000}$$

$$W_c = 123.54 \text{ kg}$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กหาได้จากกราฟผู้ผลิตเหล็กซิลิคอนกำหนดให้
ในที่นี้กำลังไฟฟ้าสูญเสียต่อน้ำหนักแกนเหล็กที่ 1.4 Wb/m^2 มีค่าเท่ากับ 0.7 W/kg

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก (P_c)

$$P_c = 0.7 \times 123.54$$

$$P_c = 86.48 \text{ W}$$

Exciting Volt-Ampere จากกราฟในภาคผนวก ก.4 ในแกนเหล็กที่ 1.4 Wb/m^2
มีค่าเท่ากับ 0.85 VA/kg

ดังนั้น Exciting Volt-Ampere ในแกนเหล็ก (P_{VA})

$$P_{VA} = 0.85 \times 123.54$$

$$P_{VA} = 105.01 \text{ VA}$$

ดังนั้นกระแสป้อนเข้าขณะ No-Load

$$I_{\phi} = \frac{P_{VA}}{V_{ip}} \quad (3.12)$$

$$I_{\phi} = \frac{105.01}{220}$$

$$I_{\phi} = 0.48 \text{ A}$$

คิดเป็น 1.06% ของกระแสป้อนเข้าที่พิกัด I_{input}

ตารางที่ 3.2 สรุปลักษณะของแกนเหล็ก

ชนิดของแกนเหล็ก	M-4
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (T)	1.4
ความหนาของแผ่นเหล็ก (mm)	0.27
การวางแผ่นเหล็ก	2 ทับ 2
พื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็กตามรูปทรงเรขาคณิต (mm ²)	11,609.55
เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนเหล็ก (mm)	138.77
พื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็กจริง (mm ²)	11,261.26
ความกว้างของแกนเหล็ก (mm)	490
ความสูงของแกนเหล็ก (mm)	450
ความยาวเฉลี่ยของแกนเหล็ก (mm)	1,460
ปริมาตรของแกนเหล็ก (cm ³)	16,148.5
น้ำหนักของแกนเหล็ก (kg)	123.54
ความสูญเสียในแกนเหล็ก (W)	86.48
กระแสป้อนเข้าขณะ No-load (A)	0.48

3.2 การออกแบบขดลวด

หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดเล็ก พิกัดน้อยๆจนถึง 50 kVA ที่ขดลวดมีการระบายความร้อนโดยอาศัยการแทรกซึมของน้ำมันหม้อแปลง จะกำหนดความหนาแน่นของกระแสในขดลวดอยู่ในช่วง 1.1-2.3 A/mm² [15]

3.2.1 การออกแบบขดลวดแรงต่ำ

ขดลวดแรงต่ำจะกำหนดความหนาแน่นกระแสอยู่ที่ 2.3 A/mm² ซึ่งจะสอดคล้องกับขนาดของลวดที่มีขายในเชิงการค้า ขดลวดที่โตกว่านี้แม้จะให้ความหนาแน่นของกระแสที่ต่ำกว่า แต่จำนวนชั้นการพันของขดลวดจะเพิ่มขึ้นอาจทำให้เปอร์เซ็นต์แรงดันลัดวงจรสูงเกินไป

1. ขนาดพื้นที่หน้าตัดของขดลวดแรงต่ำ

$$A_1 = \frac{I_1}{J_1} \quad (3.13)$$

โดย A_1 คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวด (mm²)

I_1 คือ กระแสป้อนเข้าที่พิกัด (A)

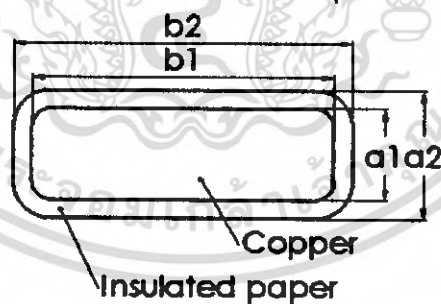
J_1 คือ ความหนาแน่นกระแส (A/mm²)

แทนค่าในสมการที่ (3.13)

$$A_1 = \frac{45.45}{2.3}$$

$$A_1 = 19.76 \text{ mm}^2$$

ขดลวดแรงต่ำ ใช้ลวดสี่เหลี่ยมทองแดงหุ้มกระดาษ มีขนาดดังรูปที่ 3.7



$$a_1 = 2.5 \text{ mm} \quad a_2 = 3.5 \text{ mm} \quad R = 0.5 \text{ mm}$$

$$b_1 = 8 \text{ mm} \quad b_2 = 9 \text{ mm}$$

รูปที่ 3.7 ภาพตัดของลวดแรงต่ำ

พื้นที่หน้าตัดใช้งานจริง(A_1) 19.79 mm²

2. จำนวนรอบขดลวด

$$N_1 = \frac{V_1}{E/N} \quad (3.14)$$

โดย N_1 คือ จำนวนรอบของขดลวดแรงต่ำ (รอบ)

V_1 คือ แรงดันป้อนเข้า (V)

E/N คือ Volt/Turn (V/T)

แทนค่าในสมการที่ (3.14)

$$\begin{aligned} &= \frac{220}{3.5} \\ &= 62.86 \text{ รอบ} \end{aligned}$$

3. การพันขดลวดแรงต่ำ

จำนวนขดลวดมี 1 ชุด พัน 3 ชั้น

ชั้นที่ 1	21	รอบ
ชั้นที่ 2	21	รอบ
ชั้นที่ 3	21	รอบ
รวม	63	รอบ

ในการฉนวนระหว่างชั้นของขดลวดจะใช้กระดาษกราฟท์ (Kraft paper) ซึ่งคุณสมบัติของกระดาษที่ใช้ทำเป็นฉนวนในที่นี้จะใช้กระดาษฉนวนมีความหนา 0.08 mm พัน 3 รอบ เพื่อป้องกันการต่อถึงกันของเส้นลวดระหว่างชั้นและเพื่อป้องกันการเสียดสีกันของเส้นลวดในขั้นตอนการพัน ส่วนบริเวณด้านข้างของขดลวดจะใช้กระดาษกราฟท์ (Kraft paper) ประกบด้านข้างขดลวดก่อนที่จะใช้ไม้หนา 10 mm อัดระหว่าง Press board กับแกนเหล็กเพื่อป้องกันขดลวดมีการเคลื่อน

$$\begin{aligned} \text{ความกว้างของขดลวด} &= (\text{ความกว้างของเส้นลวดรวมฉนวน} \\ &+ \text{ระยะห่างระหว่างเส้นลวด}) \\ &\times (\text{จำนวนรอบ/layer} + 1) \end{aligned} \quad (3.15)$$

แทนค่าในสมการที่ (3.15)

$$\begin{aligned} &= (9+0.1) \times (21+1) \\ &= 200.2 \text{ mm} \end{aligned}$$

* $(21+1)$ หมายถึงจำนวน 21 รอบบวกเผื่อไว้ 1 รอบ สำหรับเริ่มต้นการพัน

*ระยะห่างระหว่างเส้นลวด = 0.1mm [16]

$$\begin{aligned} \text{รวมความกว้างกระดาษปิดขอบด้านละ 5 mm} \\ = 210.2 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความหนาของขดลวด} &= [(\text{ความหนาของเส้นลวดรวมฉนวน} \\ &+ \text{ระยะห่างระหว่างเส้นลวด}) \\ &\times \text{จำนวน layer}] \\ &+ [(\text{จำนวน layer} - 1) \\ &\times \text{ความหนาของกระดาษกราฟท์}] \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่าในสมการที่ (3.16)} \\ = [(3.5+0.1)\times 3] + [2\times 0.24] \\ = 11.28 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\text{แรงดันสูงสุดระหว่างชั้น} = 2 \times \text{จำนวนรอบ/layer} \times \text{Volt/Turn} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่าในสมการที่ (3.17)} \\ = 2 \times 21 \times 3.5 \\ = 147 \text{ V} \end{aligned}$$

กระดาษกราฟท์หนา 0.08 mm 3 รอบ รวม 0.24 mm ซึ่งจากคุณสมบัติกระดาษกราฟท์หนา 0.24 mm 1 ชั้น สามารถทนความเครียดสนามไฟฟ้าได้ 55 kV/mm ดังนั้นกระดาษกราฟท์หนา 0.24 mm จะสามารถทนแรงดันได้ 13.2 kV เมื่อคิดค่า safety factor 150% สามารถทนแรงดันได้ 6.6 kV

4. ความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวดแรงดันต่ำ

เนื่องจากแกนเหล็กมีรัศมี 69.39 mm ระหว่างแกนเหล็กกับขดลวดแรงดันต่ำมีช่องว่าง 2 mm เพื่อเป็นช่องให้สอด Polyester angle หรือ ไม้ฉนวนเพื่อป้องกันขดลวดเคลื่อนที่และใช้ Press board หนา 3 mm เป็นแกนของขดลวดแรงต่ำ ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{รัศมีวงในของขดลวดแรงดันต่ำ} &= 69.39 + 2 + 3 \\ &= 74.39 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{รัศมีวงนอก} &= 74.39 + \text{ความหนาของขดลวด} \\ &= 74.39 + 11.28 \\ &= 85.67 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{รัศมีเฉลี่ย (r)} &= (74.39 + 85.67)/2 \\ &= 80.03 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ความยาวรอบเฉลี่ย}(l_{av}) &= 2 \times \pi \times r_1 & (3.18) \\
 \text{แทนค่าในสมการที่ (3.18)} & & \\
 &= 2 \times \pi \times 80.03 & \\
 &= 502.84 \text{ mm} &
 \end{aligned}$$

5. น้ำหนักทองแดงของขดลวด

$$W = N \times A_1 \times l_{av} \times \text{Density} \quad (3.19)$$

โดย W คือ น้ำหนักขดลวด (kg)

N คือ จำนวนรอบขดลวดแรงต่ำ (รอบ)

A_1 คือ พื้นที่หน้าตัดเส้นลวด (mm^2)

Density คือ ความหนาแน่นของทองแดง ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$) [2]

l_{av} คือ ความยาวรอบเฉลี่ย (mm)

แทนค่าในสมการที่ (3.19)

$$W = 63 \times 19.79 \text{ mm}^2 \times 502.84 \text{ mm} \times 8,900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$W = 5.58 \text{ kg}$$

6. ความต้านทานของขดลวด

$$R = \rho \frac{l}{A_1} \quad (3.20)$$

โดย R คือ ความต้านทานของขดลวด (Ω)

ρ คือ สภาพความต้านทานของทองแดง ($\Omega \cdot \text{m}$) [1]

l คือ ความยาวของขดลวด (mm)

A_1 คือ พื้นที่หน้าตัดเส้นลวด (mm^2)

แทนค่าในสมการที่ (3.20)

$$R = 0.01724 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m} \times \frac{63 \times 502.84 \text{ mm}}{19.79 \text{ mm}^2}$$

$$R = 0.028 \Omega$$

7. กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดแรงต่ำ ($P_{CU LV}$)

$$P_{CU LV} = I_1^2 R \quad (3.21)$$

โดย $P_{CU LV}$ คือ กำลังสูญเสียในขดลวดแรงต่ำ (W)

I_1 คือ กระแสป้อนเข้า (A)

R คือ ความต้านทานขดลวด (Ω)

แทนค่าในสมการที่ (3.21)

$$P_{CU LV} = 45.45^2 \times 0.028$$

$$P_{CU LV} = 57.84 \text{ W}$$

ตารางที่ 3.3 สรุปลักษณะของขดลวดแรงต่ำ

ชนิดของวัสดุ	ลวดทองแดง
ขนาดของตัวนำ (mm^2)	2.5×8
ฉนวนห่อหุ้มเส้นลวด	Insulated Paper
จำนวนรอบ (รอบ)	63
จำนวนขดลวด (ขด)	1
จำนวนชั้น (ชั้น)	3
จำนวนรอบ/ชั้น	21
ความหนาฉนวนระหว่างชั้น (mm)	0.24
รัศมีด้านในของขดลวด (mm)	74.39
รัศมีด้านนอกของขดลวด (mm)	85.67
รัศมีเฉลี่ยของขดลวด (mm)	80.03
ความกว้างของขดลวด (mm)	200.2
น้ำหนักของขดลวด (kg)	5.58
กำลังสูญเสียในขดลวด (W)	57.84

3.2.2 การออกแบบขดลวดแรงสูง

ขดลวดแรงดันสูง เป็นขดลวดที่ถูกห่อหุ้มอย่างมิดชิด ด้วยกระดาษฉนวน เนื่องจากมีความเครียดสูงดังนั้นอุณหภูมิเพิ่มในขดลวดจะมีค่าสูง การกำหนดความหนาแน่นกระแสต้องกำหนดให้มีค่าต่ำจึงเลือกค่าอยู่ที่ 1 A/mm^2 เพราะเมื่อคำนวณขนาดของขดลวดออกมาแล้วมีขนาดที่เหมาะสม

1. ขนาดพื้นที่หน้าตัดของขดลวดแรงสูง

$$A_2 = \frac{I_2}{J_2} \quad (3.22)$$

โดย A_2 พื้นที่หน้าตัดของขดลวด (mm^2)

I_2 กระแสจ่ายออกที่พิกัด (A)

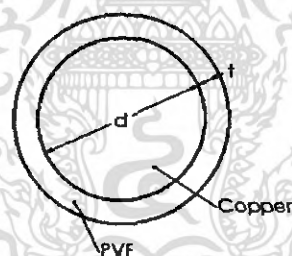
J_2 ความหนาแน่นกระแส (A/mm^2)

แทนค่าในสมการที่ (3.22)

$$A_2 = \frac{0.1}{1}$$

$$A_2 = 0.1$$

ขดลวดแรงดันสูง ใช้ลวดทองแดงกลมหุ้มฉนวน PVF SWG #29 เคลือบฉนวนหนาพิเศษดังภาคผนวก ข.11 มีขนาดดังต่อไปนี้



$$d = 0.35 \text{ mm} \quad t = 0.037 \text{ mm}$$

รูปที่ 3.8 ภาพตัดขดลวดแรงสูง

พื้นที่หน้าตัดใช้งานจริง (A_2) = 0.0962 mm^2

2. จำนวนรอบขดลวด

$$N_2 = \frac{V_2}{E/N} \quad (3.23)$$

โดย N_2 คือ จำนวนรอบของขดลวดแรงต่ำ (รอบ)

V_2 คือ แรงดันจ่ายออก (V)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 E/N \text{ คือ Volt/Turn (V/T)} \\
 \text{แทนค่าในสมการที่ (3.23)} \\
 &= \frac{100,000}{3.5} \\
 &= 28,571.43 \text{ รอบ}
 \end{aligned}$$

คิดเมื่อแรงดันตก 1.5% (การสอบถามข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต) รวม 29,000 รอบ

3. การพันขดลวด

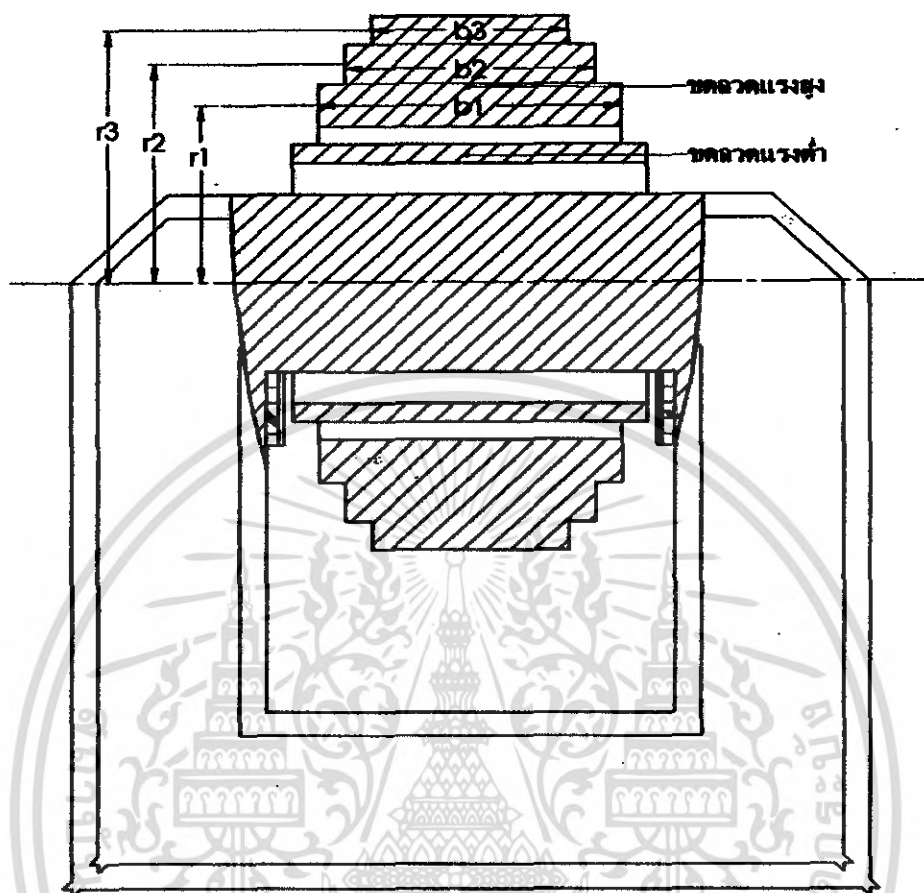
การพันขดลวดแรงดันสูงจะพันแบบชั้นทรงกระบอกโดยมีการเกรดตั้งขดลวด เนื่องจากถ้าหม้อแปลงได้รับแรงดันเสิร์ฟ จะทำให้แรงดันกระจายบนขดลวดเกิดความไม่สม่ำเสมอขึ้น[14] ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าเก็บประจุของขดลวด ดังนั้นในรอบของขดลวดที่สูงขึ้นจะต้องพันขดลวดให้กว้างน้อยลง แต่ถ้าทำการเกรดขดลวดลงทุกชั้นจะมีความยุ่งยากในการพัน และเสียเวลามาก จึงจัดแบ่งขดลวดเป็นชั้นๆ รวม 3 ชั้นด้วยกัน โดยใช้ค่ารัศมีเฉลี่ยในแต่ละชั้น ควบคู่กับความกว้างของชั้นในชั้นนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน คือ

$$r_{21}b_{21} \approx r_{22}b_{22} \approx r_{23}b_{23} \quad (3.33)$$

โดยที่ r_{21} , r_{22} และ r_{23} เป็นรัศมีเฉลี่ยของขดลวดแรงดันสูงชั้นที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ และ b_{21} , b_{22} และ b_{23} เป็นความกว้างของขดลวดแรงดันสูงชั้นที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

ชั้นที่ 1 มี	30	ชั้นๆ ละ	415	รอบ	รวม	12,450	รอบ
ชั้นที่ 2 มี	26	ชั้นๆ ละ	365	รอบ	รวม	9,490	รอบ
ชั้นที่ 3 มี	22	ชั้นๆ ละ	314	รอบ	รวม	6,908	รอบ
มี	1	ชั้นๆ ละ	157	รอบ	รวม	157	รอบ
					รวม	<u>29,005</u>	รอบ

* ชั้นที่ 3 ในชั้นที่ 23 จะพันครึ่งรอบเพื่อ lead สายออกตรงกลาง



รูปที่ 3.9 การพันขดลวดแรงสูงแบบเกรดดิ่ง

$$\begin{aligned} \text{ความกว้างของขดลวด} &= (\text{ความกว้างของเส้นลวดรวมฉนวน} \\ &+ \text{ระยะห่างระหว่างเส้นลวด}) \\ &\times (\text{จำนวนรอบ/layer} + 1) \end{aligned} \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned} \text{ชั้นที่ 1} &= 0.402 \text{ mm} \times (415 + 1) \\ &= 167.23 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{รวมความกว้างกระดาษปิดขอบด้านละ 20 mm} \\ &= 207.23 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ชั้นที่ 2} &= 0.402 \text{ mm} \times (365 + 1) \\ &= 147.13 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\text{รวมความกว้างกระดาษปิดขอบด้านละ 20 mm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 187.13 \text{ mm}$$

$$\text{ชั้นที่ 3} = 0.402 \text{ mm} \times (314 + 1)$$

$$= 126.63 \text{ mm}$$

รวมความกว้างกระดาษปิดขอบด้านละ 20 mm

$$= 166.63 \text{ mm}$$

ความหนาของขดลวด = จำนวน layer \times [ความหนาของเส้นลวดรวมฉนวน
ความหนาของกระดาษกราฟ] (3.25)

$$\text{ชั้นที่ 1} = 30 \times [0.402 \text{ mm} + 0.32]$$

$$= 21.66 \text{ mm}$$

$$\text{ชั้นที่ 2} = 26 \times [0.402 \text{ mm} + 0.32]$$

$$= 18.77 \text{ mm}$$

$$\text{ชั้นที่ 3} = 23 \times [0.402 \text{ mm} + 0.32]$$

$$= 16.61 \text{ mm}$$

แรงดันสูงสุดระหว่างชั้น = 2 \times จำนวนรอบ/layer \times Volt/Tum (3.26)

$$\text{ชั้นที่ 1} = 2 \times 415 \times 3.5$$

$$= 2,905 \text{ V}$$

$$\text{ชั้นที่ 2} = 2 \times 365 \times 3.5$$

$$= 2,555 \text{ V}$$

$$\text{ชั้นที่ 3} = 2 \times 314 \times 3.5$$

$$= 2,198 \text{ V}$$

กระดาษกราฟที่หนา 0.08 mm 6 ชั้น รวม 0.48 mm ซึ่งจากคุณสมบัติกระดาษกราฟที่กระดาษกราฟที่หนา 0.08 mm 1 ชั้น สามารถทนความเครียดสนามไฟฟ้าได้ 55 kV/mm ดังนั้นกระดาษกราฟที่หนา 0.08 mm จะสามารถทนแรงดันได้ 4.4 kV เมื่อคิดค่า safety factor 150% สามารถทนแรงดันได้ 2.2 kV

4. ความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวดแรงดันสูง

เนื่องจากขดลวดแรงดันต่ำมีรัศมีวงนอก 85.67 mm จากนั้นจะใช้ Press board หนา 1 mm เป็นแกนปิดขดลวดแรงต่ำ ระหว่างขดลวดแรงต่ำ และแรงสูง จะมีช่องว่างน้ำมัน 3 mm เพื่อระบายความร้อนโดยใช้กระดาษ collugate และใช้ Press board 1 mm ปิดอีก 1 ชั้น จากนั้นจะเผื่อระยะเพื่อสวมขดลวดขดลวดแรงสูงเข้ากับขดลวดแรงต่ำ 6 mm ขดลวดแรงสูงจะมีแกน 1 mm ตามด้วยกระดาษห่อ(creeped paper) 0.65 mm 5 ชั้น ซีลด์ซีวนิวครัล 10 mm เพราะฉะนั้น

ชั้นที่ 1

$$\begin{aligned}\text{รัศมีวงใน} &= 85.67 + 1 + 3 + 1 + 8 + 1 + (0.65 \times 5) + 10 \\ &= 112.92 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{รัศมีวงนอก} &= \text{รัศมีวงใน} + \text{ความหนาของขดลวด} \\ &= 112.92 + 21.66 \\ &= 134.58 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{รัศมีเฉลี่ย } (r_{21}) &= (110.92 + 134.58)/2 \\ &= 122.75 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ความยาวรอบเฉลี่ย } (l_{av}) &= 2 \times \pi \times r_{21} \\ &= 2 \times \pi \times 122.75 \\ &= 771.26 \text{ mm}\end{aligned} \tag{3.27}$$

น้ำหนักทองแดงของขดลวด

$$W = N \times A_1 \times l \times \text{Density} \tag{3.28}$$

แทนค่าในสมการที่ (3.28)

$$\begin{aligned}W &= 415 \times 30 \times 0.0962 \text{ mm}^2 \times 771.26 \text{ mm} \times 8,900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ W &= 8.22 \text{ kg}\end{aligned}$$

ความต้านทานของขดลวด

จากสมการ (3.28)

$$R = \rho \frac{l}{A_1} \tag{3.29}$$

แทนค่าในสมการที่ (3.29)

$$\begin{aligned}R &= 0.01724 \times 10^{-6} \Omega \times \text{m} \times \frac{30 \times 415 \times 771.26 \text{ mm}}{0.0962 \text{ mm}^2} \\ R &= 1,720.81 \Omega\end{aligned}$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวด ($P_{\text{Cu HVI}}$)

$$P_{\text{Cu HVI}} = I^2 R$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีใช้งานตัวเดียว

$$P_{\text{CU HV1}} = 0.1^2 \times 1,720.81$$

$$P_{\text{CU HV1}} = 17.21 \text{ W}$$

กรณีต่อคาสเกต

$$P_{\text{CU HV1}} = 0.05^2 \times 1,720.81$$

$$P_{\text{CU HV1}} = 4.3 \text{ W}$$

ขั้นที่ 2

$$\text{รัศมีวงใน} = 137.83 \text{ mm}$$

$$\text{รัศมีวงนอก} = \text{รัศมีวงใน} + \text{ความหนาของขดลวด}$$

$$= 137.83 + 18.77$$

$$= 156.6 \text{ mm}$$

$$\text{รัศมีเฉลี่ย (r}_{22}\text{)} = (137.83 + 156.6)/2$$

$$= 147.22 \text{ mm}$$

$$\text{ความยาวรอบเฉลี่ย (l}_{av}\text{)} = 2 \times \pi \times r_{22} \quad (3.30)$$

$$= 2 \times \pi \times 147.22$$

$$= 925.01 \text{ mm}$$

น้ำหนักทองแดงของขดลวด

จากสมการ

$$W = N \times A_2 \times l \times \text{Density} \quad (3.31)$$

แทนค่าในสมการที่ (3.31)

$$W = 365 \times 26 \times 0.0962 \text{ mm}^2 \times 925.01 \text{ mm} \times 8,900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$W = 7.52 \text{ kg}$$

ความต้านทานของขดลวด

$$R = \rho \frac{l}{A_2} \quad (3.32)$$

แทนค่าในสมการที่ (3.32)

$$R = 0.01724 \times 10^{-6} \Omega \times \text{m} \times \frac{26 \times 365 \times 925.01 \text{ mm}}{0.0962 \text{ mm}^2}$$

$$R = 1,573.17 \Omega$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวด ($P_{\text{CU HV2}}$)

$$P_{\text{CU HV2}} = I^2 R$$

กรณีใช้งานตัวเดียว

$$P_{CU\ HV2} = 0.1^2 \times 1,573.17$$

$$P_{CU\ HV2} = 15.73\ W$$

กรณีต่อคาสเคด

$$P_{CU\ HV2} = 0.05^2 \times 1,573.17$$

$$P_{CU\ HV2} = 3.93\ W$$

ขั้นที่ 3

$$\text{รัศมีวงใน} = 159.85\ \text{mm}$$

$$\text{รัศมีวงนอก} = \text{รัศมีวงใน} + \text{ความหนาของขดลวด}$$

$$= 159.85 + 16.61$$

$$= 176.46\ \text{mm}$$

$$\text{รัศมีเฉลี่ย } (r_{23}) = (159.85 + 176.46)/2$$

$$= 168.16\ \text{mm}$$

$$\text{ความยาวรอบเฉลี่ย } (l_{av}) = 2 \times \pi \times r_{23}$$

$$= 2 \times \pi \times 168.16$$

$$= 1,056.58\ \text{mm}$$

น้ำหนักทองแดงของขดลวด

$$W = N \times A_2 \times l \times \text{Density}$$

$$W = [(22 \times 314) + 157] \times 0.0962\ \text{mm}^2 \times 1,056.58\ \text{mm}$$

$$W = 6.39\ \text{kg}$$

ความต้านทานของขดลวด

$$R = \rho \frac{l}{A_2}$$

$$R = 0.01724 \times 10^{-6}\ \Omega \times \text{m} \times \frac{[(22 \times 314) + 157] \times 1,056.58\ \text{mm}}{0.0962\ \text{mm}^2}$$

$$R = 1,337.76\ \Omega$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวด ($P_{CU\ HV3}$)

$$P_{CU\ HV3} = I^2_{HV} R$$

กรณีใช้งานตัวเดียว

$$P_{CU\ HV3} = 0.1^2 \times 1,337.76$$

$$P_{CU\ HV3} = 13.38\ W$$

กรณีต่อคาสเคด

$$P_{CU\ HV3} = 0.05^2 \times 1,337.76$$

$$P_{CU\ HV3} = 3.34\ W$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในขดลวดแรงสูง ($P_{CU\ HV\ total}$)

$$P_{CU\ HV\ total} = P_{CU\ HV1} + P_{CU\ HV2} + P_{CU\ HV3}$$

กรณีใช้งานตัวเดียว

$$P_{CU\ HV\ total} = 17.35 + 15.73 + 13.38$$

$$P_{CU\ HV\ total} = 46.46\ W$$

กรณีต่อคาสเคด

$$P_{CU\ HV\ total} = 4.34 + 3.93 + 3.34$$

$$P_{CU\ HV\ total} = 11.61\ W$$

ตารางที่ 3.4 สรุปลักษณะของขดลวดแรงสูง

ชนิดของวัสดุ	ลวดทองแดง
ขนาดของค้ำไม้ (mm^2)	0.0962
ฉนวนห่อหุ้มเส้นลวด	PVF/0.037 mm
จำนวนรอบ (รอบ)	29,005
จำนวนขดลวด (ขด)	1
จำนวนชั้น	ชั้นที่ 1 30 ชั้น 415 รอบ ชั้นที่ 2 26 ชั้น 365 รอบ ชั้นที่ 3 22 ชั้น 314 รอบ 1 ชั้น 157 รอบ
ความหนาฉนวนระหว่างชั้น (mm)	0.16 - 0.48
รัศมีด้านในของขดลวด (mm)	ชั้นที่ 1 112.92 ชั้นที่ 2 137.83 ชั้นที่ 3 159.85
รัศมีด้านนอกของขดลวด (mm)	ชั้นที่ 1 134.58 ชั้นที่ 2 156.6 ชั้นที่ 3 176.46
รัศมีเฉลี่ยของขดลวด (mm)	ชั้นที่ 1 123.75 ชั้นที่ 2 147.22 ชั้นที่ 3 168.16
ความกว้างของขดลวด (mm)	ชั้นที่ 1 167.23 ชั้นที่ 2 147.13 ชั้นที่ 3 126.63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 สรุปลักษณะของขดลวดแรงสูง(ต่อ)

น้ำหนักของขดลวด (kg)	ชั้นที่ 1	8.29
	ชั้นที่ 2	7.52
	ชั้นที่ 3	6.39
	รวม	<u>22.2</u>
กำลังสูญเสียในขดลวด (W) (กรณีใช้งานตัวเดียว)	ชั้นที่ 1	17.35
	ชั้นที่ 2	15.73
	ชั้นที่ 3	13.38
	รวม	<u>46.46</u>
กำลังสูญเสียในขดลวด (W) (กรณีต่อคาสเกต)	ชั้นที่ 1	4.34
	ชั้นที่ 2	3.93
	ชั้นที่ 3	3.34
	รวม	<u>11.61</u>

3.2.3 การออกแบบขดลวดต่อควบ

1. ขนาดพื้นที่หน้าตัดของขดลวดต่อควบ

$$A_3 = \frac{I_3}{J_3} \quad (3.33)$$

โดย A_3 พื้นที่หน้าตัดของขดลวด (mm^2)

I_3 กระแสจ่ายออกที่พิกัด (A)

J_3 ความหนาแน่นกระแส (A/mm^2)

$$A_3 = \frac{45.45}{2.3}$$

$$A_3 = 19.76 \text{ mm}^2$$

ขดลวดต่อควบ ใช้ลวดสี่เหลี่ยมทองแดงหุ้มกระดาษมีขนาดดังรูปที่ 3.10

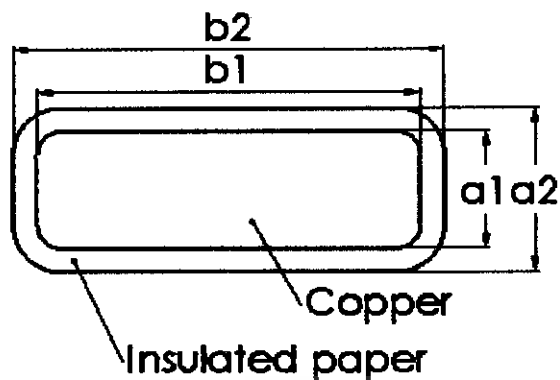
พื้นที่หน้าตัดใช้งานจริง(A_3) 19.79 mm^2

$$2. \text{ จำนวนรอบขดลวด} = \frac{V_3}{\left(\frac{E}{N}\right)} \quad (3.34)$$

$$= \frac{220}{3.5}$$

$$= 62.86 \text{ รอบ}$$

เมื่อแรงดันตก 1.5% (การสอบถามข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต) รวมประมาณ 64 รอบ



$$a_1 = 2.5 \text{ mm} \quad a_2 = 3.5 \text{ mm} \quad R = 0.5 \text{ mm}$$

$$b_1 = 8 \text{ mm} \quad b_2 = 9 \text{ mm}$$

รูปที่ 3.10 ภาพตัดขดลวดต่อควบ

3. การพัน

จำนวนขดลวดมี 2 ชุด พัน 8 ชั้น ชั้นละ 4 รอบ

รวม (N) 64 รอบ

ความกว้างของขดลวด (2 ชุด รวมช่องว่างน้ำมัน)

$$= \{[(\text{ความกว้างของเส้นลวดรวมฉนวน} + \text{ระยะห่างระหว่างเส้นลวด}) \times (\text{จำนวนรอบ/layer} + 1)] \times 2\} + \text{ช่องว่างน้ำมัน}$$

$$= \{[(9 + 0.1) \times (4 + 1)] \times 2\} + 15 \text{ mm}$$

$$= 105 \text{ mm}$$

รวมความกว้างกระดาษปิดขอบด้านละ 15 mm

$$= 135 \text{ mm}$$

ความหนาของขดลวด = [(ความหนาของเส้นลวดรวมฉนวน + ระยะห่างระหว่างเส้นลวด)

$$\times \text{จำนวน layer}] + [(\text{จำนวน layer} - 1)$$

$$\times \text{ความหนาของกระดาษกราฟท์}]$$

$$= [(3.5 + 0.1) \times 8] + [7 \times 0.24]$$

$$= 30.48 \text{ mm}$$

แรงดันสูงสุดระหว่างชั้น = 2 × จำนวนรอบ/layer × Volt/Tum

$$= 2 \times 4 \times 3.5$$

$$= 28 \text{ V}$$

กระดาษกราฟที่หนา 0.08 mm 3 รอบ รวม 0.24 mm ซึ่งจากคุณสมบัติกระดาษกราฟในภาคผนวก ข.16 กระดาษกราฟที่หนา 0.24 mm 1 ชั้น สามารถทนความเครียดสนามไฟฟ้าได้ 55 kV/mm ดังนั้นกระดาษกราฟที่หนา 0.24 mm จะสามารถทนแรงดันได้ 13.2 kV เมื่อคิดค่า safety factor 150% สามารถทนแรงดันได้ 6.6 kV

4. ความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวดต่อควม

เนื่องจากขดลวดแรงดันสูงมีรัศมีวงนอก 176.46 mm ฉนวนกัน 0.16 mm กระดาษห่อ (creeped paper) 3.25 mm และแกนกระดาษ 1 mm เพราะฉะนั้น

$$\text{รัศมีวงใน} = 176.46 + 0.16 + 3.25 + 1$$

$$= 180.87 \text{ mm}$$

$$\text{รัศมีวงนอก} = 180.87 + \text{ความหนาของขดลวด}$$

$$= 180.87 + 30.48$$

$$= 211.35 \text{ mm}$$

$$\text{รัศมีเฉลี่ย} (r_3) = (180.87 + 211.35)/2$$

$$= 196.11 \text{ mm}$$

$$\text{ความยาวรอบเฉลี่ย} (l_{av}) = 2 \times \pi \times r_3$$

$$= 2 \times \pi \times 196.11$$

$$= 1,232.2 \text{ mm}$$

5. น้ำหนักทองแดงของขดลวด

$$W = N \times A_1 \times l \times \text{Density}$$

$$W = 64 \times 19.79 \text{ mm}^2 \times 1,232.2 \text{ mm} \times 8,900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$W = 13.89 \text{ kg}$$

6. ความต้านทานของขดลวด

$$R = \rho \frac{l}{A_1}$$

$$R = 0.01724 \times 10^{-6} \Omega \times \text{m} \times \frac{64 \times 1,232.2 \text{ mm}}{19.79 \text{ mm}^2}$$

$$R = 0.069 \Omega$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดต่อควม ($P_{CU T}$)

$$P_{CU T} = I^2 l v R$$

$$P_{CU T} = 22.73^2 \times 0.069$$

$$P_{CU T} = 35.65 \text{ W}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 สรุปลักษณะของขดลวดต่อควม

ชนิดของวัสดุ	ลวดทองแดง
ขนาดของตัวนำ (mm ²)	2.5×8
ฉนวนห่อหุ้มเส้นลวด	Insulated Paper
จำนวนรอบ (รอบ)	64
จำนวนขดลวด (ขด)	2
จำนวนชั้น (ชั้น)	8
จำนวนรอบ/ชั้น	4
ความหนาฉนวนระหว่างชั้น (mm)	0.24
รัศมีด้านในของขดลวด (mm)	180.87
รัศมีด้านนอกของขดลวด (mm)	211.35
รัศมีเฉลี่ยของขดลวด (mm)	196.11
ความกว้างของขดลวด (mm)	135
น้ำหนักของขดลวด (kg)	13.89
กำลังสูญเสียในขดลวด (W)	35.65

3.3 การหาขนาดท่อนำสายแรงดันสูง

หม้อแปลงทดสอบแบบถึงฉนวนที่ได้มีการออกแบบขึ้นมาเมื่อมองภาพตัดในแนวระนาบแล้วจะเห็นได้ว่า มีลักษณะเป็นแบบทรงกระบอกซ้อนกันรวม ซึ่งในการคำนวณจะมองท่อนำสายแรงดันสูงเป็นตัวนำทรงกระบอกใน และมองระยะปลอดภัยที่น้อยที่สุดที่จะต้องห่างจากหม้อแปลงขณะใช้งานที่แรงดันสูงสุดเป็นรัศมีของทรงกระบอกนอก ในที่นี้คือระยะของระบบต่อลงดิน ดังนั้นสามารถคำนวณขนาดของท่อนำสายแรงดันสูงได้จากสมการที่ 3.27

$$E_r = \frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (3.35)$$

โดยที่ E_r คือ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า ($E_{oil} = 10 \text{ kV}_p/\text{mm}$, $E_{air} = 2 \text{ kV}_p/\text{mm}$)

U คือ ค่าแรงดันที่ใช้งาน ($U_1 = 141.42 \text{ kV}_p$, $U_2 = 282.84 \text{ kV}_p$)

r_1 คือ รัศมีของตัวนำทรงกระบอกใน

r_2 คือ รัศมีของตัวนำทรงกระบอกนอก ($r_{2,1} = 750 \text{ mm}$, $r_{2,2} = 1,250 \text{ mm}$)

ซึ่งสามารถดูขนาดของท่อนำสายแรงดันสูงที่ได้จากการคำนวณในตารางที่ 3.6

โดยทั่วไปแล้วหม้อแปลงนั้นภายในจะไม่ได้ใส่น้ำมันหม้อแปลงไว้เต็มถัง จะมีระยะต่ำจากขอบถังเล็กน้อย เพื่อให้มีพื้นที่ไว้รองรับน้ำมันหม้อแปลงเวลาขยายตัวเมื่อมีความร้อนเกิดขึ้นขณะใช้งาน ฉะนั้นท่อนำสายแรงดันสูงที่อยู่ในน้ำมันและอากาศจะมีขนาดไม่เท่ากัน

