

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบสร้างหม้อแปลงทดสอบ 100 kV 10 kVA

DESIGN AND CONSTRUCTION TEST TRANSFORMER 100 kV 10 kVA



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 62572
วัน,เดือน,ปี..... 19 ส.ค. 2549

b..... 11 b2 t 30 t
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2548

ปีการศึกษา 2548

การออกแบบสร้างหม้อแปลงทดสอบ 100 KV 10 KVA
DESIGN AND CONSTRUCTION TEST TRANSFORMER 100 KV 10 KVA



รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล
อาจารย์ นรเศรษฐ์ พัฒนเดช

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2548

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบสร้างหม้อแปลงทดสอบ 100 kV 10 kVA

ผู้จัดทำ

1. นายจักรกฤษณ์ อธิธิยาภรณ์
2. นายจิระศักดิ์ ธรรมศิลา
3. นายวรวิษ ยินยง
4. นางสาววิชุดา ใจชัยภูมิ



.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล)



.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช)

การออกแบบสร้างหม้อแปลงทดสอบ 100 kV 10 kVA

นาย จักรกฤษณ์	อิทธิยาภรณ์	
นาย จิระศักดิ์	ธรรมศिला	
นาย วรวิช	ยีนยง	
นางสาว วิชชุดา	ใจชัยภูมิ	
รศ.ศิริวัฒน์	โพธิเวชกุล	อาจารย์ที่ปรึกษา
อ. นรเศรษฐ์	พัฒนเดช	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2548		

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและการสร้างหม้อแปลงทดสอบแบบถึงฉนวนขนาด 100 kV 10 kVA 50 Hz จำนวน 1 ตัว มีขดลวด 3 ชุด ใช้กระดาษคราฟท์เป็นฉนวนระหว่างชั้นขดลวด มีการใส่ซิลด์ทองแดงควบคุมแรงดันกระจายของขดลวดแรงสูง โดยใช้ท่อพีวีซีเป็นฉนวนภายนอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 นิ้ว และมีน้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนแทรกซึมและระบายความร้อนภายใน โดยหลักการทำงานและเงื่อนไขในการออกแบบถูกอธิบายด้วยรายละเอียดในปริญญานิพนธ์นี้ หม้อแปลงทดสอบที่ได้จัดสร้างขึ้นมามีคุณสมบัติทางไฟฟ้าคุณลักษณะทางการฉนวนและทางความร้อนตามที่ได้ออกแบบไว้ทุกประการและสอดคล้องกับข้อกำหนดตามมาตรฐานสากล การออกแบบและสร้างหม้อแปลงได้จัดทำขึ้นโดยมีจุดประสงค์จะนำไปใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

DESIGN AND CONSTRUCTION TEST TRANSFORMER 100 kV 10 kVA

Chakkrit	Ittiyaporn	
Jirasak	Thommasila	
Worawit	Yuenyong	
Wichuda	Jaichaiyaphum	
Assoc.Prof. Siriwat	Potivejkul	Advisor
Norasage	Pattanadech	Advisor
2005		

ABSTRACT

This project presents a design and construction of a test transformer of 100 kV 10 kVA 50 Hz, with oil immersed three winding. 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 the project. This designed test transformer performed very well in electrical, insulation and heat characteristic followed the design conditions and the international standards. This testing transformer will be used for testing electrical equipments in high voltage laboratory in King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงด้วยดี เนื่องด้วยคณะผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือและความร่วมมืออย่างดียิ่งจากหลายฝ่าย

ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ รศ. ศิริวัฒน์ โภธิเวชกุล และ อาจารย์นรเศรษฐ พัฒนเดช ที่ให้ความดูแลเอาใจใส่อย่างใกล้ชิดด้วยดีตลอดมา ให้คำปรึกษาชี้แนะ แนะนำข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษา ค้นคว้าและได้ตรวจสอบแก้ไขปริญญาานิพนธ์จนเสร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี ทำให้ผู้จัดทำมีความภาคภูมิใจเป็นอย่างมากที่ได้มีโอกาสทำปริญญาานิพนธ์นี้

ผู้จัดทำขอขอบคุณอาจารย์พีรวิทย์ ยุทธโกวิท ที่ให้คำปรึกษาชี้แนะ แนะนำข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษา

ผู้จัดทำขอขอบคุณคุณอนุศักดิ์ ปิ่นจอม ผู้ช่วยกรรมการผู้จัดการฝ่ายปฏิบัติการ บริษัท Thai-Trafo manufacturing Co., Ltd ที่ให้คำชี้แนะในการออกแบบหม้อแปลงทดสอบและข้อมูลต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ รวมไปถึงการช่วยติดต่อขอความร่วมมือไปทางบริษัท Thai-Trafo manufacturing Co., Ltd เพื่อนำข้อมูลการออกแบบหม้อแปลงทดสอบที่เสร็จเรียบร้อยแล้วไปประกอบสร้างที่บริษัท

ผู้จัดทำขอขอบคุณรุ่นพี่ปริญญาโทที่ให้คำปรึกษาชี้แนะและให้ความช่วยเหลือในการทำปริญญาานิพนธ์

ผู้จัดทำขอขอบคุณ Thai-Trafo manufacturing Co., Ltd ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์, ค่าใช้จ่ายต่างๆ และสถานที่ในการประกอบสร้างและทดสอบหม้อแปลงทดสอบ

ผู้จัดทำขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และข้อมูลต่างๆที่เป็นประโยชน์ในการออกแบบและการประกอบสร้าง และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่สำนักหอสมุดกลางสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือและเอื้อเฟื้อข้อมูลต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ อีกทั้งขอขอบคุณเพื่อนร่วมงาน และทุกท่านที่ให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือแนะนำด้านอื่นๆรวมไปถึงการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ จนทำให้โครงการสำเร็จลงด้วยดี

ท้ายที่สุดนี้ ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา บุรพคณาจารย์ทุกท่าน ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาและให้ความช่วยเหลือในทุกด้านแก่ผู้จัดทำ ไคร่ขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

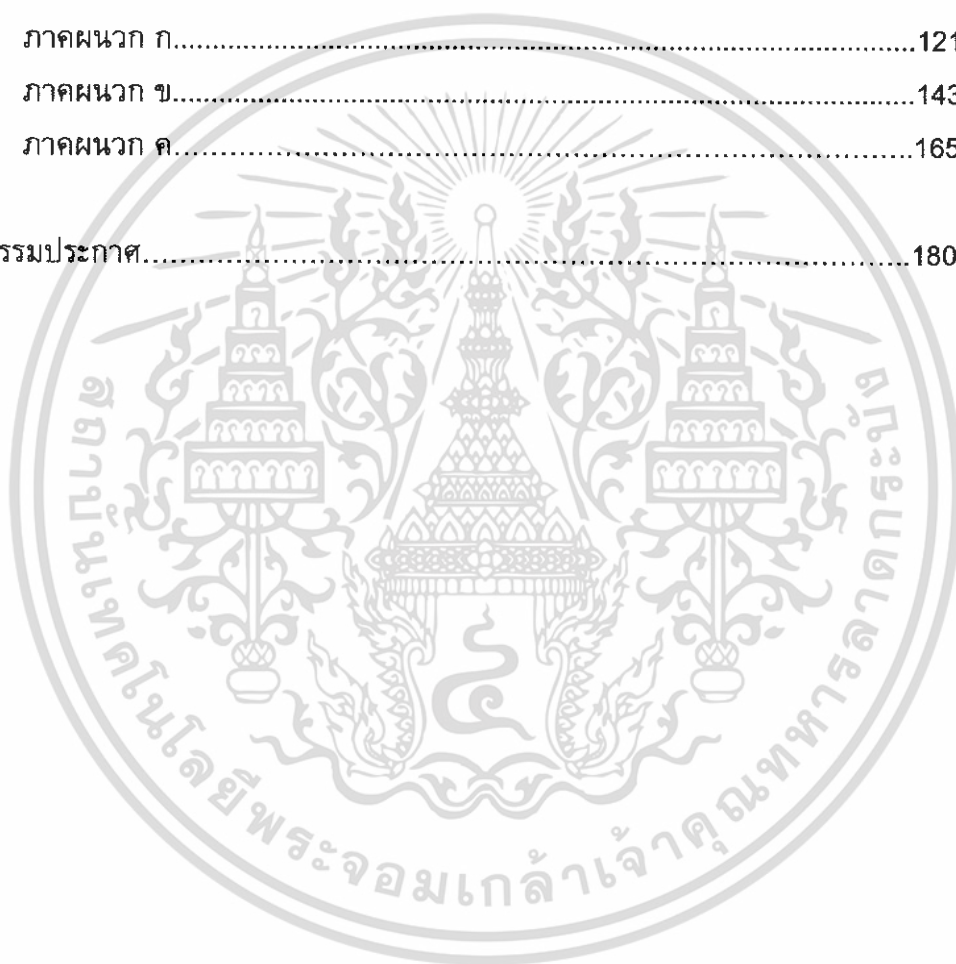
	หน้า
บทคัดย่อ.....	ก
ABSTRACT.....	ข
สารบัญ.....	ค
สารบัญรูป.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.3 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 หม้อแปลงทดสอบ.....	7
2.1.1 หม้อแปลงทดสอบจะกำหนดด้วย.....	7
2.1.2 ขนาดแรงดันที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ.....	8
2.1.3 กระแสที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ.....	8
2.1.4 ขนาดกำลังไฟฟ้าที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ.....	9
2.1.5 โครงสร้างและการฉนวนหม้อแปลงทดสอบ.....	10
2.1.6 หม้อแปลงต่อแบบชั้นบันได.....	11
บทที่ 3 การออกแบบสร้างชิ้นงาน.....	12
3.1 การออกแบบแกนเหล็ก.....	12
3.2 การออกแบบขดลวด.....	20
3.2.1 การออกแบบขดลวดแรงต่ำ.....	20
3.2.2 การออกแบบขดลวดแรงสูง.....	24
3.2.3 การออกแบบขดลวดต่อควบ.....	32
3.3 การหาขนาดท่อनाสายแรงดันสูง.....	35
3.4 การหาขนาดอิเล็กทรอนิกส์ภายนอก.....	36
3.5 ซีลด์ขั้วแรงสูงและซีลด์ขั้วนิวทรัล.....	37

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.6 การคำนวณปริมาตรน้ำมันหม้อแปลง.....	37
3.7 การถ่ายเทความร้อน(Heat Dissipation).....	40
3.7.1 การนำความร้อน.....	40
3.7.2 การพาความร้อน.....	42
3.7.3 การแผ่รังสีความร้อน.....	43
3.8 การคำนวณแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์(%Z).....	43
3.9 การคำนวณกระแสไฟฟ้าลัดวงจร(I_{sc}).....	44
3.10 กำลังไฟฟ้าลัดวงจร(S_{sc}).....	44
3.11 การออกแบบตัวถัง.....	45
3.12 การจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	49
บทที่ 4 การประกอบสร้าง.....	50
4.1 แกนเหล็ก.....	50
4.2 ขดลวดแรงต่ำ.....	64
4.3 ขดลวดแรงสูง.....	69
4.4 ขดลวดต่อควบ.....	73
4.5 ตัวถังและส่วนประกอบภายนอก.....	76
4.6 การประกอบขดลวดเข้ากับแกนเหล็ก.....	81
4.7 การต่อสาย.....	85
4.8 ประกอบตัวถัง ปิดฝาและเติมน้ำมัน.....	90
บทที่ 5 การทดสอบ.....	94
5.1 การวัดค่าความต้านทานฉนวน.....	94
5.2 การวัดอัตราส่วนแรงดันและการตรวจสอบขั้ว.....	96
5.3 การวัดค่าความต้านทานกระแสตรงของขดลวด.....	98
5.4 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสไม่มีโหลด.....	100
5.5 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียมีโหลดและแรงดันอิมพีแดนซ์.....	103
5.6 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกิน.....	106
5.7 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันจากตัวจ่ายอื่น.....	107
5.8 การทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม.....	108
5.9 การตรวจสอบรูปคลื่นแรงดัน.....	109
5.10 การทดสอบการเกิดวาทไฟของช่องว่างทรงกลม.....	113

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	115
6.1 สรุป.....	115
6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	117
เอกสารอ้างอิง.....	119
ภาคผนวก.....	120
ภาคผนวก ก.....	121
ภาคผนวก ข.....	143
ภาคผนวก ค.....	165
กิตติกรรมประกาศ.....	180



สารบัญญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	Flowchart แสดงขั้นตอนการออกแบบ.....	5
2.1	ส่วนประกอบวงจรแม่เหล็กไฟฟ้า.....	6
2.2	หม้อแปลงแบบหุ้มด้วยฉนวนแห้ง.....	10
2.3	หม้อแปลงแบบจุ่มน้ำมัน.....	10
2.4	ไดอะแกรมการต่อหม้อแปลงทดสอบแบบขั้วบันได.....	11
3.1	ภาพตัดขวางพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก.....	14
3.2	การไหลของเส้นแรงแม่เหล็กที่การตัดแผ่นเหล็กแบบมุมฉากและมุม 45° ...	15
3.3	ภาพก่อนและหลังการตัดมุมแกนเหล็ก.....	15
3.4	การกำหนดความกว้างแกนเหล็กให้สามารถบรรจุลงถังได้.....	16
3.5	ขนาดของแกนเหล็ก.....	17
3.6	ลักษณะการพันขดลวดล้อมแกนเหล็ก.....	18
3.7	ภาพตัดของลวดแรงต่ำ.....	21
3.8	ภาพตัดขดลวดแรงสูง.....	25
3.9	การพันขดลวดแรงสูงแบบเกรดตั้ง.....	26
3.10	ภาพตัดขดลวดต่อควบ.....	33
3.11	ภาพตัดของขดลวดตามแนวแกนเหล็ก.....	39
3.12	ภาพตัดของขดลวดตามแนวขวางแกนเหล็ก.....	40
3.13	พื้นที่ผิวภายนอกฉนวน.....	41
3.14	ผลการทดสอบแรงดันวาบไฟตามผิวไฟฟ้ากระแสสลับ.....	45
3.15	อิเล็กทรอนิกส์แรงสูงที่เหมาะสมที่ใช้กับแรงดันขนาด 100-200 kV.....	46
3.16	ลักษณะตัวถังหม้อแปลงทดสอบที่ออกแบบ.....	48
4.1	แกนเหล็ก.....	50
4.2	ลักษณะการตัดแผ่นเหล็ก.....	51
4.3	การตัดแผ่นเหล็ก.....	53
4.4	วิธีการเรียงแผ่นเหล็กตามลำดับขั้นตอน (ก) – (จ).....	54
4.5	ทดลองเรียงแผ่นเหล็กตามแบบ.....	55
4.6	การออกแบบแคลมป์ยึดแกนเหล็ก.....	57
4.7	รูปการเตรียมแคลมป์.....	59
4.8	การเรียงแกนเหล็ก.....	60
4.9	การเตรียมซิลต์ขั้วแรงสูงและซิลต์ขั้วนิวทรัล.....	64
4.10	Mandrel.....	66