ตารางที่ 3.6 ขนาดของท่อนำสายแรงดันสูงที่ได้จากการคำนวณ

ขนาดรัศมีท่อนำสายชั้นที่ 1 (mm)		ขนาดรัศมีท่อนำสายชั้นที่ 2 (mm)	
ในน้ำมัน	ในอากาศ	ในน้ำมัน	ในอากาศ
2.475	19.327	5.150	41.543

ตารางที่ 3.7 ขนาดท่อนำสาย

ขนาดท่อนำสายชั้นที่ 1	2 นิ้ว
ขนาดท่อนำสายชั้นที่ 2	3 นิ้ว

ตามค่าเปอร์มิตติวิตีของวัสดุต่างๆ แต่ตามลักษณะทางโครงสร้างแล้ว จะเห็นว่ารัศมีในน้ำมันนั้นมีขนาดเล็ก จนไม่สามารถที่บรรจุสายแรงดันสูงและสายต่อควบเข้าไปได้ จึงได้มีการปรับขนาดให้มีรัศมีเท่ากับขนาดรัศมีของท่อในอากาศ ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วขนาดของท่อที่จะใช้ก็ต้องเป็นขนาดที่มีจำหน่ายในท้องตลาดซึ่งเป็นขนาดมาตรฐาน ซึ่งในที่นี้ได้ทำการเลือกใช้ตามขนาดดังตารางที่ 3.7

3.4 การหาขนาดอิเล็กโทรดซิลด์ภายนอก

ใช้ทำหน้าที่ลดหรือควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าที่ขั้วแรงสูง ให้มีค่าไม่เกินค่าวิกฤตเพื่อไม่ให้เกิดดิสชาร์จโคโรนาบนผิวอิเล็กโทรดแรงสูง ซึ่งในการออกแบบนี้เป็นแบบวงแหวนท่อบางอยู่บนผิวอิเล็กโทรดแรงสูงอีกที เพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้า บริเวณขอบด้านบนที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยม ซึ่งอาจทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงได้ที่จุดนี้ การคำนวณหาขนาดอิเล็กโทรดซิลด์ภายนอกนี้ จะคำนวณเช่นเดียวกับการหาขนาดของท่อนำสายแรงดันสูงซึ่งขนาดของอิเล็กโทรดซิลด์ภายนอกที่ได้จากการคำนวณแสดงในตารางที่ 3.8 [14]

โดยที่ E_p คือ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ต้องการ ($E_{mr} = 2 \text{ kV}_p/\text{mm}$)

U คือ ค่าแรงดันที่ใช้งาน ($U_1 = 141.42 \text{ kV}_p$, $U_2 = 282.84 \text{ kV}_p$)

r_1 คือ รัศมีของตัวนำทรงกระบอกใน

r_2 คือ รัศมีของตัวนำทรงกระบอกนอก

($r_{21} = 500 \text{ mm}$, $r_{22} = 1,000 \text{ mm}$)

ในกรณีหม้อแปลงต่อแบบขั้วบนขั้วใด ที่อิเล็กโทรดตัวล่างของหม้อแปลงตัวบนจะมีการเทียบศักย์ไฟฟ้าจากอิเล็กโทรดตัวบนของหม้อแปลงตัวล่าง ทำให้ส่วนนี้มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน ฉะนั้นขนาดอิเล็กโทรดซิลด์ภายนอกที่ได้จึงมีขนาดเท่ากัน ส่วนอิเล็กโทรดซิลด์ภายนอกตัวบนของหม้อแปลงตัวบนจะมีขนาดที่ใหญ่กว่า เพราะมีแรงดันใช้งานสูงสุดเป็น 2 เท่าของหม้อแปลงตัวล่าง

3.5 ซิลด์ข้าวแรงสูงและซิลด์ข้าวนิวตรัล

วงจรภายในหม้อแปลงในสภาวะปกติแล้ว หม้อแปลงจะมีค่าความเหนี่ยวนำ และค่าตัวเก็บประจุอยู่ กรณีที่ได้รับแรงดันเกินเข้ามา วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงจะเหลือเพียง คาข่ายค่าความเก็บประจุเตอรย์และค่าความจุนุกรมดกคร่อมแต่ละขด ซึ่งทำให้แรงดันกระจาย บนขดลวดไม่สม่ำเสมอ จึงมีโอกาทำให้เกิดการเบรกคาวน์ ทำให้ฉนวนภายในเกิดความเสียหายอย่างถาวรได้ ดังนั้นจึงมีการใส่ซิลด์ข้าวแรงสูงและซิลด์ข้าวนิวตรัลไว้ เพื่อลดความเครียด สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ปลายขดลวดทั้งในสภาวะทำงานที่แรงดันปกติ และกรณีที่เกิดแรงดันเกิน โดยมีลักษณะเป็นแผ่นทองแดงพันรอบที่ขดลวดต่อควมอีกที แต่ที่ขอบของแผ่นทองแดงจะมีความคมจึงต้องมีการมันปลายให้เป็นทรงกลม ในส่วนนี้ต้องมีการคำนวณรัศมีความโค้งเพื่อลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้า ให้มีค่าไม่เกินค่าวิกฤตที่กำหนด ในการคำนวณหาขนาดรัศมีความโค้งนี้จะคำนวณเช่นเดียวกับการหาขนาดของท่อนำสายแรงดันสูงการคำนวณแสดงในตารางที่ 3.9

โดยที่ E_f คือ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ต้องการ ($E_{out} = 10 \text{ kV}_p/\text{mm}$)
 U คือ ค่าแรงดันที่ใช้งาน ($U_1 = 141.42 \text{ kV}_p, U_2 = 282.84 \text{ kV}_p$)
 r_1 คือ รัศมีของคว้านาทรงกระบอกใน
 r_2 คือ รัศมีของคว้านาทรงกระบอกนอก
 $(r_{2,1} = 750 \text{ mm}, r_{2,2} = 1,250 \text{ mm})$

3.6 การคำนวณปริมาตรน้ำมันหม้อแปลง

$$\text{ปริมาตรถัง} = \pi r^2 h \quad (3.36)$$

โดยที่ r คือ รัศมีวงในของถัง ($r = 289.6 \text{ mm}$)

h คือ ความสูงของถัง ($h = 850 \text{ mm}$)

$$\therefore \text{ปริมาตรถัง} = 223,957,656 \text{ mm}^3$$

ปริมาตรแกนเหล็กรวมกับขดลวดไม่สามารถหาได้จากการคำนวณจึงได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์วัดปริมาตรจากที่ได้ทำการออกแบบมาโดยประมาณ

ปริมาตรแกนเหล็กรวมกับขดลวด

$$= 43,341,490 \text{ mm}^3$$

ฉะนั้นจะสามารถหาปริมาตรน้ำมันโดยประมาณได้

ปริมาตรถัง – ปริมาตรแกนเหล็กรวมกับขดลวด

$$= 180,616 \text{ cm}^3$$

$$= 180,616 \text{ mL}$$

ตารางที่ 3.8 ขนาดของอิเล็กทรอนิกส์ภายนอกที่ได้จากการคำนวณจากสมการ 3.27

ขนาดอิเล็กทรอนิกส์ภายนอก ชั้นที่ 1 (mm)	ขนาดอิเล็กทรอนิกส์ภายนอก ชั้นที่ 2 (mm)
22.947	45.894

ตารางที่ 3.9 ขนาดซิลด์ขั้วแรงสูงและซิลด์ขั้วนิวตรัลที่ได้จากการคำนวณจากสมการ 3.27

ขนาดซิลด์ขั้วแรงสูงและซิลด์ขั้วนิวตรัล ชั้นที่ 1 (mm)	ขนาดซิลด์ขั้วแรงสูงและซิลด์ขั้วนิวตรัล ชั้นที่ 2 (mm)
2.475	5.150

โดยปกติแล้วอุณหภูมิใช้งานของน้ำมันหม้อแปลงจะอยู่ที่ประมาณ 30-70 °C ดังนั้นจึงคำนวณอัตราการขยายตัวสูงสุดเป็นปริมาตรที่ 70 °C ว่าเป็นปริมาตรน้ำมันที่เต็มถึงพอดี แล้วคำนวณหาปริมาตรที่อุณหภูมิ 30 °C เพื่อจะหาความสูงของปริมาตรที่น้อยที่สุดที่ต่ำลงมาจากขอบถังจากปริมาตรน้ำมันที่คำนวณหามาได้และผลต่างของอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงจะสามารถหาปริมาตรที่มีการเปลี่ยนแปลงสูงสุดได้ดังนี้

สัมประสิทธิ์การขยายตัวของน้ำมัน 0.00075 mL/°C/mL

อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง 40 °C

∴ ปริมาตรของน้ำมันที่มีการเปลี่ยนแปลง = 0.03 mL/mL

∴ ปริมาตรของน้ำมันที่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งหมด = 5,418 mL

จากปริมาตรน้ำมันที่เปลี่ยนแปลงคำนวณหาความสูงของน้ำมันที่ต่ำลงมาจากขอบถังได้ จากสูตร

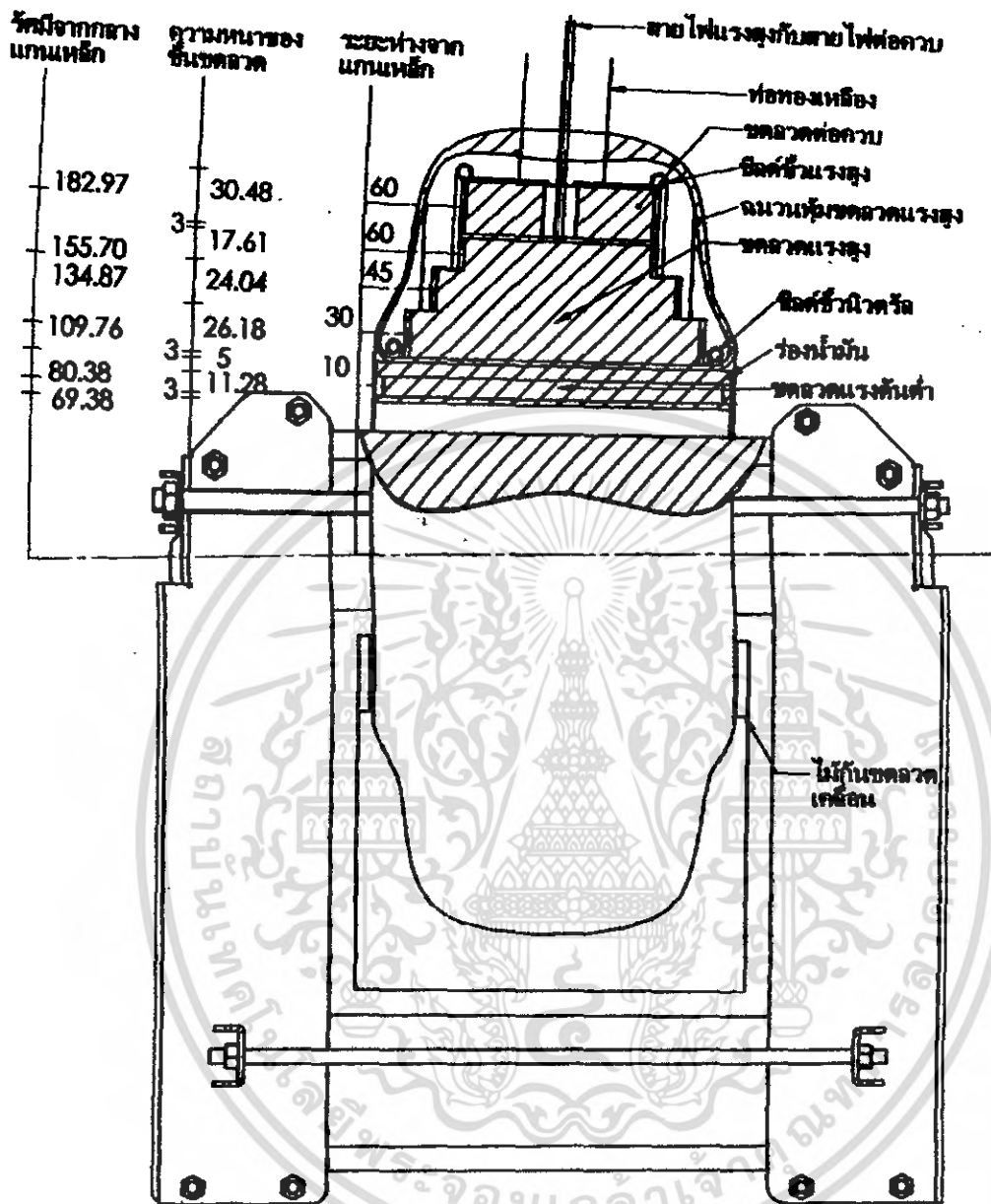
$$\Delta V = \pi r^2 h \quad (3.37)$$

โดยที่ r คือ รัศมีวงในของถัง ($r = 289.6$ mm)

ΔV คือ ปริมาตรที่ลดลง ($\Delta V = 5,418$ mL)

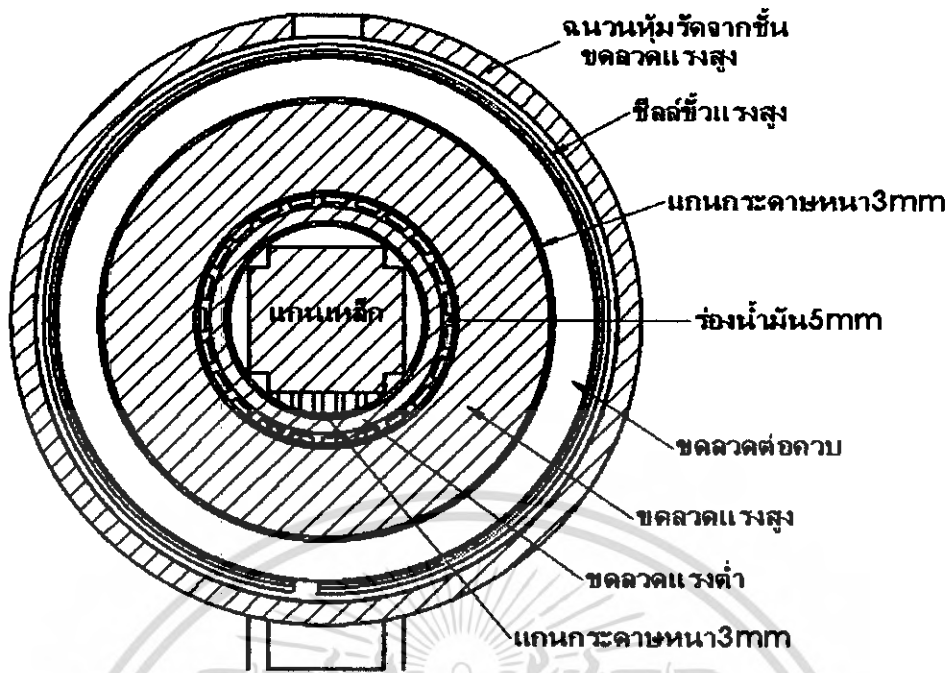
∴ ความสูงที่ลดลงจากขอบถัง = 20.56 mm

*ปกติแล้วอุณหภูมิของน้ำมันขณะที่เต็มจะสูงกว่าอุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) แต่มีค่าไม่เกินอุณหภูมิสูงสุดขณะใช้งาน (70 องศาเซลเซียส) เพราะฉะนั้นก่อนทำการเติมน้ำมันจะต้องตรวจสอบอุณหภูมิขณะทำการเติม และทำการคำนวณเทียบกับอุณหภูมิสูงสุดขณะใช้งานที่ 70 องศาเซลเซียส เพื่อหาความสูงของน้ำมันที่ต่ำจากขอบถังว่ามีค่าเท่าไร



รูปที่ 3.11 ภาพตัดของขดลวดตามแนวแกนเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะวิธีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 ภาพตัดของชดลวดตามแนวขวางแกนเหล็ก

3.7 การถ่ายเทความร้อน(Heat Dissipation)

ในกรณีของหม้อแปลง ความร้อนจะเกิดจากกระแสที่ไหลในตัวนำไฟฟ้าที่มีค่าความต้านทานของชดลวด เส้นแรงแม่เหล็กที่ไหลในสารเฟอร์โรแมกเนติก รวมทั้งเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วไหลในตัวถังและฝาปิดของหม้อแปลง ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของหม้อแปลงสูงขึ้นจากอุณหภูมิของสารตัวกลางรอบข้าง โดยกรณีทั่วไปจะเป็นอากาศโดยความร้อนนี้จะถูกถ่ายเทออกไปได้ 3 ทาง คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน

3.7.1 การนำความร้อน

การนำความร้อนจะมีลักษณะคล้ายการนำไฟฟ้า โดยการนำความร้อนจะเกิดระหว่าง 2 พื้นผิวที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิผ่านสารตัวกลางคั่นอยู่ และโมเลกุลของสารตัวกลางจะถ่ายเทความร้อนให้แก่โมเลกุลที่อยู่ติดกันโดยที่โมเลกุลไม่มีการเคลื่อนที่ การนำความร้อนจะเป็นไปตามสมการที่ 3.38 [1]

$$Q_{cond} = \frac{T_1 - T_2}{\left(\frac{\rho l}{A}\right)} = \frac{\Delta T_1}{\left(\frac{\rho l}{A}\right)} \quad (3.38)$$

โดยที่ Q_{cond} คือ กำลังความร้อนที่ถ่ายเทผ่านสารตัวกลาง (W)

ΔT_1 คือ ผลต่างของอุณหภูมิของสองพื้นผิว ($^{\circ}\text{C}$)

ρ คือ สภาพต้านทานทางความร้อน ($\frac{^{\circ}\text{C}\times\text{m}}{\text{W}}$)

l คือ ความยาวของสารตัวกลาง (m)

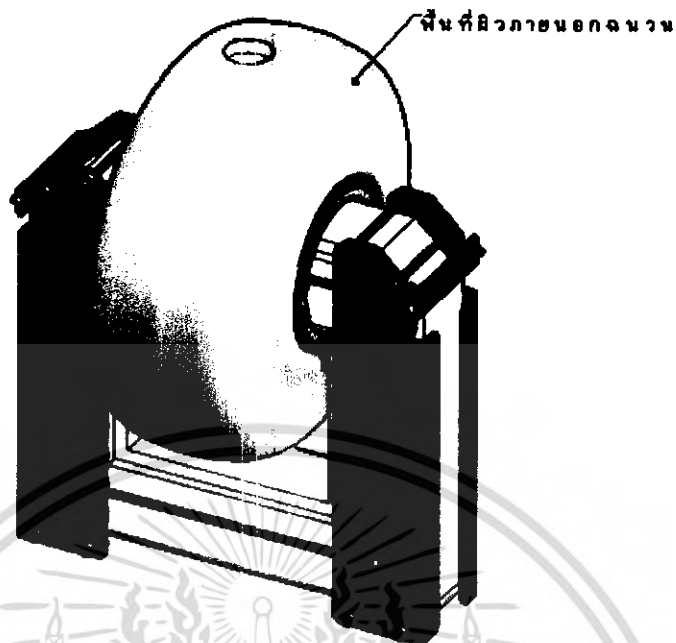
A คือ พื้นที่หน้าตัดของสารตัวกลาง (m^2)

กำหนดหม้อแปลงจะทำงานที่อุณหภูมิแวดล้อม 40°C การนำความร้อนของฉนวน โดยคิดความหนาของฉนวนที่ล้อมรอบขดลวดแรงสูงและขดลวดต่อความประมาณ 0.01m ค่าสภาพนำความร้อนของกระดาษฉนวนจุ่มน้ำมัน (σ) มีค่าอยู่ระหว่าง $0.25\text{-}0.45 \text{ W/m } ^{\circ}\text{C}$ [1] ในการคำนวณเลือกใช้ค่า $0.40 \text{ W/m } ^{\circ}\text{C}$ และพื้นที่ผิวภายนอกฉนวนประมาณ 0.4 m^2 เมื่อคำนวณอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงสูงเทียบกับน้ำมันได้ คือ

$$\begin{aligned} \Delta T_1 &= \frac{Q_{cond} \times l}{\sigma \times A} \\ \Delta T_1 &= \frac{41.66 \times 0.01}{0.4 \times 0.4} \\ \Delta T_1 &= 2.6 \text{ } ^{\circ}\text{C} \end{aligned} \quad (3.39)$$

และคำนวณอุณหภูมิเพิ่มระหว่างขดลวดแรงต่ำกับขดลวดแรงสูงได้ คือ

$$\begin{aligned} \Delta T_1 &= \frac{Q_{cond} \times l}{\sigma \times A} \\ \Delta T_1 &= \frac{57.84 \times 0.003}{0.4 \times 0.1} \\ \Delta T_1 &= 4.34 \text{ } ^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$



รูปที่ 3.13 พื้นที่ผิวภายนอกฉนวน

การออกแบบอุณหภูมิสูงสุดของขดลวดถูกกำหนดไว้ที่ 120°C และอุณหภูมิของน้ำมันในสถานะปกติมีค่า 40°C [1] ดังนั้นสามารถคำนวณอุณหภูมิเพิ่มระหว่างอุณหภูมิของน้ำมันกับอุณหภูมิแวดล้อมได้

$$\Delta T_2 = 120 - 40 - 2.6 - 4.34$$

$$\Delta T_2 = 73.06^{\circ}\text{C}$$

เนื่องจากใช้ท่อ PVC เป็นตัวถังของหม้อแปลง ดังนั้นจะต้องหาอุณหภูมิเพิ่มสูงสุดที่จะไม่ทำให้ท่อ PVC เกิดความเสียหายเนื่องจากความร้อน

จากมาตรฐานท่อ PVC [17] มีค่าอุณหภูมิวิกฤตที่ 75°C เมื่อคิดค่าอุณหภูมิของน้ำมันในสถานะปกติที่ 40°C และอุณหภูมิเพิ่มเนื่องจากการสูญเสียในขดลวดเป็น 6.94°C ดังนั้นอุณหภูมิของน้ำมันเมื่อใช้งานเต็มพิกตมีค่าประมาณ 46.94°C ซึ่งความร้อนบริเวณผิวของท่อ PVC จะมีค่าไม่เกินจากการคำนวณ ดังนั้นจึงไม่เกินอุณหภูมิวิกฤต

3.7.2 การพาความร้อน

การพาความร้อนเกิดจากอนุภาคของก๊าซหรือของเหลวที่ใกล้วัตถุร้อนและรับความร้อนจากวัตถุอื่น อนุภาคนั้นจะร้อนขึ้นและเคลื่อนที่เข้าไปแทนที่อนุภาคที่เย็นกว่า จากกระบวนการนี้จะทำให้ความหนาแน่นของของไหลมีการเปลี่ยนแปลง

การพาความร้อนจะแบ่งเป็น 2 แบบ ด้วยกันคือ การพาความร้อนแบบธรรมชาติและการพาความร้อนด้วยแรงขับเคลื่อน (Artificial convection) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวเฉพาะการพาความร้อนแบบธรรมชาติ

การพาความร้อนแบบธรรมชาติ เป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนมากขึ้นกับหลายตัวแปรด้วยกันอันได้แก่

- 1) ความหนาแน่นของกำลังงานที่ใช้
- 2) ความแตกต่างของพื้นผิวระบายความร้อนกับสารตัวกลางระบายความร้อน
- 3) ความสูง ทิศทาง สภาพพื้นผิวระบายความร้อน
- 4) สภาพต้านทานความร้อน ความหนืด การขยายตัวของสารตัวกลางระบาย

ความร้อน [1]

การคำนวณการพาความร้อนจะขึ้นกับผลต่างของอุณหภูมิวัตถุที่สนใจกับอุณหภูมิของตัวกลางที่แวดล้อมอาจทำได้โดยประมาณตามสมการที่ 3.39

$$q_{conv} = K_c (T_1 - T_2)^n \quad \text{W/m}^2 \quad (3.40)$$

โดยที่ K_c คือ ค่าคงที่ขึ้นกับขนาดและสภาพพื้นผิวของวัตถุร้อน

N คือ ค่าคงที่ขึ้นกับขนาดและสภาพพื้นผิวของวัตถุร้อนมีค่าระหว่าง 1-1.25

q_{conv} คือ ค่าการพาความร้อนของตัวกลางต่อ 1 หน่วยพื้นที่ผิวของวัตถุที่ W/m^2

จากโครงสร้างของขดลวดแรงสูงและขดลวดต่อควบในคอนตันจะมีถูกห่อหุ้มด้วยกระดาษฉนวนเพื่อป้องกันสิ่งแปลกปลอมเข้าไปในขดลวดซึ่งเป็นต้นเหตุของการเกิดเบรกควาร์ ดังนั้นอุณหภูมิเพิ่มเนื่องจากการพาความร้อนมีค่าน้อย

3.7.3 การแผ่รังสีความร้อน

การแผ่รังสีความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำออกจากวัตถุร้อน ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิและลักษณะเฉพาะตัวของพื้นผิวอันได้แก่สี และความขรุขระของพื้นผิว ซึ่งมีความซับซ้อนมากในการคำนวณ

3.8 การคำนวณแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์(%Z)

พิจารณาแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์จากสมการที่ 3.32 – 3.34 รายละเอียดของสมการดูได้จากเอกสารอ้างอิง [18]

$$e_z = \sqrt{e_r^2 + e_x^2} \quad (3.41)$$

$$e_r = \frac{P_T}{S_N} \times 100 \quad (3.42)$$

$$e_x = \frac{0.42 \times \pi \times S_N \times \left(\frac{d_m + D_m}{2} \right) \times \left(HVLV + \frac{RB_{LV} + RB_{HV}}{3} \right) \times \frac{f}{50} \times K_8}{K_9 \times \left(\frac{U_{ph}}{N} \right)^2 \times AL_{app} \times 10} \quad (3.43)$$

โดย e_z = Impedance (%)

e_r = Resistance (%)

e_x = Reactance (%)

P_T = Total load losses ; ($P_T = 0.191$ kW)

S_N = Rating ; ($S_N = 10$ kVA)

d_m = Equivalent mean diameter of low voltage winding ;
($d_m = 160.06$ mm)

D_m = Equivalent mean diameter of high voltage winding ;
($D_m = 294.44$ mm)

HVLV = Distance between high and low voltage winding ;
(HVLV = 15.52 mm)

RB_{LV} = Radial build of low voltage winding ; ($RB_{LV} = 11.28$ mm)

RB_{HV} = Radial build of high voltage winding ; ($RB_{HV} = 57.04$ mm)

f = Frequency ; ($f = 50$ Hz)

U_{ph} = Voltage per phase ; ($U_{ph} = 220$ V)

N = Number of turns per phase ; ($N = 63$ รอบ)

K_8 = Rogowski factor = $1 - \frac{RB_{LV} + RB_{HV} + HVLV}{\pi \cdot AL_{app}}$; ($K_8 = 0.8$)

K_9 = Number of wound legs (when three phase $K_9 = 3$) ; ($K_9 = 1$)

U_{phLV} = Phase voltage in low voltage winding ; ($U_{phLV} = 220$ V)

AL_{app} = Apparent axial length of low voltage winding

$$= \frac{[AL_{LV}]}{1 - \frac{(RB_{LV} + RB_{HV} + HVLV)}{(\pi \cdot AL_{LV})}} ; (AL_{app} = 234.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AL_{LV} = Axial length of low voltage winding ; ($AL_{LV} = 200.2$ mm)
 ดังนั้น %Z = 4.06 (ต่อหม้อแปลง 1 ตัว)

3.9 การคำนวณกระแสไฟฟ้าลัดวงจร(I_{sc})

จากสมการกระแสลัดวงจร

$$I_{sc} = \frac{I_{HV}}{\%Z} \times 100 \quad (3.44)$$

โดย I_{sc} คือ กระแสลัดวงจร (A)

I_{HV} คือ กระแสไฟฟ้าทางด้านแรงสูง (A)

%Z คือ แรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์

$$I_{sc} = \frac{0.1}{4.06} \times 100$$

$$I_{sc} = 2.46 \text{ A (ต่อหม้อแปลง 1 ตัว)}$$

3.10 กำลังไฟฟ้าลัดวงจร(S_{sc})

จากสมการกำลังไฟฟ้าลัดวงจร

$$S_{sc} = \frac{S_{HV}}{\%Z} \times 100 \quad (3.45)$$

โดย S_{sc} คือ กำลังไฟฟ้าวงจร (A)

S_{HV} คือ กำลังไฟฟ้าทางด้านแรงสูง (A)

%Z คือ แรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์

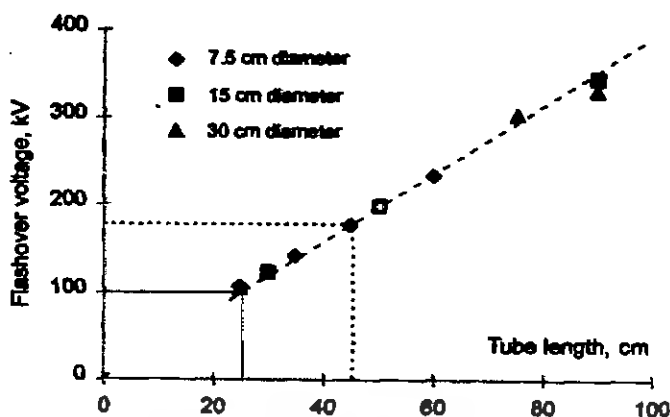
$$S_{sc} = \frac{10,000}{4.06} \times 100$$

$$S_{sc} = 246.31 \text{ kVA (ต่อหม้อแปลง 1 ตัว)}$$

3.11 การออกแบบตัวถัง

การออกแบบจะใช้ท่อ PVC เป็นตัวถังฉนวน ซึ่งจะช่วยให้ค่าใช้จ่ายในการประกอบสร้างลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับการสร้างถังโลหะ เนื่องจากหม้อแปลงที่เป็นแบบถังโลหะจะต้องมีปลอกฉนวนนำสาย ซึ่งมีราคาสูง

การเลือกขนาดท่อ PVC ที่ใช้เป็นตัวถังอุปกรณ์นั้น จะขึ้นอยู่กับแรงทางกล และทางไฟฟ้าที่กระทำต่อท่อเป็นหลัก พิกัดทางไฟฟ้านั้นจะขึ้นอยู่กับความยาวของท่อ เนื่องจากในการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้น จะมีแรงดันสูงตกคร่อมระหว่างปลายทั้งสองของ



รูปที่ 3.14 ผลการทดสอบแรงดันวาวไฟตามผิวไฟฟ้ากระแสสลับ

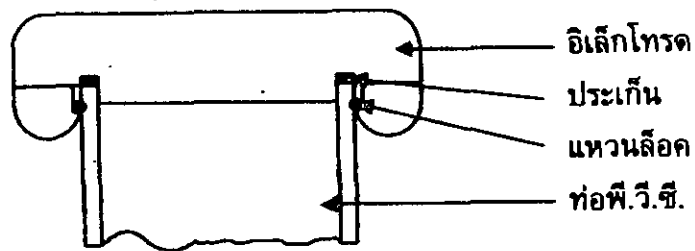
ท่อPVC ท่อจะต้องยาวพอที่จะทนแรงนี้ได้โดยไม่เกิดเบรกดาวน์ ค่าแรงดันวาวไฟตามผิวของท่อ PVC ดังปรากฏในเอกสารอ้างอิงนั้น ได้จากการทดลองที่สภาวะบรรยากาศของห้องที่แตกต่างกัน และนำมาแปลงเป็นค่าแรงดันที่สภาวะบรรยากาศมาตรฐานที่อุณหภูมิ 20°C ความดัน 760 mmHg (ไม่คำนึงถึงความชื้น) พบว่าค่าแรงดันวาวไฟตามผิวท่อ PVC มีค่าเพิ่มขึ้นตามความยาวท่อ และมีค่าวาวไฟตามผิวกระแสสลับประมาณ 400 kV/m และมีค่าประมาณ 600 kV/m และ 1,000 kV/m ในกรณีของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าชั่วคราวและชั่วคราวตามลำดับโดยค่าดังกล่าวไม่ขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ [19]

การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสม อิเล็กทรอนิกส์ที่ดีควรจะมีไมโครนาที่แรงดันใช้งาน มีความแข็งแรงทางกลเมื่อประกอบเข้ากับท่อ สะดวกในการต่อกับแหล่งจ่ายไฟอื่นๆ และบางครั้งยังต้องป้องกันการรั่วซึมได้ด้วยเนื่องจากภายในท่ออาจมีของเหลวหรือก๊าซบรรจุอยู่ อิเล็กทรอนิกส์แรงสูงดังกล่าวสามารถออกแบบได้โดยใช้ผลการคำนวณสนามไฟฟ้าจากโปรแกรมรูปร่างของอิเล็กทรอนิกส์แรงสูงที่ใช้กับแรงดันขนาด 100-200 kV ขึ้นต้นจึงควรมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.15

การออกแบบใช้ท่อ PVC เส้นผ่านศูนย์กลาง 24 นิ้ว เป็นตัวถังฉนวน และเนื่องจากการออกแบบนี้จะนำหม้อแปลง 2 ตัว มาวางซ้อนกัน ดังนั้นเพื่อความแข็งแรงของโครงสร้างหม้อแปลง จึงเลือกใช้ท่อ PVC ที่มีความหนาค่อนข้างมาก คือประมาณ 32.8 mm ส่วนการกำหนดความสูงของตัวถังนั้นจะใช้ค่าระยะความปลอดภัยระหว่างขั้วแรงสูงกับขั้วนิวทรัลไม่ต่ำกว่า 2 kV/cm [15] และจากการออกแบบขดลวดและแกนเหล็กในข้างต้น จึงเลือกออกแบบตัวถังให้มีความสูง 85 cm โดยเมื่อทำการปิดฝาครอบด้านบนและด้านล่าง ซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์แรงสูงและกราวด์ตามลำดับ จะทำให้ระยะห่างลดลงเนื่องจากการเหลื่อมเข้าด้านบนและด้านล่างประมาณด้านละ 2.5 cm เพราะฉะนั้นจะเหลือระยะฉนวนภายนอกประมาณ 80 cm ถ้าได้รับแรงดัน 120 kV ซึ่งเมื่อแรงดันเกิน 20% (จาก $E = \frac{V}{d}$) จะ

ได้ความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนเท่ากับ $120 / 80 = 1.50 \text{ kV/cm}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

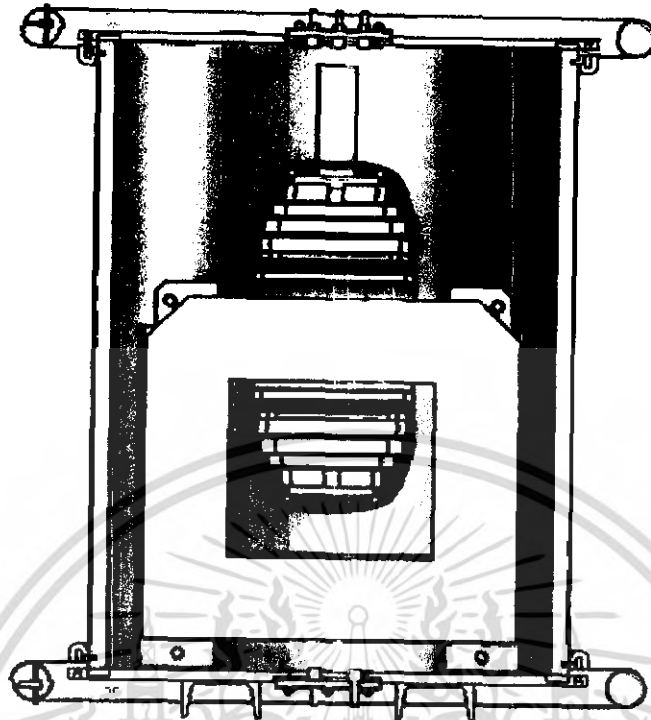


รูปที่ 3.15 อิลีกโทรดแรงสูงที่เหมาะสมที่ใช้กับแรงดันขนาด 100-200 kV

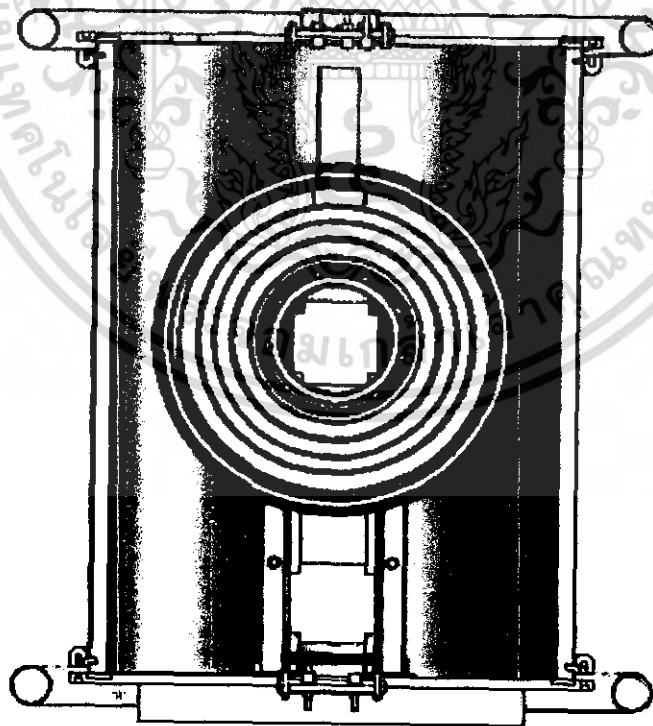


(ก) ลักษณะโครงสร้างของหม้อแปลงที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

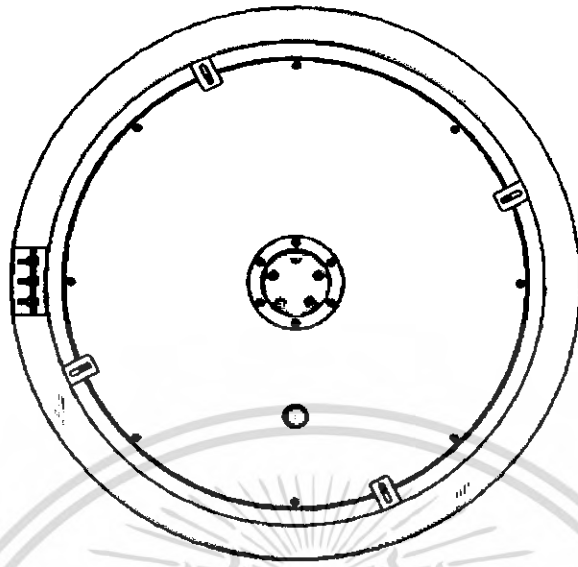


(ข) ภาพตัดตามแนวแกนเกลียว

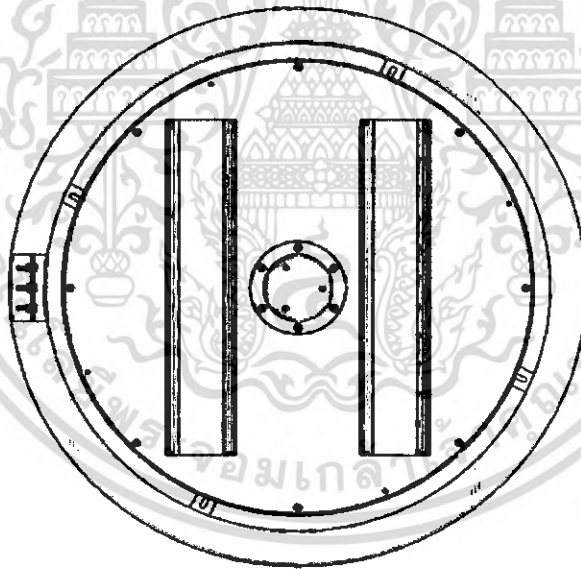


(ค) ภาพตัดขวางขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) ภาพด้านบนผ้าง