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 end Insulation.....	66
4.12 แสดงแบบการพันขดลวดแรงต่ำ.....	67
4.13 การพันขดลวดแรงต่ำ.....	68
4.14 Mandrel.....	70
4.15 end Insulation.....	70
4.16 ตำแหน่งของต้นและปลายลวดแรงสูง.....	70
4.17 แบบการพันขดลวดแรงสูง.....	71
4.18 การพันขดลวดแรงสูง.....	72
4.19 สัญลักษณ์ของต้นและปลายขดลวดต่อควบ.....	73
4.20 แบบการพันขดลวดต่อควบ.....	74
4.21 การพันขดลวดต่อควบ.....	75
4.22 การประกอบตัวถังเข้ากับฝาถังโดยใช้แหวนล็อก.....	77
4.23 การเตรียมตัวถังพีวีซี.....	77
4.24 การเตรียมส่วนประกอบอื่นๆ เช่น ฝาถัง และแหวนล็อก.....	78
4.25 ประกอบตัวถังเพื่อทดสอบการรั่วซึม.....	80
4.26 การประกอบขดลวดเข้ากับแกนเหล็ก.....	81
4.27 ขั้นตอนของการต่อสาย.....	85
4.28 การอบไล่ความชื้น.....	89
4.29 ขั้นตอนของการประกอบตัวถัง ปิดฝาและเติมน้ำมัน.....	90
5.1 วงจรทดสอบความต้านทานฉนวนระหว่างขดลวดแรงต่ำกับขดลวดแรงสูง..	95
5.2 การทดสอบค่าความต้านทานฉนวน.....	95
5.3 วงจรการวัดอัตราส่วนแรงดันและการตรวจสอบขั้ว.....	97
5.4 การวัดอัตราส่วนแรงดันและการตรวจสอบขั้ว.....	97
5.5 วงจรการวัดค่าความต้านทานกระแสตรง.....	99
5.6 การวัดค่าความต้านทานกระแสตรง.....	99
5.7 วงจรการวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสไม่มีโหลด.....	100
5.8 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสไม่มีโหลด.....	101
5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแส.....	102
5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและค่าความสูญเสีย.....	102
5.11 วงจรการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียมีโหลดและแรงดันอิมพีแดนซ์.....	103
5.12 การทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียมีโหลดและแรงดันอิมพีแดนซ์.....	103

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน.....	104
5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและค่าความสูญเสีย.....	104
5.15 วงจรทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกิน.....	106
5.16 วงจรทดสอบความคงทนต่อแรงดันจากตัวจ่ายอื่น.....	107
5.17 วงจรทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม.....	108
5.18 การทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม.....	108
5.19 วงจรตรวจสอบรูปคลื่นแรงดัน.....	110
5.20 การต่อวงจรตรวจสอบรูปคลื่นแรงดัน.....	110
5.21 รูปคลื่นแรงดันที่ 10 kV.....	111
5.22 รูปคลื่นแรงดันที่ 50 kV.....	111
5.23 รูปคลื่นแรงดันที่ 70 kV.....	112
5.24 รูปคลื่นแรงดันที่ 80 kV.....	112
5.25 วงจรทดสอบการใช้งาน.....	113
5.26 การต่อวงจรทดสอบการใช้งานและการเบรคดาวของแกปทรงกลม.....	113

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	1
1.2	2
1.3	4
2.1	8
2.2	9
3.1	12
3.2	20
3.3	24
3.4	31
3.5	35
3.6	36
3.7	36
3.8	38
3.9	38
4.1	51
5.1	96
5.2	98
5.3	100
5.4	101
5.5	104
5.6	105
5.7	109
5.8	114
6.1	115
6.2	116
6.3	116
6.4	116
6.5	117

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หม้อแปลงทดสอบเป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับจ่ายแรงดันทดสอบกระแสสลับความถี่ต่ำ เพื่อใช้ในการทดสอบวัสดุและอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงก่อนนำไปติดตั้งใช้งานในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ซึ่งอุปกรณ์ต่างๆที่ติดตั้งในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูงมีโอกาสได้รับแรงดันเกินทั้งที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างกระทันหัน หรือการทำงานของอุปกรณ์ตัดต่อวงจร เช่น เซอร์คิตเบรกเกอร์ รวมทั้งที่เกิดจากปรากฏการณ์ธรรมชาติเรียกว่า “แรงดันเลิร์จ” แรงดันเกินดังกล่าวแม้จะเกิดขึ้นในระยะเวลาสั้นๆ แต่ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากแรงดันเกินเหล่านี้มีผลกระทบต่อความคงทนของการฉนวนของอุปกรณ์ในระบบ ซึ่งจะทำให้เกิดความผิดปกติขึ้นในระบบ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้า อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทุกชนิดที่ผลิตขึ้น จะต้องทำการทดสอบในหัวข้อต่างๆ โดยจะมีมาตรฐานกำหนดไว้ อุปกรณ์ที่จะนำมาติดตั้งใช้งานจริงได้นั้นจะเป็นอุปกรณ์ที่ได้ผ่านการทดสอบแล้วทั้งสิ้น มาตรฐาน IEC Publ.71-1993 ได้กำหนดระดับแรงดันทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่กำลังเป็นเวลานาน 1 นาที (AC power frequency withstand voltage test 1 minute) ซึ่งขึ้นอยู่กับระดับแรงดันสูงดังแสดงในตาราง 1.1 และ 1.2 [1]

แรงดันสูงที่ใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ นั้น จะได้จากการแปลงระดับแรงดันต่ำให้สูงขึ้นโดยใช้หม้อแปลงทดสอบซึ่งในปัจจุบันหม้อแปลงทดสอบเหล่านี้จะนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งจะมีราคาสูง ดังนั้นถ้าหากสามารถออกแบบและสร้างขึ้นได้เอง ก็จะทำให้ประหยัดงบประมาณของทางภาควิชาและยังเป็นการพัฒนาความรู้ความสามารถของนักศึกษา ทำให้ได้รับประสบการณ์ในการทำงานมากขึ้น

ตารางที่ 1.1 มาตรฐานการฉนวนระดับ $1 \text{ kV} < U_m < 52 \text{ kV}$

Highest voltage for equipment U_m kVrms	Rate power-frequency short duration withstand voltage kVrms
3.6	10
7.2	20
12.0	28
17.5	38
24.0	50
36.0	70

ตารางที่ 1.2 มาตรฐานการฉนวนระดับ $52 \text{ kV} < U_m < 300 \text{ kV}$

Highest voltage for equipment U_m kVrms	Rate power-frequency short duration withstand voltage kVrms
52	95
72.5	140
123	185
145	230
170	275
245	325
	360
	395
	460

1.2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าได้เคยมีการออกแบบสร้างหม้อแปลงทดสอบแบบถังโลหะและถังฉนวน แบบมีขดลวด 3 ชุด 2 ตัวที่เหมือนกัน 100 kV 5 kVA และสามารถต่อกันแบบชั้นบันไดโดยวางซ้อนกันจะได้แรงดันสูงเพิ่มขึ้นเป็น 200 kV และพิกัดกำลังไฟฟ้า 10 kVA ใช้ท่อพีวีซีเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 cm เป็นฉนวนภายนอกและใช้น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนภายใน

1.3 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบแบบถังฉนวน 100 kV 10 kVA เพื่อใช้ในการต่อคาสเคดในอนาคต การฉนวนระหว่างชั้นขดลวดเป็นแบบกระดาษ และใช้น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนแทรกซึม โดยใช้ท่อ PVC เป็นตัวถัง
- 2) นำหม้อแปลงดังกล่าวมาใช้เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน เพื่อใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 3) สามารถใช้โปรแกรมไฟไนลิเมนต์ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าได้

1.4 ขอบเขตและข้อกำหนดในงานวิจัย

- 1) ทำการออกแบบสร้างหม้อแปลงทดสอบแบบถังฉนวนที่พิกัด 100 kV 10kVA เพื่อใช้ในการต่อคาสเคดในอนาคต วางซ้อนกันโดยอ้างอิงการออกแบบในส่วนต่างๆ 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]

หรือ มอก. 82-2527 ลวดทองแดงกลมตันเคลือบโพลีไวนิลฟอร์มัล [12]

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

2) ใช้โปรแกรมไฟไนลิเมนต์ในการวิเคราะห์การกระจายและความเครียดของ
สนามไฟฟ้าในแต่ละจุดของหม้อแปลงทดสอบ

3) ทำการทดสอบการใช้งานของหม้อแปลงตามมาตรฐานข้างต้น

1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1) ศึกษาทฤษฎีและการออกแบบสร้างหม้อแปลงทดสอบจากหนังสือ บทความ
ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง และงานวิจัยต่างๆ

2) ศึกษามาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบสร้างหม้อแปลงต่างๆ

3) ศึกษาการใช้งานของโปรแกรมที่เกี่ยวข้อง

- โปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้า

- โปรแกรมวิเคราะห์ทางกล

- โปรแกรมจำลองโครงสร้าง

4) ทำการออกแบบ

5) ประกอบสร้าง

6) ทดสอบ

ตารางที่ 1.3 แผนการดำเนินงานในโครงการวิศวกรรม

ขั้นตอนการดำเนินงาน	2548							2549		
	ม.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1.ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการออกแบบสร้างหม้อแปลงทดสอบและมาตรฐานต่าง ๆ	■	■								
2.ศึกษาการใช้โปรแกรมไฟไนติเมนท์		■	■	■						
3.ทำการออกแบบโดยใช้ไฟไนติเมนท์ทำการวิเคราะห์และปรับแต่ง			■	■						
4.เขียนแบบโครงสร้าง				■	■					
5.ประกอบสร้างชิ้นงาน						■	■	■	■	
6.ทำการทดสอบ								■	■	
7.สรุปและจัดทำปริญา นิพนธ์						■	■	■	■	■

■ แผนการดำเนินงานที่กำหนดไว้

■ แผนการดำเนินงานจริง

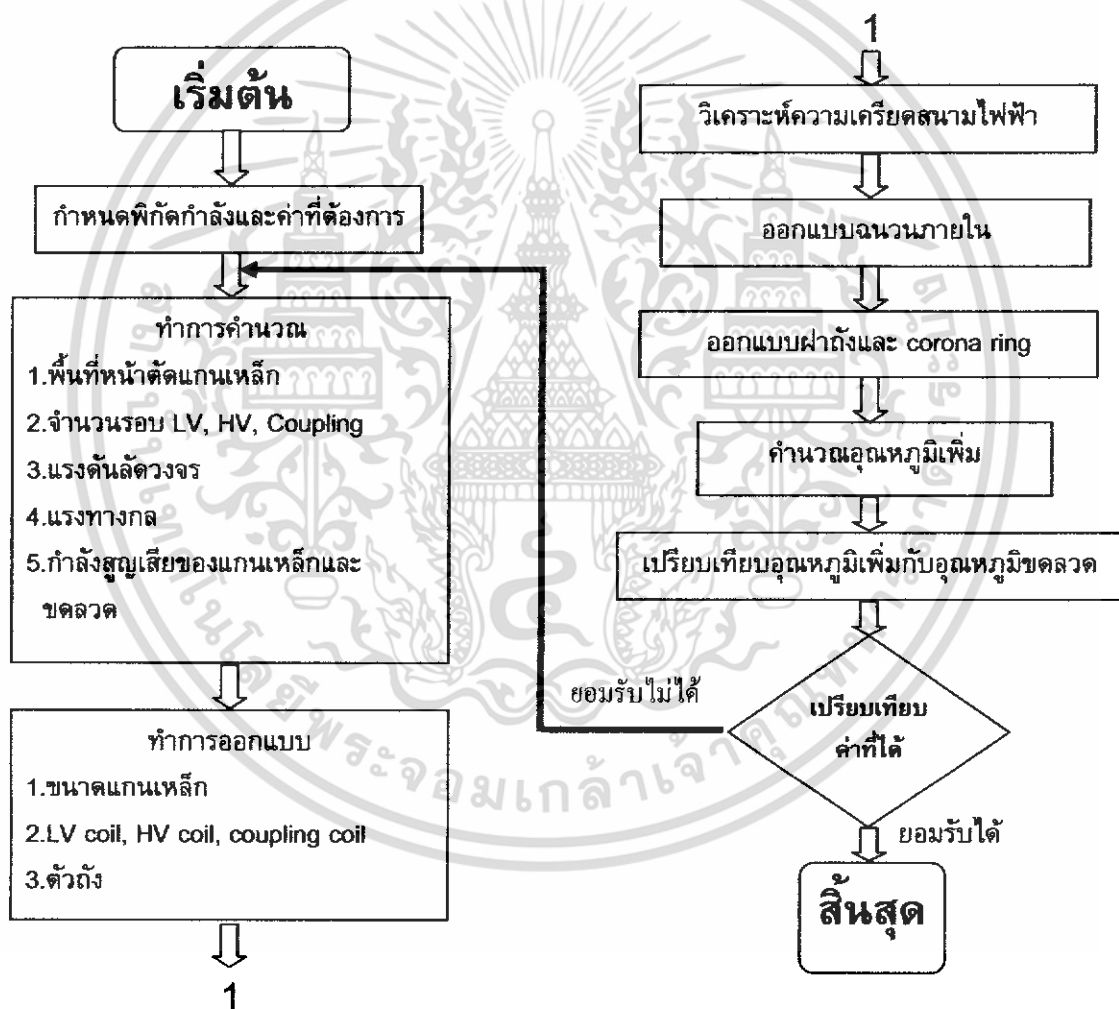
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

-มีความรู้ความเข้าใจในทฤษฎีและหลักการทำงานของหม้อแปลงทดสอบ
-เกิดแนวคิดในการออกแบบโครงสร้างหม้อแปลงทดสอบแบบถ่วงน้ำหนักที่เป็นแบบต่อขั้นบันได 2 ชั้น

-สามารถวิเคราะห์สนามไฟฟ้าของหม้อแปลงที่ออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