(จ) ภาพด้านล่าง

รูปที่ 3.16 ลักษณะตัวถังหม้อแปลงทดสอบที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.12 การออกแบบชุดควบคุม

การออกแบบชุดควบคุมจำเป็นต้องกำหนดฟังก์ชันการทำงานของชุดควบคุมขึ้นมาก่อน แล้วจึงมาคำนวณหาพิกัดต่างๆอุปกรณ์ที่ใช้ในการประกอบชุดควบคุม จากนั้นจึงทำการเขียนแบบทั้งวงจรกำลัง และวงจรควบคุม

3.12.1.กำหนดฟังก์ชันการทำงานของชุดควบคุม

- การ on / off ชุดควบคุม
- การ on / off หม้อแปลงปรับแรงดันสำหรับควบคุมแรงดันป้อนเข้า หม้อแปลงทดสอบ
- การปรับอัตราเพิ่ม / ลดแรงดัน
- การลดแรงดันอัตโนมัติเมื่อหม้อแปลงปรับแรงดันไม่อยู่ที่ตำแหน่งศูนย์
- การหยุดขึ้น / ลงอัตโนมัติเมื่อหม้อแปลงปรับแรงดันหมุนชน limit
- การตัดวงจรเมื่อกดปุ่ม emergency
- การตัดวงจรเมื่อเกิดกระแสเกินจากการเกิด flashover หรือเกิดการ short circuit
- การตัดวงจรเมื่อประจักษ์กับบริเวณทดสอบถูกเปิดออก

3.12.2.การหาค่าพิกัดอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในชุดควบคุม

- *Variac* เนื่องจากหม้อแปลงทดสอบมีพิกัดกำลังที่ 10 kVA จึงจำเป็นต้องใช้ *Variac* ที่มีพิกัดที่มากกว่าหรือเท่ากับพิกัดของหม้อแปลง และเพื่อเป็นการรองรับการใช้งานชุดควบคุมกับหม้อแปลงอื่นที่มีพิกัดสูงกว่า ดังนั้น จึงเลือก *Variac* พิกัดกำลัง 15 kVA พิกัดแรงดัน 0 – 260 V
- *Magnetic Contactor* ตัวของ *Magnetic Contactor* จะทำหน้าที่ตัดต่อวงจรที่ด้านอินพุทของหม้อแปลงซึ่งมีค่ากระแส 45.45 A ดังนั้น จึงเลือก *Magnetic Contactor* พิกัดกระแส 60 A (220V)
- *Relay และหลอดไฟ LED* เนื่องจากทั้งชุดควบคุมจ่ายไฟที่ระดับแรงดัน 220 V ดังนั้น จึงเลือกใช้ *Relay* และหลอดไฟ LED พิกัดแรงดัน 220 V
- *Motor* พิจารณา motor ที่มีความเร็วรอบต่ำ มีแรงบิดสูง ซึ่งจะได้ *Motor AC single phase 100 V 1.5 A*

- *Speed Control Motor* เป็นอุปกรณ์ใช้สำหรับควบคุมความเร็วและทิศทางการหมุนของมอเตอร์ และเนื่องจากมอเตอร์มีพิกัดกำลัง 150W ดังนั้น Speed Control Motor ควรจะมีพิกัดกำลังที่มากกว่าหรือเท่ากับพิกัดกำลังของมอเตอร์ ดังนั้น จึงเลือก Speed Control Motor ที่พิกัดกำลัง 150 W (100V)

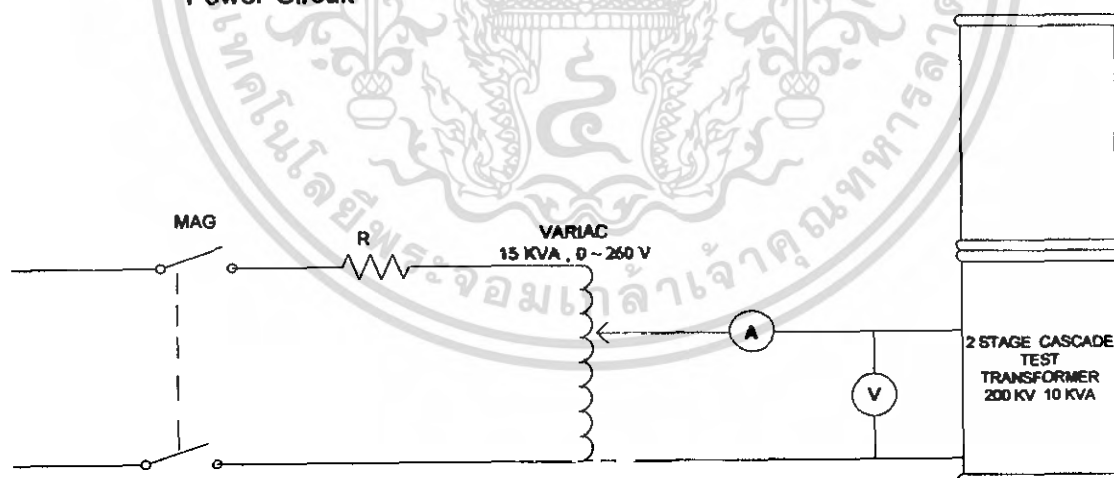
- *Fuse* เป็นอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินที่อาจเกิดขึ้นในวงจร *Fuse* ป้องกันกระแสเกินที่ชุดมอเตอร์ โดยพิจารณากระแสของมอเตอร์ซึ่งเท่ากับ 1.5 A ดังนั้น จึงเลือก *Fuse* ที่พิกัดกระแส 1.5 A

Fuse ป้องกันกระแสเกินของชุดควบคุม โดยพิจารณากระแสของโหลดทั้งหมดในชุดควบคุม (motor + relay + หลอด LED + magnetic contactor) ประมาณ 1.7 A ดังนั้น จึงเลือก *Fuse* ที่พิกัดกระแส 2 A

3.12.3. ออกแบบวงจรชุดควบคุม

จากฟังก์ชันการทำงานของชุดควบคุมที่ถูกกำหนดไว้และค่าพิกัดต่างๆของอุปกรณ์ข้างต้น สามารถนำมาเขียนแบบได้ดังนี้

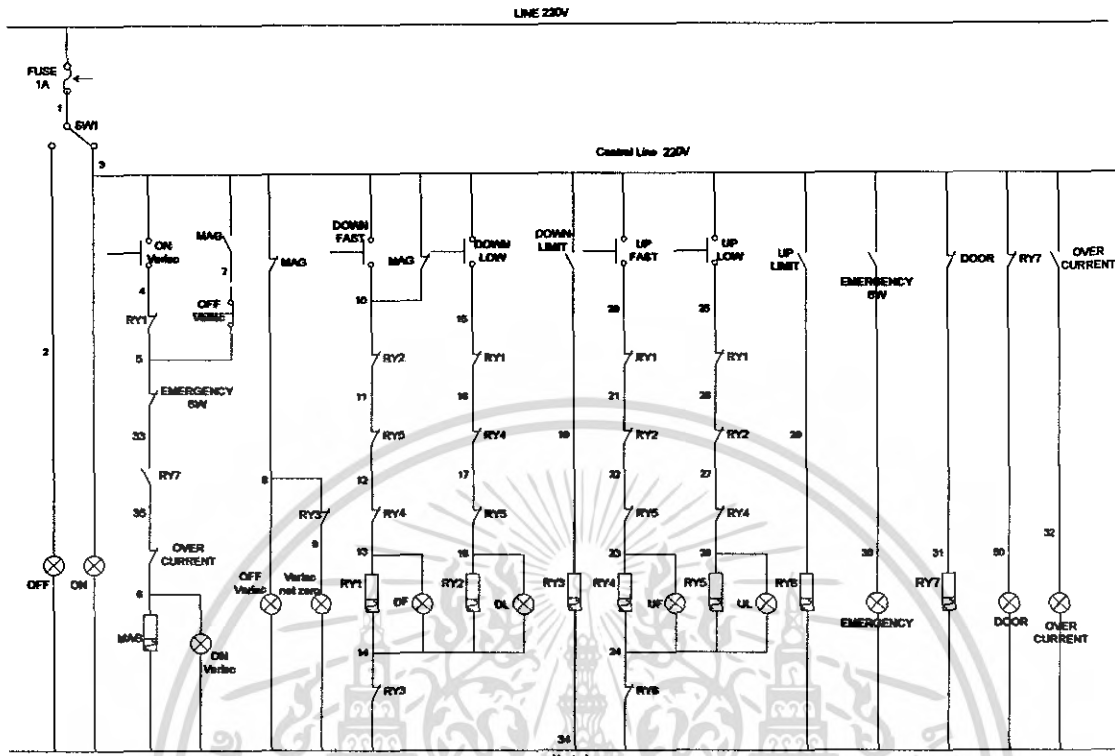
- Power Circuit



รูปที่ 3.17 Power Circuit

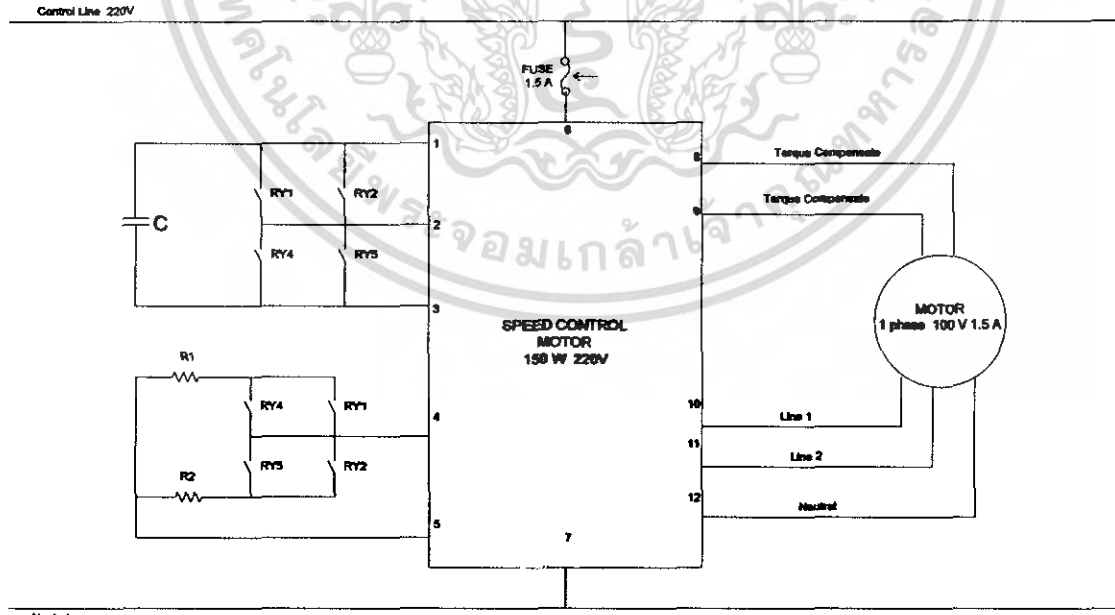
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Control Circuit



รูปที่ 3.18 Control Circuit

- Drive Circuit



- 1, 2, 3 ROTATE RIGHT / LEFT MOTOR
- 4, 5 CONTROL SPEED MOTOR

รูปที่ 3.19 Drive Circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.12.4 จัดทำรายการอุปกรณ์ที่ใช้ในการประกอบชุดควบคุม

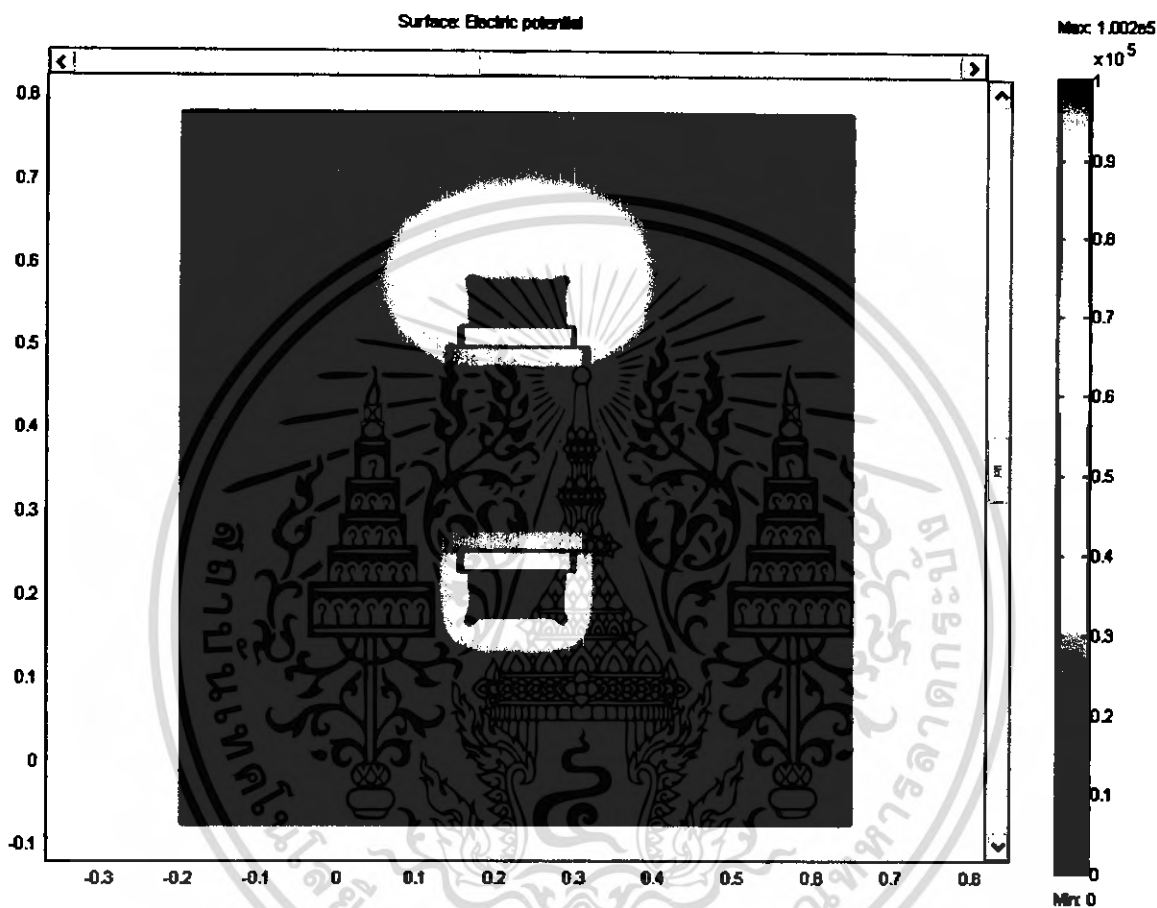
รายการอุปกรณ์ของชุดควบคุม

- หลอดไฟ LED	(220 V)	12 หลอด
- Magnetic Contactor	60 A	1 ตัว
- Relay 4 NO 4 NC	(220V)	4 ตัว
- Relay 2 NO 2 NC	(220V)	8 ตัว
- FUSE	2 A	2 ตัว
- Push Button Switch	(220V)	6 ตัว
- Limit Switch	(220V)	2 ตัว
- Emergency Switch	(220V)	1 ตัว
- CT + Over Current Relay ratio 1:5	(220V)	1 ชุด
- Limit Switch (Door Safety)	(220V)	1 ตัว
- Key Switch	(220V)	1 ตัว
- Panel Voltmeter	0 - 220 V	1 ตัว
- Panel Ammeter	0 - 50 A	1 ตัว
- Speed Control Motor	150W 220V	1 ตัว
- Motor AC	1Ø 100V 1.5A	1 ตัว
- ตู้ Control		1 ชุด
- Variac	15 KVA 0 ~ 260V	1 ตัว
- สายไฟ	เบอร์ 1	4 ขด
- หางปลา		500 ตัว
- สายรัดสายไฟ		3 ถู
- รางใส่สายไฟ (รังผึ้ง)		6 เมตร
- wire marker		16 ถู
- สายไฟกำลัง VCT	เบอร์ 16	7 เมตร
- หม้อแปลงไฟฟ้า	220/100	1 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

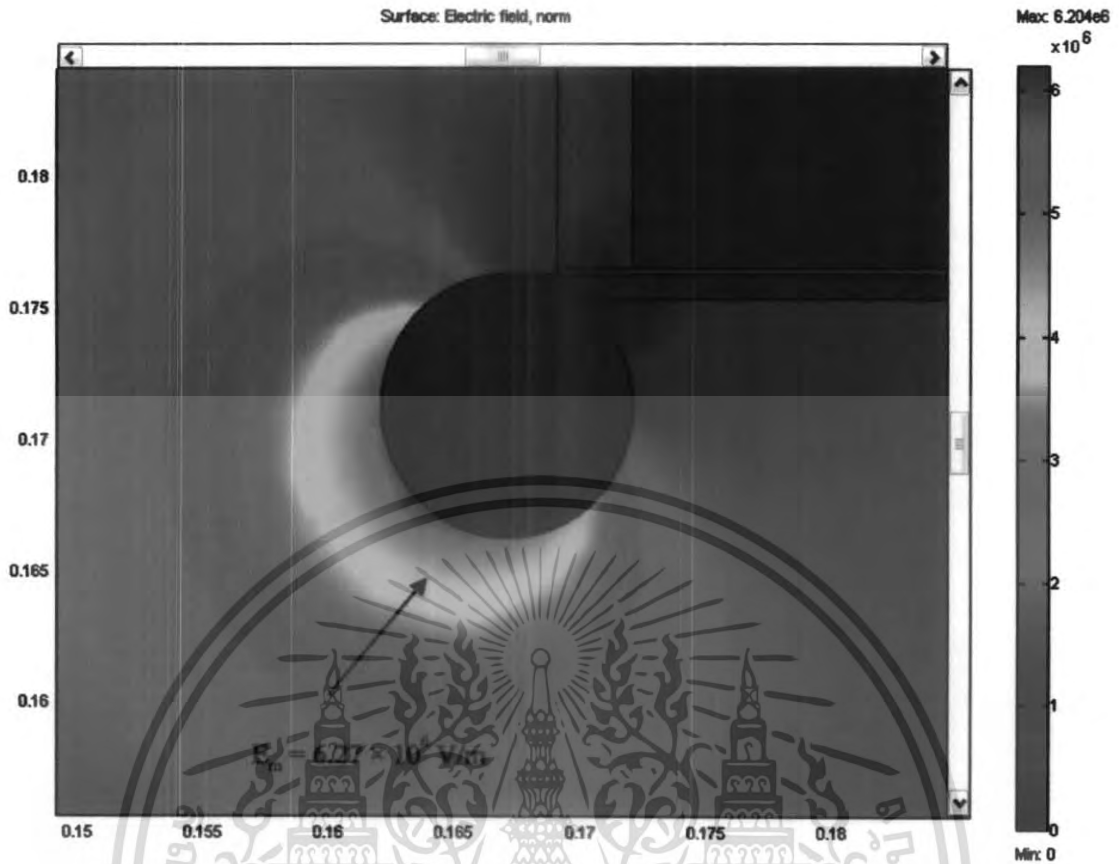
บทที่ 4 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

แรงดันไฟฟ้าบริเวณขั้วแรงสูง 100 kV



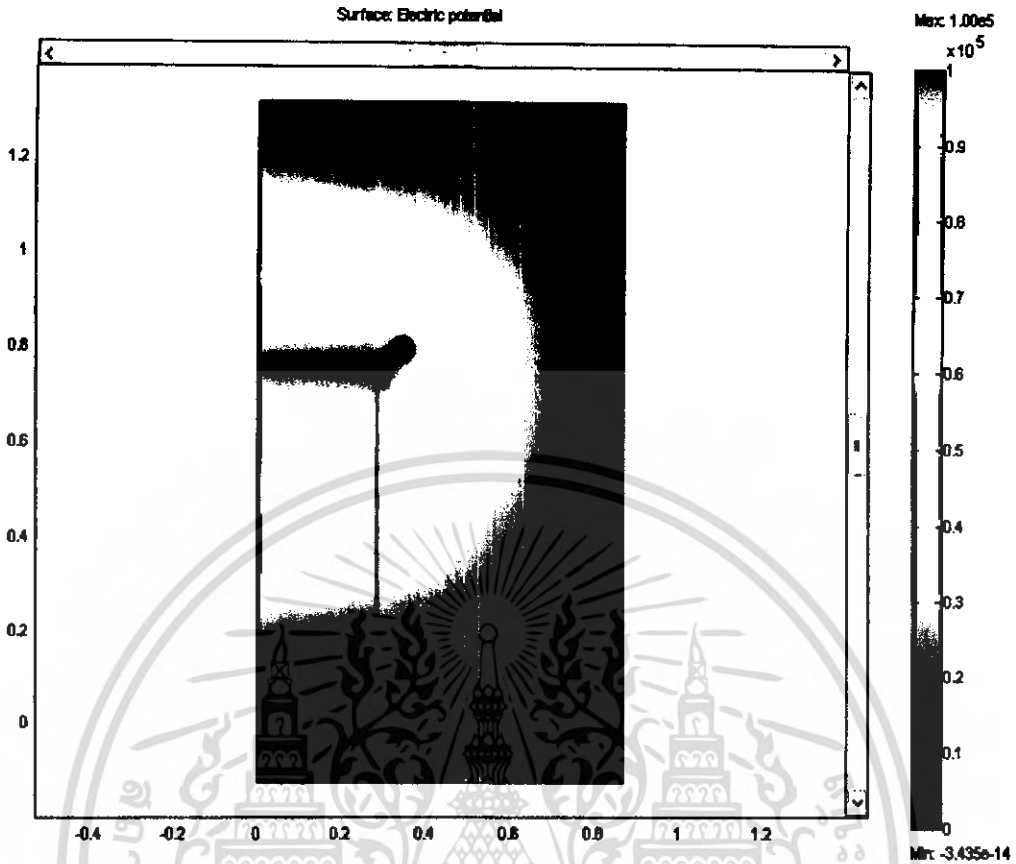
รูปที่ 4.1 การกระจายแรงดันไฟฟ้า (Electric potential) บริเวณภายในหม้อแปลง
ที่แรงดันสูงสุด 100 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field) บริเวณท่อของขีลัดซ์วแรงสูงที่แรงดันสูงสุด 100 kV

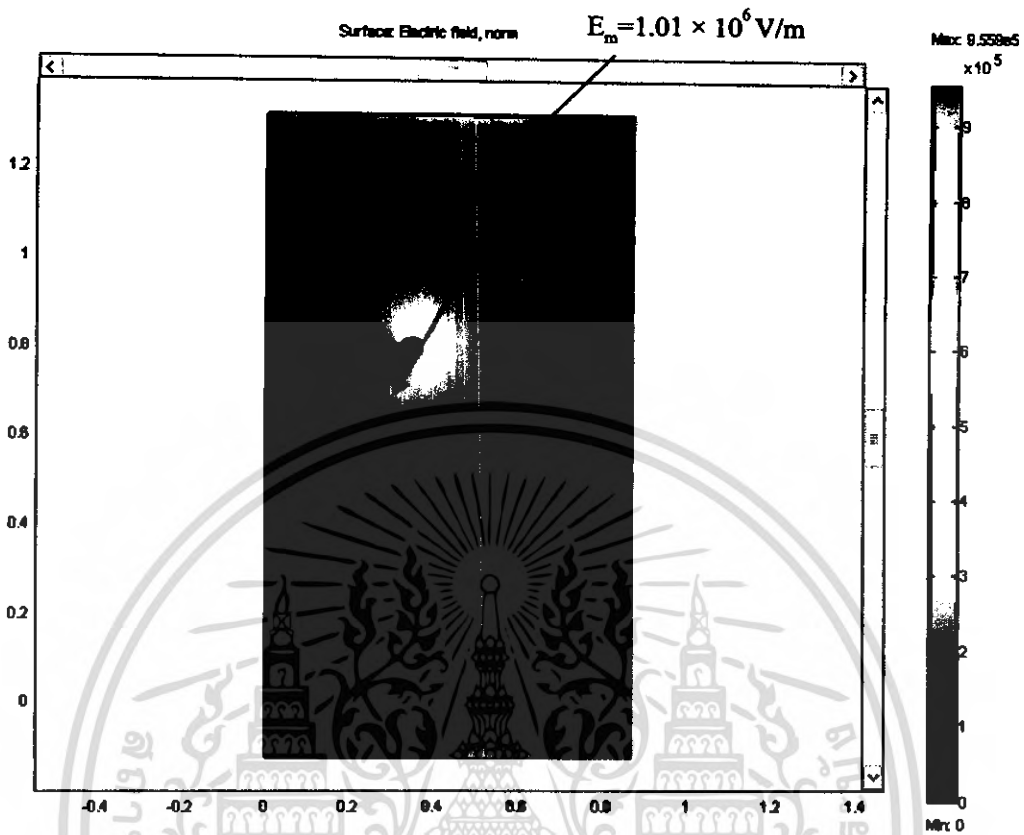
ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด $1.01 \times 10^6 \text{ V/m}$



รูปที่ 4.3 การกระจายแรงดันไฟฟ้า (Electric potential) บริเวณตัวถังหม้อแปลง
ที่แรงดันสูงสุด 100 kV

Relative permittivity ของอลูมิเนียม (ϵ_r)	1	
Relative permittivity ของ PVC (ϵ_r)	4.3	
Conductivity ของฝาอิเล็กทรอนิกส์ (σ)	3.774×10^7	S/m
แรงดันไฟฟ้าบริเวณขั้วอิเล็กทรอนิกส์	100	kV

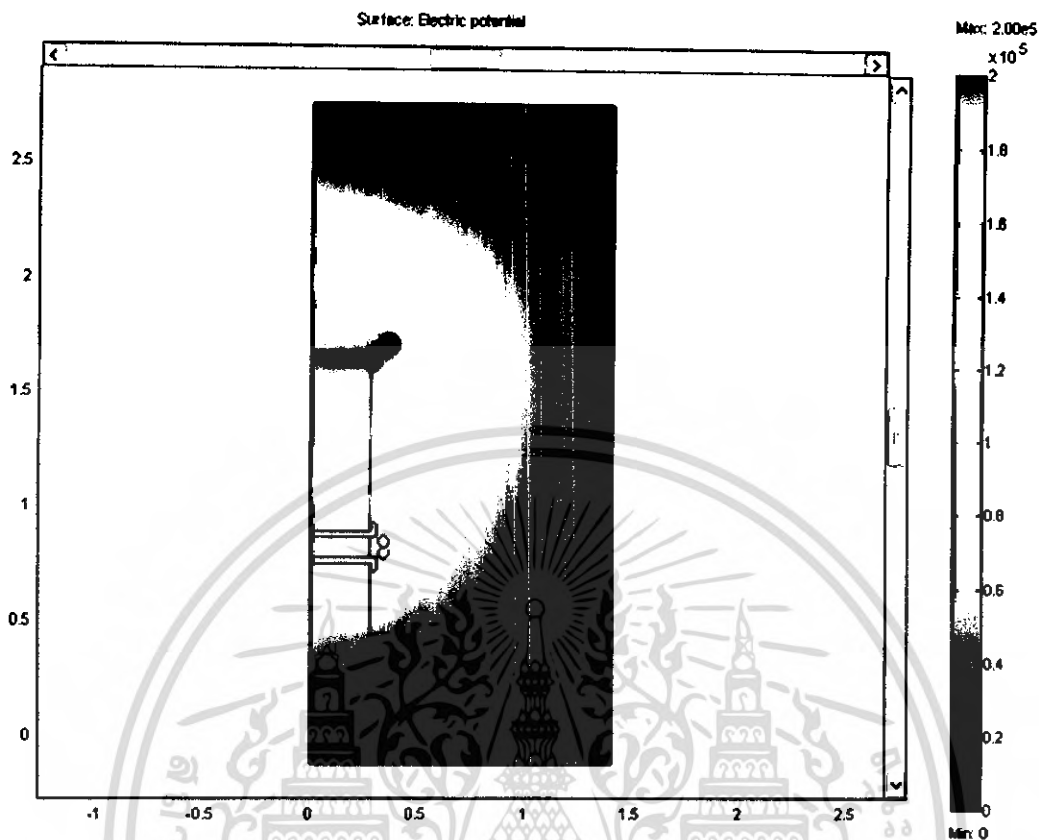
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field) ของบริเวณตัวถังหม้อแปลง
ที่แรงดันสูงสุด 100 kV

Relative permittivity ของอลูมิเนียม (ϵ_r)	1	
Relative permittivity ของ PVC (ϵ_r)	4.3	
Conductivity ของฝาอิเล็กทรอนิกส์ (σ)	3.774×10^7	S/m
ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด	1.01×10^6	V/m

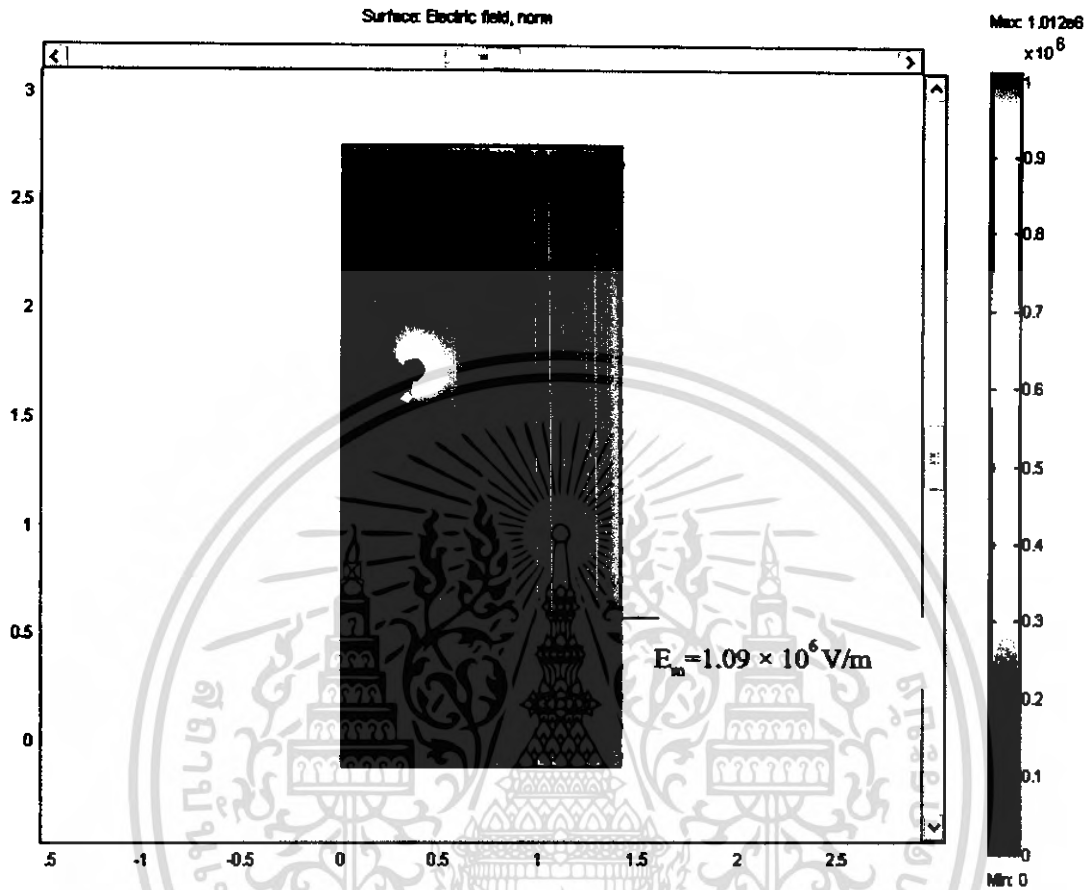
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 การกระจายแรงดันไฟฟ้า (Electric potential) บริเวณตัวถังหม้อแปลง
ที่แรงดันสูงสุด 200 kV

Relative permittivity ของอลูมิเนียม (ϵ_r)	1	
Relative permittivity ของ PVC	4.3	
Conductivity ของฝาอิเล็กทรอนิกส์ (σ)	3.774×10^7	S/m
แรงดันไฟฟ้าบริเวณขั้วอิเล็กทรอนิกส์ตัวบน	200	kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field) บริเวณตัวถังหม้อแปลง
ที่แรงดันสูงสุด 200 kV

Relative permittivity ของอลูมิเนียม(ϵ_r)	1
Relative permittivity ของ PVC(ϵ_r)	4.3
Conductivity ของฝาอิเล็กทรอนิกส์ (σ)	3.774×10^7 S/m
ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด	1.09×10^6 V/m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 การประกอบสร้างชิ้นงาน

5.1 แกนเหล็ก

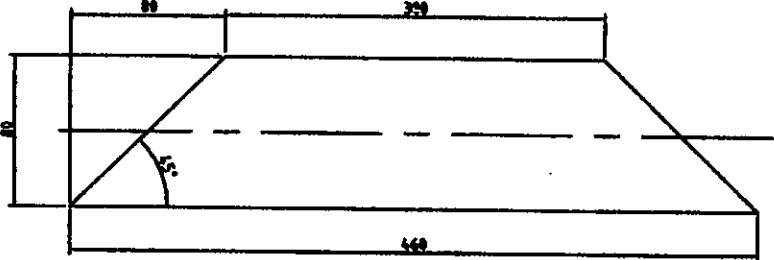
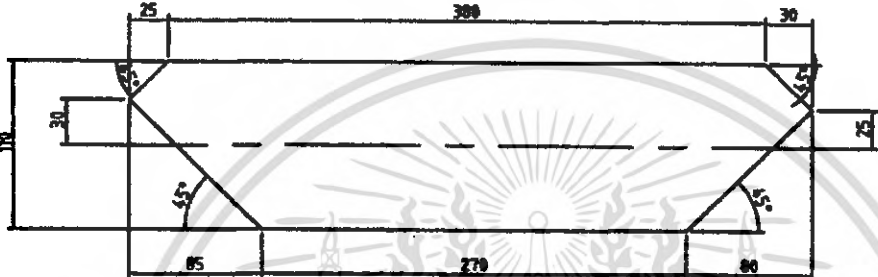

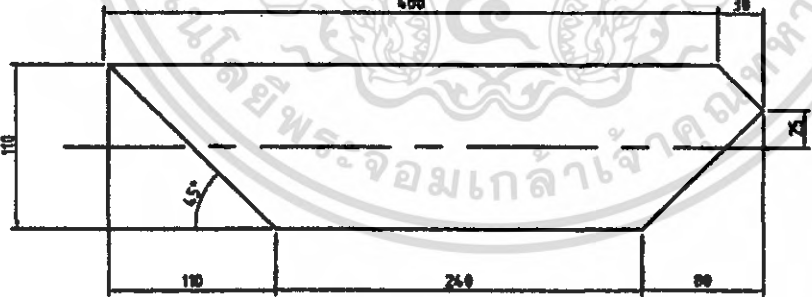
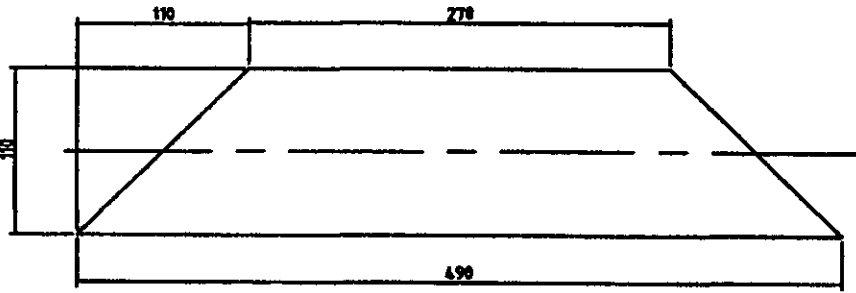
5.1.1 การตัดเหล็ก

ทำการตัดเหล็ก M-4 หน้า 0.27 mm. ให้ได้ขนาดและรูปร่างตามแบบด้านล่าง โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชุด คือ ชุดหน้าตัดกว้าง 80 mm. และชุดหน้าตัดกว้าง 110 mm.

ตารางที่ 5.1 จำนวนแผ่นเหล็กชนิดคอนตามขนาดและรูปร่าง

ขนาดและรูปร่างของการตัดแผ่นเหล็ก	จำนวน(แผ่น)
	108
	108
	108

ตารางที่ 5.2 จำนวนแผ่นเหล็กชนิดคอนตามขนาดและรูปร่าง(ต่อ)

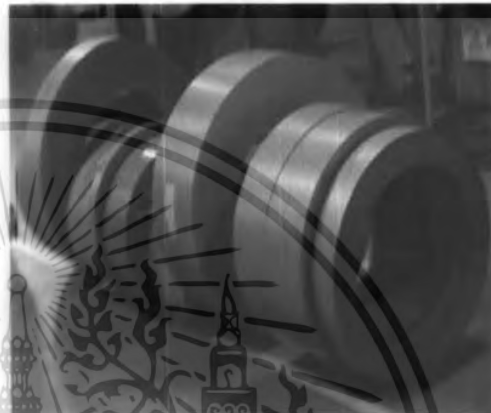
ขนาดและรูปร่างของการตัดแผ่นเหล็ก	จำนวน (แผ่น)
	108
	314
	314
	314
	314

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในการตัดเหล็กนั้นจะใช้เครื่องตัดเหล็กอัตโนมัติดังรูปที่ 5.1 ทำการตัดเหล็กม้วน M-4 หนา 0.27 mm. ดังรูปที่ 5.2 ให้เป็นเหล็กแผ่นที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูดัง รูปที่ 5.3



รูปที่ 5.1 เครื่องที่ใช้ในการตัดเหล็ก



รูปที่ 5.2 เหล็กม้วน M-4 หนา 0.27 mm.



รูปที่ 5.3 เหล็กแผ่นที่ตัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการตัดเหลี่ยมมุมของแผ่นเหล็กสี่เหลี่ยมคางหมูให้มีรูปร่างดั่งแบบ โดยใช้เครื่องตัดเหล็กเครื่องเดิมแต่ปรับโปรแกรมให้เป็นการตัดแบบ manual แล้วทำการตัดด้วยมือที่ละแผ่นดังแสดงในรูปที่ 5.4

แผ่นเหล็กที่ทำการตัดเสร็จแล้วจะมีลักษณะดังรูปที่ 5.5 ซึ่งจะนำมาวัดขนาดเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง จากนั้นจึงนำแผ่นเหล็กที่ตัดเสร็จแล้วไปเรียง ซึ่งเป็นขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 5.4 การตัดแผ่นเหล็กด้วยมือ

รูปที่ 5.5 การนำแกนเหล็กมาวัดขนาด เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 การเรียงเหล็ก

เตรียมแคลมป์และสตั๊ดสำหรับบีบแกนเหล็กแล้วนำกระดาษฉนวนมารองบนแคลมป์ทั้ง 2 ข้างก่อนทำการเรียงเหล็กดังรูปที่ 5.6 จากนั้นนำแผ่นเหล็กที่ทำการตัดเสร็จแล้วมาเรียงกันตามแบบการเรียงเหล็ก ซึ่งสามารถแสดงวิธีการเรียงได้ดังรูปที่ 5.7 – 5.8



รูปที่ 5.6 การวางแคลมป์ก่อนทำการเรียงแกนเหล็ก



รูปที่ 5.7 การเรียงแกนเหล็ก หน้าตัด 110 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 การเรียงแกนเหล็ก หน้าตัด 80 mm

จากรูปที่ 5.7 เป็นการเรียงแกนเหล็กของแผ่นเหล็กที่มีหน้าตัดใหญ่(กว้าง 110 mm.)โดยเรียงซ้อนกันทีละ 2 แผ่น เรียงจนครบชั้นจากนั้นขึ้นชั้นใหม่โดยทำการกลับด้านแผ่นเหล็กชั้นแรก (สีดำ) และแผ่นสีเขียวกับสีชมพูวางสลับข้างกัน เหตุที่这么做เช่นนี้เพื่อให้เกิดการเสียดกันของแกนเหล็กซึ่งจะทำให้แกนเหล็กยึดติดกันแน่นมากขึ้นเมื่อนำแคลมป์มาบีบ ส่วนรูปที่ 5.8 เป็นการเรียงเหล็กของแผ่นเหล็กที่มีหน้าตัดเล็ก(กว้าง 80 mm.) ซึ่งวางซ้อนทับทั้งด้านบนและด้านล่างของแกนเหล็กหน้าใหญ่ซึ่งมีวิธีการเรียงเหมือนกับการเรียงเหล็กหน้าตัดใหญ่



รูปที่ 5.9 การเรียงแกนเหล็กจริง



รูปที่ 5.10 การเสียดกันของแกนเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 การวัดความหนาของแกนเหล็ก



รูปที่ 5.12 แกนเหล็กที่เรียงเสร็จ
เรียบร้อยแล้ว

จากรูปที่ 5.9 เป็นการเรียงเหล็กตามวิธีข้างต้น ซึ่งจะเกิดการเสียดกันของเหล็กดังรูปที่ 5.10 และจะต้องทำการวัดความหนาของแกนเหล็กไปด้วยระหว่างที่ทำการเรียง เพื่อให้ได้ความหนาตามที่แบบกำหนดดังรูปที่ 5.11 เมื่อเสร็จแล้วจะได้แกนเหล็กดังรูปที่ 5.12 จากนั้นจึงนำแคลมป์มาบีบแกนเหล็กเพื่อไม่ให้แผ่นเหล็กหลุดออกจากกันดังรูปที่ 5.13



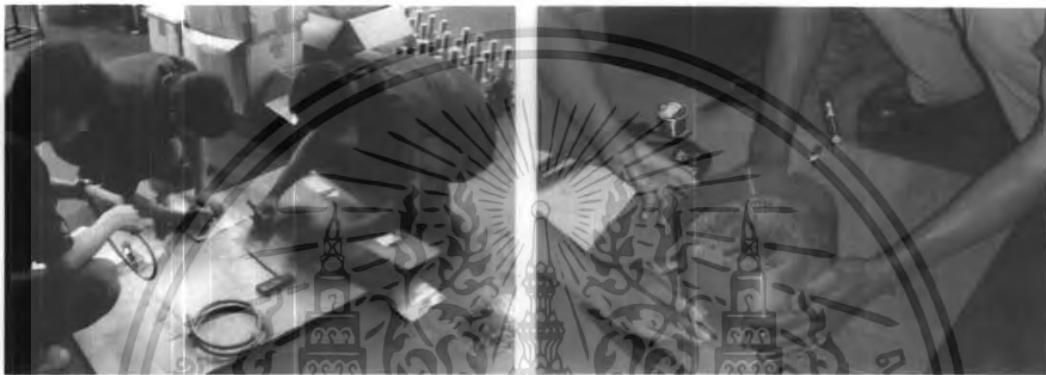
รูปที่ 5.13 การนำแคลมป์มาหนีบแกนเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การประกอบสร้างซิลด์

5.2.1 ซิลด์ชั่วคราว

นำแผ่นทองแดงหนา 0.3 mm. มาตัดให้มีความกว้าง 220 mm. ยาว 680 mm. ดังรูปที่ 5.14 จากนั้นนำมาหมุนเข้ากับ mandrel ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 285 mm. ดังรูปที่ 5.15 แล้วจึงนำท่อทองแดงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm. มาเชื่อมต่อกับด้านข้างของแผ่นทองแดง ทั้งสองด้านดังรูปที่ 5.16 โดยปลายทั้งสองด้านของแผ่นทองแดงและท่อทองแดงต้องไม่ชนกัน จะได้ซิลด์ชั่วคราวดังรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.14 การตัดแผ่นทองแดงเพื่อนำไปทำ shield รูปที่ 5.15 การทำตัว shield ชั่วคราว

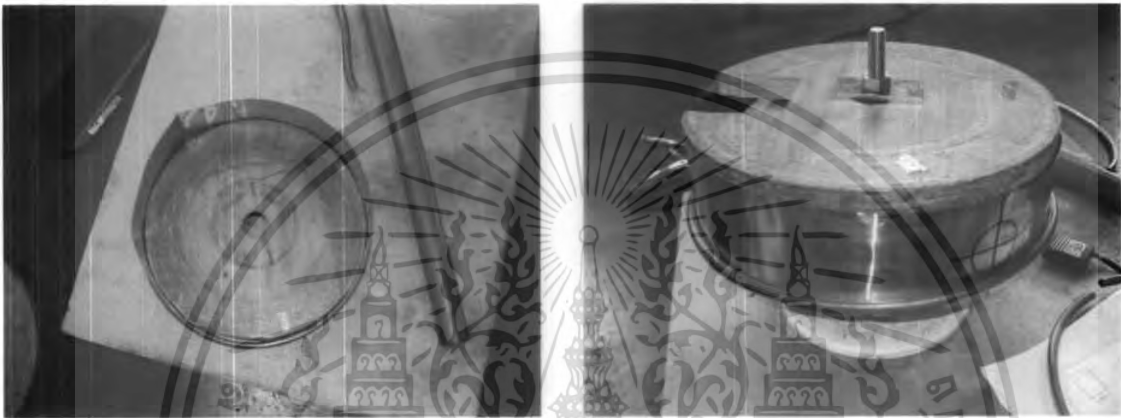


รูปที่ 5.16 การเชื่อมตัว shield กับ ring รูปที่ 5.17 shield ชั่วคราวที่เสร็จแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 ซิลด์ซั้วแรงสูง

นำแผ่นทองแดงหนา 0.3 mm. มาตัดให้มีความกว้าง 115 mm. ยาว 1340mm. จากนั้นนำมาหมุนเข้ากับ mandrel ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 418 mm. ดังรูปที่ 5.18 แล้วจึงนำท่อทองแดงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm. มาเชื่อมต่อกับด้านข้างของแผ่นทองแดงทั้งสองด้าน เหมือนกับซิลด์ซั้วนิวตรัล ดังรูปที่ 5.19 แต่จะเจาะรูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm. ตรงกลางแผ่นทองแดง แล้วนำท่อทองแดงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันมาเชื่อมให้มีลักษณะดังรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.18 การทำตัว shield แรงสูง

รูปที่ 5.19 การเชื่อมตัว shield กับ ring



รูปที่ 5.20 การเชื่อมตัว shield แรงสูง กับ ท่อนำสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การพันขดลวดแรงต่ำ

เตรียมกระดาษฉนวนที่กำหนดไว้ในแบบซึ่งประกอบด้วย kraft paper, creeped paper, press board และ collugate ดังรูปที่ 5.21 และเตรียม mandrel ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับขนาด 143 mm. ส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางในด้านตรงกันข้ามจะให้มีขนาดเท่ากับ 144 mm. เนื่องจากเพื่อความสะดวกในการนำขดลวดออกจาก mandrel แสดงดังรูปที่ 5.22 ก่อนทำการพันชั้นแรกจะมีการหักสายลวดให้มีลักษณะตั้งฉากเพื่อนำต้นสายต่อด้านล่างของหม้อแปลง บริเวณที่มีการหักสายนี้จะมีการพันกระดาษย่น (creeped paper) เพื่อให้เกิดความยืดหยุ่น และเป็นการเพิ่มฉนวนบริเวณนั้นเนื่องจากอาจมีกระดาษฉนวนของลวดตัวนำขาดจากการหักสาย แสดงได้ดังรูปที่ 5.23



รูปที่ 5.21 กระดาษฉนวน

รูปที่ 5.22 mandrel ของขดลวดแรงต่ำ



รูปที่ 5.23 การหักสายลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการพันลวดตามแบบโดยเริ่มจากใช้กระดาษ press board หนา 3mm. (Inside cylinder) พันรอบ mandrel เป็นทรงกระบอก 1 ชั้น แล้วเริ่มด้วยการพัน end insulation ซึ่งมีความหนา 1 mm. จำนวน 3 ชั้น ดังรูปที่ 5.24 จากนั้นพันขดลวดชั้นที่ 1 จำนวน 21 รอบ โดยเหลื่อมกันสายไว้ 1 m. แล้วปิดขอบด้วย end insulation อีกครั้งหนึ่งดังรูปที่ 5.25 จากนั้นพันกระดาษฉนวนหนา 0.08 mm. (Layer insulation) จำนวน 3 ชั้น แล้วจึงเริ่มพันชั้นที่ 2 ดังรูปที่ 5.26 ซึ่งชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 จะทำการพันเช่นเดียวกับชั้นที่ 1 โดยมี เป็นฉนวนกั้นระหว่าง layers เมื่อพันขดลวดและกระดาษฉนวนจนครบ 3 ชั้นแล้วจึงปิดด้วยกระดาษอัดหนา 1 mm. (Outside cylinder) จำนวน 1 ชั้น แล้วหักสายลวดออกมาดังรูปที่ 5.27 จากนั้นใช้กระดาษ collugate มีความหนา 3 mm. เพื่อใช้เป็นร่องน้ำมันระบายความร้อนดังรูปที่ 5.28 แล้วจึงปิดด้วยกระดาษ press board หนา 1 mm. (Outside cylinder) โดยเหลื่อมปลายสายไว้ 1.2 m. จะได้ขดลวดแรงต่ำดังรูปที่ 5.29



รูปที่ 5.24 แกนกลางของขดลวดแรงต่ำ

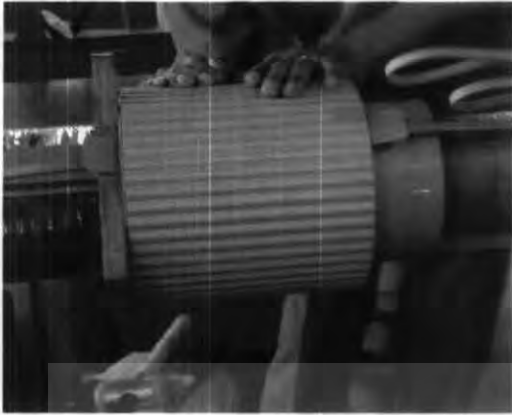
รูปที่ 5.25 การพันขดลวดแรงต่ำ



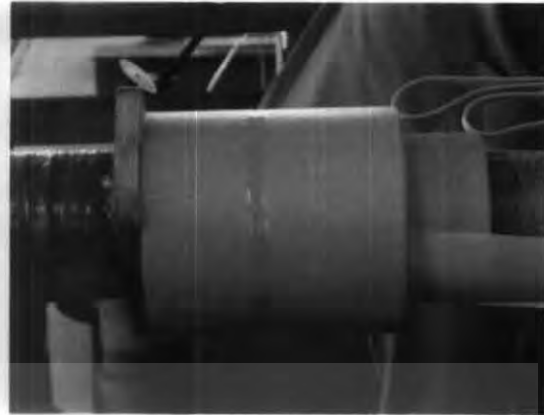
รูปที่ 5.26 การพันกระดาษฉนวน

รูปที่ 5.27 การหักสายลวดออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.28 การพันกระดาษร่อนน้ำมัน

รูปที่ 5.29 ขดลวดแรงต่ำที่พันเสร็จ
เรียบร้อยแล้ว

5.4 การพันขดลวดแรงสูง

การพันขดลวดแรงสูงจะเริ่มพันจากใส่ shield แรงต่ำ ดังรูปที่ 5.30 โดยใช้กระดาษฉนวน inside cylinder (press board) มาหุ้ม shield ก่อน 1 ชั้นเพื่อเป็นฉนวนดังรูปที่ 5.31 และพันกระดาษจนกว่าจะเสมอกับท่อทองแดงดังรูปที่ 5.31 โดยใส่ end insulation ที่สองข้างของท่อทองแดงด้วย เป็นแกนของขดลวดแรงสูง หลังจากนั้นจะใช้ layer insulation พันทับ จากนั้นเริ่มพันลวดโดยช่วงแรกจะนำผ้ามาพันรอบขดลวดเพื่อรับแรงดึงที่ขดลวดได้รับ ดังรูปที่ 5.32 – 5.33 โดยแต่ละชั้นจะมีการพันกระดาษฉนวน end insulation หนา 0.5 mm. ก่อนและหลังการพันในแต่ละชั้นดังรูปที่ 5.34

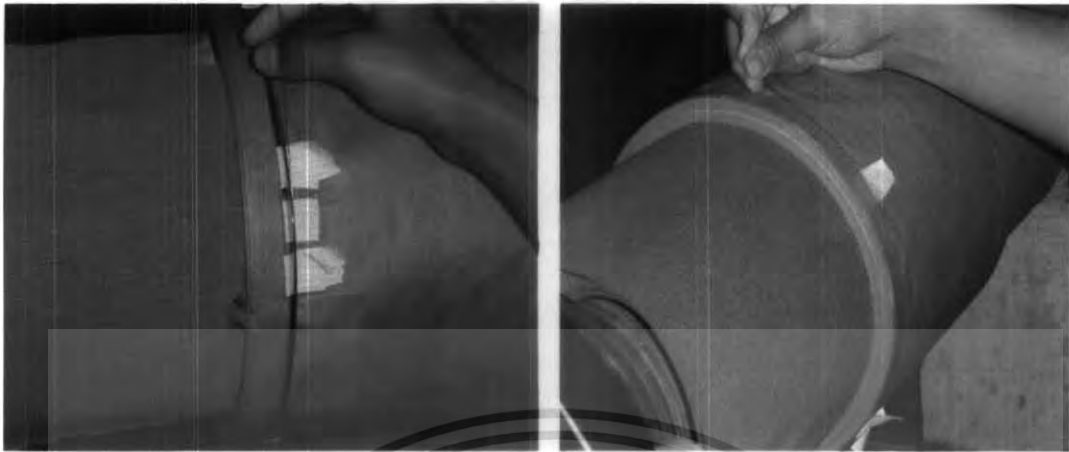


รูปที่ 5.30 แกนกลางของขดลวดแรงสูง



รูปที่ 5.31 เตรียมพันขดลวดแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.32 เริ่มพันขดลวดแรงสูง

รูปที่ 5.33 เริ่มพันขดลวดแรงสูงชั้นที่ 2



รูปที่ 5.34 การพันกระดาษ end insulation

รูปที่ 5.35 การพันขดลวดแรงสูง

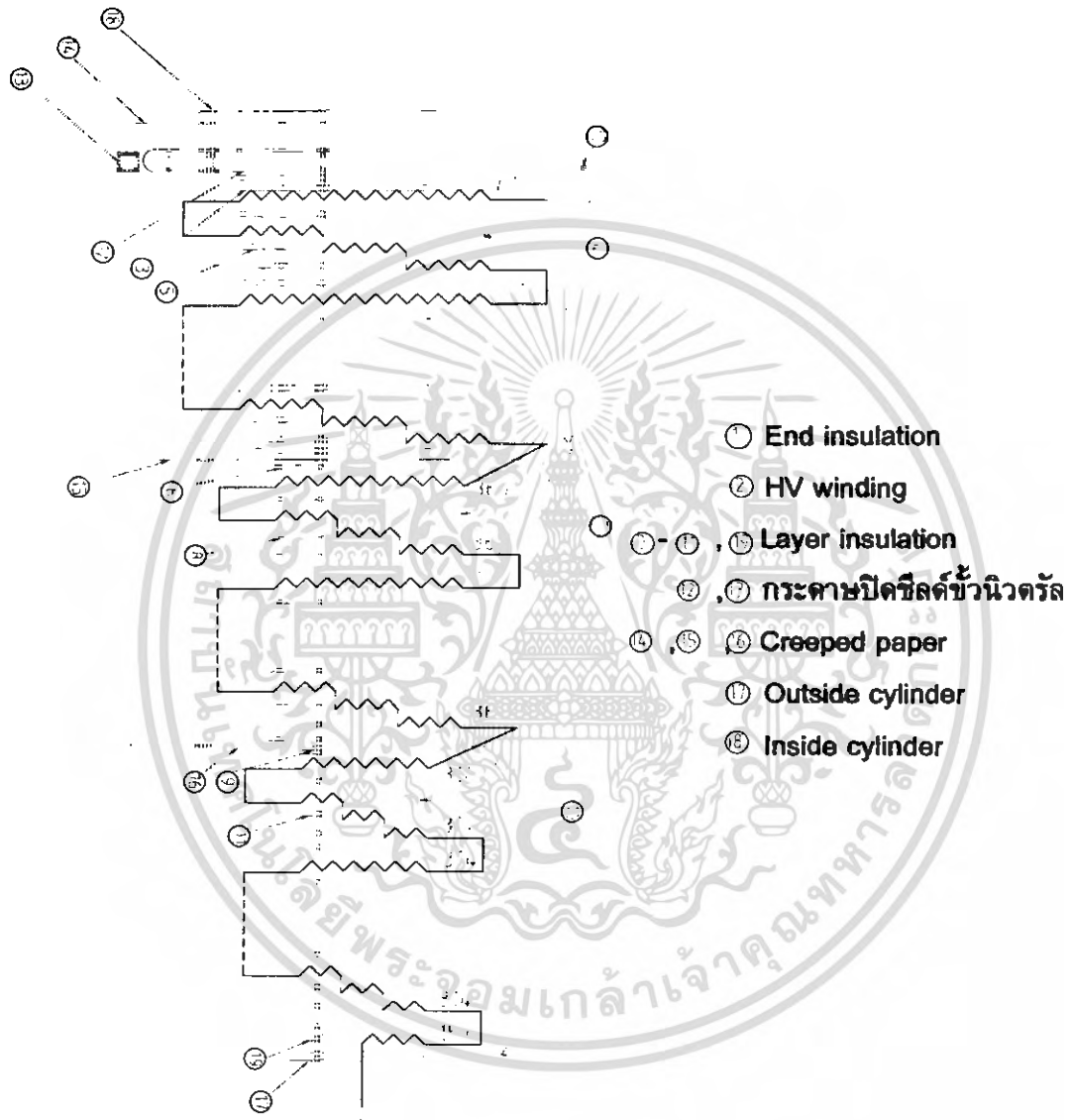
ทำการพันขดลวดแรงสูงไปอย่างช้าๆ เพราะขนาดลวดมีขนาดเล็กต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ การพันขดลวดแรงสูงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขดลวดแรงสูงนั้นจะถูกแบ่งเป็น 3 blog โดย blogแรกจะมีชั้นที่ 1-30 จะมีความกว้างของ layer insulation อยู่ 3 หน้า คือ 70,140,240 mm. และใช้ขดลวดพัน 415 รอบ/layer blogที่ 2 ชั้นที่ 31-56 จะมีความกว้างของlayer insulation อยู่ 3 หน้า คือ 187,125,63 mm.และใช้ขดลวดพัน 365 รอบ/layer blog ที่ 3 ชั้นที่ 57-79 จะมีความกว้างของlayer insulation อยู่ 3 หน้า คือ 166,111,56 mm. และใช้ขดลวดพัน 314 รอบ/layer โดยลักษณะการใช้ layer insulation 3 หน้า นั้น ในทางปฏิบัติจะใช้กระดาษฉนวนทั้ง 3 หน้ามาติดกันไว้ก่อน แล้วจึงนำมาพันครั้งเดียวเลย หลังจากนั้นจึงเริ่มพันขดลวดแรงสูง โดยระหว่าง layer ก็จะถูกพันด้วย layer insulation 3 หน้า และ ระหว่าง blog จะถูกพันด้วย cover 5 ชั้น เพื่อไปหุ้มภายหลังเป็นการฉนวนและการพันขดลวดชั้นสุดท้าย จะพันแค่ครึ่งหนึ่งเพื่อให้ขดลวดแรงสูงไปจบตรงกลางพอดีทำให้สามารถลากสายไปใช้ได้เลยดังรูปที่ 5.36



รูปที่ 5.36 ขดลวดแรงสูงที่พันเสร็จเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 5.37 แบบการพันขดลวดแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 การพันขดลวดต่อควบ

ขดลวดต่อควบจะพันต่อจากขดลวดแรงสูง ลักษณะการพันขดลวดต่อควบเราจะพันที่ละข้างให้เสร็จก่อนแล้วค่อยมาพันอีกข้างหนึ่ง ก่อนเริ่มพันขดลวดต่อควบเราจะใช้กระดาษ layer insulation พัน 2 รอบ ตามด้วย cover และ inside cylinder อย่างละ 1 ชั้น ก่อนพันจะทำการหักต้นสายขึ้นด้านบนแล้วพันกระดาษ creped paper บริเวณที่ทำการหักสาย จากนั้นจะเริ่มพันขดลวดต่อควบโดยจะพันจากด้านในออกมาด้านนอกโดยจะพันขดลวด 4 รอบ แล้วพันฉนวนทับ 2 รอบ จำนวน 4 ชั้นทั้ง 2 ข้าง เมื่อพันเสร็จจะทำการพันผ้า 2 รอบเพื่อรัดขดลวดให้อยู่ติดกันดังรูปที่ 5.38, 5.39 , 5.40 ,5.41



รูปที่ 5.38 การหักสายขดลวดต่อควบ

รูปที่ 5.39 ทำการพันขดลวดต่อควบ

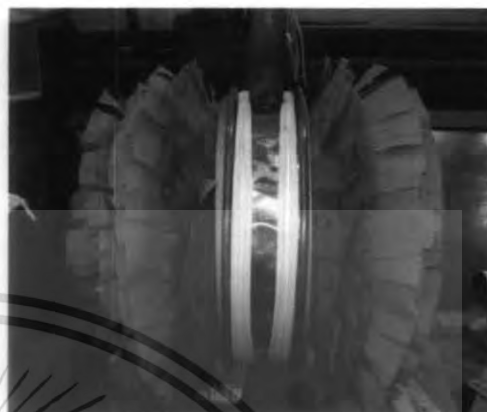


รูปที่ 5.40 ขดลวดต่อควบที่พันเสร็จ
เรียบร้อยแล้ว

รูปที่ 5.41 การพันผ้ารัดขดลวดให้แน่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นจะใส่ shield แรงสูงแล้วทำการตัดกระดาษcover ให้เป็นริ้วเพื่อนำมาหุ้ม shield แรงสูงจากนั้นก็ใช้ผ้ามาพันทับอีกทีเพื่อให้แน่นขึ้นดังรูปที่ 5.42, 5.43 , 5.44



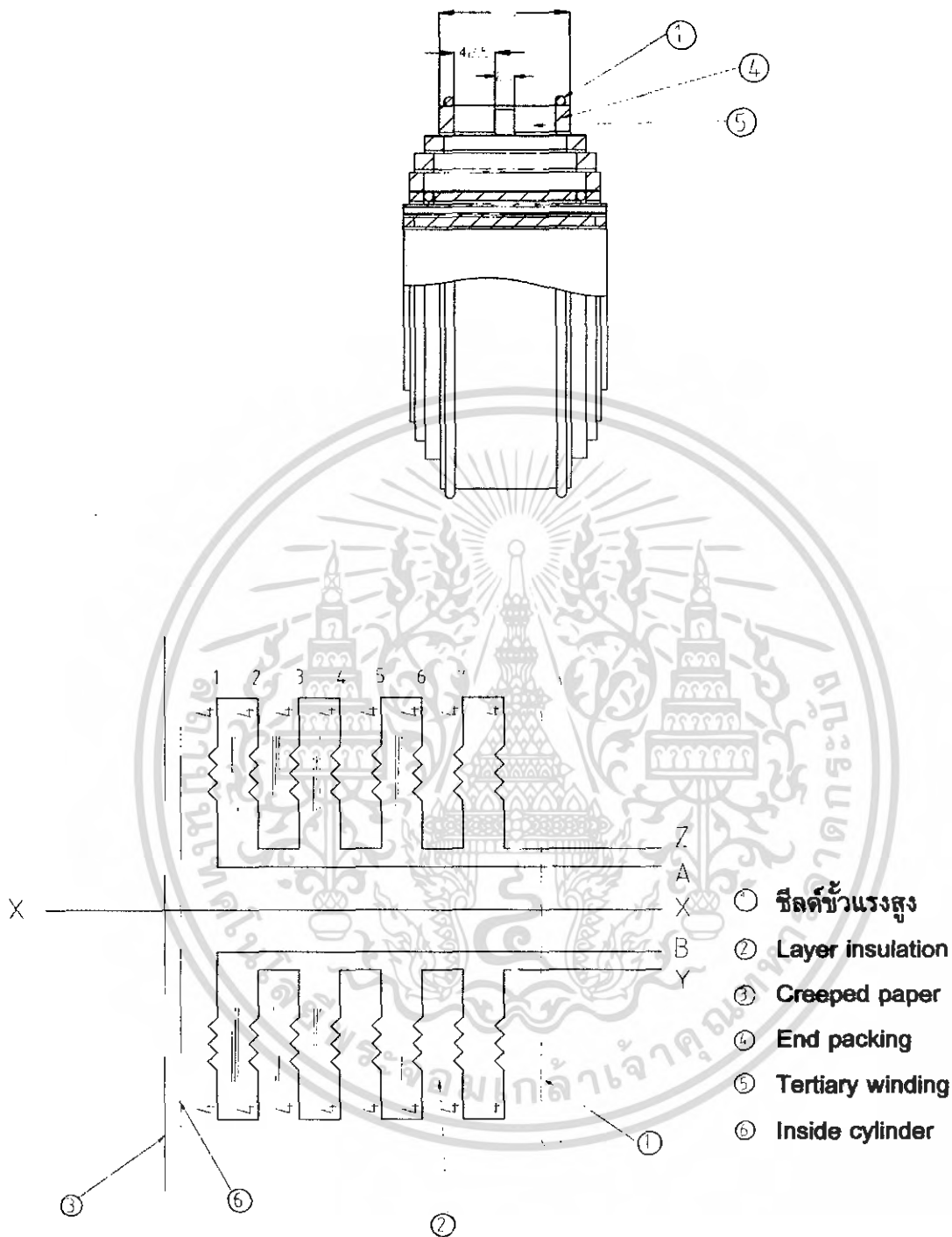
รูปที่ 5.42 การตัดกระดาษเพื่อนำมาหุ้ม shield

รูปที่ 5.43 การหุ้ม shield



รูปที่ 5.44 ขดลวดที่หุ้มเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.45 แบบการพันขดลวดต่อควม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6 การสวมขดลวดลงแกนเหล็ก

วางแกนเหล็กในแนวนอนแล้วถอดแคลมป์ออกด้านหนึ่ง โดยใช้ C - clamp ยึดด้านหัวท้ายของแกนเหล็กเพื่อไม่ให้แกนเหล็กหลุดออกจากกันจากนั้นถอดแกนเหล็กด้านที่ หงายขึ้นออกทีละ 2 แผ่น แล้วสวมขดลวดแรงต่ำก่อนจากนั้นสวมขดลวดแรงสูงทับ หันปลาย ไปด้านบนของแกนเหล็กแล้วนำแผ่นเหล็กที่ถอดออกเสียบเข้าที่เดิมดังรูปที่ 5.46 จะได้แกน เหล็กที่ลงขดลวดเรียบร้อยแล้วดังรูปที่ 5.47



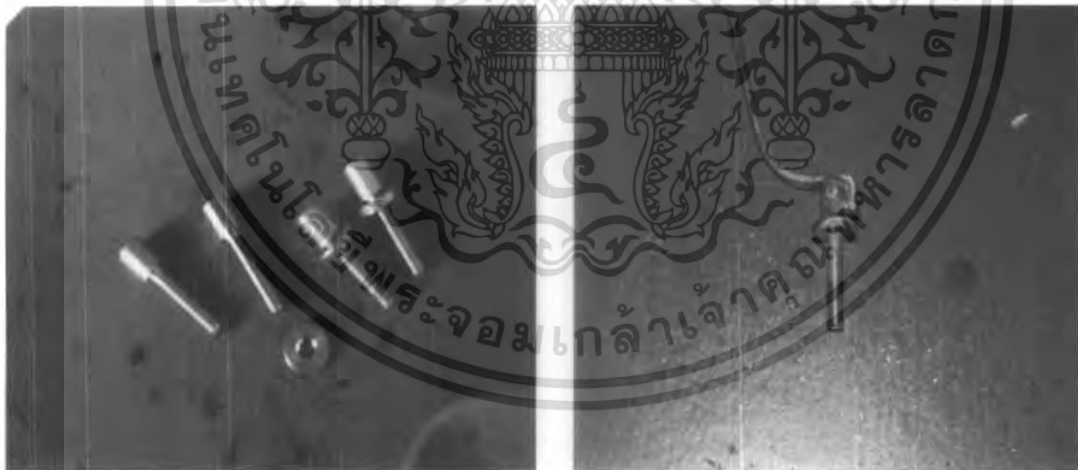
รูปที่ 5.46 การสวมขดลวดลงแกน

รูปที่ 5.47 แกนเหล็กที่ลงขดลวดเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

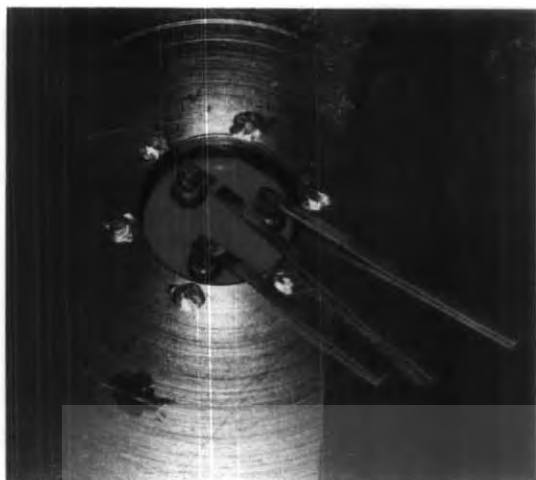
5.7 การต่อขั้วสาย

ขั้วสายทั้งหมดจะใช้ชนิดทองเหลืองดังรูปที่ 5.48 โดยชนิดทองเหลืองจะทำการเชื่อมกับลวดทองแดงก่อนดังรูปที่ 5.49 นี้จะยึดอยู่กับแผ่นแบกกะไลต์ ที่ตัดเป็นวงกลมยึดอยู่ติดกับฝาถังดังรูปที่ 5.50 ฝาด้านล่างจะประกอบด้วยขั้วต่อสายทั้งหมด 3 ขั้ว คือ ปลายสายของขดลวดแรงต่ำ 2 เส้น และสายกราวด์อีก 1 เส้น ส่วนด้านบนจะประกอบด้วยปลายสายแรงสูง 1 เส้น และปลายสายของขดลวดต่อควบทั้ง 2 ขด อีก 4 เส้น โดยในขั้นตอนแรกเราจะทำการติดขั้วต่อสายกับฝาด้านล่างก่อน แล้วจึงทำการนำไส้หม้อแปลงมายึดติดกับฝาด้านล่างโดยการขันน็อตดังรูปที่ 5.51 แล้วจึงทำการต่อสายกราวด์ทั้งหมดมาไว้ที่จุดเดียวกัน แล้วจึงทำการเชื่อมปลายขดลวดทางบนให้ติดกับขั้วต่อสายดังรูปที่ 5.52 - 5.53 ซึ่งในการเชื่อมสายแรงสูงต้องระมัดระวังเป็นพิเศษเนื่องจากลวดมีขนาดเล็กมาก และเราใช้ไฟจากแก๊สซึ่งมีอุณหภูมิสูงมากทำให้สายแรงสูงขาดได้ง่าย ดังนั้นจึงควรให้ผู้ที่มีชำนาญทำการเชื่อม โดยเทคนิคที่ใช้ในการเชื่อมเราจะใช้สาลีชุบน้ำจำนวนมากพันรอบๆเส้นลวดที่จะทำการเชื่อมเพื่อเป็นการลดอุณหภูมิของเส้นลวดแล้วทำการทดลองนำแผ่นแบกกะไลต์มาใส่หัวต่อสายดังรูปที่ 5.54 เมื่อทำการต่อสายทั้งหมดเสร็จเรียบร้อยแล้วเรานำไส้หม้อแปลงเข้าอบดังรูปที่ 5.58, 5.59, 5.60 เพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 120°C เพราะขณะเราใช้งานหม้อแปลงความชื้นในฉนวนจะออกมาผสมในน้ำมันและความชื้นเหล่านี้เป็นสาเหตุของการดิสชาร์จบางส่วนและนำไปสู่การเบรกดาวน



รูปที่ 5.48 น๊อตทองเหลือง

รูปที่ 5.49 ขั้วสาย



รูปที่ 5.50 ขั้วสายที่ยึดติดกับแผ่น
แบกกะไลต์



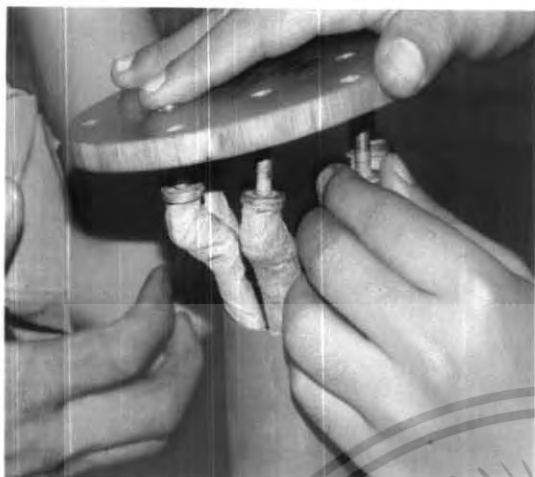
รูปที่ 5.51 การต่อสาย



รูปที่ 5.52 กระดาษชุบน้ำพันรอบจุดต่อ
ก่อนทำการเชื่อม

รูปที่ 5.53 การเชื่อมขั้วสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.54 การลงใส่ขั้วสายกับแผ่นแบกกะไลต์ **รูปที่ 5.55** ขั้วสายที่เชื่อมเสร็จเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 5.56 การต่อสายกราวด์

รูปที่ 5.57 ไล้หม้อแปลงที่ต่อสายเสร็จเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.58 การนำไส้หม้อแปลงเข้าไปอบ



รูปที่ 5.59 การนำไส้หม้อแปลงเข้าอบ



รูปที่ 5.60 เครื่องที่ใช้ในการอบไส้หม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.8 ประกอบตัวถัง ปิดฝาและเติมน้ำมัน

เมื่อทำการอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว เราจะนำไส้ของหม้อแปลงออกมาทำการประกอบกับตัวถัง จากนั้นจึงเติมน้ำมันหม้อแปลง ซึ่งการเติมน้ำมันหม้อแปลงนี้จะกระทำภายใต้สุญญากาศ เพื่อป้องกันการเกิดฟองอากาศแทรกอยู่ภายในฉนวนกระดาษกับน้ำมันโดยฟองอากาศเหล่านี้เป็นสาเหตุของการดิสชาร์จบางส่วนและนำไปสู่การเบรกดาวน์ โดยในการประกอบนั้นเราจะนำตัวถังพีวีซี มาครอบไส้หม้อแปลงและวางประก็นน้ำมันที่ฝาทั้ง2ด้านของหม้อแปลง แล้วใส่แหวนล็อกและขันน๊อตยึดให้แน่นดังรูปที่ 5.61 - 5.62 จากนั้นจึงทำการเติมน้ำมันหม้อแปลงภายในห้องสุญญากาศดังรูปที่ 5.65 หลังจากนั้นก็จะทำการปิดฝาดังวางแผ่นแบกกะไลต์และนำปลายสายขึ้นมาด้านบนดังรูปที่ 5.67



รูปที่ 5.61 การนำตัวถังพีวีซีมาครอบ
ไส้หม้อแปลง



รูปที่ 5.62 การใส่แหวนล็อก

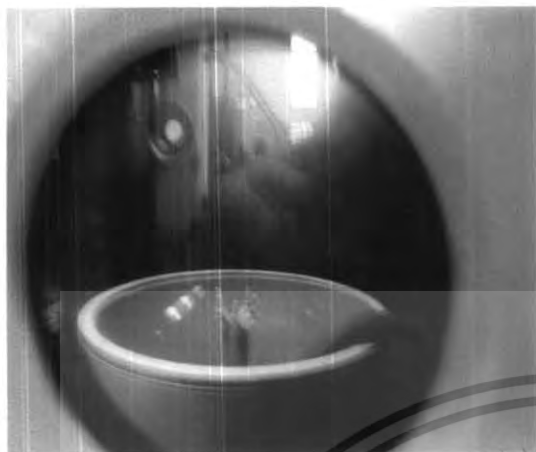


รูปที่ 5.63 หม้อแปลงก่อนการเติมน้ำมัน

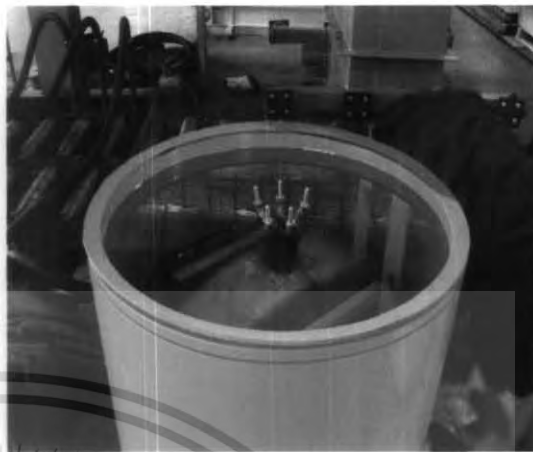


รูปที่ 5.64 ห้องสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.65 การเติมน้ำมันในสุญญากาศ



รูปที่ 5.66 เติมน้ำมันเสร็จเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 5.67 การใส่แผ่นแบกกะไลต์
เข้ากับขั้วสาย



รูปที่ 5.68 หม้อแปลงที่เสร็จเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.9 การประกอบสร้างชุดควบคุม

การประกอบสร้างชุดควบคุมนั้นจะทำการประกอบสร้างตามแบบที่ได้ทำการออกแบบไว้ทั้งวงจรกำลัง วงจรควบคุม และวงจรขับ โดยในการประกอบสร้างชุดควบคุมนั้นจะทำการแบ่งการประกอบสร้างออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

5.9.1 การประกอบชุดมอเตอร์เข้ากับหม้อแปลงปรับแรงดัน

เพื่อให้สามารถควบคุมความเร็วของหม้อแปลงปรับแรงดันได้ จึงติดตั้งมอเตอร์เพื่อควบคุมอัตราการเพิ่ม / ลดแรงดันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังรูปที่ 5.69 – 5.70



รูปที่ 5.69 มอเตอร์ใช้ขับหม้อแปลงปรับแรงดัน รูปที่ 5.70 มอเตอร์เมื่อประกอบเข้ากับหม้อแปลงปรับแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.9.2 การประกอบแผงวงจร

ขั้นตอนการประกอบแผงวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 5.71 – 5.73



รูปที่ 5.71 ทำการประกอบแผงวงจรควบคุม(1) รูปที่ 5.72 ทำการประกอบแผงวงจรควบคุม(2)



รูปที่ 5.73 แผงวงจรที่ทำการประกอบเสร็จแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.9.3 การประกอบอุปกรณ์ต่าง ๆ เข้ากับตู้

การประกอบแผงวงจรเข้ากับตู้ควบคุมและลักษณะของตู้ควบคุมเมื่อประกอบเสร็จแล้ว แสดงในรูปที่ 5.74 – 5.75



รูปที่ 5.74 ทำการประกอบแผงวงจรเข้ากับตู้



รูปที่ 5.75 แผงหน้าปัดของตู้เมื่อประกอบเสร็จแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