-ประหยัดงบประมาณในการจัดซื้อหม้อแปลงทดสอบ

-ได้ฝึกฝนทักษะการแก้ปัญหาในการทำงาน



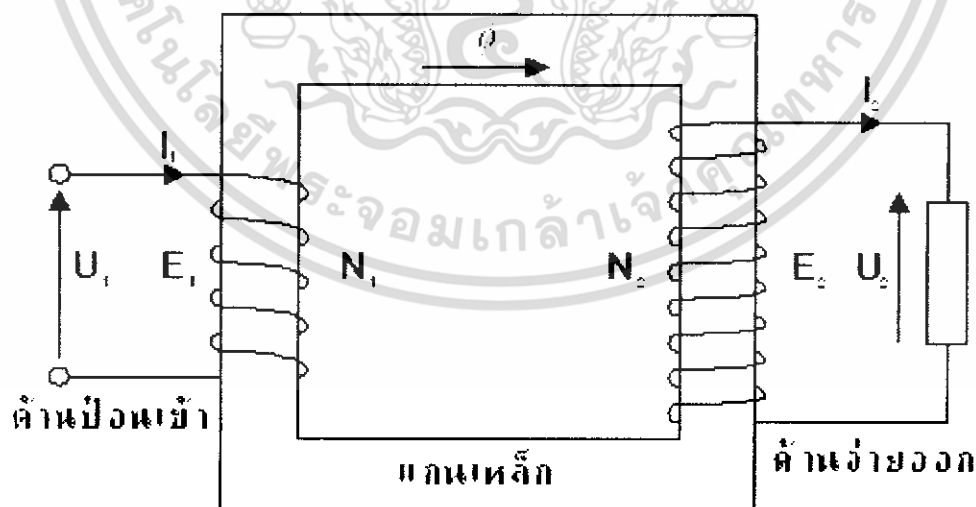
รูปที่ 1.1 Flowchart แสดงขั้นตอนการออกแบบ

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากแรงดันระดับหนึ่งไปยังแรงดันอีกระดับหนึ่ง อาจสูงขึ้นหรือต่ำลง หรือเท่าเดิมก็ได้ เช่น หม้อแปลงขดลวดแยก หลักการทำงานของหม้อแปลงจะอาศัยการเหนี่ยวนำของขดลวด ที่อยู่ในสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ส่วนประกอบที่สำคัญของหม้อแปลง ประกอบด้วย แกนเหล็กเป็นทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็ก และมีขดลวดสองชุด ชุดหนึ่งเป็นด้านป้อนแรงดันเข้า อีกชุดหนึ่งเป็นด้านจ่ายแรงดันออก พันอยู่บนแกนเหล็ก ดังรูป นอกจากนี้แกนเหล็กและขดลวดแล้ว ก็มีฉนวนซึ่งถือเป็นส่วนประกอบสำคัญในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทุกชนิด [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

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

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

$$E = 4.44 f N \phi_{\max}$$

$$\text{โดยที่ } \phi_{\max} = B_{\max} A$$

จะได้สมการพื้นฐานของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดของหม้อแปลงคือ

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

2.1 หม้อแปลงทดสอบ

หม้อแปลงทดสอบเป็นหม้อแปลงที่ใช้สร้างแรงดันสูงสำหรับการทดสอบวัสดุฉนวนหรืออุปกรณ์ที่จะนำไปใช้ในระบบส่งจ่ายแรงสูง 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}) เมื่อเกิดวาทไฟตามผิว หรือ เบรกดาวนที่วัสดุทดสอบ
- 5) ระดับแรงดันที่โคโรนาเริ่มเกิด (Corona inception level)
- 6) ความถี่ (f)

2.1.2 ขนาดแรงดันที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ

การกำหนดขนาดแรงดันของหม้อแปลงทดสอบ ขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันทดสอบ สูงสุดที่มีโอกาสจะใช้ อย่างน้อยที่สุดจะต้องสูงกว่าค่าแรงดันคงทนอยู่ได้ของวัสดุทดสอบ ที่ใช้กับระบบแรงดันที่กำหนดให้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1.1-1.2 ซึ่งแรงดันที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบควรสูงกว่าแรงดันทดสอบประมาณ 10-20%

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

รูปคลื่นแรงดันทดสอบกระแสลับที่เปลี่ยนไปตามเวลา $U(t)$ อาจจะแตกต่างไปจากรูปคลื่นไซน์ได้ ฉะนั้นลักษณะของแรงดันทดสอบอาจอธิบายได้ด้วยค่ายอด และค่า r.m.s. ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.6

$$U_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \quad (2.6)$$

เมื่อ T คือ เวลาช่วงคาบของแรงดันรูปคลื่นแรงดันนี้อาจแตกต่างไปจากรูปคลื่นไซน์ได้ไม่เกิน 5% ของค่ายอดรูปคลื่นพื้นฐาน [14]

2.1.3 กระแสที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ

กระแสที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ ขึ้นอยู่กับวัสดุทดสอบ กล่าวคือ วัสดุทดสอบบางชนิดใช้กระแสมาก บางชนิดใช้กระแสน้อย ฉะนั้นหม้อแปลงทดสอบจะต้องสามารถจ่ายกระแสให้กับวัสดุทดสอบได้ ตัวอย่างกระแสสูงสุดที่ใช้ทดสอบดังแสดงในตารางที่ 2.1 [14]

ตารางที่ 2.1 กระแสสูงสุดที่ใช้ทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าความถี่ต่ำ

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 จะต้องทดสอบ โดยการติดตั้งให้เหมือนหรือใกล้เคียงกับสภาพการใช้งานจริง แรงดันควรเป็นรูปคลื่นไซน์ อุปกรณ์หรือวัสดุจนวนทั้งหลายในด้านไฟฟ้าแรงสูง อาจถือได้ว่ามีลักษณะเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า คือ มีค่าเก็บประจุ ฉะนั้นโผลดของหม้อแปลงทดสอบจึงเป็นแบบตัวเก็บประจุ กระแสจึงเป็นแบบเก็บประจุ (capacitive current) หากการจนวนไม่ดีพอทนต่อแรงดันไม่ได้ก็จะเกิดเบรกดาวร์ สปาร์ก เจาะทะลุ ลัดวงจร กระแสลัดวงจรจะต้องสูงมากพอ เพื่อให้สามารถสังเกตเห็นความบกพร่องของการจนวนได้ชัดเจน แต่กำลังไฟฟ้าลัดวงจรไม่ควรสูงจนเกินไปเพราะจะทำให้เกิดการระเบิดได้ ฉะนั้น กำลังของหม้อแปลงและกำลังไฟฟ้าลัดวงจรต้องให้สอดคล้องกัน

ความจุทางไฟฟ้าหรือค่าเก็บประจุ ที่เป็นโผลดของหม้อแปลง ประกอบด้วย ความจุทางไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ อุปกรณ์วัด และสายต่อ รวมทั้งค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์ (stray capacitance) ฉะนั้นกำลังไฟฟ้าที่จะต้องใช้ในการทดสอบจะคำนวณได้จากสมการ

$$S = \omega C U_t^2 \quad (2.7)$$

$$S = 2\pi f C U_t^2 \times 10^{-9} \text{ kVA} \quad (2.8)$$

โดย S คือ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ (kVA)

C คือ ค่าความจุไฟฟ้ารวม เป็น (pF)

U_t คือ แรงดันทดสอบ เป็น (kVrms)

f คือ ความถี่ของแรงดัน เป็น (Hz)

กำลังไฟฟ้าที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ ควรจะต้องมีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าที่จะต้องป้อนให้กับโผลด คือ จะต้องคำนึงถึงแฟกเตอร์ปลอดภัย (safety factor) ด้วย เพื่อให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงทดสอบใช้ได้ยาวนานๆ ค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบอาจประมาณได้จากตารางที่ 2.2 [14]

ตารางที่ 2.2 ค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุจนวนและอุปกรณ์ไฟฟ้า

วัสดุจนวนและอุปกรณ์ไฟฟ้า	ค่าความจุไฟฟ้า(pF)
-ลูกถ้วยจนวนธรรมดา	10...100
-ปลอกจนวนตัวนำ	150...400
-หม้อแปลงกระแส	200...600
-เคเบิลแรงสูง(ต่อความยาว 1 เมตร)	150...300
-หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 1 MVA	ประมาณ 1,000
100 MVA	ประมาณ 10,000
-อุปกรณ์วัดแรงดัน(voltage divider)	50...500
-สายต่อวงจรแรงสูง(ต่อเมตร)	5...15

2.1.5 โครงสร้างและการฉนวนหม้อแปลงทดสอบ

หม้อแปลงทดสอบโดยทั่วไปเป็นเฟสเดียว ประกอบด้วยขดลวด 2 ชุด คือ ขดป้อนแรงดันเข้า(ด้านแรงต่ำ) และขดจ่ายแรงดันออก(ด้านแรงสูง) ขดลวดทั้งสองจะพันอยู่บนแกนเหล็ก ดังที่กล่าวแล้ว ปัญหาสำคัญของหม้อแปลงทดสอบที่นอกเหนือไปจากหม้อแปลงธรรมดา คือ การฉนวน ถ้าแรงดันไม่เกิน 100 kV การฉนวนอาจเป็นแบบแห้ง หรือหุ้มขดลวดและแกนเหล็กด้วยสารสังเคราะห์ก็ได้ เช่น อีพ็อกซี ดังรูปที่ 2.2 และ 2.3 หม้อแปลงที่มีแรงดันสูงขึ้น ขดลวดแต่ละขดรับแรงดัน 50 ถึง 100 kV การฉนวนจะเป็นกระดาษชุบน้ำมัน แกนเหล็กและขดลวดจะจุ่มอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง ที่บรรจุอยู่ในถังโลหะหรือถังฉนวน [14]

1. แบบหุ้มด้วยฉนวนแห้ง

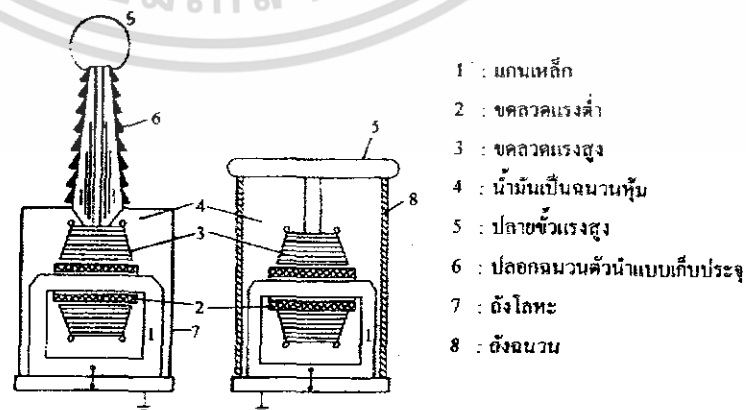
แกนเหล็กจะต่อลงดิน ขดลวดแรงต่ำจะพันติดกับแกนเหล็ก ขดลวดแรงสูงจะพันทับขดลวดแรงต่ำ นั่นคือ ขดลวดแรงสูงจะอยู่ห่างแกนเหล็ก ขดลวดรอบที่มีแรงดันสูงขึ้นก็จะอยู่ห่างจากแกนเหล็กหรือส่วนที่ต่อลงดินมากขึ้น การฉนวนจะเพิ่มขึ้นตามแรงดัน

2. แบบจุ่มน้ำมัน

ขดลวด แกนเหล็ก และส่วนประกอบทั้งหมดจะจุ่มอยู่ในน้ำมัน ซึ่งบรรจุอยู่ในถังโลหะหรือถังฉนวน ในกรณีที่ใช้ถังโลหะต้องใช้ปลอกฉนวนนำสายแรงสูงออกนอกถัง ถ้าใช้ตัวถังฉนวนจะไม่ต้องใช้ปลอกฉนวนนำสายออกด้านนอก



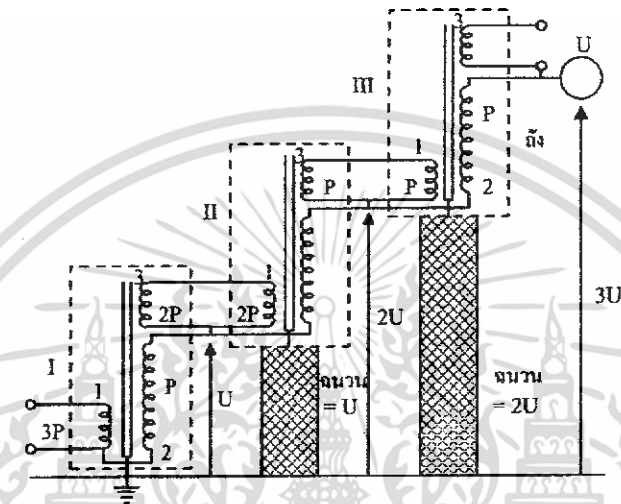
รูปที่ 2.2 หม้อแปลงแบบหุ้มด้วยฉนวนแห้ง



รูปที่ 2.3 หม้อแปลงแบบจุ่มน้ำมัน

2.1.6 หม้อแปลงต่อแบบชั้นบันได

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



รูปที่ 2.4 ไดอะแกรมการต่อหม้อแปลงทดสอบแบบชั้นบันได

บทที่ 3

การออกแบบสร้างชิ้นงาน

การออกแบบสร้างหม้อแปลงทดสอบแบบชั้นบันไดขนาดพิกัด 100 kV 10 KVA มีขดลวด 3 ชุด คือ ขดลวดแรงดันต่ำ ขดลวดแรงสูง และขดลวดต่อควบ ซึ่งมีค่าที่กำหนดดังแสดงในตารางที่ 3.1

3.1 การออกแบบแกนเหล็ก

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

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

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

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

ตารางที่ 3.1 ค่ากำหนดของหม้อแปลงทดสอบที่ออกแบบ

ข้อกำหนดแต่ละตัว	หม้อแปลง 1 ตัว	เมื่อต่อชั้นบันได 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
แรงดันต่อควบ U_3 , V	220	220
กระแสต่อควบ I_3 , A	-	22.73
จำนวนเฟส	1	1
ความถี่	50	50

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)

การหาขนาดแกนเหล็กจะต้องมีการกำหนด ค่า E/N ขึ้นมาในที่นี้กำหนดให้มีค่า 3.5 ซึ่งค่านี้เป็นค่าที่ทำให้ได้ขนาดของแกนเหล็กและขดลวดมีขนาดที่เหมาะสมกันหลังจากที่ได้มีการออกแบบในพิภักนี้มาแล้วหลายครั้ง

*Stacking factor = 0.97 เป็นค่าเฉพาะของเหล็กชนิด M-4

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

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

เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก

$$\phi = B_m \times A_m \times F_s$$

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

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

การออกแบบหน้าตัดของแกนเหล็กอาจจะทำเป็นหลายชั้น คือ รูปสี่เหลี่ยมอัดภายในวงกลม เพื่อให้สามารถใช้พื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงขึ้นกว่าพื้นที่หน้าตัดขวงที่เป็นสี่เหลี่ยม และเหตุผลทางกายภาพในการพันขดลวดให้มีลักษณะเป็นวงกลมได้ง่ายขึ้น ลดการเสียดสีระหว่างขดลวดกับแกนเหล็ก และเมื่อขณะใช้งานจะเกิดแรงระหว่างขดลวดก็จะไม่ทำให้ขดลวดเสียรูป การออกแบบหน้าตัดแกนเหล็กแบบหลายชั้นเพื่อให้มีประสิทธิภาพการใช้พื้นที่สูงสุดสามารถคำนวณได้ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์แต่การออกแบบหน้าตัดแกนเหล็กให้มีหลายชั้นจะทำให้มีความยุ่งยากในการตัดและเรียงแกนเหล็กมากขึ้น ดังนั้นจึงเลือกที่จะเรียงแกนเหล็กเพียง 2 ชั้น

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

แกนเหล็กแบบ 2 ชั้นนี้จะให้ค่าแฟกเตอร์พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กในวงกลม (F_c)

เป็น

$$F_c = 76.8\%$$

F_c มาจากการคำนวณเปรียบเทียบย้อนกลับ

เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของแกนแม่เหล็กหาได้จากสมการ (3.4)

$$\frac{\pi}{4} \times D^2 = \frac{A_m}{F_c} \quad (3.3)$$

โดย D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางผ่านกลางของวงกลม

A_m คือ พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก มีหน่วยเป็น mm^2

F_c คือ Factor พื้นที่หน้าตัดในวงกลม

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad D &= \sqrt{(A_m \times 4) / (\pi \times F_c)} \\ &= \sqrt{(11609.55 \text{ mm}^2) / (\pi \times 0.768)} \\ &= 138.77 \text{ mm} \end{aligned} \quad (3.4)$$

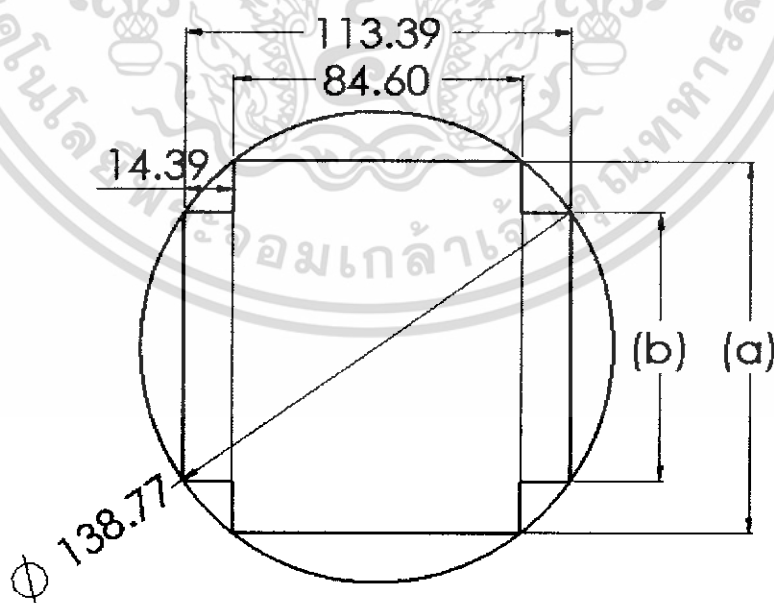
ความหนาของแกนเหล็กชั้นที่ 1

$$\begin{aligned} d_1 &= \sqrt{D^2 - a^2} \\ &= \sqrt{138.77^2 - 110^2} \\ &= 84.6 \text{ mm} \end{aligned} \quad (3.5)$$

ความหนาของแกนเหล็กชั้นที่ 2

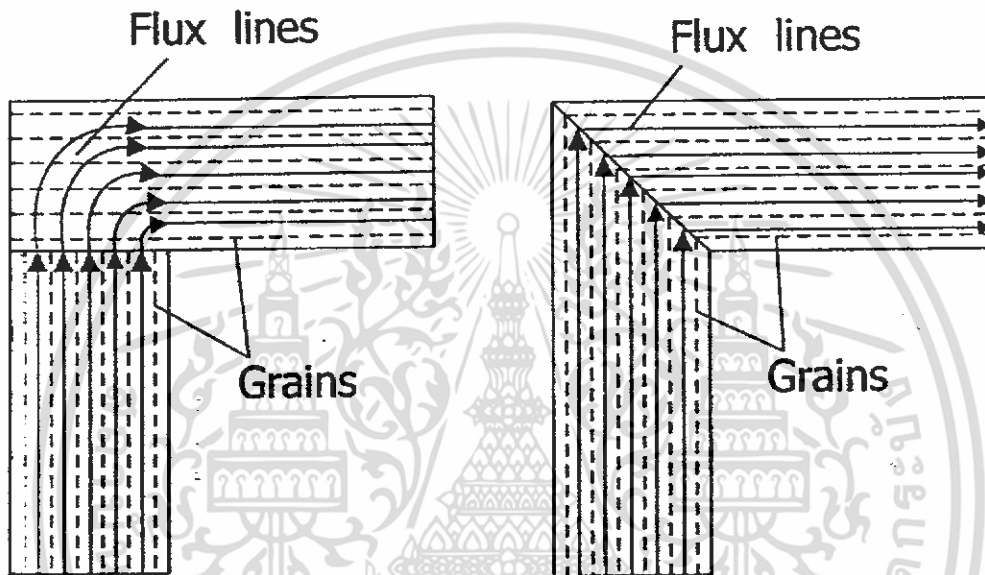
$$\begin{aligned} d_2 &= \frac{\sqrt{D^2 - b^2} - d_1}{2} \\ &= \frac{\sqrt{138.77^2 - 80^2} - 84.6}{2} \\ &= 14.39 \text{ mm} \end{aligned} \quad (3.6)$$

ดังนั้นจะได้ภาพตัดขวางของพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กดังรูปที่ 3.1

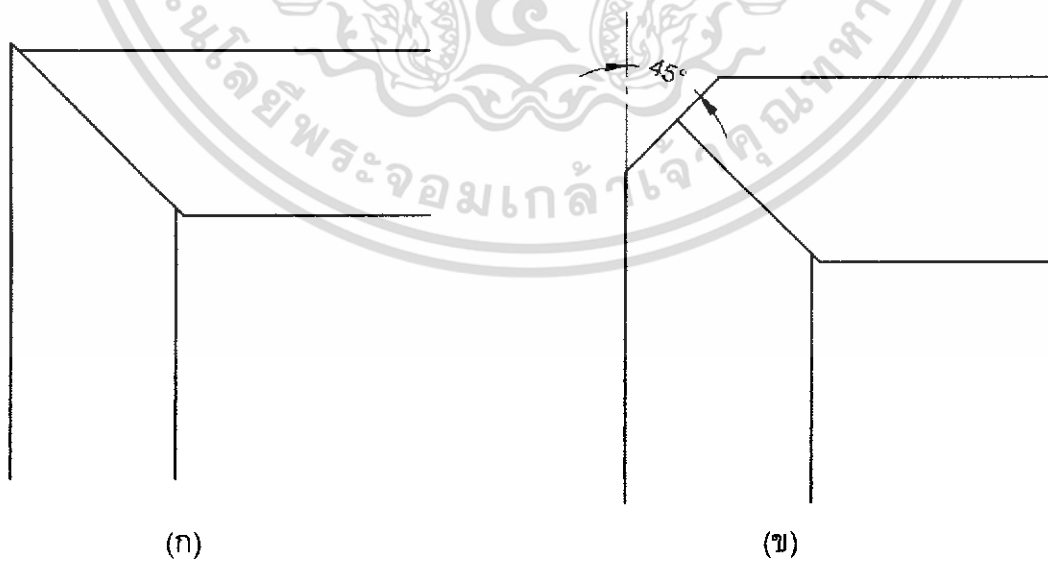


รูปที่ 3.1 ภาพตัดขวางพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

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



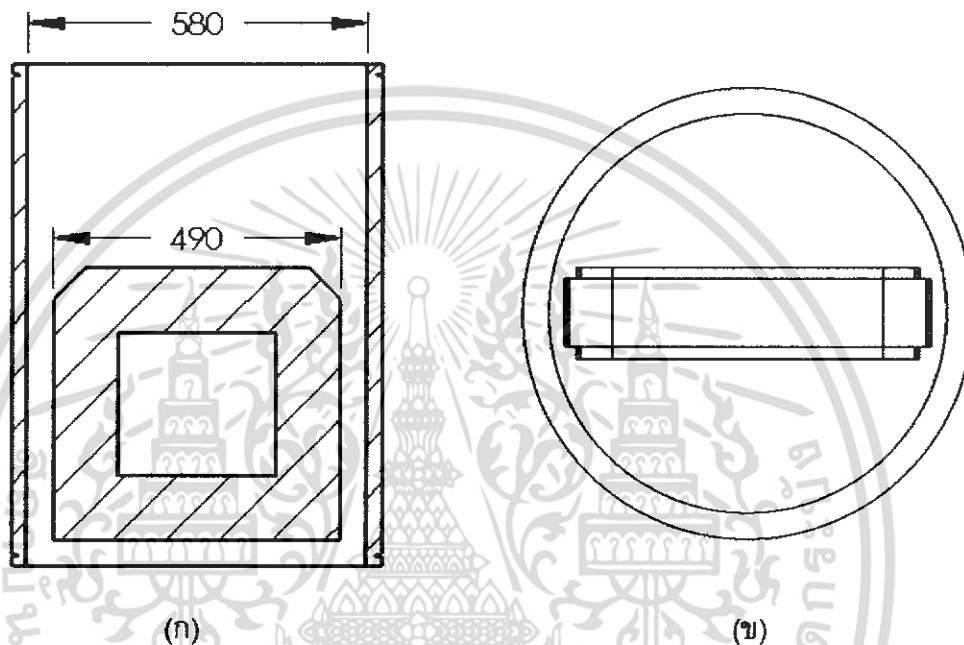
รูปที่ 3.2 การไหลของเส้นแรงแม่เหล็กที่การตัดแผ่นเหล็กแบบมุมฉากและมุม 45°



รูปที่ 3.3 ภาพก่อนและหลังการตัดมุมแกนเหล็ก

- (ก) ไม่มีการตัดมุมแกนเหล็ก
 (ข) มีการตัดมุมแกนเหล็ก เพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้า

แกนเหล็กด้านบน (Top yoke) จะเป็นที่สำคัญสำหรับสวมชุดลวด เนื่องจากจะสามารถนำสายไฟแรงสูงออกมาใช้งานได้ง่าย มุมของแกนเหล็กด้านบนจะอยู่ใกล้กับชุดลวดแรงสูงจึงจะทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงในบริเวณนี้ ดังนั้นต้องทำการตัดมุมของแกนเหล็กดังในรูปที่ 3.3 (ข) เพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้า



รูปที่ 3.4 การกำหนดความกว้างแกนเหล็กให้สามารถบรรจุลวดได้

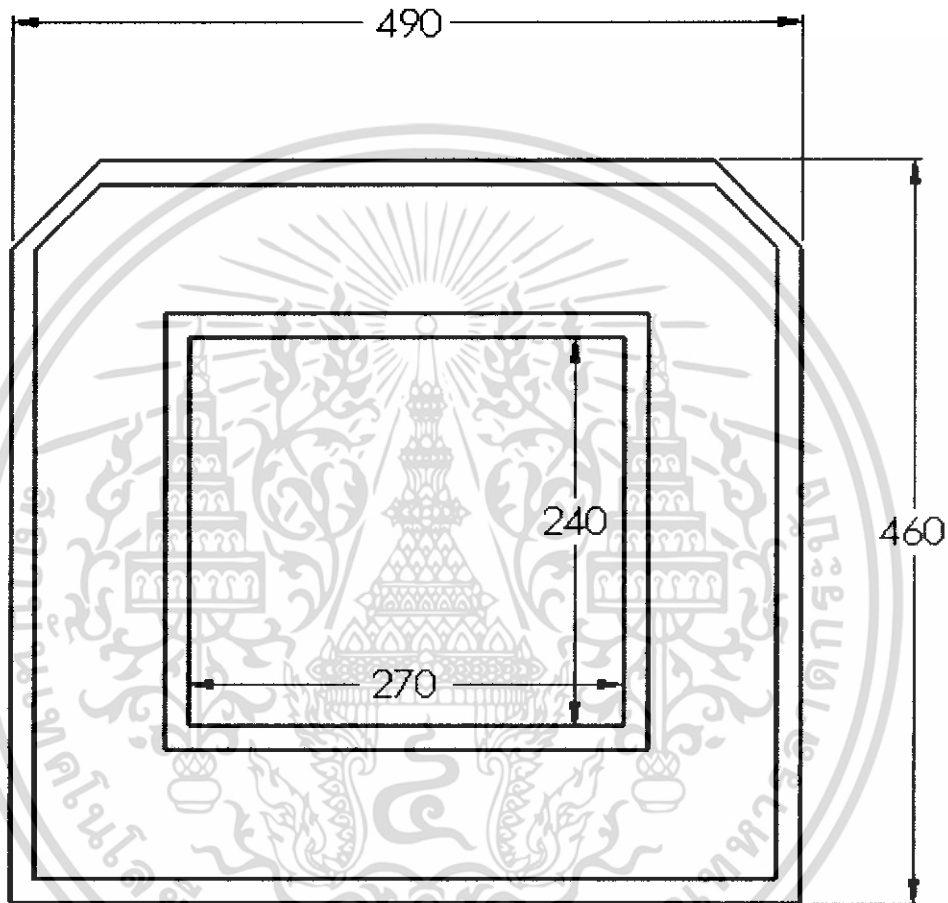
(ก) ภาพตัดด้านหน้า

(ข) ด้านบน

ความกว้างของแกนเหล็กจะขึ้นอยู่กับขนาดของตัวถังซึ่งจะใช้ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 580 มม. เนื่องจากในการออกแบบได้ออกแบบให้หม้อแปลงวางซ้อนกันดังนั้นจึงควรจะใช้ท่อ PVC 8.5 ซึ่งมีความหนา 25.4 ± 1.3 มม. เพื่อให้สามารถรองรับแรงทางกลที่เกิดขึ้นจากการวางซ้อนกัน ขนาดท่อ PVC แสดงดังภาคผนวก ข.5 ในที่นี้จะกำหนดความกว้างของแกนเหล็กที่ 490 มม. เพื่อให้สามารถบรรจุแกนเหล็กลงในถังได้พอดี