การทดสอบ

การทดสอบหม้อแปลงที่ประกอบสร้างขึ้นเพื่อตรวจสอบว่าลักษณะคุณสมบัติของหม้อแปลงเป็นไปตามที่ออกแบบหรือไม่ แต่เนื่องจากไม่มีมาตรฐานสำหรับหม้อแปลงทดสอบโดยตรง ฉะนั้นการทดสอบจะทำตามมาตรฐานกำหนด IEC Plub.No.76-1976 Power Transformers และ IEC Plub.No. 60-2-1994 High Voltage Test Technique บางรายการและเพิ่มเติมบางรายการดังนี้

- 1) การวัดความต้านทานฉนวน
- 2) การวัดค่าความต้านทานกระแสตรงของขดลวด
- 3) การทดสอบขั้วและอัตราส่วนแรงดันของขดลวด
- 4) การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลด
- 5) การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดและแรงดันลัดวงจร
- 6) การทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับ
- 7) การทดสอบการเกิดการเบรกดาว์นผ่านช่องว่างทรงกลม

การทดสอบหม้อแปลงที่ออกแบบสร้างจะมี 2 กรณีคือ ทดสอบหม้อแปลงเดี่ยวๆแต่ละลูกตามมาตรฐานที่กำหนดหลังจากนั้นก็นำหม้อแปลงทั้ง 2 ลูกนำมาต่อคาสเคดกันและทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดัน (withstand voltage) และการทดสอบการวาวไฟตามฉนวน



รูปที่ 6.1 หม้อแปลงที่เคยประกอบสร้างไว้แล้วก่อนหน้า



รูปที่ 6.2 หม้อแปลงที่ประกอบสร้างขึ้นใหม่

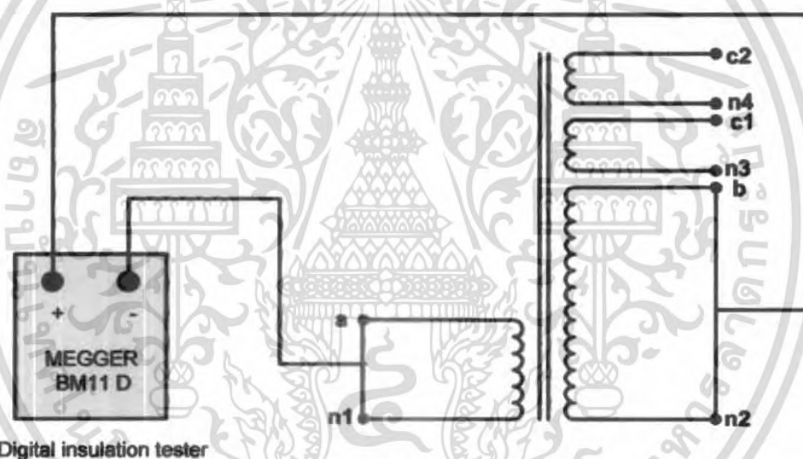
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบที่จะนำเสนอเป็นผลการทดสอบหม้อแปลงลูกที่ 2 ซึ่งได้ออกแบบและประกอบสร้างขึ้นใหม่โดยที่หม้อแปลงลูกที่ 1 ได้จัดทำไปในปีที่แล้วโดยนักศึกษากลุ่มโครงการวิศวกรรมก่อนหน้า

6.1 การทดสอบหม้อแปลงเดี่ยว

6.1.1 การวัดค่าความต้านทานฉนวน

การวัดค่าความต้านทานฉนวนโดยใช้เครื่อง AVO MEGGER BM11D โดยจะทำการวัดในส่วนของฉนวนที่กั้นอยู่ระหว่างขดลวดแรงต่ำกับขดลวดแรงสูง ขดลวดแรงต่ำกับขดลวดต่อควบ ขดลวดแรงสูงกับขดลวดต่อควบ และขดลวดแต่ละขดกับส่วนที่ต่อลงดิน ซึ่งมีวงจรการทดสอบค่าความต้านทานของฉนวนตามรูปที่ 6.3 รูปแสดงการทดสอบค่าความต้านทานของฉนวนดังรูปที่ 6.4 และผลการทดสอบค่าความต้านทานของฉนวนดังแสดงในตารางที่ 6.1



รูปที่ 6.3 วงจรการทดสอบความต้านทานฉนวนระหว่างขดลวดแรงต่ำกับขดลวดแรงสูง



รูปที่ 6.4 การทดสอบค่าความต้านทานฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1 ผลการทดสอบค่าความต้านทานของฉนวน

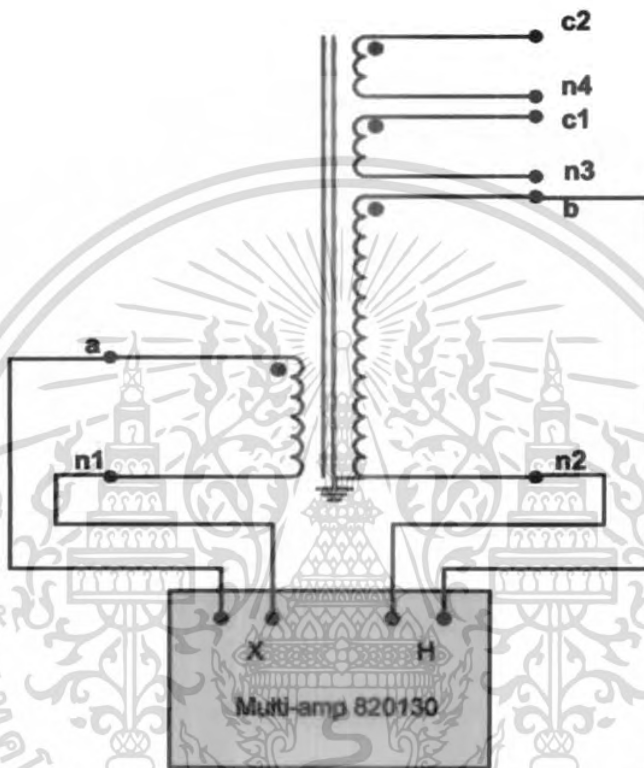
ขดลวดชุดที่ 1	ขดลวดชุดที่ 2	ค่าความต้านทานก่อนทำการอบ (M Ω)	ค่าความต้านทานที่มี ค่าคงที่แล้ว (G Ω)
a-n1	b-n2	178	70.4
a-n1	c1-n3	159	102.0
a-n1	c2-n4	167	100.4
b-n2	c1-n3	44	31.4
b-n2	c2-n4	48	32.1
a-n1	แกนเหล็ก	46	78.8
b-n2	แกนเหล็ก	182	124.9
c1-n3	แกนเหล็ก	130	188.1
c2-n4	แกนเหล็ก	131	183.0

ในการทำการทดสอบค่าความเป็นฉนวนนั้น ใช้ระดับแรงดันกระแสตรงของอุปกรณ์ที่ทำการทดสอบคือขนาด 2,500 V โดยจะทำการทดสอบทีละ 2 ขดโดยขดแรกจ่ายแรงดัน 2,500 V และขดที่สองเป็น 0 V เพื่อวัดค่าความเป็นฉนวนของฉนวนทั้งหมดที่กั้นอยู่ระหว่าง 2 ขดที่ทำการทดสอบ และในกรณีที่วัดค่าความเป็นฉนวนของขดลวดเทียบกับส่วนที่ต่อลงดิน จะจ่ายแรงดัน 2,500 V ที่ขดลวด และ 0 V ที่ส่วนที่ต่อลงดิน ทำการวัดเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนกว่าค่าที่ได้จากการวัดในแต่ละครั้งจะมีค่าไม่เพิ่มขึ้น

ขณะที่ทำการอบจะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาในการอบมากขึ้น จะทำให้ค่าความเป็นฉนวนเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากความชื้นในขดลวดและการคายฉนวนจะค่อยๆ ระเหยออกไป ในขณะที่ทำการอบ โดยเราจะทำการอบแล้ววัดค่าไปเรื่อยๆ จนกว่าค่าความต้านทานที่ได้จะมีค่าคงที่ นั่นแสดงให้เห็นว่าความชื้นที่มีอยู่ในขดลวดและการคายฉนวนได้ระเหยจนหมดไปแล้ว จะทำให้ได้ค่าความเป็นฉนวนที่มีค่ามากที่สุด

6.1.2 การทดสอบหาค่าอัตราส่วนของแรงดัน

ทำการทดสอบหาค่าอัตราส่วนแรงดันโดยมีวงจรทดสอบดังรูปที่ 6.5 และทำการทดสอบหาค่าอัตราส่วนของแรงดันโดยใช้เครื่อง MULTI-AMP 820130 TRANSFORMER RATIO METER ดังรูปที่ 6.6 จากนั้นทำการปรับค่าจนกว่า เข็มจะชี้เลข 0 แสดงว่าบริดจ์สมดุล แล้วจึงทำการอ่านค่าแล้วบันทึกผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 6.2



รูปที่ 6.5 วงจรการทดสอบหาค่าอัตราส่วนของแรงดัน



รูปที่ 6.6 การทดสอบหาค่าอัตราส่วนของแรงดันโดยใช้เครื่อง MULTI-AMP 820130 TRANSFORMER RATIO METER ขณะทำการประกอบสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบหาอัตราส่วนแรงดัน

คู่ขดลวดที่ทำการทดสอบ	อัตราส่วนแรงดันที่ได้จากการคำนวณ	อัตราส่วนแรงดันที่ได้จากการทดสอบ	ความคลาดเคลื่อน (%)	ข้อ
แรงสูง : แรงต่ำ	460.4 : 1	460.26 : 1	+ 0.03%	เหมือนกัน
แรงต่ำ:ต่อควบ1	1.97 : 1	1.98 : 1	- 0.71	เหมือนกัน
แรงต่ำ:ต่อควบ2	1.97 : 1	1.98 : 1	- 0.71	เหมือนกัน
แรงต่ำ:ต่อควบ1,2	1.02 : 1	1.03 : 1	- 0.97	เหมือนกัน

** ข้อควบ 1,2 คือ การต่อขดลวดชุดที่ 1 อนุกรมกับขดลวดชุดที่ 2

6.1.3 การวัดค่าความต้านทานกระแสตรงของขดลวด

การวัดค่าความต้านทานกระแสตรงใช้เครื่อง RESISTOMAT QT-07 ซึ่งมีวงจรการทดสอบดังรูปที่ 6.7 และค่าที่วัดได้แสดงไว้ในตารางที่ 6.3 โดยมีอุณหภูมิและทำการวัดความต้านทานที่อุณหภูมิ 75°C

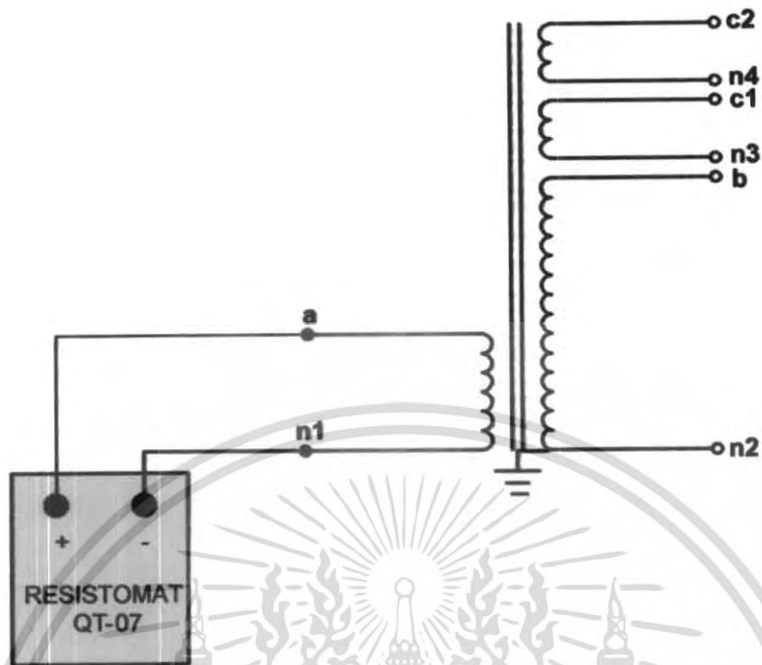
$$R_{75^{\circ}\text{C}} = [(T_0 + 75) / (T_0 + t_{\text{test}})] \times R_{\text{Temp at test lab } ^{\circ}\text{C}} \quad (6.1)$$

เมื่อ

T_0 คือ อุณหภูมิที่ความต้านทานเสมือนมีค่าเป็นศูนย์ และสำหรับทองแดง $T_0 = 234.5^{\circ}\text{C}$

ดังนั้น

$$R_{75^{\circ}\text{C}} = [(234.5 + 75) / (234.5 + t_{\text{test}})] \times R_{\text{temp at test lab } ^{\circ}\text{C}} \quad (6.2)$$



รูปที่ 6.7 วงจรการวัดค่าความต้านทานกระแสตรงของขดลวด



รูปที่ 6.8 การวัดค่าความต้านทานกระแสตรงของขดลวดขณะทำการประกอบสร้าง

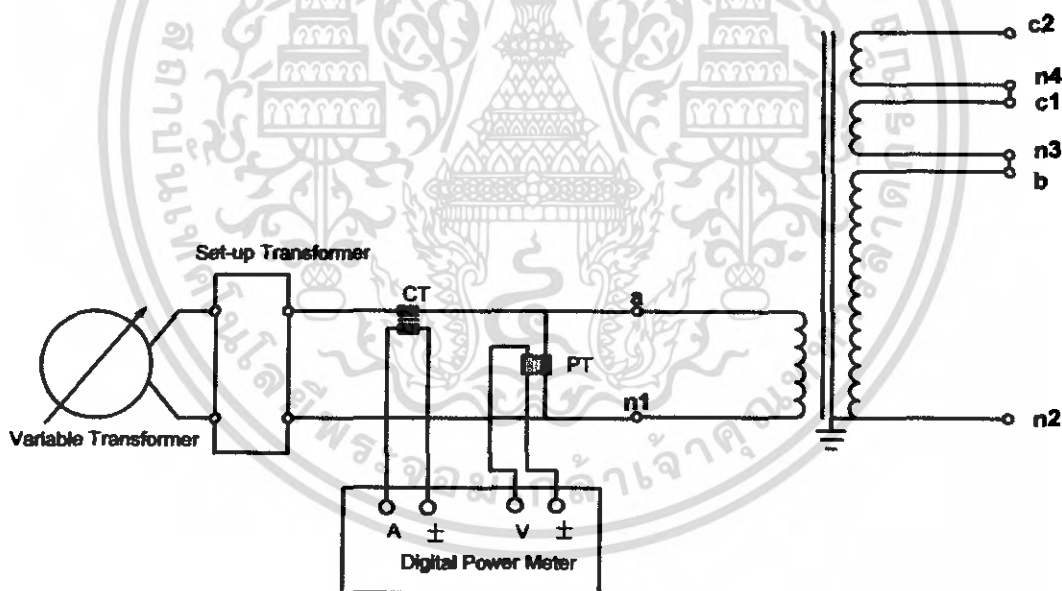
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.3 ค่าความต้านทานกระแสตรงของขดลวด

ขดลวด	ค่าความต้านทานกระแสตรง (Ω)		ความคลาดเคลื่อน (%)
	การวัด Temp at test lab 32.4°C	การคำนวณ 75°C	
แรงดันต่ำ	0.0328	0.0330	-15.15
แรงดันสูง	4890	5524	-2.46
ต่อควบ 1,2	0.0707	0.0820	-2.46

6.1.4 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลด

การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลดใช้เครื่อง YOKOGAWA 2533 DIGITAL POWER METER เป็นการวัดค่าเมื่อหม้อแปลงไม่ได้จ่ายโหลด ที่แรงดันและความถี่ปกติ กำลังที่ป้อนเข้าเป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่มีค่าคงที่โดยมีวงจรการทดสอบดังรูปที่ 6.9 และทำการทดสอบดังรูปที่ 6.10 โดยค่าที่วัดได้แสดงไว้ในตารางที่ 6.4



รูปที่ 6.9 วงจรการวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.10 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลดใช้เครื่อง YOKOGAWA 2533
DIGITAL POWER METER

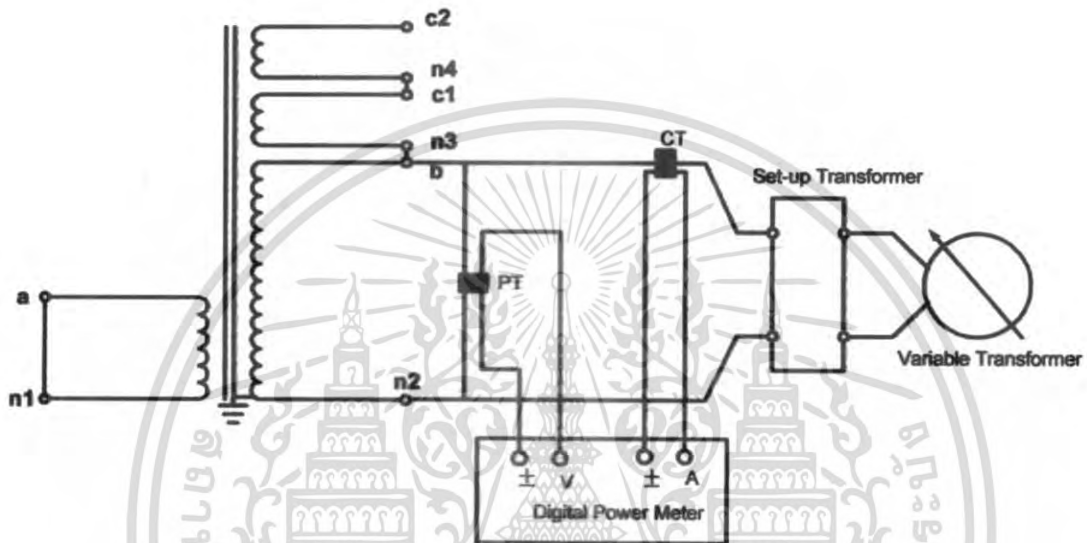
ตารางที่ 6.4 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลด

U1 (Volt)	I1 (Amp)	W1 (Watt)
66.74	0.965	9.9
79.89	1.192	14.4
100.01	1.505	22.1
120.04	1.810	31.6
140.10	2.046	42.8
160.12	2.226	56.1
180.02	2.341	72.0
200.10	2.334	91.2
219.91	2.268	115.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.5 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดและแรงดันลัดวงจร

การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดและแรงดันลัดวงจร ใช้เครื่อง YOKOGAWA YEW 2533 DIGITAL POWER METER โดยการป้อนแรงดันให้ขดลวดแรงสูง จนกระทั่งกระแสทางด้านแรงสูงมีค่าเท่ากับกระแสพิกัด (0.1 A) และลัดวงจรทางด้านขดลวดแรงต่ำ เปิดวงจรขดลวดต่อควบ ซึ่งมีวงจรทดสอบตามรูปที่ 6.11และทำการทดสอบดังรูปที่ 6.12 และค่าความสูญเสียที่วัดได้แสดงในตารางที่ 6.5 และสรุปค่าต่างๆ ในตารางที่ 6.6



รูปที่ 6.11 วงจรการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดและแรงดันลัดวงจร



รูปที่ 6.12 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดและแรงดันลัดวงจรใช้เครื่อง

YOKOGAWA YEW 2533 DIGITAL POWER METER

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.5 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดและแรงดันลัดวงจร อุณหภูมิขณะทดสอบ 32.4 °C

I (A)	V (kV)	P (W)
0.0291	1.679	11
0.050	2.881	32
0.075	4.319	73
0.100	5.767	129

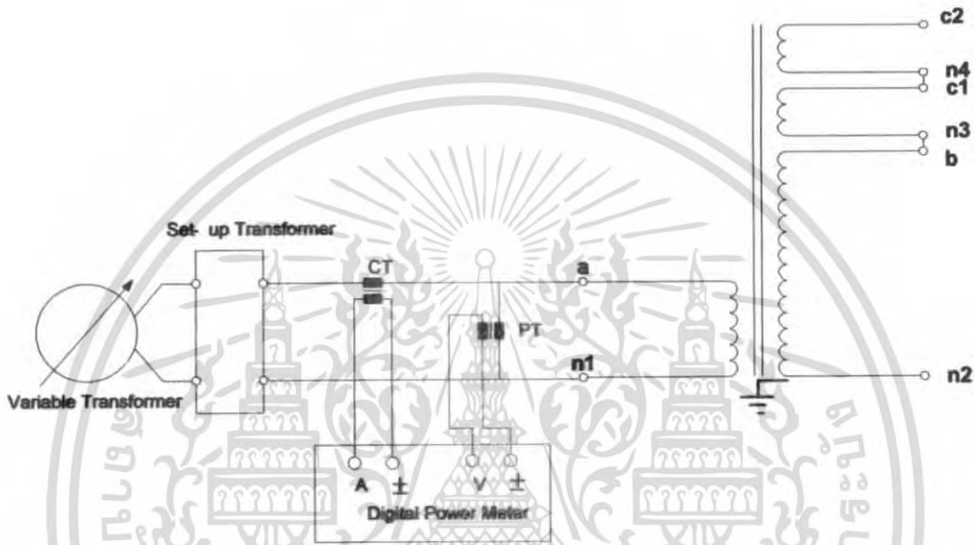
ตารางที่ 6.6 สรุปค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิห้องทดสอบ และ 75 °C

	อุณหภูมิห้อง ทดสอบ 32.4 (°C)	75 °C
$P_{dc}(W)$	116	136
$P_{stray}(W)$	7	6
$R_{sc}(\Omega)$	4,824.2889	5,658.4546
$X_{sc}(\Omega)$	55,571	55,571
$Z_{sc}(\Omega)$	55,780	55,858.34
$E_{sc}(\%)$	-	5.58
% ความคลาดเคลื่อน $E_{sc}(\%)$	-	-37.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.6 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกินกระแสสลับ

การทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกินกระแสสลับ ใช้เครื่อง YOKOGAWA 2533 DIGITAL POWER METER เป็นการทดสอบค่าความคงทนของฉนวนระหว่างขดลวดกับขดลวด ชั้นของขดลวด ขดลวดกับดิน แรงดันที่ทำการทดสอบมีขนาด 120 kV 50 Hz (120% ของแรงดันที่พิกัด) โดยใช้เวลาดทดสอบ 1 นาที ซึ่งมีวงจรการทดสอบดังรูปที่ 6.13 และมีการทำทดสอบดังรูปที่ 6.14 และมีผลการทดสอบแสดงในหัวข้อที่ 6.6.3



รูปที่ 6.13 วงจรทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกินกระแสสลับ



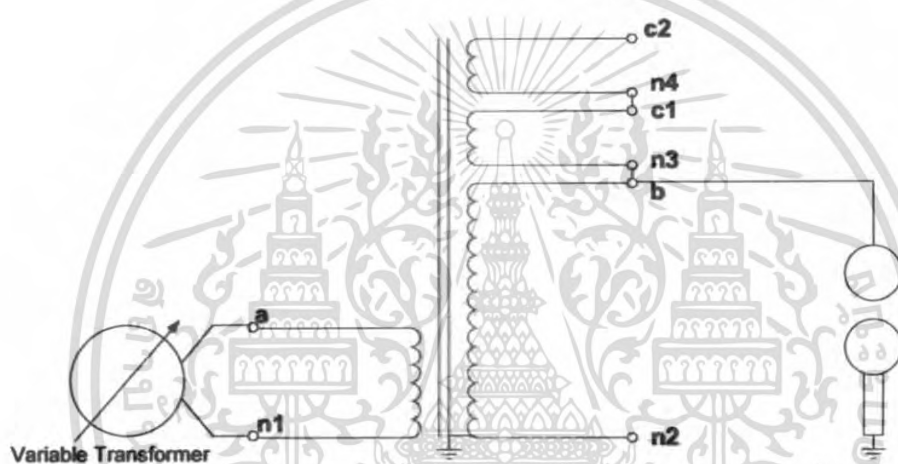
รูปที่ 6.14 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกินกระแสสลับ ใช้เครื่อง YOKOGAWA 2533 DIGITAL POWER METER

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกินกระแสสลับ หม้อแปลงทดสอบมีความคงทนต่อแรงดันทดสอบ 120 kV ได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการฉนวนภายในของหม้อแปลงทดสอบมีค่าที่มากพอที่จะรับแรงดันเกินชั่วขณะได้

6.1.7 การทดสอบการเกิดเบรกดาว์นผ่านช่องว่างทรงกลม

นำหม้อแปลงทดสอบมาใช้งานโดยการเบรกดาว์นผ่านช่องว่างทรงกลม 5 ครั้ง ติดต่อกัน โดยทรงกลมมีขนาด 25 cm. ระยะห่าง 5 cm. ป้อนแรงดันทางด้านขดลวดแรงต่ำ โดยใช้หม้อแปลงปรับแรงดันจนเกิดการเบรกดาว์น แล้วบันทึกค่าแรงดันทางด้านขดลวดแรงต่ำ ซึ่งมีวงจรทดสอบดังรูปที่ 6.15 และทำการทดสอบการเกิดเบรกดาว์นผ่านช่องว่างทรงกลมดังรูปที่ 6.16 โดยมีผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 6.7



รูปที่ 6.15 วงจรทดสอบการเกิดเบรกดาว์นผ่านช่องว่างทรงกลม



รูปที่ 6.16 การทดสอบการเกิดเบรกดาว์นผ่านช่องว่างทรงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.7 ผลการทดสอบการใช้งานของหม้อแปลง

ครั้งที่	แรงดันที่เกิดเบรกดาว์น วัดทางด้านแรงต่ำ(V)	แรงดันที่เกิดเบรกดาว์น ทางด้านแรงสูง(kV)
1	169.4	77.4
2	174.2	79.3
3	165.9	76.0
4	172.9	78.4
5	171.1	77.5

6.2 การทดสอบหม้อแปลงสองตัวต่อแบบคาสเคด

นำหม้อแปลงทั้ง 2 ตัวมาวางซ้อนกันและทำการต่อเคสเคดกันโดยทำการต่อขดลวดต่อควบของหม้อแปลงตัวล่างเข้ากับขดลวดแรงต่ำของหม้อแปลงตัวบน และต่อปลายขดลวดแรงสูงของหม้อแปลงตัวล่างต่อเข้ากับสายกราว์นของหม้อแปลงตัวบนเพื่อให้ศักย์ไฟฟ้าของกราว์นของหม้อแปลงตัวบนเท่ากับแรงดันสูงของหม้อแปลงตัวล่าง ดังแสดงในรูปที่ 6.17,6.18



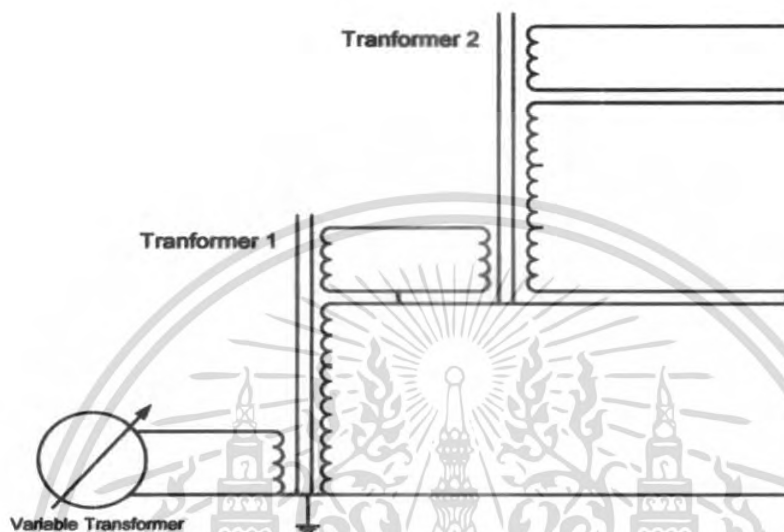
รูปที่ 6.17 ยกหม้อแปลงวางซ้อนกัน

รูปที่ 6.18 ทำการต่อคาสเคดกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.1 ทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกินกระแสสลับเมื่อต่อคาสเคดกัน

เป็นการทดสอบค่าความคงทนของฉนวนระหว่างขดลวดกับขดลวด ชั้นของขดลวด ขดลวดกับดิน เมื่อทำการต่อคาสเคดกัน แรงดันที่ทำการทดสอบมีขนาด 240 kV โดยใช้เวลาดทดสอบ 1 นาที ซึ่งมีวงจรการทดสอบดังรูปที่ 6.19 และมีการทำทดสอบดังรูปที่ 6.20



รูปที่ 6.19 วงจรการทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกินกระแสสลับเมื่อต่อคาสเคดกัน



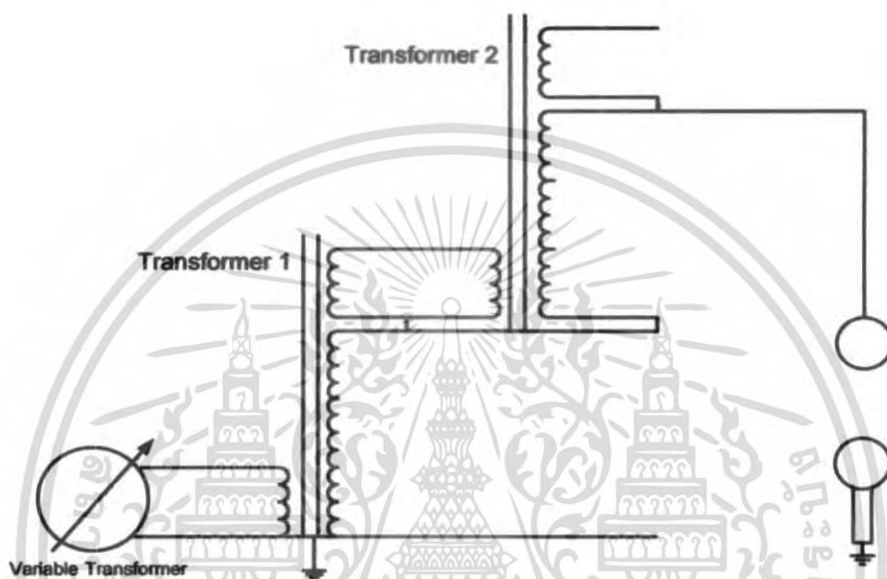
รูปที่ 6.20 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกินกระแสสลับเมื่อต่อคาสเคดกัน

ผลการทดสอบ หม้อแปลงสามารถทนแรงดันเกินกระแสสลับชั่วขณะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.2 การทดสอบการเกิดเบรกดาว์นผ่านช่องว่างทรงกลมเมื่อต่อคาสเคดกัน

นำหม้อแปลงทดสอบซึ่งต่อคาสเคดกันมาใช้งานโดยการเบรกดาว์นผ่านช่องว่างทรงกลม 5 ครั้ง ติดต่อกัน โดยทรงกลมมีขนาด 25 cm. ระยะระหว่างทรงกลม 10 cm. ป้อนแรงดันทางด้านขดลวดแรงต่ำโดยใช้หม้อแปลงปรับแรงดันจนเกิดการเบรกดาว์น แล้วบันทึกค่าแรงดันทางด้านขดลวดแรงต่ำ ซึ่งมีวงจรทดสอบดังรูปที่ 6.21 และทำการทดสอบการเกิดเบรกดาว์นระหว่างช่องว่างทรงกลมดังรูปที่ 6.22 โดยมีผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 6.8



รูปที่ 6.21 วงจรทดสอบการเบรกดาว์นผ่านช่องว่างทรงกลมเมื่อต่อคาสเคดกัน



รูปที่ 6.22 การทดสอบการเกิดเบรกดาว์นผ่านช่องว่างทรงกลมเมื่อต่อคาสเคดกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.8 ผลการทดสอบการใช้งานของหม้อแปลงเมื่อต่อคาสเกดกัน

ครั้งที่	แรงดันที่เกิดเบรกดาว์น วัดทางด้านแรงต่ำ(V)
1	164.9
2	164.3
3	166.5
4	167.4
5	167.3

6.3 การทดสอบชุดควบคุม

ทำการทดสอบโดยการเช็คฟังก์ชันการทำงานทั้งหมดของชุดควบคุมโดยชุดควบคุมมีฟังก์ชันการทำงาน ดังนี้

- การ on / off ชุดควบคุม
- การ on / off หม้อแปลงปรับแรงดันสำหรับควบคุมแรงดันป้อนเข้าหม้อแปลงทดสอบ
- การปรับอัตราเพิ่ม / ลดแรงดัน
- การลดแรงดันอัตโนมัติเมื่อหม้อแปลงปรับแรงดันไม่อยู่ที่ตำแหน่งศูนย์
- การหยุดขึ้น / ลงอัตโนมัติเมื่อหม้อแปลงปรับแรงดันหมุนชน limit
- การตัดวงจรเมื่อกดปุ่ม emergency
- การตัดวงจรเมื่อเกิดกระแสเกินจากการเกิด flashover หรือเกิดการ short circuit
- การตัดวงจรเมื่อประจู่รั้วกันบริเวณทดสอบถูกเปิดออก

ผลการทดสอบ

ชุดควบคุมสามารถทำงานได้ตามฟังก์ชันการทำงานทั้งหมดที่กำหนดไว้ในการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ทีมงานที่ทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

หม้อแปลงทดสอบที่ทำการออกแบบและประกอบสร้างขึ้นมามีคุณสมบัติทางไฟฟ้า คุณลักษณะทางการฉนวนและทางความร้อนตามที่ได้ออกแบบไว้ทุกประการและสอดคล้องกับข้อกำหนดตามมาตรฐานสากล

ตารางที่ 7.1 ค่าพิกัดของหม้อแปลงทดสอบ

ค่าพิกัดต่าง ๆ ของหม้อแปลง	หม้อแปลง 1 ตัว	เมื่อต่อชั้นบันได 2 ชั้น
กำลังไฟฟ้า S_m , kVA	10	10
แรงดันขี้นเข้า(แรงดันต่ำ) U_1 , V	220	220
แรงดันจ่ายออก(แรงดันสูง) U_2 , kV	100	200
กระแสขี้นเข้า I_1 , A	45.45	45.45
กระแสจ่ายออก I_2 , A	0.1	0.05
แรงดันต่อคาบ U_3 , V	220	220
กระแสต่อคาบ I_3 , A	-	22.73
จำนวนเฟส	1	1
ความถี่	50	50

นอกจากนี้ชุดควบคุมสามารถทำงานได้ตามฟังก์ชันที่ทำการออกแบบไว้ได้เป็นอย่างดีโดยมีผลการทดสอบชุดควบคุมดังตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2 ผลการทดสอบฟังก์ชันการทำงานของชุดควบคุม

ฟังก์ชันการทำงานของชุดควบคุม	ผลการทดสอบ
การ on / off ชุดควบคุม	ผ่านการทดสอบ
การ on / off หม้อแปลงปรับแรงดันสำหรับควบคุมแรงดันป้อนเข้าหม้อแปลงทดสอบ	ผ่านการทดสอบ
การปรับอัตราเพิ่ม / ลดแรงดัน	ผ่านการทดสอบ
การลงแรงดันอัตโนมัติเมื่อหม้อแปลงปรับแรงดันไม่อยู่ที่ตำแหน่งศูนย์	ผ่านการทดสอบ
การหยุดขึ้น / ลงอัตโนมัติเมื่อหม้อแปลงปรับแรงดันหมุนชน limit	ผ่านการทดสอบ
การตัดวงจรเมื่อกดปุ่ม emergency	ผ่านการทดสอบ
การตัดวงจรเมื่อเกิดกระแสเกินจากการเกิด flashover หรือเกิดการ short circuit	ผ่านการทดสอบ
การตัดวงจรเมื่อประตูรั้วกันบริเวณทดสอบถูกเปิดออก	ผ่านการทดสอบ

หม้อแปลงทดสอบและชุดควบคุมนี้ จะนำไปติดตั้งที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต่างๆต่อไป

7.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบนี้ งานบางส่วนเป็นงานทางกล ซึ่งทางคณะผู้จัดทำยังมีความรู้และประสบการณ์ทางด้านนี้ไม่เพียงพอ อีกทั้งหม้อแปลงทดสอบนี้ทางโรงงานยังไม่เคยประกอบสร้างมาก่อนจึงเกิดปัญหาเกี่ยวกับโครงสร้างและการรั่วซึมของน้ำมันหม้อแปลง ทางคณะผู้จัดทำจึงได้ทำการออกแบบโครงสร้างและประกอบสร้างชิ้นงานบางส่วนใหม่ จึงทำให้การวางแผนและการดำเนินการจริงคลาดเคลื่อนขึ้นทำให้งานต้องล่าช้าออกไป

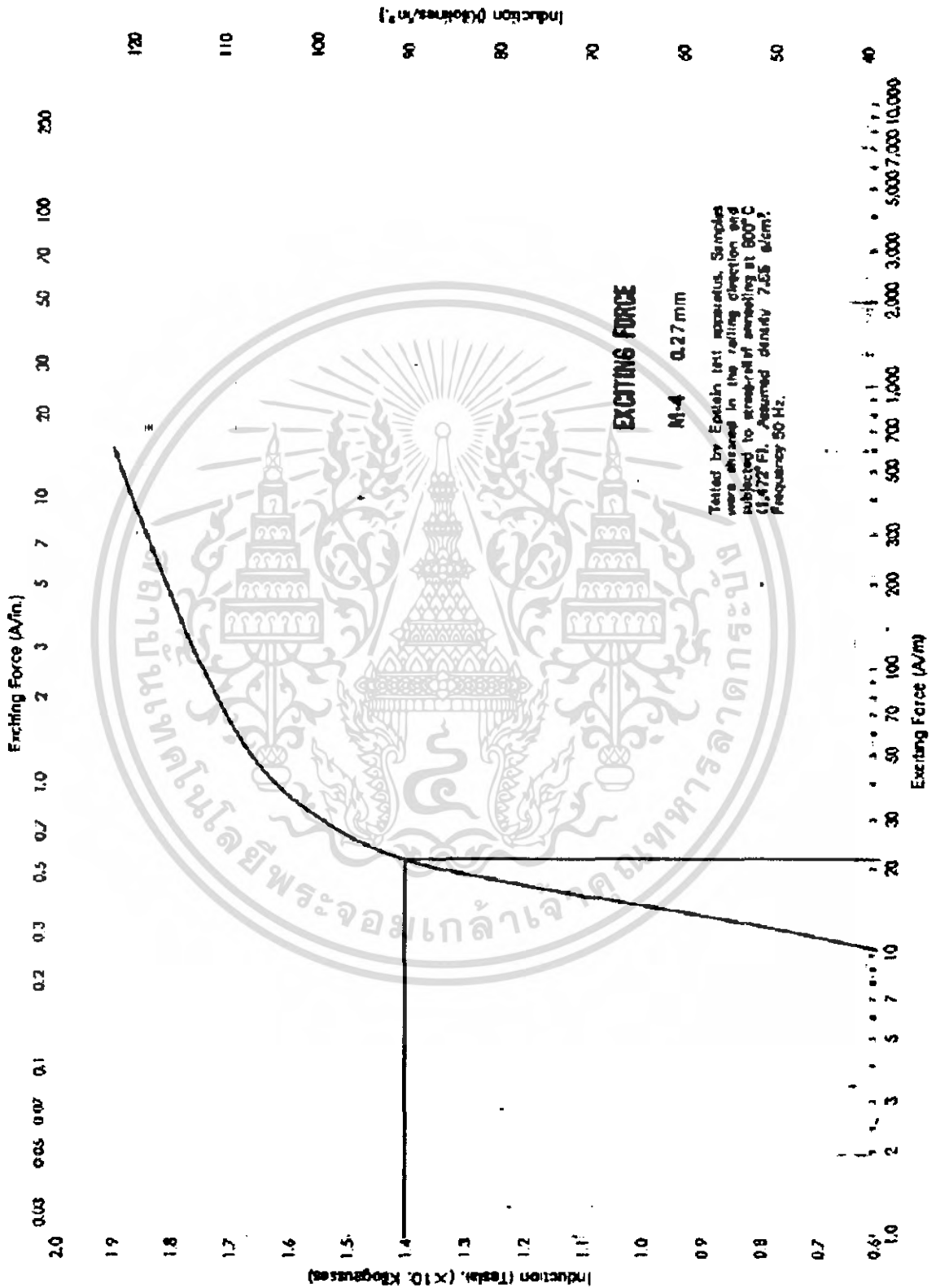
จากความสำเร็จการออกแบบและประกอบสร้าง หม้อแปลงทดสอบต่อกันแบบ กาสเคดพิกัด 200 kV 10 kVA และชุดควบคุม สามารถนำไปพัฒนาเพิ่มเติมโดยการพัฒนาการชิลด์หม้อแปลงทดสอบให้เกิดการสูญเสียที่เกิดจากโคโรน่าให้น้อยที่สุด ตลอดจนการพัฒนาชุดควบคุมให้มีลักษณะการขึ้นแรงดันที่แม่นยำมากขึ้นโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ที่ใช้ขับ variac ซึ่งจะทำให้ได้แรงดันด้านแรงสูงที่มีความแม่นยำมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] พีรวุฒิ ยุทธโกวิท, การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบขนาด 300 kV 300 kVA, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, เมษายน 2544.
- [2] ASTM D877-87 (89) [7] Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using Disk Electrodes
- [3] ASTM D924-82(90) [9] Testing of insulating Oils
- [4] BS 4653 Specification for paper covered conductor. Rectangular conductor
- [5] DIN 51353 Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Oils
- [6] DIN 7733 Electrical Insulation For Transformer(Pressboard, Transformer board)
- [7] IEC Publ.No.60076-1, "Power transformer," 2.1 Ed., 1999.
- [8] IEC Publ.No.60076-2, "Power transformer," 2.1 Ed., 1999.
- [9] IEC Publ.No.60076-3, "Power transformer," 2.1 Ed., 1999.
- [10] IEC 641-3-1 (type B.2.1, B.3.1, B.4.1) Electrical Insulating Paper/Press board
- [11] JIS C3202 Diameters tolerances and technical data
- [12] JIS C-2305 (class 2) Insulation Paper/Press board
- [13] มอก. 82-2527 ลวดทองแดงกลมดัดเคลือบโพลีไวนิลฟอร์มัล
- [14] สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, เมษายน 2547.
- [15] สำรวย สังข์สะอาด, ปรีพจน์, หม้อแปลงทดสอบชั้นบันได 200 kV 10 kVA, รายงานผลการวิจัยทุนวิจัยพิเศษกรมวิทยาศาสตร์, 2531.
- [16] Indrajit Dasgupta, Design of Transformers, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited ,2002.
- [17] มอก. 999-2533, ท่อพีวีซีแข็งสำหรับใช้ในงานอุตสาหกรรม, 2533
- [18] เอกสารประกอบการออกแบบหม้อแปลงบริษัท Thai Trafo Manufacturing CO.,LTD
- [19] คมสัน เพ็ชรรักษ์, สุกิจ ชูชาญชัย, สุรพัฒน์ สุกัมภีรานนท์, อติศักดิ์ อัมพรกษกร, สุทธิชัย คุ่มวรชัย, แรงดันวาทไฟตามผิวท่อพี.วี.ซี., การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20 ,จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.

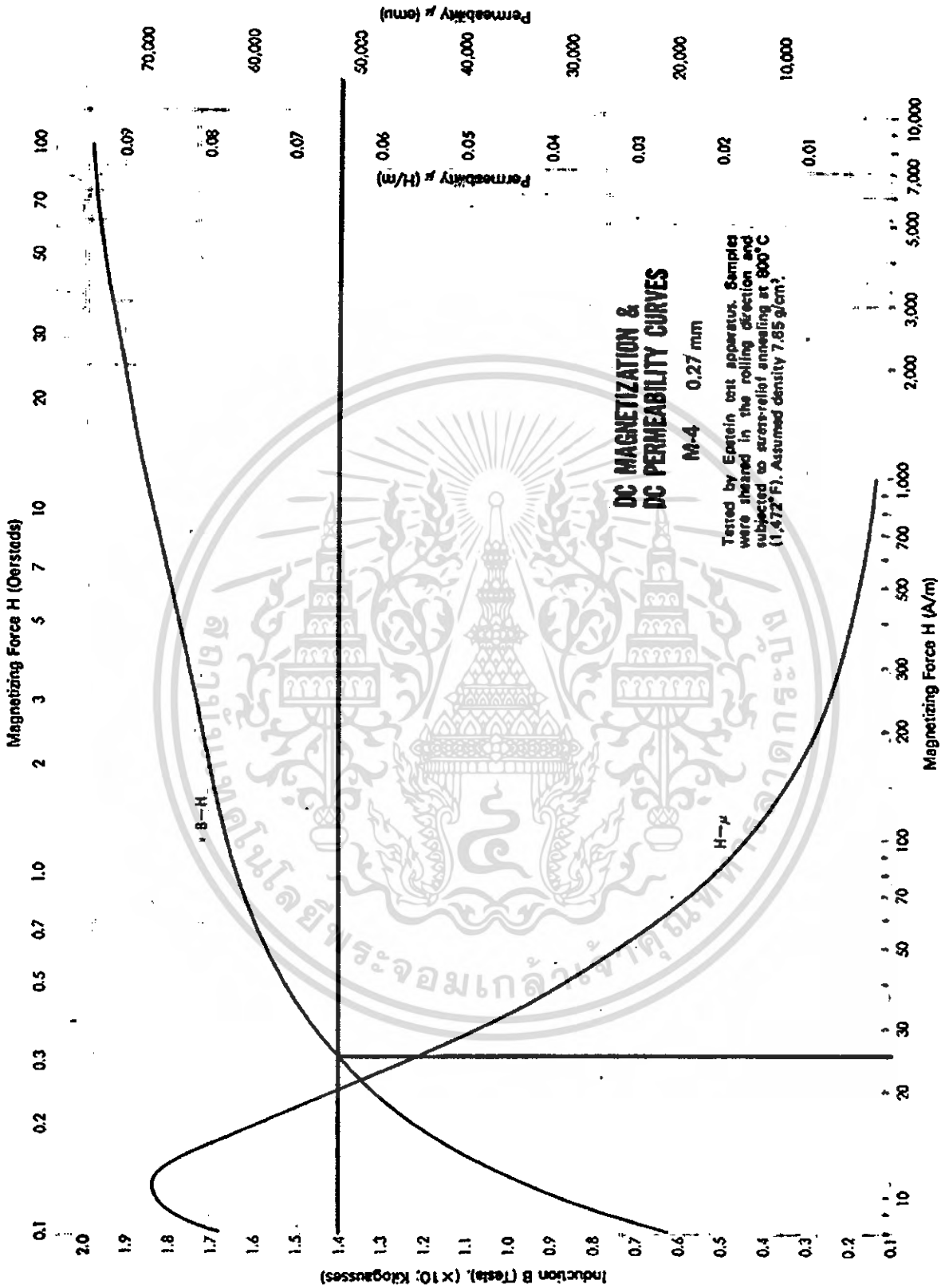
ภาคผนวก ก

คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการประกอบสร้างหม้อแปลงจากผู้ผลิต



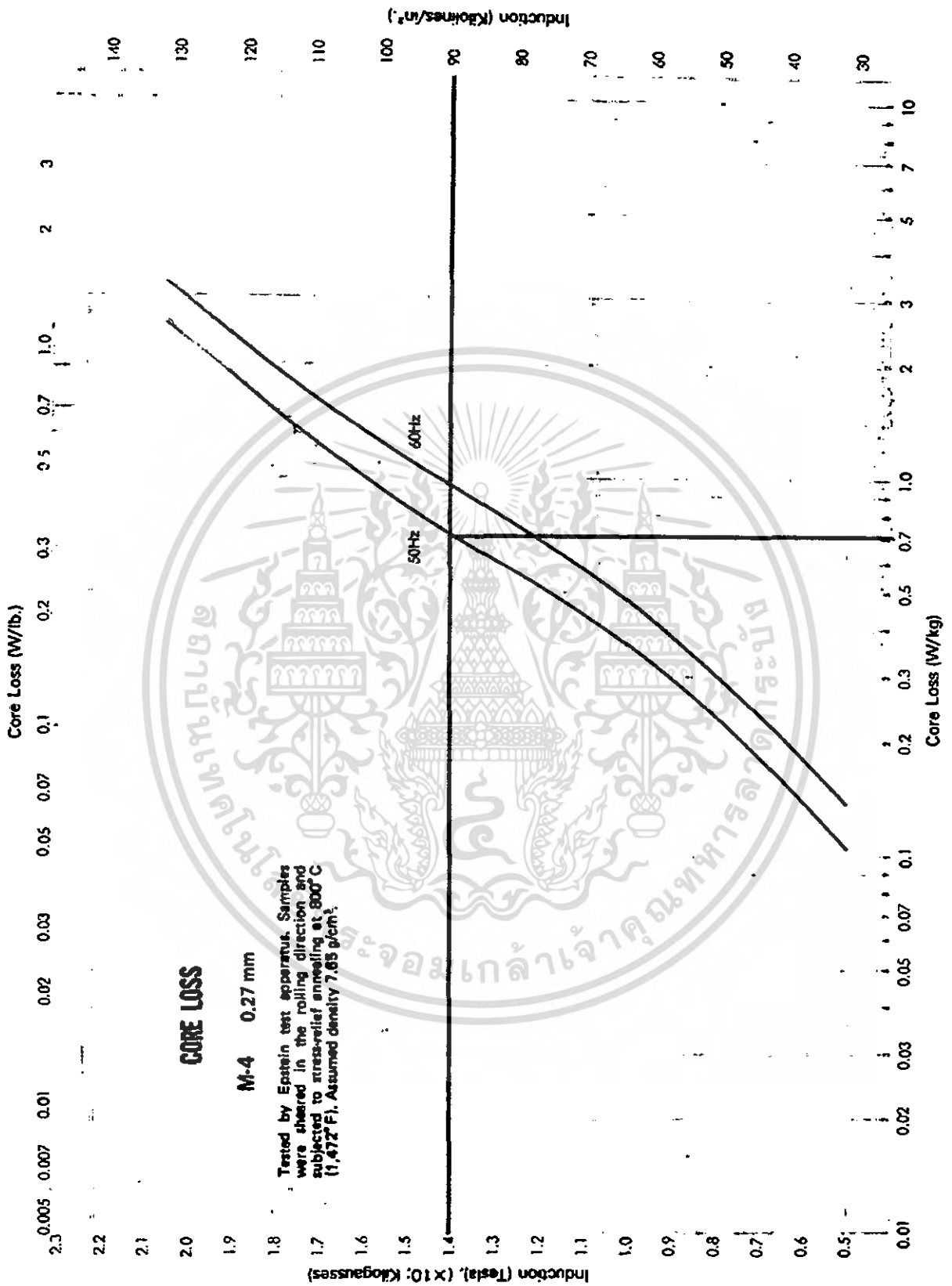
รูปที่ ก.1 กราฟ Exciting Force (A/m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



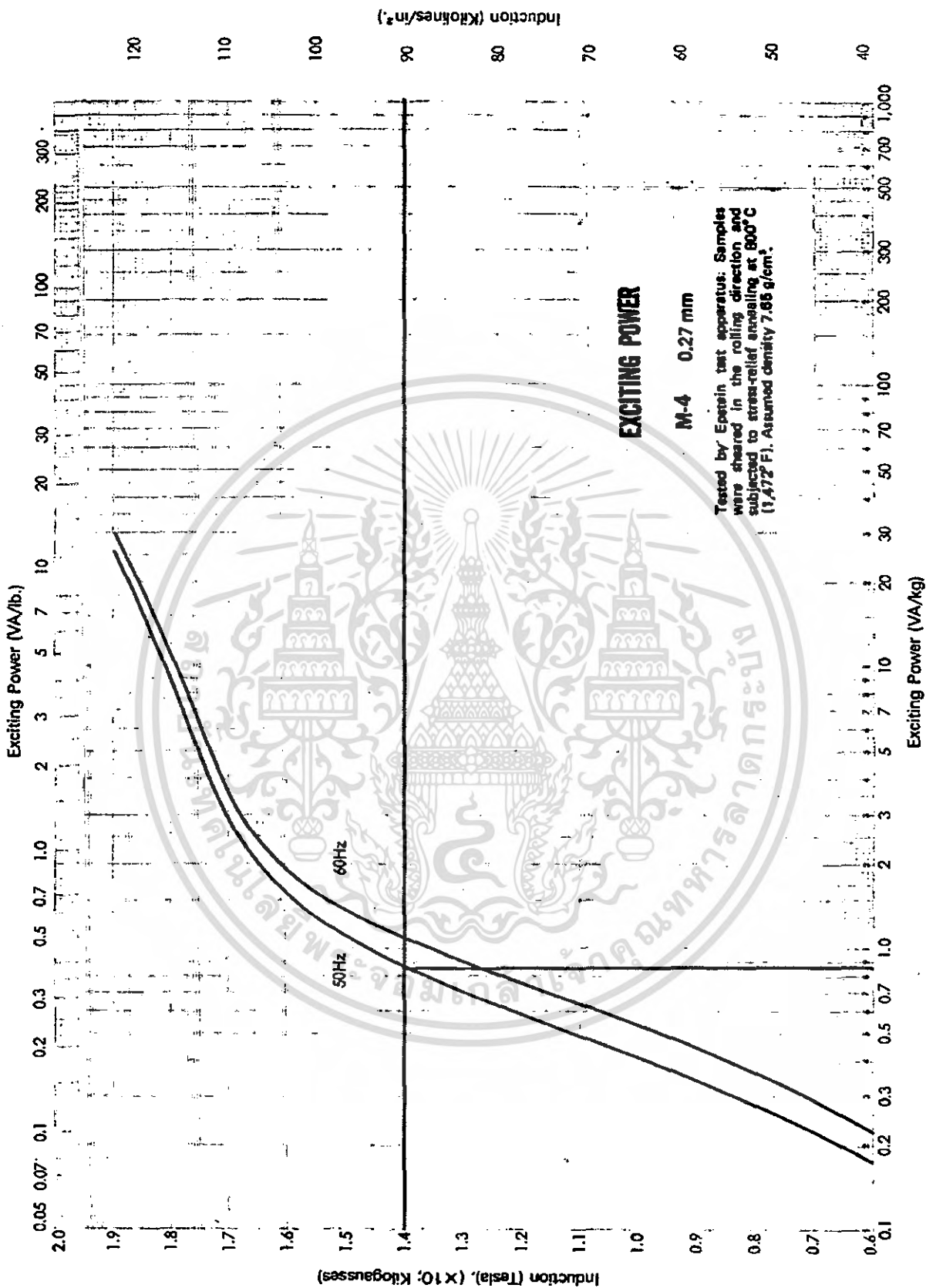
รูปที่ ก.2 กราฟ Magnetizing Force (A/m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.3 กราฟ Core Loss (W/kg)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.4 กราฟ Exciting Power (VA/kg)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Applications		Standard	Sizes	Color
Residential	Household water supply	TIS. 17-2532	1/2"-24"	Arctic blue
Industrial	Chemical products in factories	TIS. 999-2533	3/8"-24"	Dark grey
Industrial	Electrical wiring & telephone cable	TIS. 216-2524	3/8"-4"	Light yellow
Agricultural	Irrigation systems in farms, plantations, & low pressure applications	"Thai Pipe Standard"	1/4"-5"	Grey

Specifications

1. uPVC Pipes for Drinking Water Service with Both Plain End (in arctic blue color) For portable water supply and distribution, drainage, and sewerage.



Manufactured in conformity with TIS. 17-2532 "Standard for Unplasticized Polyvinyl Chloride Pipes for Drinking Water Service."

Unit: mm

Nominal Size	Outside Diameter	Thickness			Length	Weight per Length (Kg)			
		PVC 5	PVC 8.5	PVC 13.5		PVC 5	PVC 8.5	PVC 13.5	
18 (3/4")	22±0.15	-	2.0±0.20	2.5±0.20	4000	-	0.72	0.88	
20 (3/4")	26±0.15	-	2.0±0.20	2.5±0.20		-	0.86	1.06	
25 (1")	34±0.15	-	2.0±0.20	3.0±0.25		-	1.15	1.67	
35 (1 1/4")	42±0.15	1.5±0.15	2.0±0.20	3.1±0.25		1.09	1.44	2.17	
40 (1 1/2")	48±0.15	1.5±0.15	2.3±0.20	3.5±0.25		1.25	1.89	2.80	
55 (2")	60±0.15	1.8±0.20	2.9±0.25	4.3±0.30		1.88	2.98	4.30	
65 (2 1/2")	76±0.20	2.2±0.20	3.5±0.25	5.4±0.35		2.92	4.56	6.85	
80 (3")	89±0.20	2.5±0.20	4.1±0.30	6.4±0.40		3.89	6.26	9.50	
100 (4")	114±0.30	3.2±0.25	5.2±0.35	8.1±0.50		6.37	10.17	15.41	
125 (5")	140±0.30	3.9±0.30	6.4±0.40	9.9±0.55		9.55	15.40	23.23	
150 (6")	165±0.40	4.6±0.30	7.5±0.45	11.7±0.65		13.28	21.29	32.37	
200 (8")	216±0.50	5.4±0.35	8.8±0.50	13.7±0.75		20.48	32.87	50.06	
250 (10")	267±0.70	6.6±0.40	10.9±0.60	16.9±0.90		+30	30.98	50.37	78.43
300 (12")	318±0.80	7.8±0.45	12.9±0.70	20.1±1.05		43.61	71.07	108.40	
350 (14")	370±0.90	9.1±0.55	15.0±0.80	23.4±1.20		59.22	96.22	147.01	
400 (16")	420±1.10	10.3±0.60	17.0±0.90	26.5±1.35		-0	76.12	123.89	189.23
450 (18")	470±1.20	11.5±0.65	19.0±1.00	29.7±1.50		95.16	155.07	237.58	
500 (20")	520±1.30	12.7±0.70	21.0±1.10	32.8±1.65		116.32	189.78	290.65	
600 (24")	630±1.60	15.3±0.80	25.4±1.30	39.7±2.00	169.97	278.57	427.32		

Note:

1. Working pressures of PVC pipes class PVC 5, PVC 8.5 and PVC 13.5 are 5, 8.5 and 13.5 kgf/cm² at 27°C respectively.
2. Pipe length differs from the standard 4000 mm can be made. Please contact our sales department for special arrangement.
3. Weight per length in the table above are approximated values.

รูปที่ ก.5 ขนาดท่อพีวีซีที่ใช้เป็นตัวถังของหม้อแปลง

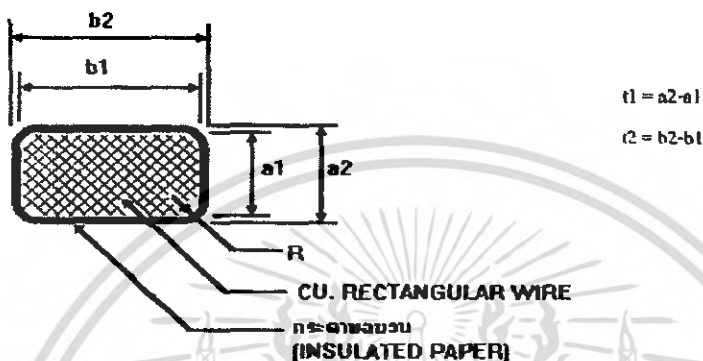
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลวดสี่เหลี่ยมทองแดงหุ้มกระดาษ

ขอบเขตการใช้งาน ใช้สำหรับการพันคอยล์ สำหรับ OIL-IMMERSED TRANSFORMER

คุณสมบัติที่ระบุไว้ มาตรฐาน BS 4653

แบบชิ้นงานและขนาด



รายละเอียดของรายการวัสดุ หมายเลขชิ้นงาน / "ลวดสี่เหลี่ยมทองแดงหุ้มกระดาษ" / ความหนา x ความกว้าง

ORIGINAL

Revision	01	STANDARDS PART MANUAL	TTS - 03
Date	พ.ศ. 2562	คู่มือชิ้นส่วนมาตรฐาน	
QA Manager	<i>[Signature]</i>	บริษัท ไทย ทรานโฟ มานูแฟกเจอริง จำกัด	Page 1 of 5
EN Manager	<i>[Signature]</i>	THAI TRAF0 MANUFACTURING CO.,LTD.	

รูปที่ ก.6 ขนาดลวดสี่เหลี่ยมทองแดงหุ้มกระดาษที่ใช้เป็นขดลวดแรงต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดค้ำฟ้า (มม.)				ความหนา กระดาษ t และ l2 (มม.)	ความค้ำฟ้า (@ 20 ° C (kg/m) Maximum	%การยืดตัว Elongation 30cm gauge length (%)	รัศมี ความโค้ง R (มม.)	หมายเลขชิ้นส่วน
a1		b1						
STD	(±)	STD	(±)					
1.40	0.03	9.00	0.07	0.5	1.4344	Min.30	0.50	0031-0514-0090
1.50	0.03	6.00	0.05	0.5	2.0208	Min.30	0.50	0031-0515-0060
1.50	0.03	7.00	0.07	0.5	1.7289	Min.30	0.50	0031-0515-0070
1.50	0.03	8.00	0.07	0.5	1.5061	Min.30	0.50	0031-0515-0080
1.50	0.03	9.00	0.07	0.5	1.3250	Min.30	0.50	0031-0515-0090
1.50	0.03	10.00	0.07	0.5	1.1988	Min.30	0.50	0031-0515-0100
1.50	0.03	12.00	0.07	0.5	0.9953	Min.30	0.50	0031-0515-0120
1.60	0.03	5.00	0.05	0.5	2.2611	Min.30	0.50	0031-0516-0050
1.60	0.03	5.50	0.05	0.5	2.0668	Min.30	0.50	0031-0516-0055
1.60	0.03	6.70	0.05	0.5	1.6756	Min.30	0.50	0031-0516-0055
1.60	0.03	8.50	0.07	0.5	1.3242	Min.30	0.50	0031-0516-0085
1.70	0.03	8.20	0.07	0.5	1.3047	Min.30	0.65	0031-0517-0082
1.70	0.03	12.00	0.07	0.5	0.9814	Min.30	0.65	0031-0517-0120
1.80	0.03	5.20	0.05	0.5	1.9565	Min.30	0.65	0031-0518-0052
1.80	0.03	6.30	0.07	0.5	1.6127	Min.30	0.65	0031-0518-0063
1.80	0.03	8.20	0.07	0.5	1.2291	Min.30	0.65	0031-0518-0082
1.80	0.03	11.00	0.07	0.5	0.9082	Min.30	0.65	0031-0518-0110
1.80	0.03	12.00	0.07	0.5	0.8307	Min.30	0.65	0031-0518-0120
1.90	0.03	8.70	0.07	0.5	1.0929	Min.30	0.65	0031-0519-0087
2.00	0.03	4.00	0.05	0.5	2.3240	Min.30	0.65	0031-0520-0040
2.00	0.03	6.00	0.05	0.5	1.5179	Min.30	0.65	0031-0520-0060
2.00	0.03	6.50	0.07	0.5	1.4012	Min.30	0.65	0031-0520-0065
2.00	0.03	7.00	0.07	0.5	1.2974	Min.30	0.65	0031-0520-0070
2.00	0.03	8.00	0.07	0.5	1.1299	Min.30	0.65	0031-0520-0080
2.00	0.03	9.00	0.07	0.5	1.0007	Min.30	0.65	0031-0520-0090
2.00	0.03	9.50	0.07	0.5	0.9703	Min.30	0.65	0031-0520-0095
2.00	0.03	10.00	0.07	0.5	0.8980	Min.30	0.65	0031-0520-0100
2.00	0.03	11.00	0.07	0.5	0.8145	Min.30	0.65	0031-0520-0110
2.00	0.03	12.00	0.07	0.5	0.7451	Min.30	0.65	0031-0520-0120
2.00	0.03	13.00	0.10	0.5	0.6882	Min.30	0.65	0031-0520-0130
2.20	0.03	6.50	0.07	0.5	1.2630	Min.30	0.65	0031-0522-0065
2.20	0.03	8.00	0.07	0.5	1.0234	Min.30	0.65	0031-0522-0080
2.24	0.03	12.50	0.07	0.5	0.6360	Min.30	0.65	0031-0522-4125
2.25	0.03	7.10	0.07	0.5	1.1690	Min.30	0.65	0031-0522-5071
2.40	0.03	9.30	0.07	0.5	0.8084	Min.30	0.65	0031-0524-0093
2.50	0.03	4.00	0.05	0.5	1.8726	Min.30	0.80	0031-0525-0040
2.50	0.03	6.00	0.05	0.5	1.4765	Min.30	0.80	0031-0525-0060
2.50	0.03	8.00	0.07	0.5	0.9102	Min.30	0.80	0031-0525-0080
2.50	0.03	9.00	0.07	0.5	0.8017	Min.30	0.80	0031-0525-0090
2.50	0.03	9.80	0.07	0.5	0.7468	Min.30	0.80	0031-0525-0098
2.50	0.03	10.00	0.07	0.5	0.71907	Min.30	0.80	0031-0525-0100
2.50	0.03	12.00	0.07	0.5	0.5962	Min.30	0.80	0031-0525-0120
2.50	0.03	13.00	0.07	0.5	0.5540	Min.30	0.80	0031-0525-0130

ค่าความต้านแรงดึง (Tensile Strength) สูงสุด = 263 N/mm²

Revision	01	STANDARDS PART M	TTS - 03
Date	2542		
QA Manager		บริษัท ไทย ทรานโซ มานูแฟกเจอริง จำกัด	Page 2 of 5
EN Manager		THAI TRAF0 MANUFACTURING CO.,LTD.	

รูปที่ ก.7 ขนาดของลวดสี่เหลี่ยมทองแดงหุ้มกระดาษที่ใช้เป็นขดลวดแรงต่ำ(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดลำตัว (mm.)				ความหนา กระดาษทวน (1 และ 2 (ม.ม.))	ความเค้นทวน (@ 20 ° C (mm ² /cm) Maximum	%การยืดตัว Elongation 30cm gauge length (%)	รัศมี ความโค้ง R (mm.)	หมายเลขชิ้นส่วน
a1		b1						
STD	(±)	STD	(±)					
2.60	0.03	8.00	0.07	0.5	0.8684	Min.35	0.80	0031-0526-0080
2.60	0.03	9.50	0.07	0.5	0.7226	Min.35	0.80	0031-0526-0095
2.60	0.03	10.00	0.07	0.5	0.6904	Min.35	0.80	0031-0526-0100
2.60	0.03	11.00	0.07	0.5	0.6260	Min.35	0.80	0031-0526-0110
2.60	0.03	14.60	0.10	0.5	0.4696	Min.35	0.80	0031-0526-0146
2.70	0.03	8.00	0.07	0.5	0.8360	Min.35	0.80	0031-0527-0080
2.70	0.03	9.00	0.07	0.5	0.7412	Min.35	0.80	0031-0527-0090
2.70	0.03	9.20	0.07	0.5	0.7340	Min.35	0.80	0031-0527-0092
2.70	0.03	12.00	0.07	0.5	0.5508	Min.35	0.80	0031-0527-0120
2.80	0.03	5.50	0.05	0.5	1.1852	Min.35	0.80	0031-0528-0055
2.80	0.03	6.00	0.05	0.5	1.0822	Min.35	0.80	0031-0528-0060
2.80	0.03	8.00	0.07	0.5	0.8050	Min.35	0.80	0031-0528-0080
2.80	0.03	8.50	0.07	0.5	0.7562	Min.35	0.80	0031-0528-0085
2.80	0.03	10.00	0.07	0.8	0.6984	Min.35	0.80	0031-0528-0100
2.80	0.03	11.00	0.07	0.8	0.6033	Min.35	0.80	0031-0528-0110
2.85	0.03	10.00	0.07	0.8	0.6769	Min.35	0.80	0031-0528-5100
2.80	0.03	10.80	0.07	0.5	0.5910	Min.35	0.80	0031-0528-0108
2.90	0.03	9.60	0.07	0.5	0.6669	Min.35	0.80	0031-0529-0096
3.00	0.03	4.00	0.05	0.5	1.5417	Min.35	0.80	0031-0530-0040
3.00	0.03	4.30	0.05	0.5	1.4280	Min.35	0.80	0031-0530-0043
3.00	0.03	4.50	0.05	0.5	1.3411	Min.35	0.80	0031-0530-0045
3.00	0.03	6.00	0.05	0.5	1.0070	Min.35	0.80	0031-0530-0060
3.00	0.03	7.00	0.07	0.5	0.8607	Min.35	0.80	0031-0530-0070
3.00	0.03	8.00	0.07	0.5	0.7496	Min.35	0.80	0031-0530-0080
3.00	0.03	8.20	0.07	0.5	0.7364	Min.35	0.80	0031-0530-0082
3.00	0.03	9.00	0.07	0.5	0.6683	Min.35	0.80	0031-0530-0090
3.00	0.03	9.50	0.07	0.5	0.6337	Min.35	0.80	0031-0530-0095
3.00	0.03	10.00	0.07	0.5	0.5957	Min.35	0.80	0031-0530-0100
3.00	0.03	11.00	0.07	0.5	0.5403	Min.35	0.80	0031-0530-0110
3.00	0.03	12.00	0.07	0.5	0.4943	Min.35	0.80	0031-0530-0120
3.00	0.03	12.80	0.10	0.5	0.4638	Min.35	0.80	0031-0530-0128
3.00	0.03	13.00	0.10	0.5	0.4566	Min.35	0.80	0031-0530-0130
3.00	0.03	14.00	0.10	0.5	0.4232	Min.35	0.80	0031-0530-0140
3.00	0.03	14.50	0.10	0.5	0.4249	Min.35	0.80	0031-0530-0145
3.00	0.03	15.00	0.10	0.5	0.3945	Min.35	0.80	0031-0530-0150
3.00	0.03	18.30	0.10	0.5	0.3222	Min.35	0.80	0031-0530-0183

ค่าความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) สูงสุด = 255 N/mm²

ORIGINAL

Revision	01	STANDARDS PART MANUAL	TTS - 03
Date	พ. 2562	คู่มือชิ้นส่วนมาตรฐาน	
QA Manager		บริษัท ไทย ทรานส์ แมคคาทรอนิกส์ จำกัด	Page 3 of 5
EN Manager		THAI TRAFU MANUFACTURING CO.,LTD.	

รูปที่ ก.8 ขนาดลวดสี่เหลี่ยมทองแดงหุ้มกระดาษที่ใช้เป็นขดลวดแรงต่ำ(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดตัวนำ (mm.)				ความหนา กระดาษ (1 และ 2 มม.)	ความต้านทาน (ที่ 20 °C (Ω/ม) Maximum	%การยืดตัว Elongation 30cm gauge length (%)	รัศมี ความโค้ง R (mm.)	หมายเลขชิ้นงาน
a1		b1						
STD	(±)	STD	(±)					
3.10	0.03	8.30	0.07	0.5	0.7064	Min.35	0.80	0031-0531-0083
3.10	0.03	3.80	0.05	0.5	1.6182	Min.35	0.80	0031-0531-0038
3.10	0.03	11.40	0.07	0.5	0.5065	Min.35	0.80	0031-0531-0114
3.10	0.03	14.40	0.1	0.5	0.4015	Min.35	0.80	0031-0531-0144
3.20	0.05	7.00	0.07	0.5	0.8102	Min.35	0.80	0031-0532-0070
3.20	0.05	7.50	0.07	0.5	0.7543	Min.35	0.80	0031-0532-0075
3.20	0.05	9.00	0.07	0.5	0.6231	Min.35	0.80	0031-0532-0090
3.20	0.05	9.50	0.07	0.5	0.6114	Min.35	0.80	0031-0532-0095
3.20	0.05	10.00	0.07	0.5	0.5803	Min.35	0.80	0031-0532-0100
3.20	0.05	11.00	0.07	0.5	0.5126	Min.35	0.80	0031-0532-0110
3.40	0.05	6.30	0.05	0.5	0.8301	Min.35	0.80	0031-0534-0063
3.40	0.05	7.00	0.07	0.5	0.7606	Min.35	0.80	0031-0534-0070
3.40	0.05	9.00	0.07	0.5	0.5871	Min.35	0.80	0031-0534-0090
3.40	0.05	10.00	0.07	0.5	0.5271	Min.35	0.80	0031-0534-0100
3.40	0.05	11.00	0.07	0.5	0.4772	Min.35	0.80	0031-0534-0110
3.40	0.05	12.00	0.07	0.5	0.4374	Min.35	0.80	0031-0534-0120
3.40	0.05	13.00	0.10	0.5	0.4041	Min.35	0.80	0031-0534-0130
3.50	0.05	5.00	0.05	0.5	1.0431	Min.35	0.80	0031-0535-0050
3.50	0.05	5.50	0.05	0.5	0.9445	Min.35	0.80	0031-0535-0055
3.50	0.05	6.00	0.05	0.5	0.8460	Min.35	0.80	0031-0535-0060
3.50	0.05	9.10	0.07	0.5	0.5508	Min.35	0.80	0031-0535-0091
3.50	0.05	10.0	0.07	0.5	0.5139	Min.35	0.80	0031-0535-0100
3.50	0.05	11.40	0.07	0.5	0.4498	Min.35	0.80	0031-0535-0114
3.50	0.05	14.00	0.10	0.5	0.3637	Min.35	0.80	0031-0535-0140
3.60	0.05	6.00	0.05	0.5	0.8508	Min.35	1.00	0031-0536-0060
3.60	0.05	9.00	0.07	0.5	0.5580	Min.35	1.00	0031-0536-0090
3.60	0.05	9.50	0.07	0.5	0.5285	Min.35	1.00	0031-0536-0095
3.60	0.05	10.00	0.07	0.5	0.5103	Min.35	1.00	0031-0536-0100
3.60	0.05	12.00	0.07	0.5	0.4155	Min.35	1.00	0031-0536-0120
3.60	0.05	12.80	0.07	0.5	0.3893	Min.35	1.00	0031-0536-0128
3.60	0.05	14.40	0.07	0.5	0.3473	Min.35	1.00	0031-0536-0144
3.70	0.05	6.00	0.05	0.5	0.8266	Min.35	1.00	0031-0537-0060
3.70	0.05	12.50	0.07	0.5	0.3878	Min.35	1.00	0031-0537-0125
3.80	0.05	7.00	0.07	0.5	0.6461	Min.35	1.00	0031-0538-0070
3.80	0.05	10.00	0.07	0.5	0.4739	Min.35	1.00	0031-0538-0100
3.80	0.05	11.00	0.07	0.5	0.4296	Min.35	1.00	0031-0538-0110
3.80	0.05	12.00	0.07	0.5	0.3929	Min.35	1.00	0031-0538-0120
3.80	0.05	15.00	0.10	0.5	0.3133	Min.35	1.00	0031-0538-0150

ค่าความแข็งแรงตึง (Tensile Strength) สูงสุด : 255 N/mm²

ORIGINAL

Revision	01	STANDARDS PART MANUAL	TIS-03
Date	5 มี.ค. 2547	ผู้เขียน: วัฒนพร พงษ์	
QA Manager	<i>[Signature]</i>	บริษัท ไทย ทรานโซล แมนูแฟคเจอริ่ง จำกัด	Page 4 of 5
EN Manager	<i>[Signature]</i>	THAI TRAFU MANUFACTURING CO.,LTD.	

รูปที่ ก.9 ขนาดลวดสี่เหลี่ยมทองแดงหุ้มกระดาษที่ใช้เป็นขดลวดแรงต่ำ(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉนวนลวดนำยา

คุณสมบัติพื้นฐาน

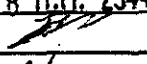
1 ชื่อทั่วไป	PVF ฉนวนทองแดงเคลือบ โพลีไวเนิล ฟอร์มัลลีน (Polyvinyl Formal Copper Wire)
มาตรฐาน	JIS C3202 หรือ มอก. 82-2527
ชนิด	ทนน้ำมันหรือเปลือง
ขนาด	เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 ถึง 3.20 มม.
ระดับอุณหภูมิใช้งาน	E 120 องศา C
ความหนาของฟิล์มนำยา	JIS Class 1

2 ชื่อทั่วไป	EIW ฉนวนทองแดงเคลือบ Polyester - imide wire
มาตรฐาน	JIS C3202 หรือ มอก. 299-2522
ชนิด	ทนน้ำมันหรือเปลือง
ขนาด	เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 ถึง 3.20 มม.
ระดับอุณหภูมิใช้งาน	H 180 องศา C
ความหนาของฟิล์มนำยา	JIS Class 1

ORIGINAL

รายละเอียดของรายการวัสดุ

หมอกฉนวนลวดนำยา / ฉนวนลวดนำยา / ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

Revision	03	STANDARDS PART MANUAL	TTS - 02
Date	18 ก.ค. 2544	คู่มือชิ้นส่วนมาตรฐาน	
QA Manager		บริษัท ไทย ทรานส์ แมนูแฟคเจอร์ริง จำกัด	Page 1 of 3
EN Manager		THAI TRAFU MANUFACTURING CO.,LTD.	