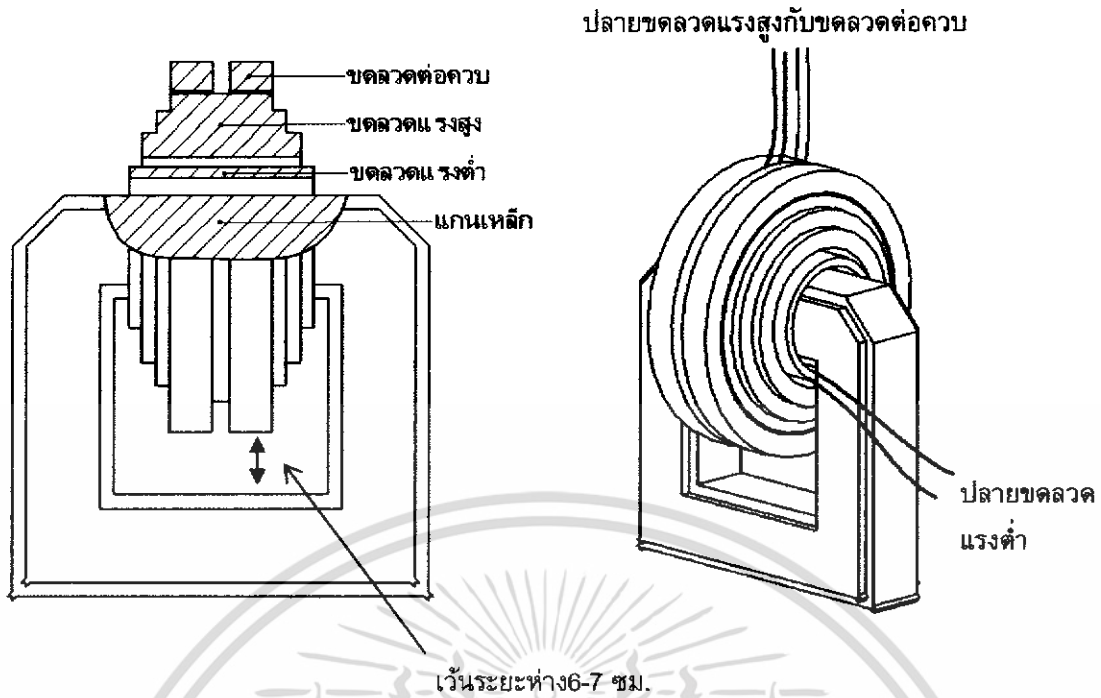
ความสูงของแกนเหล็กจะขึ้นอยู่กับความหนาของชุดลวดซึ่งจากการคำนวณรัศมีวงนอกสุดของชุดลวดจะมีค่า 215.5 มม. ความต่างศักย์สูงสุดของชุดลวดด้านล่างเมื่อเทียบกับแกนเหล็กมีค่าประมาณ $100 \text{ kV}_{\text{rms}}$ จากภาคผนวก ข.19 ความคงทนต่อสนามไฟฟ้าสูงสุดภายในน้ำมันหม้อแปลงมีค่า $30 \text{ kV}_{\text{rms}}/\text{mm}$ ในตอนแรกเมื่อคิดค่า safety factor 150% จะได้ค่า $15 \text{ kV}_{\text{rms}}/\text{mm}$ แต่จากการสอบถามข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตได้มีการออกแบบไว้ที่ $3 \text{ kV}_{\text{rms}}/\text{mm}$

เนื่องจากในการผลิตอาจจะมีฝุ่นละอองต่างๆเข้าไปปะปนอยู่กับน้ำมันจึงทำให้ความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวนในน้ำมันลดลง ดังนั้นระยะห่างระหว่างแกนเหล็กกับขดลวดควรจะมีค่าไม่ต่ำกว่า 23.6 มม. แต่เนื่องจากในการออกแบบต้องการให้เกิดโคโรนาน้อยที่สุดเพราะต้องการยืดอายุการใช้งานของหม้อแปลง อีกทั้งในเชิงการผลิตจะมีขีดจำกัดในการตัดแผ่นเหล็กได้เป็นขนาดเลขที่ลงตัว จึงได้เผื่อระยะไว้ประมาณ 6-7 ซม. ดังในรูปที่ 3.5 ดังนั้นจะได้ความสูงของแกนเหล็กมีค่า 460 มม.



รูปที่ 3.5 ขนาดของแกนเหล็ก

แกนเหล็กที่ใช้เป็นแบบคอร์ (core type transformer) ซึ่งมีลักษณะการพันขดลวดเป็นแบบพันล้อมแกนเหล็ก และเนื่องจากแกนเหล็กของหม้อแปลงจะถูกต่อลงดิน ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการฉนวนจะทำการพันขดลวดแรงต่ำไว้ด้านใน และพันขดลวดแรงสูงทับขดลวดแรงต่ำ และในที่นี้จะมีการพันขดลวดต่อควบทับขดลวดแรงสูงเพื่อส่งกำลังไฟฟ้าไปยังหม้อแปลงตัวบน ดังรูปที่ 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

$$V_{C1} = A_m \times F_s \times l_{FE} \tag{3.8}$$

$$V_{C1} = 11,609.55 \times 10^{-2} \times 0.97 \times 146$$

$$V_{C1} = 16,441.44 \text{ cm}^3$$

หลังถูกตัด

$$V_{C2} = \text{ปริมาตรก่อนถูกตัด} - \text{ปริมาตรที่ถูกตัด} \tag{3.9}$$

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

$$\times \text{ความหนาของแกนเหล็กชั้นที่ 1}]$$

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

$$\times \text{ความหนาของแกนเหล็กชั้นที่ 2}] \times 2 \times 0.97$$

$$= \left\{ \left[\frac{1}{2} \times (110/2)^2 \times 84.6 \right] + \left[\frac{1}{2} \times (80/2)^2 \times 2 \times 14.4 \right] \right\} \times 2 \times 0.97$$

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

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)

$$W_C = V_{C2} \times \text{Density} \quad (3.11)$$

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

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

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กหาได้จากกราฟผู้ผลิตเหล็กซิลิคอนกำหนดให้ในนี้ จากกราฟในภาคผนวก ข.3 กำลังไฟฟ้าสูญเสียต่อน้ำหนักแกนเหล็กที่ 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 ข.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

$$I_\phi = \frac{P_{VA}}{V_{i/p}} \quad (3.12)$$

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

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

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 ดังภาคผนวก ข.7 ขดลวดที่โตกว่านี้แม้จะให้ความหนาแน่นของกระแสที่ต่ำกว่า แต่จำนวนชั้นการพันของขดลวดจะเพิ่มขึ้นอาจทำให้เปอร์เซ็นต์แรงดันลัดวงจรสูงเกินไป

1. ขนาดพื้นที่หน้าตัดของขดลวดแรงต่ำ

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

โดย A_1 คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวด (mm²)

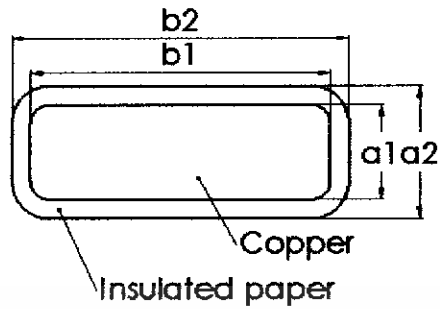
I_1 คือ กระแสป้อนเข้าที่พิกัด (A)

J_1 คือ ความหนาแน่นกระแส (A/mm²)

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

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

ขดลวดแรงดันต่ำ ใช้ลวดสี่เหลี่ยมทองแดงหุ้มกระดาษ ดังภาคผนวก ข.7 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 mm^2

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/Tum (V/T)

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

3. การพันขดลวดแรงต่ำ

จำนวนขดลวดมี 1 ชุด พัน 3 ชั้น

ชั้นที่ 1	21	รอบ
ชั้นที่ 2	21	รอบ
ชั้นที่ 3	21	รอบ
รวม N_1	63	รอบ

ในการฉนวนระหว่างชั้นของขดลวดจะใช้กระดาษคราฟท์ (Kraft paper) ซึ่งคุณสมบัติของกระดาษที่ใช้ทำเป็นฉนวนทั้งหมดแสดงดังภาคผนวก ข.16 โดยในที่นี้จะใช้กระดาษฉนวนมีความหนา 0.08 mm พัน 3 รอบ เพื่อป้องกันการต่อถึงกันของเส้นลวดระหว่างชั้นและเพื่อป้องกันการเสียดสีกันของเส้นลวดในขั้นตอนการพัน ส่วนบริเวณด้านข้างของขดลวดจะใช้กระดาษคราฟท์ (Kraft paper) ประกบด้านข้างขดลวดก่อนที่จะใช้ไม้หนา 10 mm อัดระหว่าง Press board กับแกนเหล็กเพื่อป้องกันขดลวดมีการเคลื่อน

$$\begin{aligned}
\text{ความกว้างของขดลวด} &= (\text{ความกว้างของเส้นลวดรวมฉนวน} \\
&+ \text{ระยะห่างระหว่างเส้นลวด}) \\
&\times (\text{จำนวนรอบ/layer} + 1) \quad (3.15) \\
&= (9+0.1) \times (21+1) \\
&= 200.2 \text{ mm}
\end{aligned}$$

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

$$\text{ระยะห่างระหว่างเส้นลวด} = 0.1 \text{ mm} \quad [16]$$

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

$$\begin{aligned}
\text{ความหนาของขดลวด} &= [(\text{ความหนาของเส้นลวดรวมฉนวน} \\
&+ \text{ระยะห่างระหว่างเส้นลวด}) \\
&\times \text{จำนวน layer}] \\
&+ [(\text{จำนวน layer} - 1) \\
&\times \text{ความหนาของกระดาษกราฟท์}] \quad (3.16) \\
&= [(3.5+0.1) \times 3] + [2 \times 0.24] \\
&= 11.28 \text{ mm}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{แรงดันสูงสุดระหว่างชั้น} &= 2 \times \text{จำนวนรอบ/layer} \\
&\times \text{Volt/Turn} \quad (3.17) \\
&= 2 \times 21 \times 3.5 \\
&= 147 \text{ V}
\end{aligned}$$

กระดาษกราฟท์หนา 0.08 mm 3 รอบ รวม 0.24 mm ซึ่งจากคุณสมบัติกระดาษกราฟท์ในภาคผนวก ข.16 กระดาษกราฟท์หนา 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 ไม่นวนเพื่อป้องกันขดลวดเคลื่อนที่และใช้ Press board หนา 3 mm เป็นแกนของขดลวดแรงต่ำ ดังนั้น

$$\text{รัศมีวงในของขดลวดแรงดันต่ำ} = 69.39 + 2 + 3$$

$$= 74.39 \text{ mm}$$

$$\text{รัศมีวงนอก} = 74.39 + \text{ความหนาของขดลวด}$$

$$= 74.39 + 11.28$$

$$= 85.67 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \text{รัศมีเฉลี่ย } (r_1) &= (74.39 + 85.67)/2 \\ &= 80.03 \text{ mm} \end{aligned}$$

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

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 ความหนาแน่นของทองแดง [2]

l_{av} ความยาวรอบเฉลี่ย (mm)

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

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

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)

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

$$R = 0.028 \Omega$$

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

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

โดย $P_{\text{CU LV}}$ กำลังสูญเสียในขดลวดแรงต่ำ (W)

I_1 กระแสป้อนเข้า (A)

R ความต้านทานขดลวด (Ω)

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

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

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/mm² เพราะเมื่อคำนวณขนาดของขดลวดออกมาแล้วมีขนาดที่เหมาะสม

1. ขนาดพื้นที่หน้าตัดของขดลวดแรงสูง

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

โดย A_2 พื้นที่หน้าตัดของขดลวด (mm²)

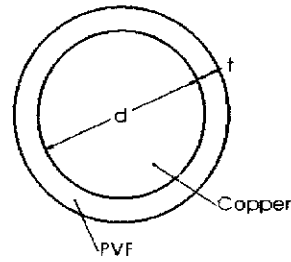
I_2 กระแสจ่ายออกที่พิกัด (A)

J_2 ความหนาแน่นกระแส (A/mm²)

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

$$A_2 = 0.1$$

ขดลวดแรงดันสูง ใช้ลวดทองแดงกลมหุ้มฉนวน PVF SWG #29 เคลือบฉนวนหนาพิเศษดังภาคผนวก ข.11 มีขนาดดังต่อไปนี้



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

รูปที่ 3.8 ภาพตัดขวางขดลวดแรงสูง

พื้นที่หน้าตัดใช้งานจริง (A_2) = 0.0962 mm²

2. จำนวนรอบขดลวด

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

โดย N_2 คือ จำนวนรอบของขดลวดแรงต่ำ (รอบ)

V_2 คือ แรงดันจ่ายออก (V)

E/N คือ Volt/Turn (V/T)

$$\begin{aligned} &= \frac{100,000}{3.5} \\ &= 28,571.43 \text{ รอบ} \end{aligned}$$

คิดเผื่อแรงดันตก 1.5% (การสอบถามข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต) รวม 29,000 รอบ