รูปที่ ก.10 ขนาดลวดลวดนำยาที่ใช้เป็นขดลวดแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ENAMELLED WIRE DATA (METRIC UNIT)

漆包線漆膜厚度及外徑 (公制)

CONDUCTOR		TYPE 0		TYPE 1		TYPE 2	
SWG WIRE NO.	DIAMETER	MIN. FILM THICKNESS	MAX. OVERALL DIAMETER	MIN. FILM THICKNESS	MAX. OVERALL DIAMETER	MIN. FILM THICKNESS	MAX. OVERALL DIAMETER
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
10	3.2	0.049	3.309	0.034	3.338	-	-
-	3.0	0.049	3.178	0.034	3.128	-	-
11	2.9	0.049	3.078	0.034	3.028	-	-
-	2.8	0.049	2.978	0.034	2.927	-	-
-	2.7	0.049	2.878	0.034	2.828	-	-
12	2.6	0.049	2.778	0.034	2.728	-	-
-	2.5	0.049	2.678	0.034	2.628	-	-
-	2.4	0.048	2.574	0.033	2.526	-	-
13	2.3	0.046	2.468	0.032	2.422	-	-
-	2.2	0.046	2.368	0.032	2.322	-	-
-	2.1	0.045	2.266	0.031	2.220	-	-
14	2.0	0.044	2.162	0.030	2.118	-	-
-	1.90	0.044	2.062	0.030	2.018	-	-
15	1.80	0.042	1.956	0.029	1.914	-	-
-	1.70	0.042	1.856	0.029	1.814	-	-
16	1.60	0.041	1.754	0.028	1.712	-	-
-	1.50	0.041	1.654	0.028	1.612	-	-
17	1.40	0.038	1.548	0.027	1.508	-	-
-	1.30	0.038	1.448	0.027	1.408	-	-
18	1.20	0.037	1.342	0.026	1.304	-	-
-	1.10	0.037	1.242	0.026	1.204	-	-
19	1.00	0.036	1.138	0.025	1.102	0.017	1.062
-	0.95	0.034	1.072	0.024	1.038	0.017	1.008
20	0.90	0.033	1.020	0.023	0.986	0.016	0.956
-	0.85	0.032	0.966	0.022	0.934	0.015	0.904
21	0.80	0.031	0.914	0.021	0.882	0.015	0.852
-	0.75	0.030	0.860	0.020	0.830	0.014	0.798
22	0.70	0.028	0.804	0.019	0.776	0.013	0.746
-	0.65	0.027	0.752	0.018	0.724	0.012	0.696
23	0.60	0.026	0.698	0.017	0.672	0.012	0.644
24	0.55	0.025	0.646	0.017	0.620	0.012	0.592
25	0.50	0.025	0.586	0.017	0.560	0.012	0.542
26	0.45	0.024	0.532	0.016	0.508	0.011	0.490
27	0.40	0.023	0.480	0.015	0.456	0.011	0.439
28	0.37	0.022	0.446	0.014	0.424	0.010	0.407
29	0.35	0.021	0.424	0.014	0.402	0.010	0.387
30	0.32	0.021	0.394	0.014	0.372	0.010	0.357
-	0.30	0.021	0.374	0.014	0.352	0.010	0.337
31	0.29	0.020	0.360	0.013	0.340	0.009	0.324
-	0.28	0.020	0.350	0.013	0.330	0.009	0.314
32	0.27	0.020	0.340	0.013	0.320	0.009	0.304
-	0.26	0.020	0.330	0.013	0.310	0.009	0.294
33	0.25	0.020	0.318	0.013	0.298	0.009	0.284
-	0.24	0.020	0.309	0.013	0.288	0.009	0.274
34	0.23	0.020	0.298	0.013	0.278	0.009	0.264
-	0.22	0.019	0.286	0.012	0.266	0.008	0.252
35	0.21	0.019	0.276	0.012	0.256	0.008	0.241
-	0.20	0.019	0.266	0.012	0.246	0.008	0.231
36	0.19	0.019	0.256	0.012	0.236	0.008	0.221
-	0.18	0.019	0.246	0.012	0.226	0.008	0.211
37	0.17	0.018	0.232	0.011	0.214	0.007	0.199
-	0.16	0.018	0.222	0.011	0.204	0.007	0.189
38	0.15	0.017	0.210	0.010	0.192	0.006	0.177
-	0.14	0.017	0.200	0.010	0.182	0.006	0.167
39	0.13	0.017	0.190	0.010	0.172	0.006	0.157
40	0.12	0.017	0.180	0.010	0.162	0.006	0.147
41	0.11	0.016	0.166	0.009	0.150	0.005	0.135
42	0.10	0.016	0.156	0.009	0.140	0.005	0.125
43	0.09	-	-	-	-	0.005	0.113
44	0.08	-	-	-	-	0.005	0.103
45	0.07	-	-	-	-	0.004	0.091
46	0.06	-	-	-	-	0.004	0.091
47	0.05	-	-	-	-	0.004	0.069
48	0.04	-	-	-	-	0.003	0.056

รูปที่ ก.11 ขนาดลวดอาบนํ้ายาที่ใช้เป็นขลวดแรงสูง(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. PVF (E 120 °C)

เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	พิทช์เชื้อ (มม.)	Min. dielectric breakdown voltage (kV)	Class I		ความต้านทาน สูงที่สุดที่ 20 °C (มโวลต์/ม)	Min. elongation %	หมายเลขชิ้นส่วน
			ความหนาที่พิมพ์ (มม.) Min.	เส้นผ่านศูนย์กลาง รวม(มม.) Max.			
0.30	±0.01	2.800	0.014	0.352	262.9	20.0	0021-0300-0000
0.45	±0.01	2.800	0.016	0.508	114.2	20.0	0021-0450-0000
0.55	±0.02	3.050	0.017	0.620	78.15	20.0	0021-0550-0000
0.60	±0.02	3.050	0.017	0.672	65.26	20.0	0021-0600-0000
0.63	±0.006	3.050	0.017	0.694	59.02	30	0021-0630-0000
0.65	±0.02	3.050	0.018	0.724	55.31	20.0	0021-0650-0000
0.70	±0.02	3.050	0.019	0.776	47.47	20.0	0021-0700-0000
0.75	±0.02	3.400	0.020	0.830	41.19	20.0	0021-0750-0000
0.80	±0.02	3.400	0.021	0.882	36.08	25.0	0021-0800-0000
0.85	±0.02	3.400	0.022	0.934	31.87	25.0	0021-0850-0000
0.90	±0.02	3.400	0.023	0.986	28.35	25.0	0021-0900-0000
1.00	±0.03	3.400	0.025	1.102	23.33	25.0	0021-1000-0000
1.10	±0.03	4.150	0.026	1.204	19.17	25.0	0021-1100-0000
1.20	±0.03	4.150	0.026	1.304	16.04	25.0	0021-1200-0000
1.30	±0.03	4.150	0.027	1.408	13.61	25.0	0021-1300-0000
1.40	±0.03	4.150	0.027	1.508	11.70	25.0	0021-1400-0000
1.50	±0.03	4.150	0.028	1.608	10.16	25.0	0021-1500-0000
1.60	±0.03	4.150	0.028	1.712	8.906	25.0	0021-1600-0000
1.70	±0.03	4.350	0.029	1.814	7.871	25.0	0021-1700-0000
1.80	±0.03	4.350	0.029	1.914	7.007	25.0	0021-1800-0000
1.90	±0.03	4.350	0.030	2.018	6.278	25.0	0021-1900-0000
2.00	±0.03	4.350	0.030	2.118	5.656	30.0	0021-2000-0000
2.10	±0.03	4.350	0.031	2.220	5.123	30.0	0021-2100-0000
2.20	±0.03	4.350	0.032	2.322	4.662	30.0	0021-2200-0000
2.30	±0.03	4.350	0.032	2.422	4.260	30.0	0021-2300-0000
2.40	±0.03	4.350	0.033	2.526	3.908	30.0	0021-2400-0000
2.50	±0.03	4.350	0.034	2.628	3.598	30.0	0021-2500-0000
2.60	±0.03	4.350	0.034	2.728	3.324	30.0	0021-2600-0000
2.70	±0.03	4.350	0.034	2.828	3.079	30.0	0021-2700-0000
2.80	±0.03	4.350	0.034	2.928	2.861	30.0	0021-2800-0000
2.90	±0.03	4.350	0.034	3.028	2.665	30.0	0021-2900-0000
3.00	±0.03	4.350	0.034	3.128	2.489	30.0	0021-3000-0000
3.20	±0.04	4.350	0.034	3.338	2.198	30.0	0021-3200-0000

* คิวคิวที่มีจากบริษัท siam pacific electric wire & cable

Revision	03	STANDARDS PART MANUAL คู่มือชิ้นส่วนมาตรฐาน	TTS - 02
Date	18 ก.ค. 2544		
QA Manager		บริษัท ไทย ทรานส์ ฟอสฟอไรต์ จำกัด	Page 2 of 3
EN Manager		THAI TRAFU MANUFACTURING CO.,LTD.	

รูปที่ ก.12 ขนาดลวดอานนำยาที่ใช้เป็นขลวดแรงสูง(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระดาษฉนวน

ขอบเขตการใช้งาน ลักษณะของกระดาษฉนวนที่ใช้แบ่งออกเป็น 4 ประเภท ดังนี้

INSULATION PAPER (KRAFT PAPER)

ใช้เป็นฉนวนกันระหว่างชั้น (layer) ของขดลวด หรือกันระหว่างขดลวดแรงต่ำและขดลวดแรงสูง

PRESS BOARD

- 1 ใช้เป็นฉนวนปิดหัวและท้ายของขดลวด
- 2 ใช้ทำกระดาษลูกฟูก หรือกระดาษรองน้ำมัน เพื่อการไหลของน้ำมันช่วยในการระบายความร้อน
- 3 เป็นฉนวนในการรองรับระหว่างขดลวดและโครงสร้าง
- 4 ใช้ในการฉนวนรูปสำหรับพันขดลวดแรงต่ำ หรือขดลวดแรงสูง

CREPED PAPER

ใช้สำหรับพันสายตัวนำ ที่ต้องการความยืดหยุ่น

THERMOPOX



ใช้เป็นฉนวน (insulation layer) สำหรับแผ่น Foil แบบ double sides

คุณสมบัติพื้นฐาน : ใช้นาครฐาน JIS C-2305 (class 2)

IEC 641-3-1 (type B.2.1 , B.3.1 , B.4.1)

DIN 7733

ORIGINAL

Revision	01	STANDARDS PART MANUAL	TTS - 22
Date	- 1 ก.ย. 2542	คู่มือชิ้นส่วนมาตรฐาน	
QA Manager		บริษัท ไทย ทรานส์ แมกนูฟักเจอริง จำกัด	Page 1 of 14
EN Manager		THAI TRAFU MANUFACTURING CO.,LTD.	

รูปที่ ก.13 ขนาดและคุณสมบัติกระดาษฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INSULATION PAPER / PRESS BOARD ที่ใช้ตามมาตรฐานทั้งต่อไป

JIS C-2305 (class 2)

Thickness (mm.)	Density g/cm ³	Tensile strength		Elongation		Moisture content %	Ash content %	Dielectric break- down strength		Shrinkage %		
		MPa		%				kV/mm		MD	CD	TD
		MD	CD	MD	CD	%	%	AVE	Min.	Max.	Max.	Max.
		Min.	Min.	Min.	Min.							
0.13-0.8	0.95-1.30	70	30	1.5	4.0	10.0	1.0	9.0	6.5	1.0	2.0	8.0
0.8<= t <=3.0	0.95-1.30	70	35	1.5	4.0	10.0	1.0	7.0	5.0	1.0	2.0	8.0
3.0<= t	0.95-1.30	60	35	1.5	5.0	10.0	1.0	6.0	4.0	1.0	2.0	8.0

MD : Machine direction

CD : Cross direction

TD : Thickness direction

<= : มากกว่า หรือ เท่ากับ เช่น 1<= คือ ค่าที่ต้องทราบ ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 1

Revision	01	STANDARDS PART MANUAL	TTS - 22
Date	๒1 ก.ย. 2547	คู่มือรับเข้ามาตรฐาน	
QA Manager		บริษัท ไทย ทรานโซล มอนูแฟคเจอริง จำกัด	Page 2 of 14
EN Manager		THAI TRAF0 MANUFACTURING CO.,LTD.	

รูปที่ ก.14 ขนาดและคุณสมบัติกระดาษฉนวน(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. DESCRIPTION

THERMOKRAFT - insulating paper is made of 100 % pure sulphate cellulose. It contains neither sizing nor loading materials.

2. APPLICATION

THERMOKRAFT - insulating paper is used for the insulation of conductors and coils in the transformer as well as for the insulation of power cables.

3. ADVANTAGES

The strength properties of THERMOKRAFT insulating paper allow a high taping speed. The result of the high concentration of fibres in the calendered type is the excellent breakdown strength.

4. GRADES

THERMOKRAFT - insulating paper is manufactured in uncalendered and calendered form according to type P-5238 resp. P-5538 of DIN 6740/41.

Mechanical and electrical values see catalogue sheet Nr. K 61-2.

5. SIZES

Thickness: 0.040 mm - 0.25 mm

Weight: 30 - 250 gr/m²

Width: standard - 1000 mm, 750 mm, 600 mm, 500 mm
narrow coils - 10 mm - 499 mm

Diameters: inside - 70 mm, 76 mm, 120 mm
outside - 500 mm - 1000 mm



บริษัท ไทย ทรานส์ จำกัด
THAI TRAF0 CO.LTD.

THERMOKRAFT - INSULATING PAPER

WEIDMANN

Nr.

K 61-1 E

(1)

Copyright by H. Weidmann Ltd, 8640 Rapperswil, Switzerland

รูปที่ ก.15 ขนาดและคุณสมบัติกระดาษฉนวน(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	<u>THERMOKRAFT uncalendered</u>	<u>THERMOKRAFT calendered</u>
Density	0.66 - 0.75	0.96 - 1.05
Tearing length	min. 8000 min. 3500	min. 8000 min. 3500
Elongation at break	min. 2 min. 4	min. 2 min. 4
Folding number	min. 600 min. 1000 min. 1500	min. 600 min. 1000 min. 1500
Ash content	max. 0.5	max. 0.5
Conductivity of aqueous extract	13	20
Dielectric dissipation factor at 23°C	0.0026	0.0030
Dielectric dissipation factor at 100°C	0.0038	0.0048
Breakdown strength in air	8 7	10 8
Breakdown strength in oil, one layer electrode \varnothing 50 mm, 50 Hz	60 55	75 65

Above values are typical test results of current productions, carried out in Weidmann Laboratories. These values do not stand for a specification of these products.



บริษัท ไทย ทรานโซ จำกัด
THAI TRAF0 CO.,LTD.

THERMOKRAFT - INSULATING PAPER

WEIDMANN

NR.

K 61-2 E
(1)

Copyright by H. Weidmann Ltd. 8640 Rapperswil, Switzerland

รูปที่ ก.16 ขนาดและคุณสมบัติกระดาษฉนวน(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THERMOPOX

Thermally upgraded kraft paper printed on both sides with B-stage resin dots which form a bonding and insulating system of excellent stability in hot transformer oil.

The resin is applied in dots forming squares of 9.5 mm edge length arranged in a diamond pattern.

1. APPLICATION

THERMOPOX can be used to bond together aluminium or copper winding foils, insulation layers, laminations and straps.

The pattern of B-stage resin dots ensures there is sufficient space between them for oil impregnation.

2. HOW TO USE

THERMOPOX can be applied in one or more layers between the parts to be insulated. Through heating in the drying oven, the thin layer of B-stage resin melts and cures. Through this process the layers are glued together. (see diagram 4.2.)

The space between dots allows free escape of air and moisture during drying and application of vacuum.

3. ADVANTAGES

When using THERMOPOX the winding layers are glued together and the complete winding becomes one solid block.

The short circuit strength of such a winding is considerably increased compared to conventional systems. Savings due to a reduction in support elements are possible.

The high tensile strength and elasticity of THERMOPOX permits its use in the coil-winding process.

The thermal upgrading of the base paper results in a 12 - 15 % higher thermal withstand capability compared to regular cellulose products.



บริษัท ไทย ทรานโซ ฟอร์มา
THAI TRAF0 CO.,LTD.

THERMOPOX R 8 / 12 / 18 / 25 / 38 / 50

WEIDMANN

Nr.

K 12 - 1 E
(2)

Copyright by H. Weidmann Ltd, 8540 Rapperswil, Switzerland

รูปที่ ก.17 ขนาดและคุณสมบัติกระดาษฉนวน(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. TECHNICAL DATA

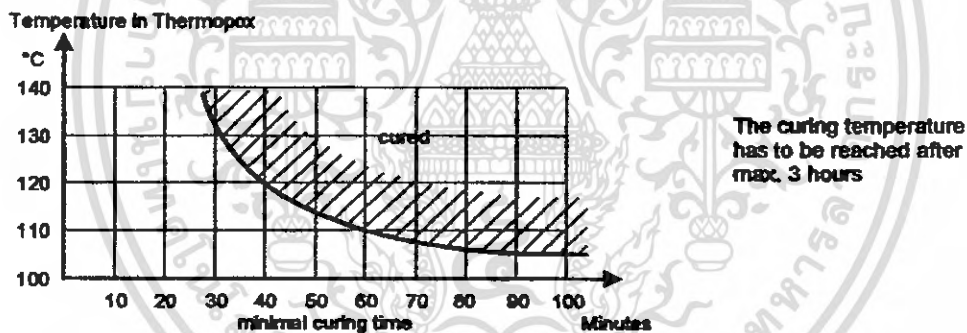
4.1 Physical characteristics

	Unit	Values						Standard	
Thickness	mm	0.08	0.12	0.18	0.25	0.38	0.50	IEC 641-2	
Thickness tolerance	± %	10	8						
Density	g/cm ³	0.95 - 1.05						IEC 641-2	
Sheet weight (coated) approx.	kg/m ²	0.080	0.140	0.180	0.280	0.400	0.520	IEC 641-2	
Tensile strength	MR QR	N/mm ²	100 40	105 40	110 40	115 40	120 35	125 35	IEC 641-2
Shrinkage when completely dried out *	MR QR	%	0.6				0.5	IEC 641-2	
pH of the aqueous extract			6-8					IEC 641-2	
Ash content	%		< 0.5					IEC 641-2	
Thickness of the resin coating	mm	0.010 - 0.014							
Electric strength	dry under oil	kV _{eff.}	0.8 6.5	1.2 8	1.6 10	2.1 12.6	3.0 16.5	3.8 18.7	IEC 243-1

* referred to the delivery condition 23° C, 50 % rel. humidity

4.2 Chemical characteristics

a) Curing cycle



A minimum temperature of 105 °C is required to cure the "B"-stage resin.



บริษัท ไทย ทรานโฟ จำกัด
THAI TRAF0 CO.,LTD.

THERMOPOX R 8 / 12 / 18 / 25 / 38 / 50	WEDMANN Nr. K 12 - 2 E (6)
--	---

Copyright by H. Weidmann Ltd. 8640 Rapperswil, Switzerland

รูปที่ ก.18 ขนาดและคุณสมบัติกระดาษฉนวน(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันหม้อแปลง

ขอบเขตการใช้งาน

ใช้ในหม้อแปลง OIL-FILLED TRANSFORMER

ความปลอดภัยและข้อควรระวัง

ควรใช้ให้ถูกต้องตามคำแนะนำของผู้ผลิต ว่าด้วยมาตรฐานทางสุขภาพและที่ติดตั้งในชั้นส่วนบุคคล และอุตสาหกรรม

Shell Dials AX หรือ AT

คุณสมบัติพื้นฐาน

(*) Dielectric strength,

ASTM D877-87 (89) [7],

30

VDE 0370

50

kV minimum

Power factor,

ASTM D924-82 (90) [9],

25 °C, % maximum :

0.05

100 °C, % maximum :

0.30

Interfacial tension,

ASTM D971-91 [10],

mN/m minimum :

40

Color,

ASTM D1500-91 [14],

ASTM units maximum :

0.5

(*) Visual examination,

ASTM D1524-84 [15] :

Bright and clear

Acid number,

ASTM D974-87 [11],

mg KOH/g maximum :

0.03

(*) Water content,

ASTM D1533-88 [16],

ppm maximum :

35

(*) Viscosity

40 deg C cst/sus

12.066 Max.

100 deg C cst/sus

3.0/16 Max.

ORIGINAL

Revision	02	STANDARDS PART MANUAL	TTS - 06
Date	27.4.01	คู่มือชิ้นส่วนมาตรฐาน	
QA Manager		บริษัท ไทย ทรานส์ แมนูแฟคเจอริ่ง จำกัด	Page 1 of 5
EN Manager		THAI TRAF0 MANUFACTURING CO.,LTD.	

รูปที่ ก.19 คุณสมบัติน้ำมันหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TECHNICAL BULLETIN



SHELL LUBRICANTS

SHELL DIALA® OILS

Electrical insulating oils for rapid heat transmission with high oxidation stability

MEETS ANSI/ASTM/NEMA STANDARDS

Product Description

Shell Diala® Oils meet standard specifications required by both ANSI/ASTM D 3487 and NEMA TR-P8-1975 for domestic electrical oil applications.

Two oils, designated Type I and Type II, are covered in these specifications. Type I oil is intended for use where normal oxidation resistance is required. Type II oil is for more severe service applications requiring greater oxidation resistance.

Diala A Oil meets the ANSI/ASTM/NEMA Type I requirements without the addition of an oxidation inhibitor. Diala AX Oil meets Type II requirements and contains approximately 0.2%w (2000 ppm) of oxidation inhibitor. Anti-oxidant concentration is varied to meet Rotating Bomb Oxidation Test requirements, but does not exceed 0.3%w maximum of Type II requirements.

Shell Diala base oils are highly-refined from low-pour point naphthenic lube crudes. As such, Diala Oils do not contain any polychlorinated biphenyls (PCBs). Results of quarterly testing certify that Shell Diala Oils are PCB-free.

Specifications

Shell Diala Oils meet standard specifications required by both ANSI/ASTM D 3487 and NEMA TR-P8-1975 for domestic electrical oil applications.

In addition, Diala Oils meet U.S. Government Military Specification VV-I-530A and Amendment 2 for Class I and Class II fluids (Type I and Type II, respectively). This Military Specification supersedes the Department of the Navy specification OS-1023. Diala Oils also are approved for International military use under NATO symbol S-756, covered by British Standard BS 148:1972.

Applications

Shell Diala Oils are excellent for use in transformers, circuit breakers, oil-filled switches and in X-ray equipment. These oils provide electrical insulation and heat transfer in such electrical devices.

Diala Oils have the oxidation stability required to resist the formation of acids that might attack construction materials and resist the formation of other oxidation products that can reduce the ability of the oil to insulate and cool electrical winding.

SOC: 39-93

(Supersedes SOC: 39-92)

รูปที่ ก.20 คุณสมบัติน้ำมันหม้อแปลง(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Availability

Shell Diala A and Diala AX Oils are available for domestic use or export. Contact your Shell Oil Sales Office for your requirements.

Storage Precautions

The critical electrical properties of Diala Oils are easily compromised by minute concentrations of contaminants. Typically encountered contaminants include moisture, particulates, fibers and surfactants. Therefore, it is imperative that electrical insulating oils be kept clean and dry.

It is strongly recommended that storage containers be dedicated for electrical oil service and include air-tight seals. It is further recommended that electrical insulating oils be stored indoors in climate controlled environments.

HANDLING & SAFETY INFORMATION

Refer to Shell's Material Safety Data Sheet (MSDS) and Environmental Data Sheet (EDS). The MSDS and EDS should be available from your Shell supplier or you may call Shell's general MSDS assistance number, 713-241-4819.

Table 1/ Physical Properties of Shell Diala[®] Oils

	ASTM Method	ANSI/ASTM/NEMA Limits - Type I and II	Diala A/AX Oils Typical Values
Aniline Point, °C	D611	63-84	74
Color	D1500	0.5 max	<0.5
Flash Point, °C	D92	145 min	148
Interfacial Tension, dynes/cm @ 25°C	D971	40 min	46
Pour Point, °C	D97	-40 min	-50
Specific Gravity, 15/15°C	D1298	0.91 max	0.885
Viscosity:	D445/ D88		
@ 0°C, cSt/SUS		76.0/350 max	66/304
@ 40°C, cSt/SUS		12.0/66 max	9.68/57.7
@ 100°C, cSt/SUS		3.0/36 max	2.34/34.3
Visual Examination	D1524	Clear & Bright	Clear & Bright

Table 2/ Electrical Properties of Shell Diala[®] Oils

	ASTM Method	ANSI/ASTM/NEMA Limits - Type I and II	Diala A/AX Oils Typical Values
Dielectrical Breakdown Voltage			
@ 60 Hz, Disc electrodes, kV	D877	30 min	> 35
@ 60 Hz, VDE electrodes, kV	D1816 ¹		
0.040 - inch (1.02 mm) gap		28 min	> 28
0.080 - inch (2.03 mm) gap		56 min	> 56
Dielectric Breakdown Voltage Impulse			
@ 25°C, needle-to-sphere grounded	D3300		
1 inch (25.4 mm) gap, kV		145 min	> 190
Power Factor, 60 Hz:	D924		
@ 25°C, %		0.05 max	0.01
@ 100°C, %		0.30 max	0.07
Gassing Tendency, µL/min	D2300 Proc B	+30 max	+16

¹. D1816 applies only to new, filtered, dehydrated and degassed oil.

รูปที่ ก.21 คุณสมบัติน้ำมันหม้อแปลง(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 3/ Chemical Properties of Shell Diala® Oils

	ASTM Method	Requirement		Diala A	Diala AX
		Type I	Type II		
Oxidation Inhibitor Content, %w 2,6-ditertiary butyl paracresol	D2668 or D1473	0.08 max	0.3 max	None	0.19
Corrosive Sulfur	D1275	Non-Corrosive		Non-Corrosive	
Water, ppm	D1533	35 max	35 max	30	30
Neutralization No., mg KOH/g	D974	0.03 max	0.03 max	0.01	0.01
Oxidation Stability @ 72 hrs.	D2440				
Sludge, %w		0.15 max	0.10 max	0.08	0.02
TAN-C, mg KOH/g		0.50 max	0.30 max	0.27	0.21
Oxidation Stability @ 164 hrs.	D2440				
Sludge, %w		0.30	0.20	0.15	0.10
TAN-C, mg KOH/g		0.60	0.40	0.35	0.35
Oxidation Stability					
Rotating Bomb, min.	D2112	N/A	195 min	N/A	250
PCB Content, ppm	D4059	ND	ND	ND	ND

N/A- Not Applicable
ND - Not Detectable, which is reported as <2 ppm.

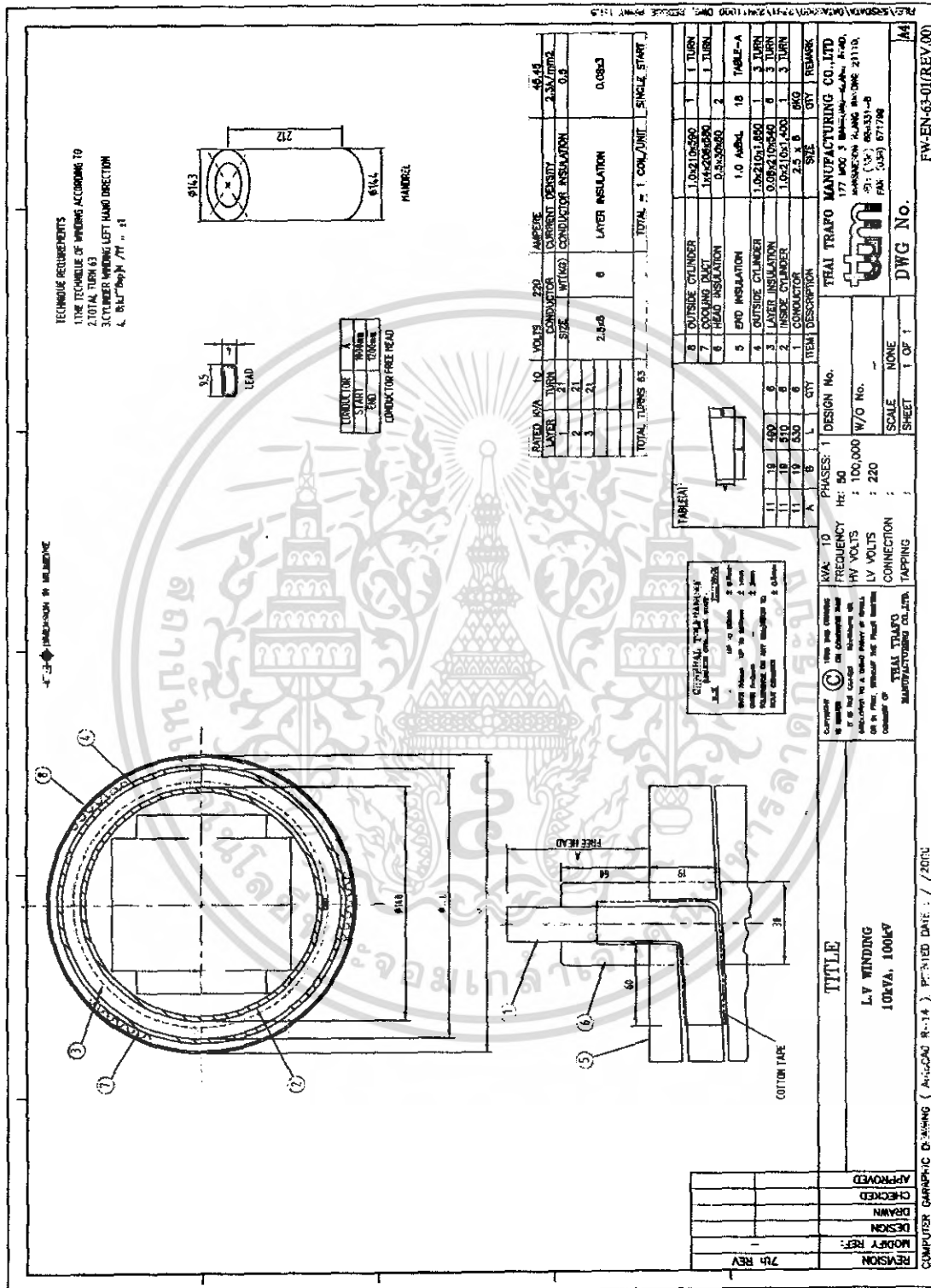
Table 4/ Supplemental Information on Shell Diala® Oils

	ASTM Method	ANSI/ASTM/NEMA Typical Values	Diala A/AX Oils
			Typical Values
Coefficient of Thermal Expansion: mL/°C/mL	D1903	0.0007-0.0008	0.00075
Resistivity, cm @ 25°C @ 100°C	D1169		2000*10 ¹² 50*10 ¹²
Relative Permittivity @ 25°C	D924	2.2-2.3	2.2-2.3
Specific Heat, gm-cal/gm @ 20°C	D2766	0.44	0.445
Thermal Conductivity, cal/cm/sec°C	D2717	0.0003-0.0004	0.0003
Gravity, API 60/60°F	D287		28.4
Color, Saybolt	D156		+15
Viscosity:	D445/ D2161		58.8 34.1
@ 100°F, SUS			10.5
@ 210°F, SUS			2.38
@ 100°F, cSt	D445		15
@ 100°C, cSt			0.07
Steam Emulsion No.	D1935		261
Sulfur, %w	D2622		1.4815
Molecular Weight	D2503		0.865
Refractive Index	D1218		45
Viscosity-Gravity Constant	D2140		
Viscosity Index	D2270		

รูปที่ ก.22 คุณสมบัติน้ำมันหม้อแปลง(ต่อ)

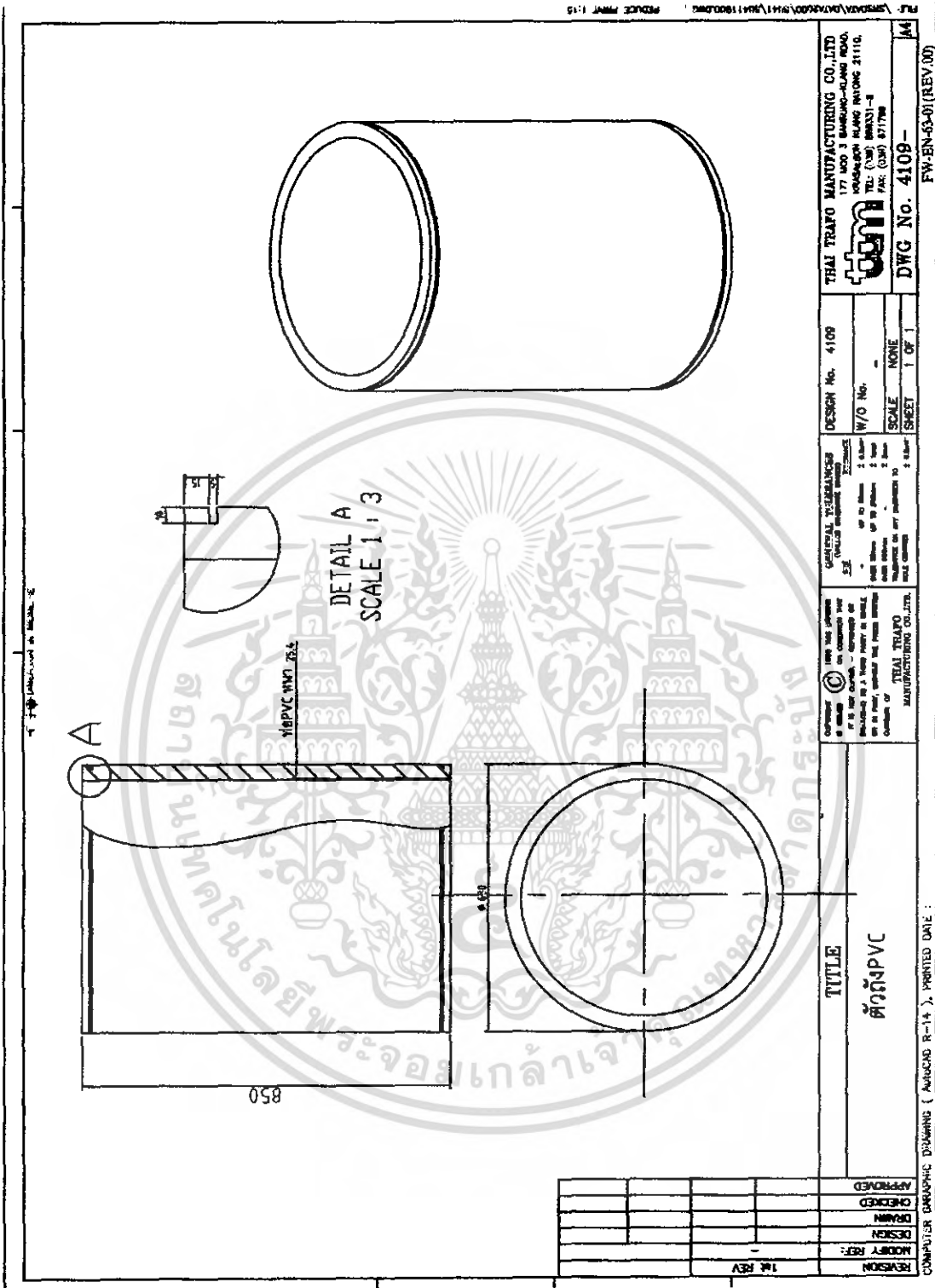
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข แบบขนาดและรูปร่างของชิ้นส่วนหม้อแปลง



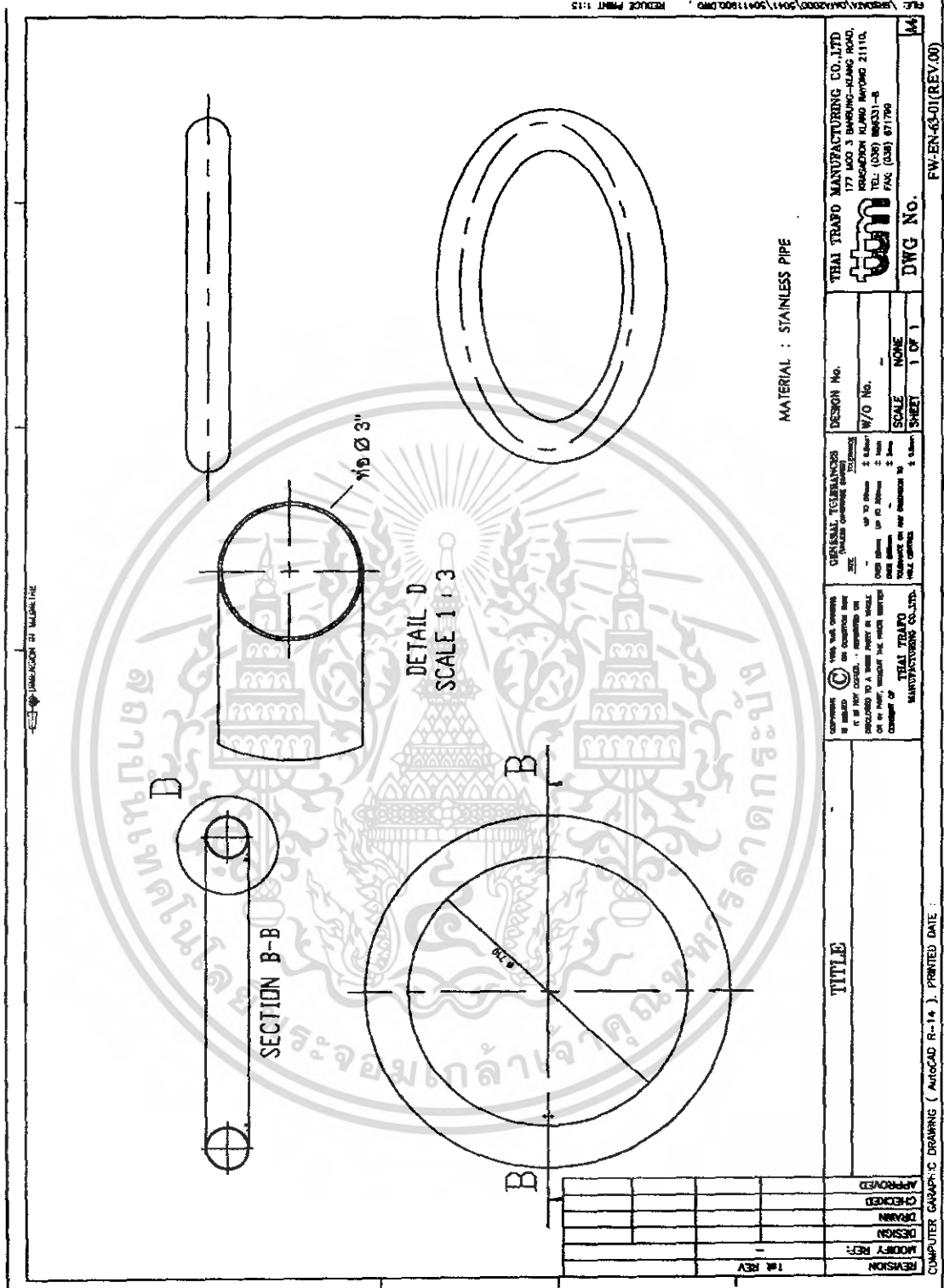
รูปที่ ข.1 แบบขนาดและวิธีการพันขดลวดแรงต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



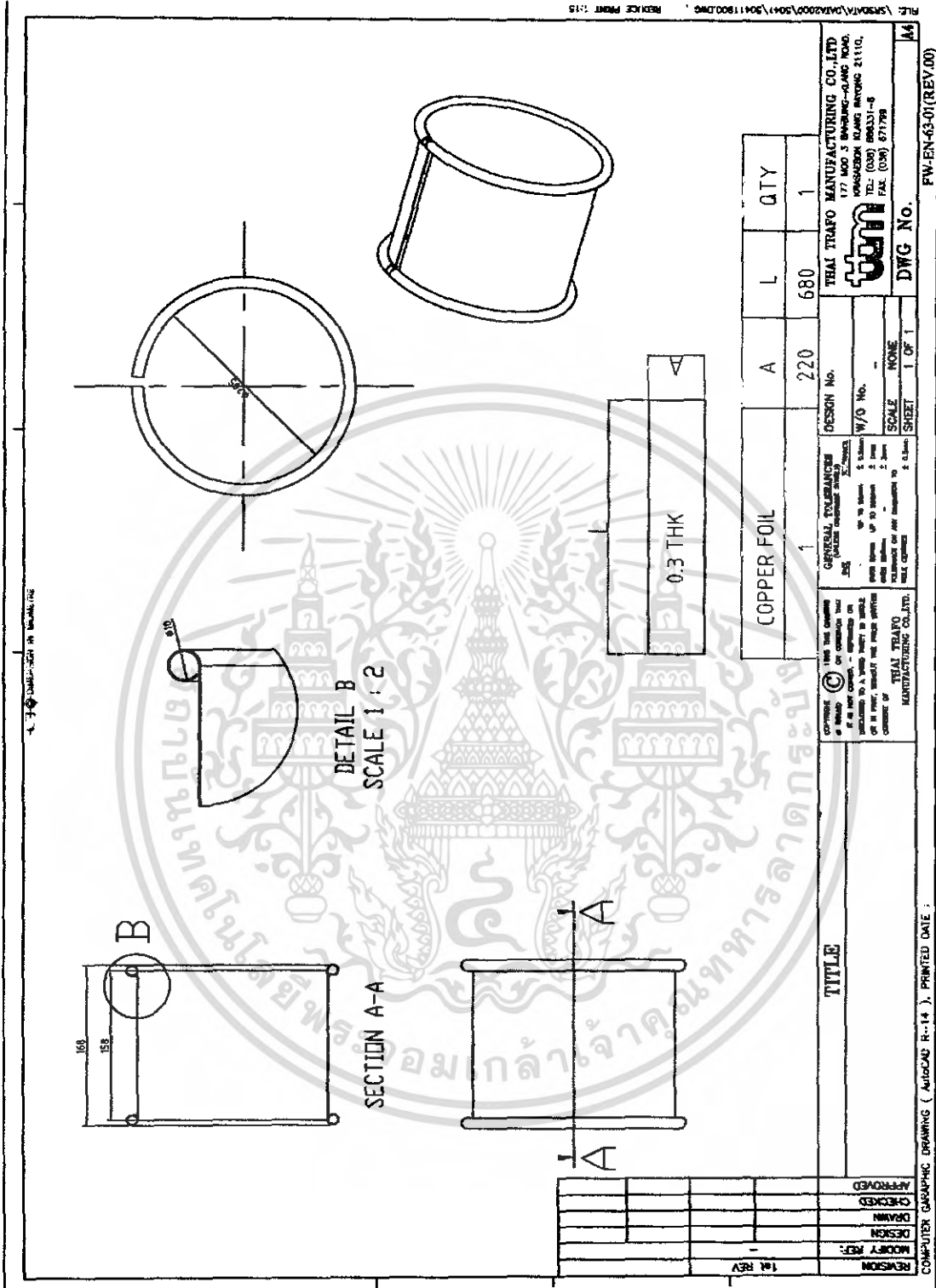
รูปที่ ข.4 แบบและขนาดของตัวถังหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



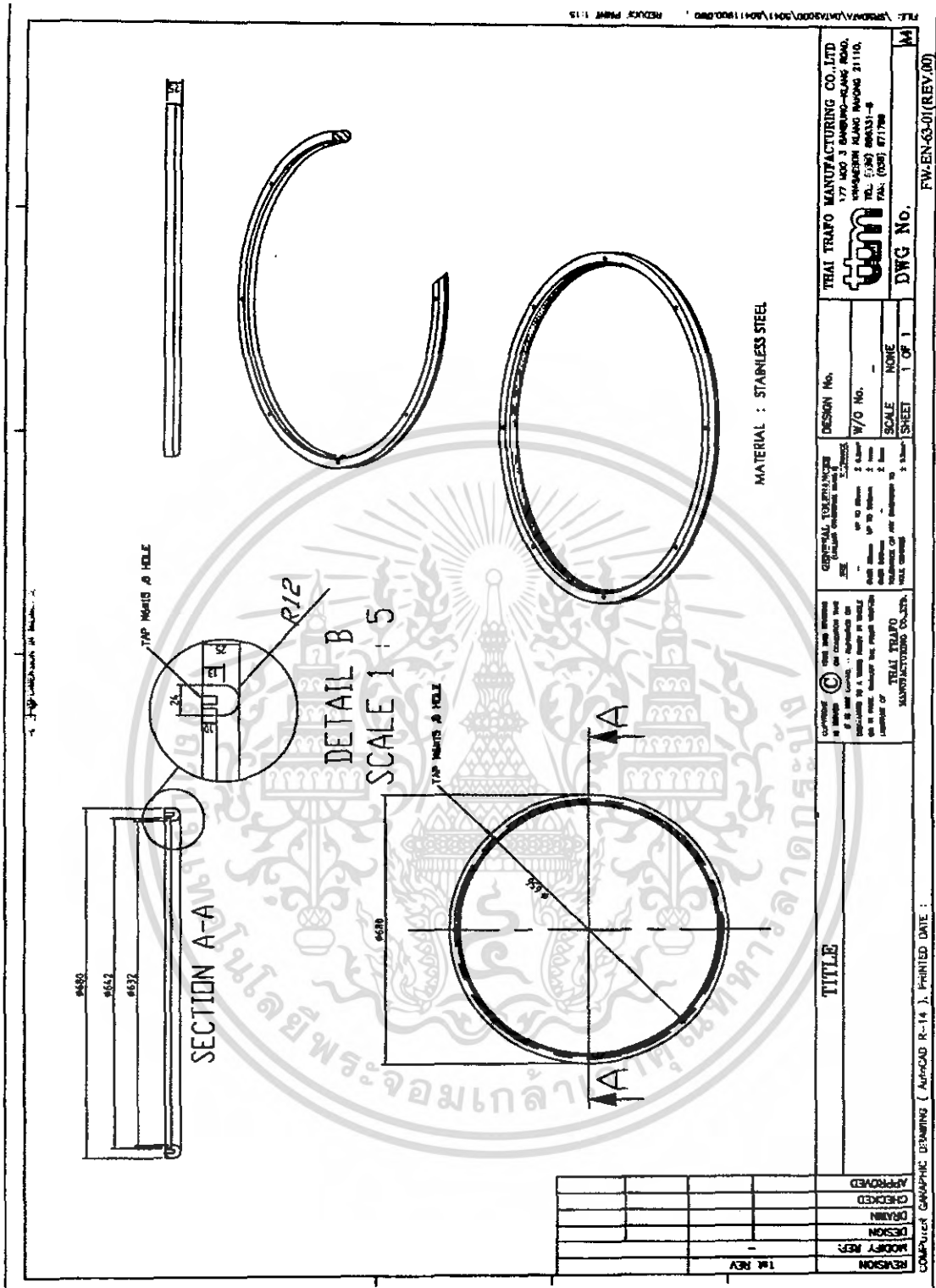
รูปที่ ข.5 แบบและขนาดของโคโนวาล์ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



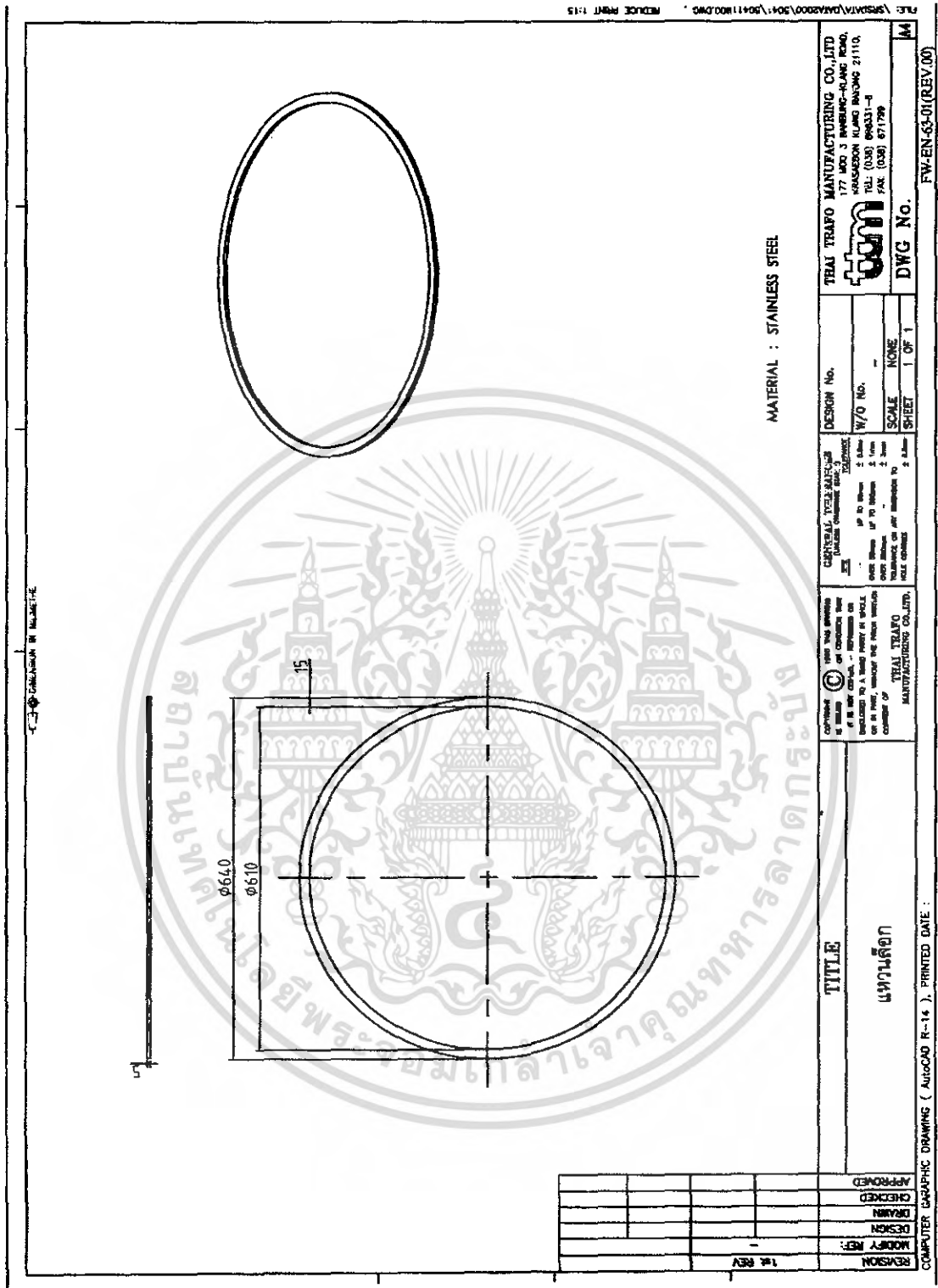
รูปที่ ข.7 แบบและขนาดของชีลด์ขั้วนิวทรัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



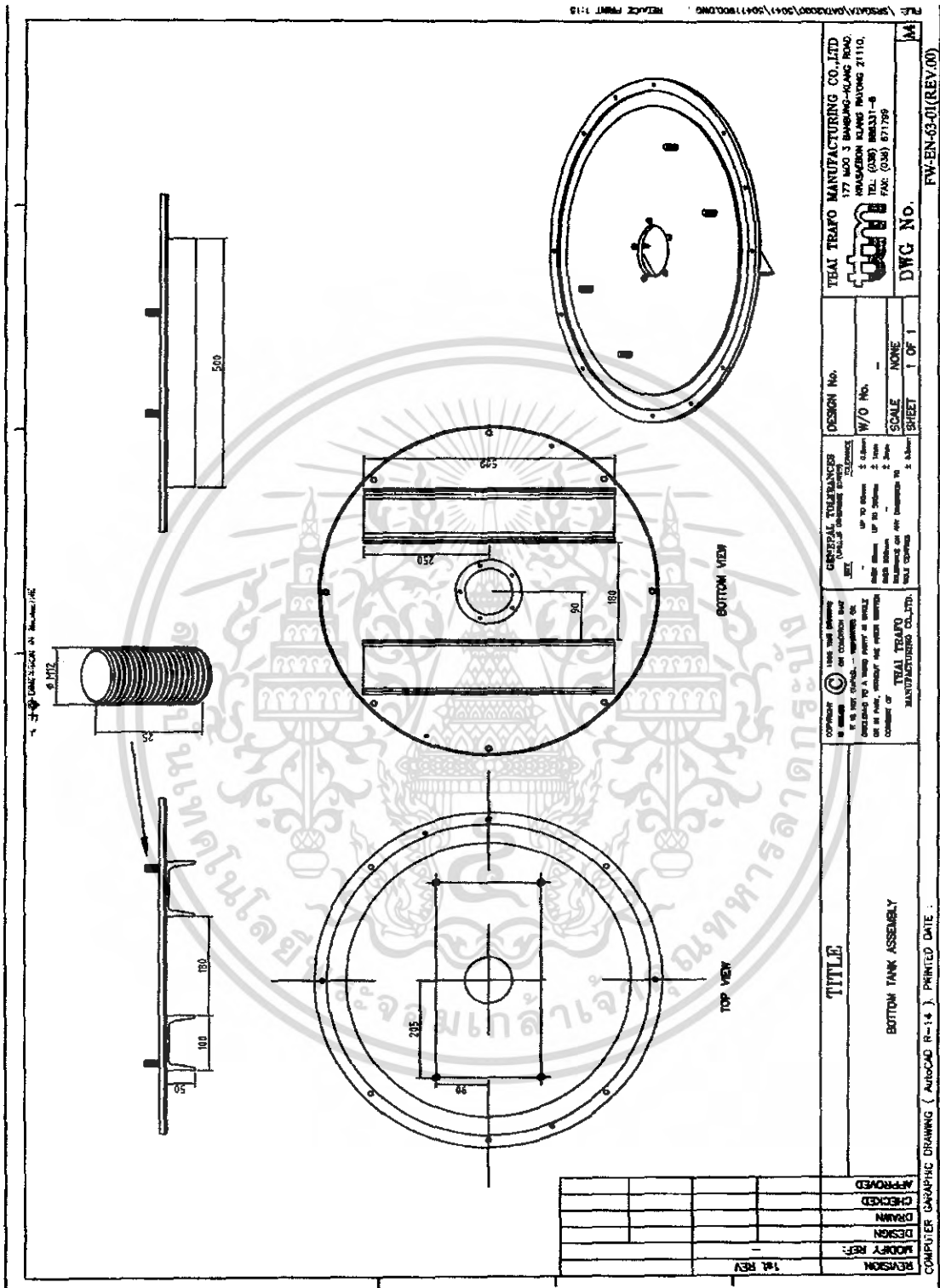
รูปที่ ข.9 แบบและขนาดของตัวล๊อคฝาอ็เล็กโทรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



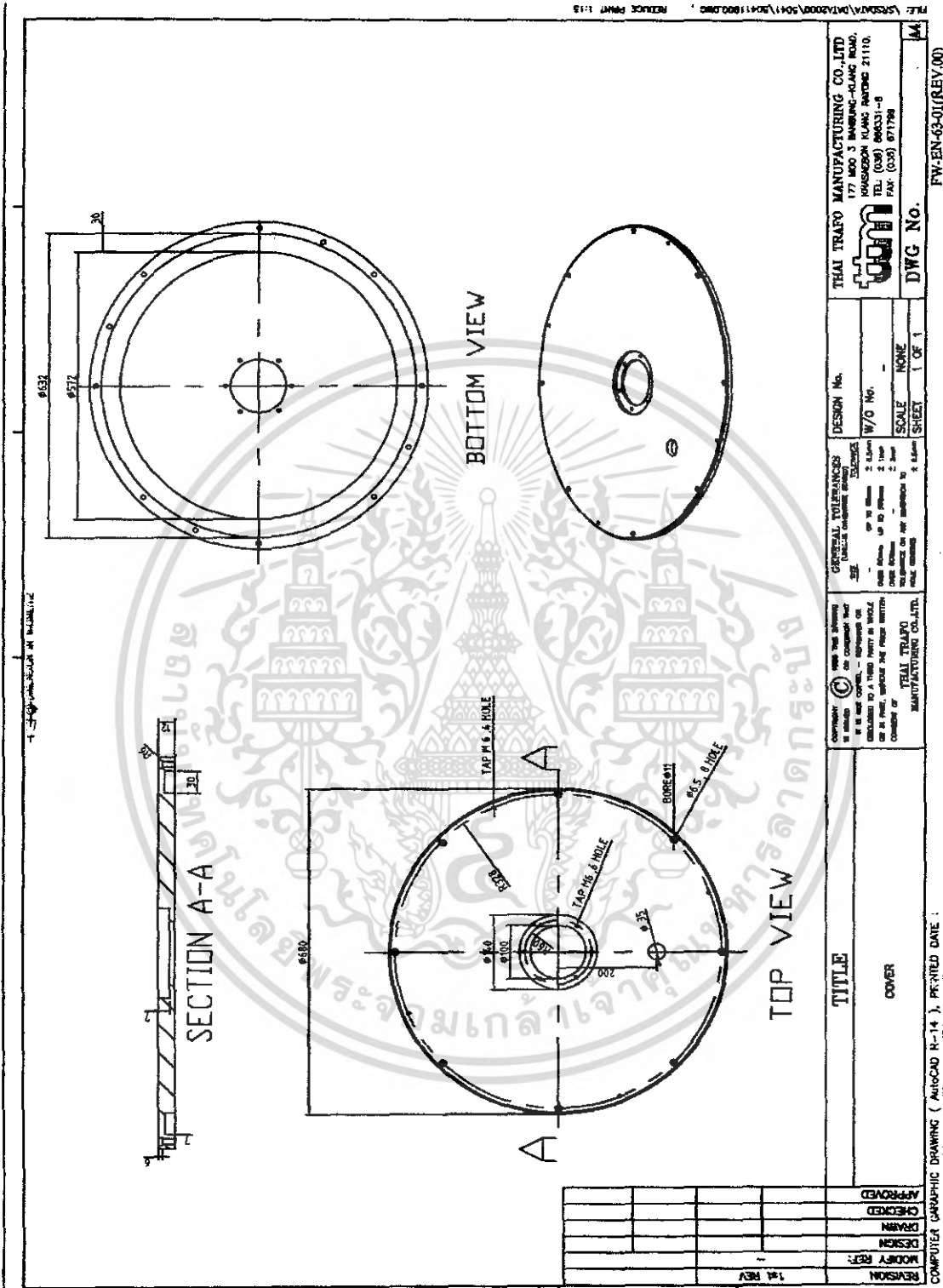
รูปที่ ข.10 แบบและขนาดของแหวนล็อก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



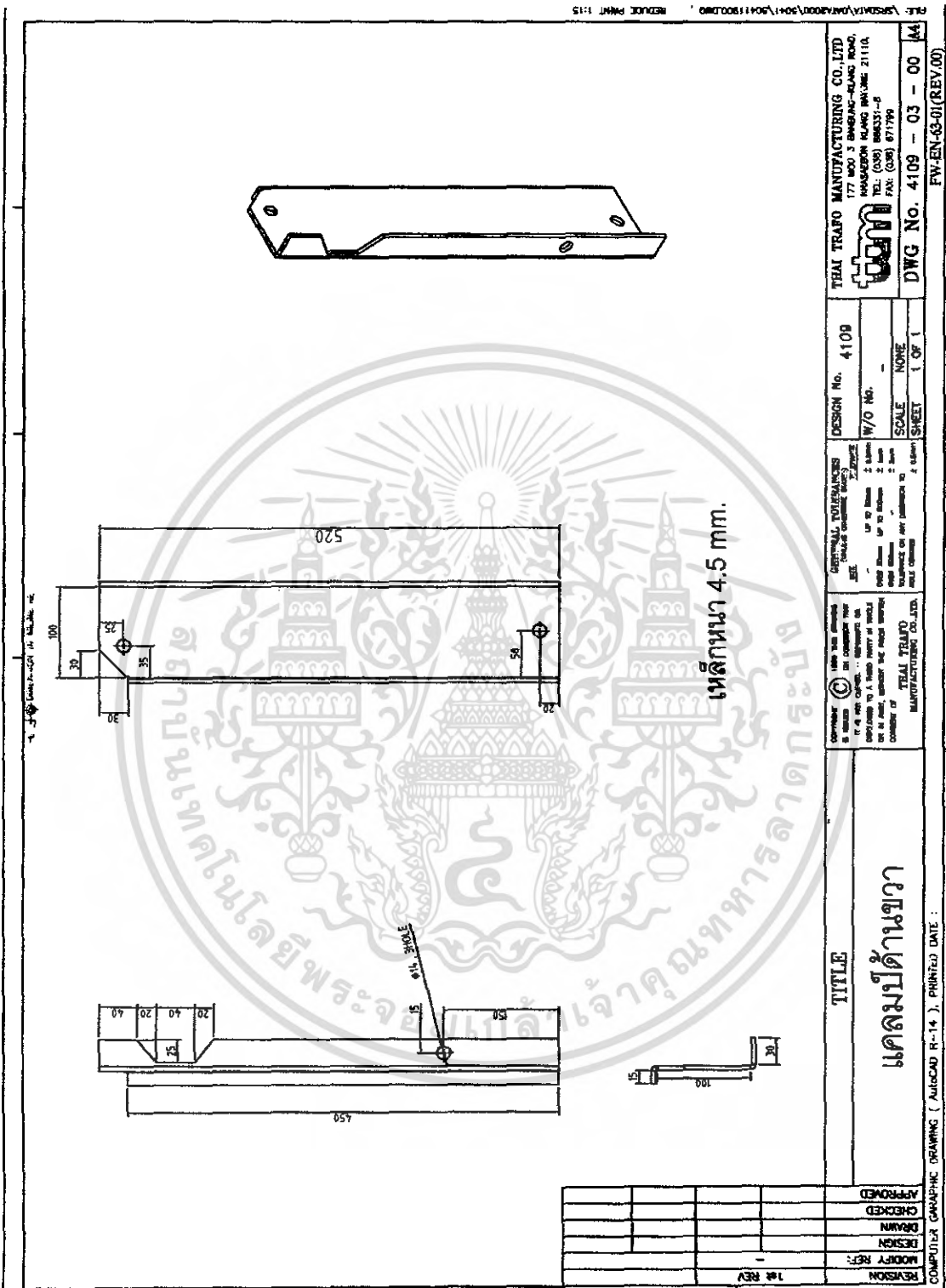
รูปที่ ข.11 แบบและขนาดของอิเล็กทรอนิกส์ตัวล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



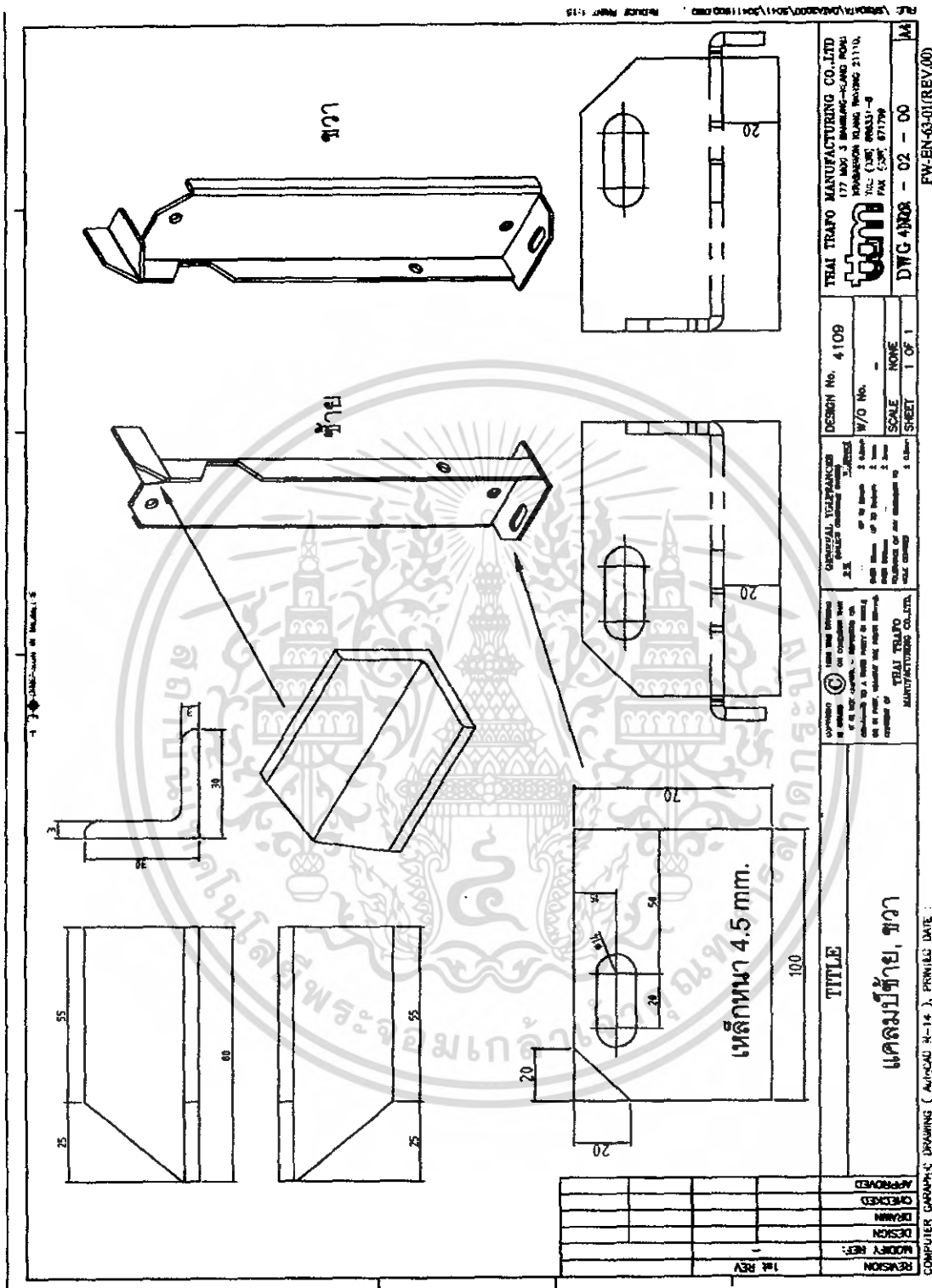
รูปที่ ข.12 แบบและขนาดของอิลีกโทรดตัวบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.14 แบบและขนาดของแคลมป์ด้านขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.15 แบบและขนาดของแคลมป์ด้านขวาและด้านซ้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ปัญหาของการประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบ

ในการประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบนั้นประสบปัญหาในการประกอบสร้างมากมาย โดยปัญหาสำคัญของการประกอบสร้าง คือ ปัญหาทางกล จากรูปที่ ค.1 แสดงตัวถังหม้อแปลงที่ทำจากท่อพีวีซีที่ถูกแรงดึงจากน็อตร้อยฝาตั้งจนขาดออกจากกันบริเวณที่ทำการเจาะร่องของตัวท่อพีวีซี

วิธีแก้ปัญหานี้ทำได้โดยการตั้งค่าแรงบิดที่ใช้ในการขันน็อตแต่ละตัวให้พอเหมาะและสม่ำเสมอ

อีกปัญหาหนึ่งของการประกอบสร้าง คือ น้ำมันหม้อแปลงเกิดการรั่วซึมออกตามร่องระหว่างฝากับตัวถัง

วิธีแก้ปัญหาน้ำมันรั่วซึมนี้ทำได้โดยจัดทำฝาตั้งใหม่โดยเจาะร่องฝาให้มีความลึกของร่องมากขึ้นและลดความกว้างของร่องให้กระชั้นเท่ากับความหนาของตัวถังพีวีซี



รูปที่ ค.1 ตัวถังหม้อแปลงท่อพีวีซีที่ถูกแรงดึงจากน็อตร้อยฝาตั้งจนขาดออกจากกัน

ภาคผนวก ง

คู่มือการใช้งานชุดควบคุม

หลักการทำงานของชุดควบคุม

- การ ON/OFF ชุดควบคุม

เมื่อปิดสวิตช์กุญแจมาที่ ON ไฟจะไหลเข้าสู่ชุดควบคุมโดยจะไหลผ่าน หลอดไฟ ON และไฟจะไหลเข้าสู่ speed control motor และเมื่อปิดสวิตช์ กุญแจมาที่ OFF ไฟจะไหลผ่านหลอดไฟ OFF
- การ ON/OFF หม้อแปลงปรับแรงดัน

เมื่อไฟไหลเข้าสู่ชุดควบคุมแล้ว กดสวิตช์ ON ไฟจะไหลเข้า magnetic MAG และไหลเข้าหลอดไฟ ON POWER ทำให้ magnetic สับสวิตช์ในวงจร กำลังไฟจะไหลเข้าหม้อแปลงปรับแรงดัน และ auxiliary ของ MAG ปิดลงจากนั้น ไฟไหลผ่าน magnetic MAG ตลอด โดยไม่ต้องกดสวิตช์ค้าง และหากกดสวิตช์ OFF ไฟจะหยุดไหลผ่าน magnetic MAG และทำให้ magnetic ในวงจรกำลัง สับสวิตช์ออกไฟจะหยุดไหลเข้าหม้อแปลงปรับแรงดัน และทำให้ auxiliary ของ MAG กลับสู่สภาวะปกติไฟจะไหลผ่านหลอดไฟ OFF POWER
- หม้อแปลงปรับแรงดันหมุนลงอัตโนมัติเมื่อไม่ได้อยู่ที่ตำแหน่งศูนย์

เมื่อยังไม่ได้ ON ไฟเข้าหม้อแปลงปรับแรงดัน auxiliary ชนิด NC ของ MAG ทั้ง 2 ตัวจะยังปิดอยู่ทำให้ไฟไหลผ่านเข้าสู่หลอดไฟ VARIAC NOT ZERO และ relay RY1 และหลอด DF โดยไม่ต้องกดสวิตช์ DOWN FAST โดย RY1 จะทำงาน ซึ่งทำให้ auxiliary ชนิด NC ของ RY1 ทั้ง 4 ตัวเปิดออกเพื่อเป็น การ interlock สวิตช์ที่เหลืออีก 3 ตัว และเป็นการ interlock สวิตช์ที่ ON ไฟเข้า หม้อแปลงปรับแรงดัน ส่วน auxiliary ชนิด NO ทั้ง 2 ตัว ที่ชุด speed control จะ ปิดลง ส่งผลให้ขา 1 และ 2 ของ speed control motor เชื่อมถึงกัน ทำให้หม้อ แปลงปรับแรงดัน หมุนลงและไฟจากขา 4 จะไหลผ่าน R1 เข้าขา 5 ทำให้มอเตอร์ หมุนเร็ว เมื่อหม้อแปลงปรับแรงดัน หมุนมาถึงตำแหน่งศูนย์จะไปชน DOWN LIMIT switch ทำให้ DOWN LIMIT switch ปิดลง ไฟจะไหลผ่าน relay RY3 auxiliary ชนิด NC ของ RY3 ทั้ง 2 ตัวจะเปิดออก จากนั้นหลอดไฟ VARIAC NOT ZERO จะดับและ relay RY1 จะหยุดทำงาน auxiliary ต่างๆ จึงกลับสู่สภาวะ ปกติ ทำให้มอเตอร์ที่ขับหม้อแปลงปรับแรงดันหยุดหมุน

- การขึ้นแรงดันอย่างรวดเร็ว

เมื่อกดสวิตช์ UP FAST ไฟจะไหลผ่านเข้า relay RY4 และหลอดไฟ UF ทำให้ auxiliary ชนิด NC ของ RY4 ทั้ง 3 ตัว เปิดออกเพื่อเป็นการ interlock สวิตช์ที่เหลืออีก 3 ตัว ส่วน auxiliary ชนิด NO ทั้ง 2 ตัว ที่ชุด speed control จะปิดลง ทำให้ขา 2 และ 3 ของ speed control motor เชื่อมถึงกันส่งผลให้หม้อแปลงปรับแรงดันหมุนขึ้นและไฟจากขา 4 จะไหลผ่าน R1 เข้าขา 5 ทำให้มอเตอร์หมุนเร็ว หากหม้อแปลงปรับแรงดันหมุนมาถึงตำแหน่ง 210 จะไปชน UP LIMIT switch ทำให้ UP LIMIT switch ปิดลง ไฟจะไหลเข้า relay RY6 ทำให้ auxiliary ชนิด NC ของ RY6 เปิดออก RY4 จะหยุดทำงาน หลอดไฟ UF จะดับ auxiliary ต่างๆ จึงกลับสู่การสภาวะปกติ ทำให้มอเตอร์ที่ขับหม้อแปลงปรับแรงดันหยุดหมุน

- การขึ้นแรงดันอย่างช้าๆ

เมื่อกดสวิตช์ UP LOW ไฟจะไหลผ่านเข้า relay RY5 และหลอดไฟ UL ทำให้ auxiliary ชนิด NC ของ RY5 ทั้ง 3 ตัวเปิดออกเพื่อเป็นการ interlock สวิตช์ที่เหลืออีก 3 ตัว ส่วน auxiliary ชนิด NO ทั้ง 2 ตัว ที่ชุด speed control จะปิดลงทำให้ขา 2 และ 3 ของ speed control motor เชื่อมถึงกัน หม้อแปลงปรับแรงดันจะหมุนขึ้นและไฟจากขา 4 จะไหลผ่าน R2 เข้าขา 5 ทำให้มอเตอร์หมุนช้า หากหม้อแปลงปรับแรงดันหมุนมาถึงตำแหน่ง 210 จะไปชน UP LIMIT switch ทำให้ UP LIMIT switch ปิดลง ไฟจะไหลเข้า relay RY6 ทำให้ auxiliary ชนิด NC ของ RY6 เปิดออก RY5 จะหยุดทำงานและหลอดไฟ UL จะดับ auxiliary ต่างๆ จึงกลับสู่การสภาวะปกติ ทำให้มอเตอร์ที่ขับหม้อแปลงปรับแรงดันหยุดหมุน

- การลงแรงดันอย่างรวดเร็ว

เมื่อกดสวิตช์ DOWN FAST ไฟจะไหลผ่านเข้า relay RY1 และหลอดไฟ DF ทำให้ auxiliary ชนิด NC ของ RY1 ทั้ง 3 ตัวเปิดออกเพื่อเป็นการ interlock สวิตช์ที่เหลืออีก 3 ตัว ส่วน auxiliary ชนิด NO ทั้ง 2 ตัว ที่ชุด speed control จะปิดลง ทำให้ขา 1 และ 2 ของ speed control motor เชื่อมถึงกัน หม้อแปลงปรับแรงดันจะหมุนลงและไฟจากขา 4 จะไหลผ่าน R1 เข้าขา 5 ทำให้มอเตอร์หมุนเร็ว หากหม้อแปลงปรับแรงดันหมุนมาถึงตำแหน่ง 0 จะไปชน DOWN LIMIT switch ทำให้ DOWN LIMIT switch ปิดลง ไฟจะไหลเข้า relay RY3 ทำให้ auxiliary ชนิด NC ของ RY3 เปิดออก RY1 จะหยุดทำงาน

หลอดไฟ DF จะดับ auxiliary ต่างๆ จึงกลับสู่การสภาวะปกติ ทำให้มอเตอร์ที่ขับหม้อแปลงปรับแรงดันหยุดหมุน

- การลงแรงดันอย่างช้าๆ

เมื่อกดสวิตช์ DOWN LOW ไฟจะไหลผ่านเข้า relay RY2 และหลอดไฟ DL ทำให้ auxiliary ชนิด NC ของ RY2 ทั้ง 3 ตัว เปิดออกเพื่อเป็นการ interlock สวิตช์ที่เหลืออีก 3 ตัว ส่วน auxiliary ชนิด NO ทั้ง 2 ตัว ที่ชุด speed control จะปิดลงทำให้ขา 1 และ 2 ของ speed control motor เชื่อมถึงกัน หม้อแปลงปรับแรงดันจะหมุนลงและไฟจากขา 4 จะไหลผ่าน R2 เข้าขา 5 ส่งผลให้มอเตอร์หมุนช้า หากหม้อแปลงปรับแรงดันหมุนมาถึงตำแหน่ง 0 จะไปชน DOWN LIMIT switch ทำให้ DOWN LIMIT switch ปิดลง ไฟจะไหลเข้า relay RY3 ทำให้ auxiliary ชนิด NC ของ RY3 เปิดออก RY2 จะหยุดทำงาน หลอดไฟ DL จะดับ auxiliary ต่างๆ จึงกลับสู่การสภาวะปกติ ทำให้มอเตอร์ที่ขับหม้อแปลงปรับแรงดันหยุดหมุน

- การทำงานของปุ่ม EMERGENCY

เมื่อทำการกดปุ่ม EMERGENCY สวิตช์ปกติเปิดปิดลงส่งผลให้หลอดไฟ EMERGENCY ดัด auxiliary ชนิด NC จะเปิดออกทำให้ไฟหยุดไหลผ่าน magnetic MAG จากนั้น magnetic ในวงจรกำลังจะสับสวิตช์ออกไฟจะหยุดไหลเข้าหม้อแปลงปรับแรงดันและทำให้ auxiliary ของ MAG กลับสู่สภาวะปกติ

- การทำงานของ SAFETY ที่ประตู

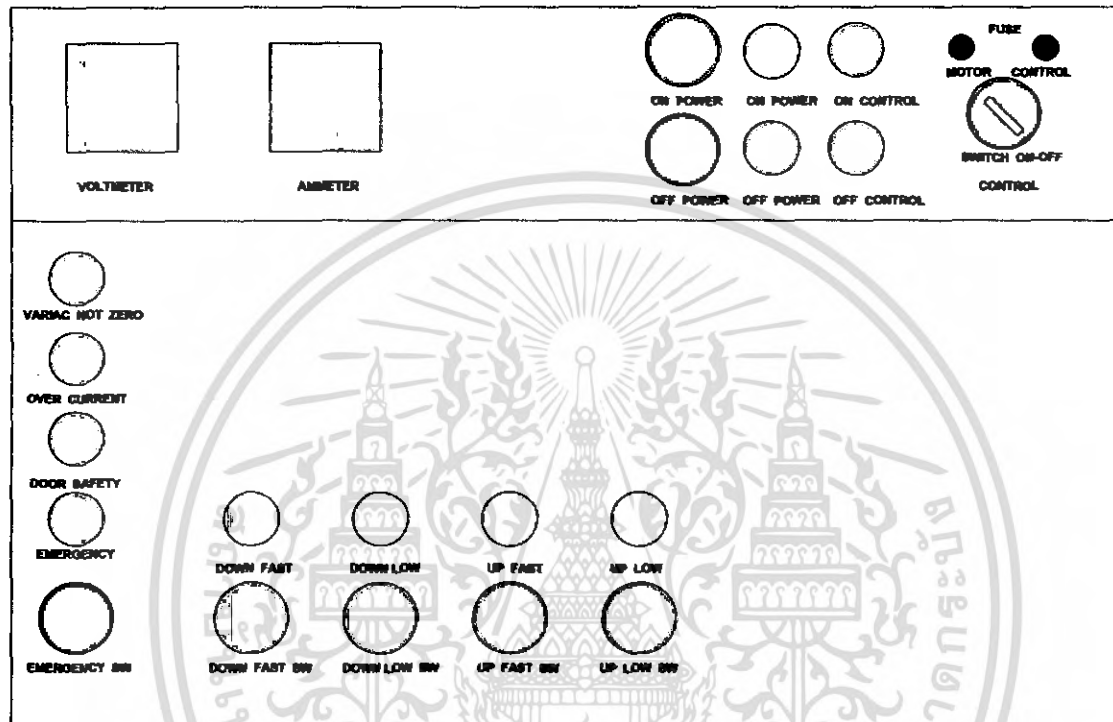
ในขณะที่ทำการขึ้นแรงดันหากมีคนเปิดประตูรั้วของห้องทดสอบ จะทำให้สวิตช์ DOOR ถูกเปิดออก และทำให้หลอดไฟ DOOR ดัดและไฟจะหยุดไหลผ่าน relay RY7 auxiliary ชนิด NO จะเปิดออกทำให้ไฟหยุดไหลผ่าน magnetic MAG จากนั้น magnetic ในวงจรกำลังจะสับสวิตช์ออกไฟจะหยุดไหลเข้าหม้อแปลงปรับแรงดัน และทำให้ auxiliary ของ MAG กลับสู่สภาวะปกติ

- การทำงานของ OVER CURRENT

ในขณะที่ทำการทดสอบหากเกิด Flashover จะทำให้เกิดกระแสสูงไหลเข้าสู่ชุดควบคุม เพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับอุปกรณ์อื่นเนื่องมาจากกระแสเกิน จึงติดตั้ง over current relay โดยเมื่อมีกระแสเกิน จะทำให้สวิตช์ OVER CURRENT ปิดลง ไฟจะไหลผ่าน หลอดไฟ OVER CURRENT และไหลผ่าน auxiliary ชนิด NC จะเปิดออกทำให้ไฟหยุดไหลผ่าน magnetic

MAG จากนั้น magnetic ในวงจรกำลังจะสับสวิตช์ออกไฟจะหยุดไหลเข้า หม้อแปลงปรับแรงดันและทำให้ auxiliary ของ MAG กลับสู่สภาวะปกติ

ลักษณะตำแหน่งของอุปกรณ์บนแผงหน้าปัดชุดควบคุม



รูปที่ ง.1 ลักษณะแผงหน้าปัดของชุดควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้