3. การพัน

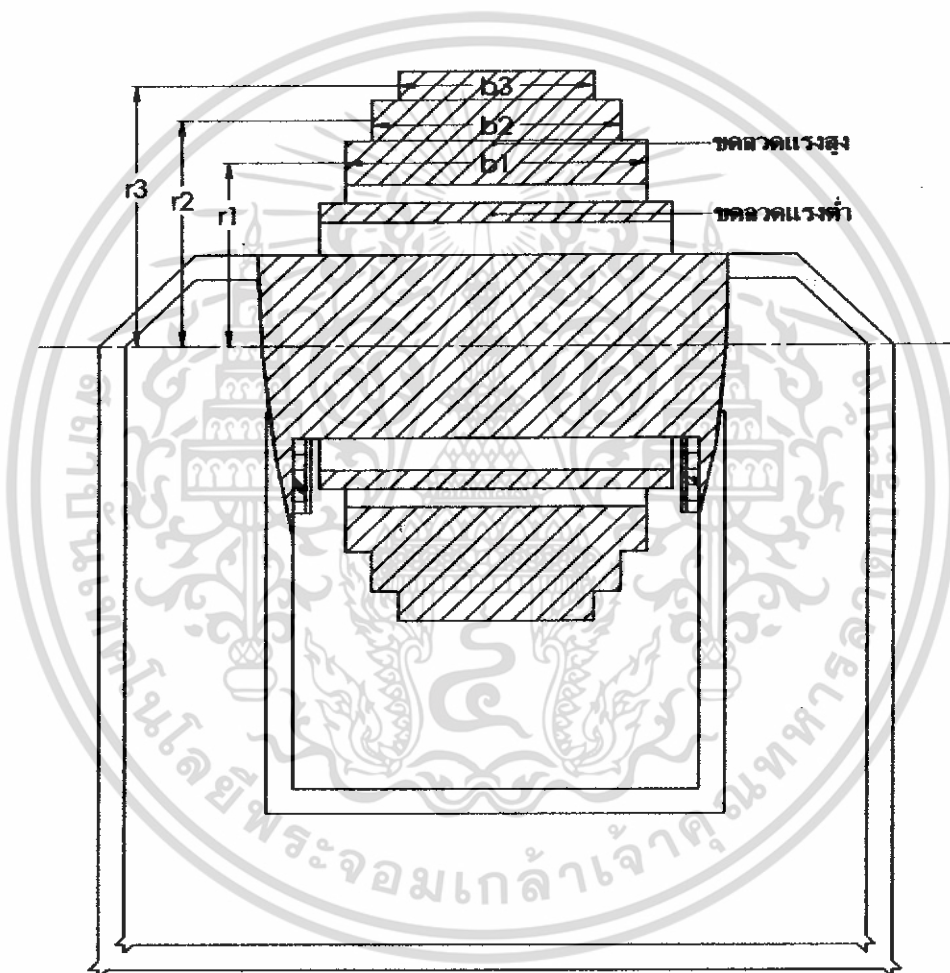
การพันขดลวดแรงดันสูงจะพันแบบชั้นทรงกระบอกโดยมีการเกรตติ้งขดลวดเนื่องจากถ้าหม้อแปลงได้รับแรงดันเสิร์จ จะทำให้แรงดันกระจายบนขดลวดเกิดความไม่สม่ำเสมอขึ้น[14] ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าเก็บประจุของขดลวดดังนั้นในรูปของขดลวดที่สูงขึ้นจะต้องพันขดลวดให้กว้างน้อยลงแต่ถ้าทำการเกรตขดลวดลงทุกชั้นจะมีปัญหาความยุ่งยากในการพันและเสียเวลามาก จึงจัดแบ่งขดลวดเป็นชั้นๆ รวม 3 ชั้นด้วยกัน โดยใช้คาร์ตมีเนลีย์ในแต่ละชั้นคู่กับความกว้างของชั้นในชั้นนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน คือ

$$r_{21} b_{21} \approx r_{22} b_{22} \approx r_{23} b_{23}$$

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

* ชั้นที่ 3 ในชั้นที่ 25 จะพันครึ่งรอบเพื่อ lead สายออกตรงกลาง



รูปที่ 3.9 การพันขดลวดแรงสูงแบบเกรตติ้ง

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

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

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

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

$$\begin{aligned} \text{รวมความกว้างกระดาษปิดขอบด้านละ 20 mm} \\ &= 187.13 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ชั้นที่ 3} &= 0.402 \text{ mm} \times (314 + 1) \\ &= 126.63 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{รวมความกว้างกระดาษปิดขอบด้านละ 20 mm} \\ &= 166.63 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความหนาของขดลวด} &= \text{จำนวน layer} \times [\text{ความหนาของเส้นลวดรวมฉนวน} \\ &+ \text{ความหนาของกระดาษกราฟท์}] \end{aligned} \quad (3.25)$$

$$\begin{aligned} \text{ชั้นที่ 1} &= 30 \times [0.402 \text{ mm} + 0.32] \\ &= 21.66 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ชั้นที่ 2} &= 26 \times [0.402 \text{ mm} + 0.32] \\ &= 18.77 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ชั้นที่ 3} &= 23 \times [0.402 \text{ mm} + 0.32] \\ &= 16.61 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\text{แรงดันสูงสุดระหว่างชั้น} = 2 \times \text{จำนวนรอบ/layer} \times \text{Volt/Turn} \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned} \text{ชั้นที่ 1} &= 2 \times 415 \times 3.5 \\ &= 2,905 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ชั้นที่ 2} &= 2 \times 365 \times 3.5 \\ &= 2,555 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ชั้นที่ 3} &= 2 \times 314 \times 3.5 \\ &= 2,198 \text{ V}\end{aligned}$$

กระดาษคราฟท์หนา 0.08 mm 6 ชั้น รวม 0.48 mm ซึ่งจากคุณสมบัติกระดาษคราฟท์ในภาคผนวก ข.16 กระดาษคราฟท์หนา 0.08 mm 1 ชั้น สามารถทนความเครียดสนามไฟฟ้าได้ 55 kV/mm ดังนั้นกระดาษคราฟท์หนา 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 จากนั้นจะเพื่อระยะเพื่อสวมขดลวดขดลวดแรงสูงเข้ากับขดลวดแรงต่ำ 6 mm ขดลวดแรงสูงจะมีแกน 1 mm ตามด้วยกระดาษห่อ(creeped paper) 0.65 mm 5 ชั้น ซิลด์ชั่วคราว 10 mm เพราะฉะนั้น

$$\begin{aligned}\text{ชั้นที่ 1} \\ \text{รัศมีวงใน} &= 85.67 + 1 + 3 + 1 + 8 + 1 + (0.65 \times 5) + 10 \\ &= 112.92 \text{ mm} \\ \text{รัศมีวงนอก} &= \text{รัศมีวงใน} + \text{ความหนาของขดลวด} \\ &= 112.92 + 21.66 \\ &= 134.58 \text{ mm} \\ \text{รัศมีเฉลี่ย } (r_{21}) &= (110.92 + 134.58)/2 \\ &= 122.75 \text{ mm} \\ \text{ความยาวรอบเฉลี่ย } (l_{av}) &= 2 \times \pi \times r_{21} \\ &= 2 \times \pi \times 122.75 \\ &= 771.26 \text{ mm}\end{aligned}$$

น้ำหนักทองแดงของขดลวด

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

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

$$W = 8.22 \text{ kg}$$

ความต้านทานของขดลวด

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

$$R = 0.01724 \times 10^{-6} \Omega \cdot m \times \frac{30 \times 415 \times 771.26 \text{ mm}}{0.0962 \text{ mm}^2}$$

$$R = 1,720.81 \Omega$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวด ($P_{\text{CU HV1}}$)

$$P_{\text{CU HV1}} = I^2_{\text{HV}} R$$

กรณีใช้งานตัวเดียว

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

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

กรณีต่อคาสเคด

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

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

ชั้นที่ 2

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

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

$$= 137.83 + 18.77$$

$$= 156.6 \text{ mm}$$

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

$$= 147.22 \text{ mm}$$

$$\text{ความยาวรอบเฉลี่ย } (l_{av}) = 2 \times \pi \times r_{22}$$

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

$$= 925.01 \text{ mm}$$

น้ำหนักทองแดงของขดลวด

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

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

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

ความต้านทานของขดลวด

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

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

$$R = 1,573.17 \Omega$$

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

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

กรณีใช้งานตัวเดียว

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

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

กรณีต่อคาสเคด

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

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

ขั้นที่ 3

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

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

$$= 159.85 + 16.61$$

$$= 176.46 \text{ mm}$$

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

$$= 168.16 \text{ mm}$$

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

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

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

น้ำหนักทองแดงของขดลวด

$$W = N \times A_2 \times 1 \times \text{Density}$$

$$W = [(314 \times 22) + 157] \times 0.0962 \text{ mm}^2 \times 1,056.58 \text{ mm} \times 8,900 \text{ kg/m}^3$$

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

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})

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

กรณีใช้งานตัวเดียว

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

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

กรณีต่อคาสเคด

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

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

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

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

กรณีใช้งานตัวเดียว

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

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

กรณีต่อคาสเคด

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

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

ตารางที่ 3.4 สรุปลักษณะของขดลวดแรงสูง

ชนิดของวัสดุ	ลวดทองแดง
ขนาดของตัวนำ (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

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) (กรณีต่อคาสเคด)	ชั้นที่ 1	4.34
	ชั้นที่ 2	3.93
	ชั้นที่ 3	3.34
	รวม	<u>11.61</u>

3.2.3 การออกแบบขดลวดต่อควบ

1. ขนาดพื้นที่หน้าตัดของขดลวดต่อควบ

$$A_3 = \frac{I_3}{J_3}$$

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

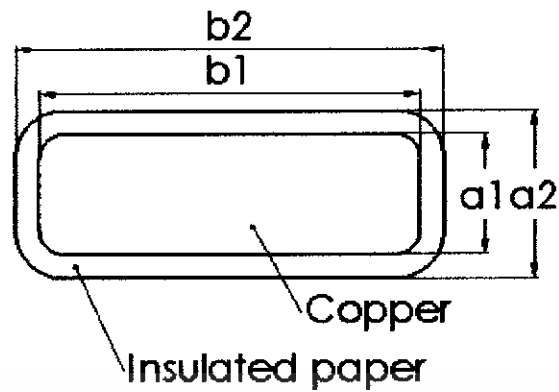
พื้นที่หน้าตัดใช้งานจริง(A_3) 19.79 mm^2

$$2. \text{ จำนวนรอบขดลวด} = \frac{V_3}{E/N}$$

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

$$= 62.86 \text{ รอบ}$$

เพื่อแรงดันตก 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 ภาพตัดขวางขดลวดต่อควม

3. การพัน

จำนวนขดลวดมี 2 ชุด พัน 8 ชั้น ชั้นละ 4 รอบ

$$\text{รวม (N)} \quad 64 \quad \text{รอบ}$$

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

$$= 135 \text{ mm}$$

$$\text{ความหนาของขดลวด} = [(\text{ความหนาของเส้นลวดรวมฉนวน} + \text{ระยะห่างระหว่างเส้นลวด})$$

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

$$\times \text{ความหนาของกระดาษคราฟท์}]$$

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

$$= 30.48 \text{ mm}$$

$$\text{แรงดันสูงสุดระหว่างชั้น} = 2 \times \text{จำนวนรอบ/layer} \times \text{Volt/Turn}$$

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

$$= 28 \text{ V}$$

กระดาษคราฟท์หนา 0.08 mm 3 รอบ รวม 0.24 mm ซึ่งจากคุณสมบัติ
กระดาษคราฟท์ในภาคผนวก ข.16 กระดาษคราฟท์หนา 0.24 mm 1 ชั้น สามารถทน

ความเครียดสนามไฟฟ้าได้ 55 kV/mm ดังนั้นกระดาษกราฟหนา 0.24 mm จะสามารถทนแรงดันได้ 13.2 kV เมื่อคิดค่า safety factor 150% สามารถทนแรงดันได้ 6.6 kV

4. ความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวดต่อควบ

เนื่องจากขดลวดแรงดันสูงมีรัศมีวงนอก 176.46 mm ฉนวนกัน 0.16 mm

กระดาษห่อ (creeped paper) 3.25 mm และแกนกระดาษ 1 mm เพราะฉะนั้น

$$\begin{aligned} \text{รัศมีวงใน} &= 176.46 + 0.16 + 3.25 + 1 \\ &= 180.87 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{รัศมีวงนอก} &= 180.87 + \text{ความหนาของขดลวด} \\ &= 180.87 + 30.48 \end{aligned}$$

$$= 211.35 \text{ mm}$$

$$\text{รัศมีเฉลี่ย (r}_3\text{)} = (180.87 + 211.35)/2$$

$$= 196.11 \text{ mm}$$

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

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

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

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

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

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

$$R = 0.069 \Omega$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดต่อควบ ($P_{CU T}$)

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

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

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

ตารางที่ 3.5 สรุปลักษณะของขดลวดต่อควบ

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 มีลักษณะเป็นแบบทรงกระบอกซ้อนกันสามชั้น ซึ่งในการคำนวณจะมองท่อนำสายแรงดันสูงเป็นตัวนำทรงกระบอกใน และมองระยะปลอดภัยที่น้อยที่สุดที่จะต้องห่างจากหม้อแปลงขณะใช้งานที่แรงดันสูงสุดเป็นรัศมีของทรงกระบอกนอก ในที่นี้คือระยะของระบบต่อลงดิน ดังนั้นสามารถคำนวณขนาดของท่อนำสายแรงดันสูงได้จากสมการที่ 3.27

$$E_r = \frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (3.27)$$

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 จะมีระยะต่ำจากขอบถึงเล็กน้อย 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

ตามค่าเปอร์มิตติวิตีของวัสดุนั้นๆ แต่ตามลักษณะทางโครงสร้างแล้ว จะเห็นว่ารัศมีในน้ำมันนั้นมีขนาดเล็ก จนไม่สามารถที่บรรจุสายแรงดันสูงและสายต่อควมเข้าไปได้ จึงได้มีการปรับขนาดให้มีรัศมีเท่ากับขนาดรัศมีของท่อในอากาศ ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วขนาดของท่อที่จะใช้ก็ต้องเป็นขนาดที่มีจำหน่ายในท้องตลาดซึ่งเป็นขนาดมาตรฐาน ซึ่งในที่นี้ได้ทำการเลือกใช้ตามขนาดดังตารางที่ 3.7

3.4 การหาขนาดอิเล็กโทรดซิลด์ภายนอก

ใช้ทำหน้าที่ลดหรือควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าที่ขั้วแรงสูง ให้มีค่าไม่เกินค่าวิกฤตเพื่อไม่ให้เกิดดีสชาร์จโคโรนาบนผิวนิเล็กโทรดแรงสูง ซึ่งในการออกแบบนี้เป็นแบบวงแหวนท่อนำวางอยู่บนผิวนิเล็กโทรดแรงสูงอีกที เพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้า บริเวณขอบด้านบนที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยม ซึ่งอาจทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงได้ที่จุดนี้ การคำนวณหาขนาดอิเล็กโทรดซิลด์ภายนอกนี้ จะคำนวณเช่นเดียวกับการหาขนาดของท่อนำสายแรงดันสูงซึ่งขนาดของอิเล็กโทรดซิลด์ภายนอกที่ได้จากการคำนวณแสดงในตารางที่ 3.8 [14]

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

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

ในกรณีหม้อแปลงต่อแบบชั้นบันได ที่อิเล็กโทรดตัวล่างของหม้อแปลงตัวบนจะมีการเทียบศักย์ไฟฟ้าจากอิเล็กโทรดตัวบนของหม้อแปลงตัวล่าง ทำให้ส่วนนี้มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน ฉะนั้นขนาดอิเล็กโทรดซิลด์ภายนอกที่ได้จึงมีขนาดเท่ากัน ส่วนอิเล็กโทรดซิลด์ภายนอกตัวบนของหม้อแปลงตัวบนจะมีขนาดที่ใหญ่กว่า เพราะมีแรงดันใช้งานสูงสุดเป็น 2 เท่าของหม้อแปลงตัวล่าง

3.5 ซิลด์ข้าวแรงสูงและซิลด์ข้าวนิวตริล

วงจรภายในหม้อแปลงในสภาวะปกติแล้ว หม้อแปลงจะมีค่าความเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุอยู่ กรณีที่ได้รับแรงดันเกินเข้ามา วงจรสมมุติของหม้อแปลงจะเหลือเพียงดาข่ายค่าความเก็บประจุสตรีย์และค่าความจุอนุกรมตกร้อมแต่ละขด ซึ่งทำให้แรงดันกระจายบนขดลวดไม่สม่ำเสมอ จึงมีโอกาศทำให้เกิดการเบรกดาวร์น ทำให้ฉนวนภายในเกิดความเสียหายอย่างถาวรได้ ดังนั้นจึงมีการใส่ซิลด์ข้าวแรงสูงและซิลด์ข้าวนิวตริลไว้ เพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ปลายขดลวดทั้งในสภาวะทำงานที่แรงดันปกติ และกรณีที่เกิดแรงดันเกินโดยมีลักษณะเป็นแผ่นทองแดงพันรอบที่ขดลวดต่อควบอีกที แต่ที่ขอบของแผ่นทองแดงจะมีความคมจึงต้องมีการม้วนปลายให้เป็นทรงกลม ในส่วนนี้ต้องมีการคำนวณรัศมีความโค้งเพื่อลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้า ให้มีค่าไม่เกินค่าวิกฤตที่กำหนด ในการคำนวณหาขนาดรัศมีความโค้งนี้จะคำนวณเช่นเดียวกับการหาขนาดของท่อนำสายแรงดันสูงการคำนวณแสดงในตาราง 3.9

โดยที่ E_{ri} คือ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ต้องการ ($E_{oil} = 10 \text{ kV}_p/\text{mm}$)

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

r_1 คือ รัศมีของตัวนำทรงกระบอกใน

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

3.6 การคำนวณปริมาตรน้ำมันหม้อแปลง

$$\text{ปริมาตรถัง} = \pi r^2 h \quad (3.28)$$

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

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

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

ปริมาตรแกนเหล็กพร้อมกับขดลวดไม่สามารถหาได้จากการคำนวณจึงได้ใช้

โปรแกรมคอมพิวเตอร์วัดปริมาตรจากที่ได้ทำการออกแบบมาโดยประมาณ

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

ฉะนั้นจะสามารถหาปริมาตรน้ำมันโดยประมาณได้

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

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

โดยปกติแล้วอุณหภูมิใช้งานของน้ำมันหม้อแปลงจะอยู่ที่ประมาณ $30-70 \text{ }^\circ\text{C}$ ดังนั้นจึงคำนวณอัตราการขยายตัวสูงสุดเป็นปริมาตรที่ $70 \text{ }^\circ\text{C}$ ว่าเป็นปริมาตรน้ำมันที่เต็มถึงพอดี แล้วคำนวณหาปริมาตรที่อุณหภูมิ $30 \text{ }^\circ\text{C}$ เพื่อจะหาความสูงของปริมาตรที่น้อยที่สุดที่ต่ำลงมาจากขอบถัง

จากปริมาตรน้ำมันที่คำนวณหามาได้และผลต่างของอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงจะสามารถหาปริมาตรที่มีการเปลี่ยนแปลงสูงสุดได้ดังนี้

$$\text{สัมประสิทธิ์การขยายตัวของน้ำมัน} \quad 0.00075 \text{ mL}/^\circ\text{C/mL}$$

ตารางที่ 3.8 ขนาดของอิเล็กโทรดซีลด์ภายนอกที่ได้จากการคำนวณจากสมการ 3.27

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

ตารางที่ 3.9 ขนาดซีลด์ขั้วแรงสูงและซีลด์ขั้วนิวตริลที่ได้จากการคำนวณจากสมการ 3.27

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

อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง 40 °C

∴ ปริมาตรของน้ำมันที่มีการเปลี่ยนแปลง = 0.03 mL/mL

∴ ปริมาตรของน้ำมันที่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งหมด = 5,418 mL

จากปริมาตรน้ำมันที่เปลี่ยนแปลงคำนวณหาความสูงของน้ำมันที่
ต่ำลงมาจากขอบถังได้ จากสูตร

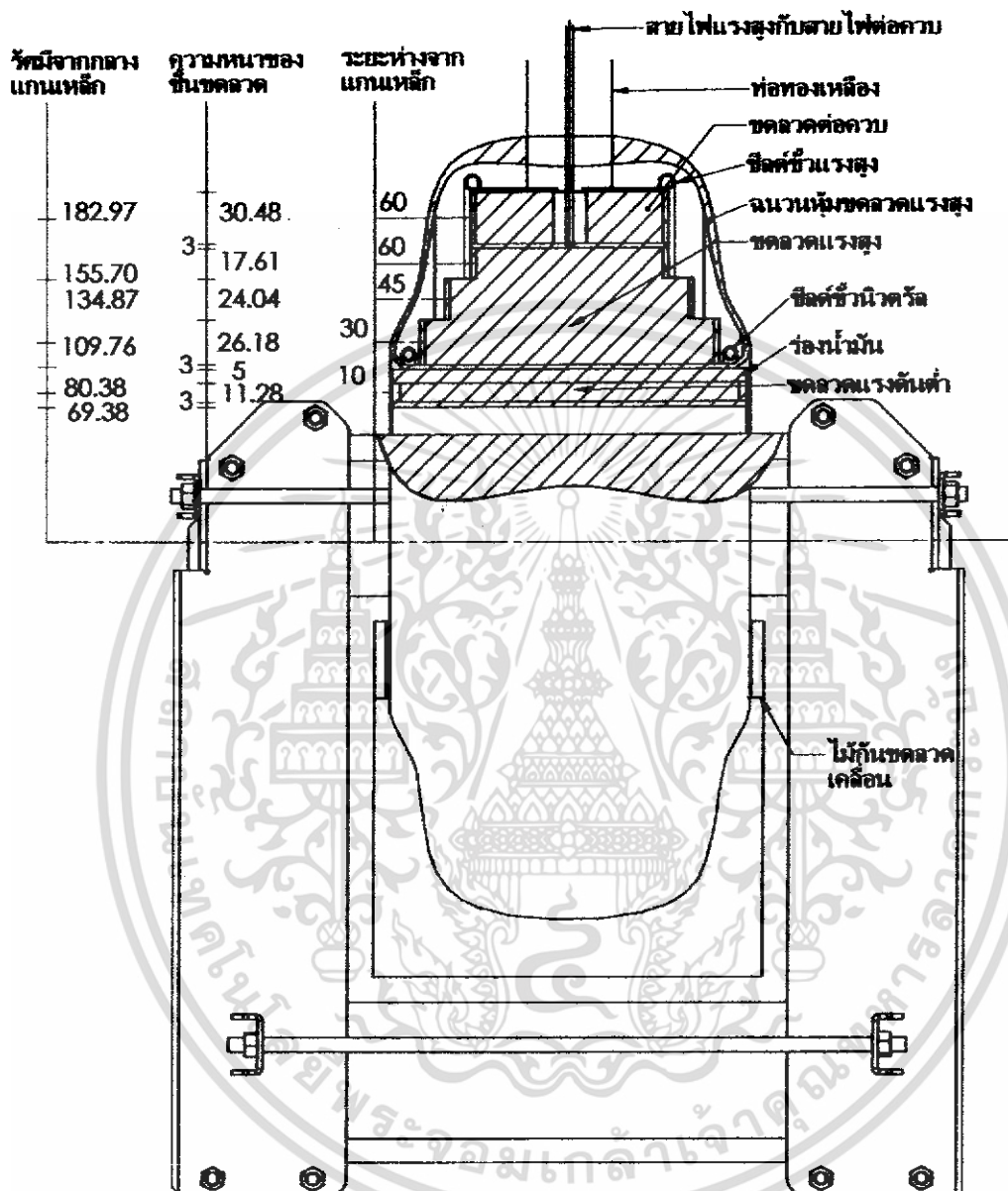
$$\Delta V = \pi r^2 h \quad (3.29)$$

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

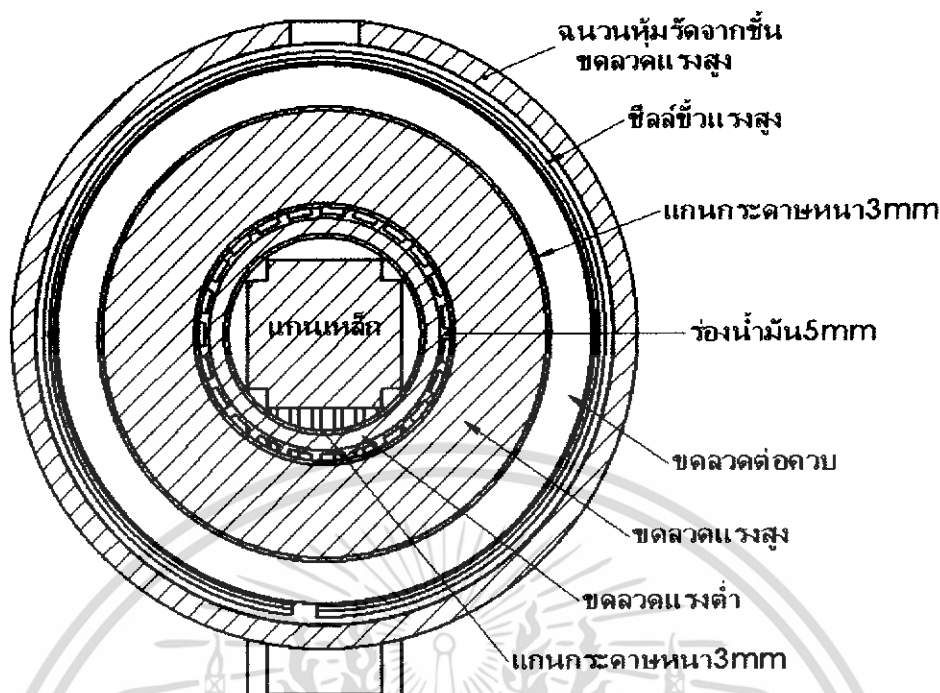
ΔV คือ ปริมาตรที่ลดลง ($\Delta V = 5,418$ mL)

∴ ความสูงที่ลดลงจากขอบถัง = 20.56 mm

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



รูปที่ 3.11 ภาพตัดของขดลวดตามแนวแกนหลัก



รูปที่ 3.12 ภาพตัดของขดลวดตามแนวขวางแกนเหล็ก

3.7 การถ่ายเทความร้อน(Heat Dissipation)

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

3.7.1 การนำความร้อน

การนำความร้อนจะมีลักษณะคล้ายการนำไฟฟ้า โดยการนำความร้อนจะเกิดระหว่าง 2 พื้นผิวที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิผ่านสารตัวกลางคั่นอยู่ และโมเลกุลของสารตัวกลางจะถ่ายเทความร้อนให้แก่โมเลกุลที่อยู่ติดกันโดยที่โมเลกุลไม่มีการเคลื่อนที่ การนำความร้อนจะเป็นไปตามสมการที่ 3.30 [1]

$$Q_{\text{cond}} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\rho l}{A}} = \frac{\Delta T_1}{\frac{\rho l}{A}} \quad (3.30)$$

โดยที่ Q_{cond} คือ กำลังความร้อนที่ถ่ายเทผ่านสารตัวกลาง (W)

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

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

l คือ ความยาวของสารตัวกลาง (m)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของสารตัวกลาง (m^2)

กำหนดหม้อแปลงจะทำงานที่อุณหภูมิแวดล้อม 40°C การนำความร้อนของฉนวน โดยคิดความหนาของฉนวนที่ล้อมรอบขดลวดแรงสูงและขดลวดต่อควบประมาณ 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

$$\Delta T_1 = \frac{Q_{\text{cond}} \times l}{\sigma \times A}$$

$$\Delta T_1 = \frac{41.66 \times 0.01}{0.4 \times 0.4}$$

$$\Delta T_1 = 2.6^{\circ}\text{C}$$

และคำนวณอุณหภูมิเพิ่มระหว่างขดลวดแรงต่ำกับขดลวดแรงสูงได้ คือ

$$\Delta T_1 = \frac{Q_{\text{cond}} \times l}{\sigma \times A}$$

$$\Delta T_1 = \frac{57.84 \times 0.003}{0.4 \times 0.1}$$

$$\Delta T_1 = 4.34^{\circ}\text{C}$$



รูปที่ 3.13 พื้นที่ผิวภายนอกฉนวน

การออกแบบอุณหภูมิสูงสุดของขดลวดถูกกำหนดไว้ที่ 120°C จากภาคผนวก ข.10 และอุณหภูมิของน้ำมันในสภาวะปกติมีค่า 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

จากมาตรฐาน [17] ท่อ PVC มีค่าอุณหภูมิมิวิกฤตที่ 75°C เมื่อคิดค่าอุณหภูมิของน้ำมันในสภาวะปกติที่ 40°C และอุณหภูมิเพิ่มเนื่องจากการสูญเสียในขดลวดเป็น 6.94°C ดังนั้นอุณหภูมิของน้ำมันเมื่อใช้งานเต็มพิกัดมีค่าประมาณ 46.94°C ซึ่งความร้อนบริเวณผิวของท่อ PVC จะมีค่าไม่เกินจากการคำนวณ ดังนั้นจึงไม่เกินอุณหภูมิมิวิกฤต

3.7.2 การพาความร้อน

การพาความร้อนเกิดจากอนุภาคของก๊าซหรือของเหลวที่ใกล้วัตถุร้อนและรับความร้อนจากวัตถุอื่น อนุภาคนั้นจะร้อนขึ้นและเคลื่อนที่เข้าไปแทนที่อนุภาคที่เย็นกว่า กระบวนการนี้จะทำให้ความหนาแน่นของของไหลมีการเปลี่ยนแปลง

การพาความร้อนจะแบ่งเป็น 2 แบบ ด้วยกันคือ การพาความร้อนแบบธรรมชาติและการพาความร้อนด้วยแรงขับเคลื่อน (Artificial convection) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวเฉพาะการพาความร้อนแบบธรรมชาติ

การพาความร้อนแบบธรรมชาติ เป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนมากขึ้นกับหลายตัวแปรด้วยกันอันได้แก่

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

ความร้อน [1]

การคำนวณการพาความร้อนจะขึ้นกับผลต่างของอุณหภูมิต่อวัตถุที่สนใจกับอุณหภูมิของตัวกลางที่แวดล้อมอาจทำได้โดยประมาณตามสมการที่ 3.31

$$q_{\text{conv}} = K_c (T_1 - T_2)^n \quad \text{W/m}^2 \quad (3.31)$$

โดยที่ K_c คือ ค่าคงที่ขึ้นกับขนาดและสภาพพื้นผิวของวัตถุร้อน

N คือ ค่าคงที่ขึ้นกับขนาดและสภาพพื้นผิวของวัตถุร้อนมีค่าระหว่าง

$$1-1.25$$

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

จากโครงสร้างของขดลวดแรงสูงและขดลวดต่อควบในตอนต้นจะมีถูกห่อหุ้มด้วยกระดาษฉนวนเพื่อป้องกันสิ่งแปลกปลอมเข้าไปในขดลวดซึ่งเป็นต้นเหตุของการเกิดเบรกดาวน์ ดังนั้นอุณหภูมิเพิ่มเนื่องจากการพาความร้อนมีค่าน้อย

3.7.3 การแผ่รังสีความร้อน

การแผ่รังสีความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำออกจากวัตถุร้อน ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิและลักษณะเฉพาะตัวของพื้นผิวอันได้แก่สี และความขรุขระของพื้นผิว ซึ่งมีความซับซ้อนมากในการคำนวณ

3.8 การคำนวณแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์(%Z)

พิจารณาแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์จากสมการที่ 3.32 – 3.34 รายละเอียดของสมการดูได้จากเอกสารอ้างอิง [18]

$$e_z = \sqrt{e_r^2 + e_x^2} \quad (3.32)$$

$$e_r = \frac{P_T}{S_N} \times 100 \quad (3.33)$$

$$e_x = \frac{0.42 \times \pi \times S_N \times \left(\frac{d_m + D_m}{2} \right) \times \left(\text{HVLV} + \frac{\text{RB}_{LV} + \text{RB}_{HV}}{3} \right) \times \frac{f}{50} \times K_g}{K_9 \times \left(\frac{U_{ph}}{N} \right)^2 \times \text{AL}_{app} \times 10} \quad (3.34)$$

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 ; ($\text{RB}_{LV} = 11.28$ mm)

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

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

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

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

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

$$K_9 = \text{Number of wound legs (when three phase } K_9 = 3) ; (K_9 = 1)$$

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

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

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

$$AL_{LV} = \text{Axial length of low voltage winding} ; (AL_{LV} = 200.2 \text{ mm})$$

ตั้งนั้น %Z = 4.06 (ต่อหม้อแปลง 1 ตัว)

3.9 การคำนวณกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{SC})

จากสมการกระแสลัดวงจร

$$I_{SC} = \frac{I_{HV}}{\%Z} \times 100 \quad (3.35)$$

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

$$S_{SC} = \frac{S_{HV}}{\%Z} \times 100 \quad (3.36)$$

โดย S_{SC} คือ กำลังไฟฟ้าวงจร (A)

S_{HV} คือ กำลังไฟฟ้าทางด้านแรงสูง (A)

%Z คือ แรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์

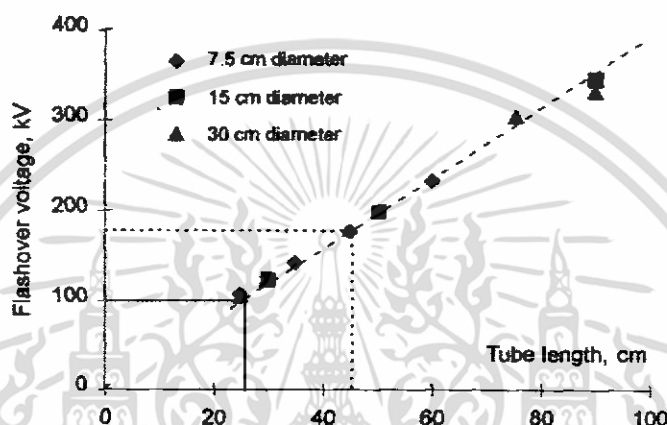
$$S_{SC} = \frac{10,000}{4.06} \times 100$$

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

3.11 การออกแบบตัวถัง

การออกแบบจะใช้ท่อ PVC เป็นตัวถังฉนวน ซึ่งจะช่วยให้ค่าใช้จ่ายในการประกอบสร้างลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับ การสร้างถังโลหะ เนื่องจากหม้อแปลงที่เป็นแบบถังโลหะจะต้องมีปลอกฉนวนนำสาย ซึ่งมีราคาสูง

การเลือกขนาดท่อ PVC ที่ใช้เป็นตัวถังอุปกรณ์นั้น จะขึ้นอยู่กับแรงทางกลและทางไฟฟ้าที่กระทำต่อท่อเป็นหลัก พิกัดทางไฟฟ้านั้นจะขึ้นอยู่กับความยาวของท่อ เนื่องจากในการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้น จะมีแรงดันสูงตกคร่อมระหว่างปลายทั้งสองของ



รูปที่ 3.14 ผลการทดสอบแรงดันวาวไฟตามผิวไฟฟ้ากระแสสลับ [19]

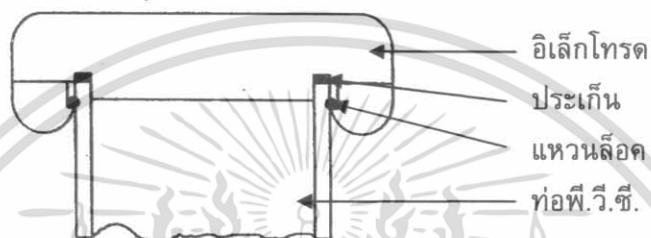
ท่อ PVC ท่อจะต้องยาวพอที่จะทนแรงนี้ได้โดยไม่เกิดเบรกดาวน ค่าแรงดันวาวไฟตามผิวของท่อ PVC ดังปรากฏในเอกสารอ้างอิงนั้น [19] ได้จากการทดลองที่สภาวะบรรยากาศของห้องที่แตกต่างกัน และนำมาแปลงเป็นค่าแรงดันที่สภาวะบรรยากาศมาตรฐานที่อุณหภูมิ 20°C ความดัน 760 mmHg (ไม่คำนึงถึงความชื้น) พบว่าค่าแรงดันวาวไฟตามผิวท่อ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

การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสม อิเล็กทรอนิกส์ที่ดีควรจะไม่มีโคโรนาที่แรงดันใช้งาน 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 ซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดแรงสูงและกราวด์ตามลำดับ จะทำให้ระยะห่างลดลงเนื่องจากการเหลื่อมเข้าด้านบนและด้านล่างประมาณด้านละ 2.5 cm เพราะฉะนั้นจะเหลือระยะฉนวนภายนอกประมาณ 80 cm ถ้าได้รับแรงดัน 120 kV ซึ่งเมื่อแรงดันเกิน 20% จะมีความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนเท่ากับ

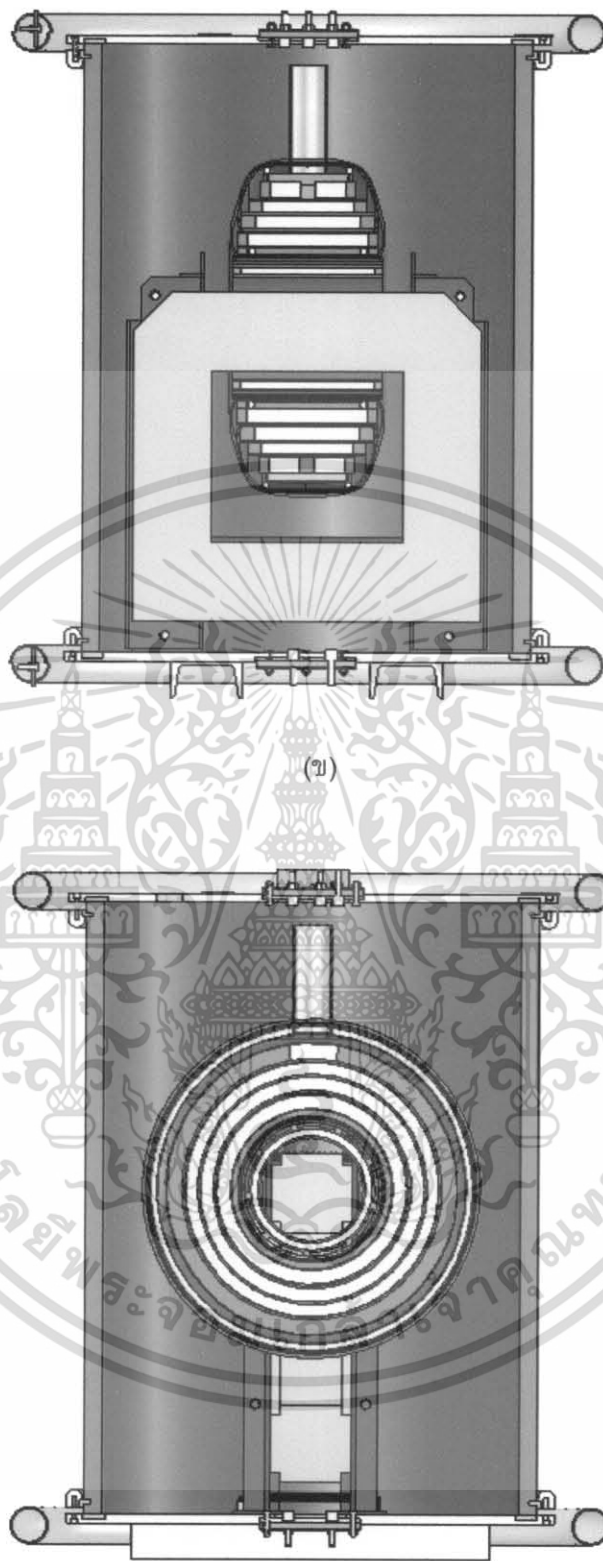
$$120 / 80 = 1.50 \text{ kV/cm}$$



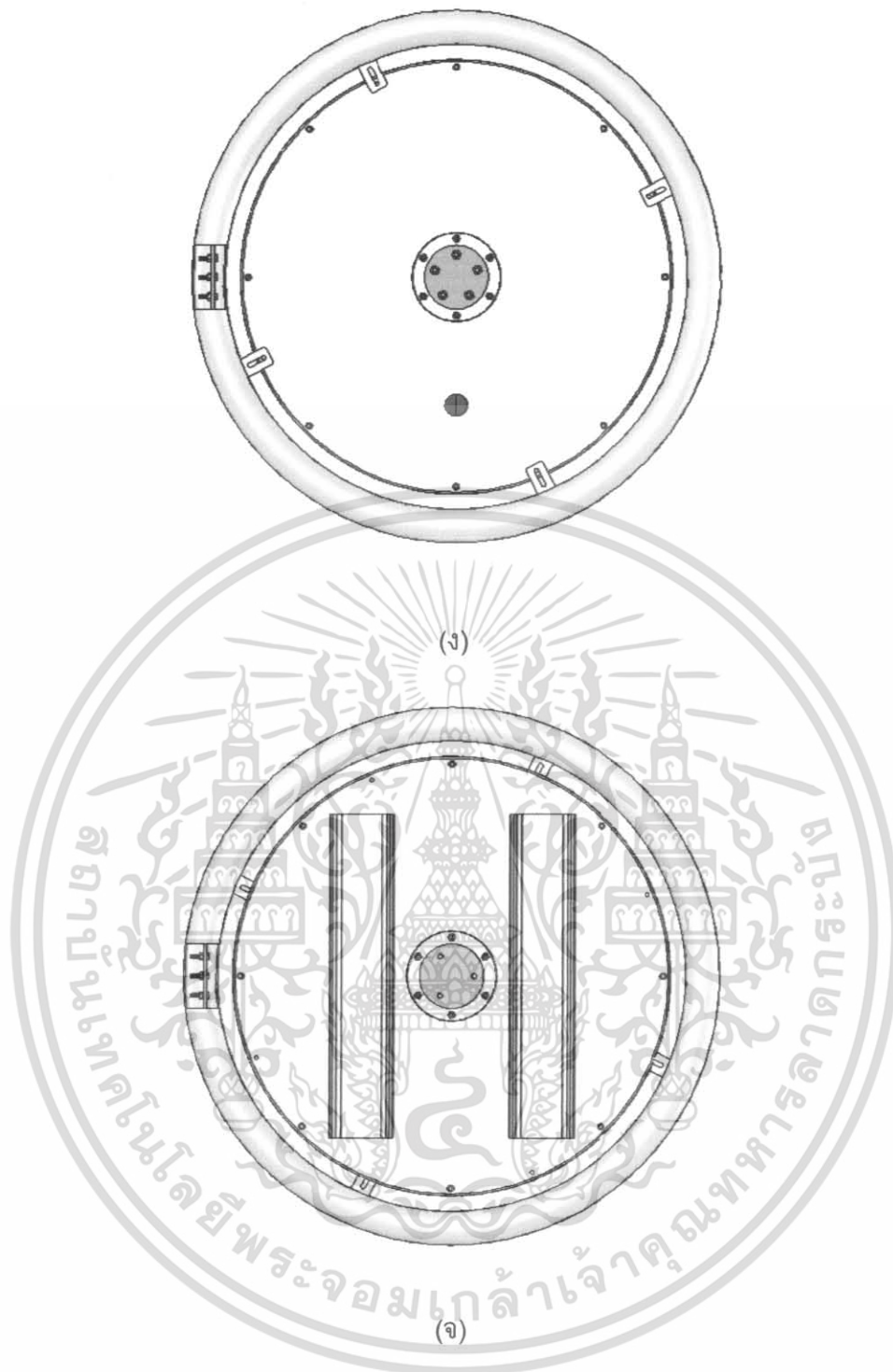
รูปที่ 3.15 อิเล็กโทรดแรงสูงที่เหมาะสมที่ใช้กับแรงดันขนาด 100-200 kV [5]



(ก)



(ก)



รูปที่ 3.16 ลักษณะตัวถังหม้อแปลงทดสอบที่ออกแบบ

- (ก) ลักษณะโครงสร้างของหม้อแปลงที่ออกแบบ
- (ข) ภาพตัดตามแนวแกนหลัก
- (ค) ภาพตัดขวางขดลวด
- (ง) ภาพด้านบนฝาถัง
- (จ) ภาพด้านล่าง

3.12 การตรวจสอบความเครียดสนามไฟฟ้าและการกระจายเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากการจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

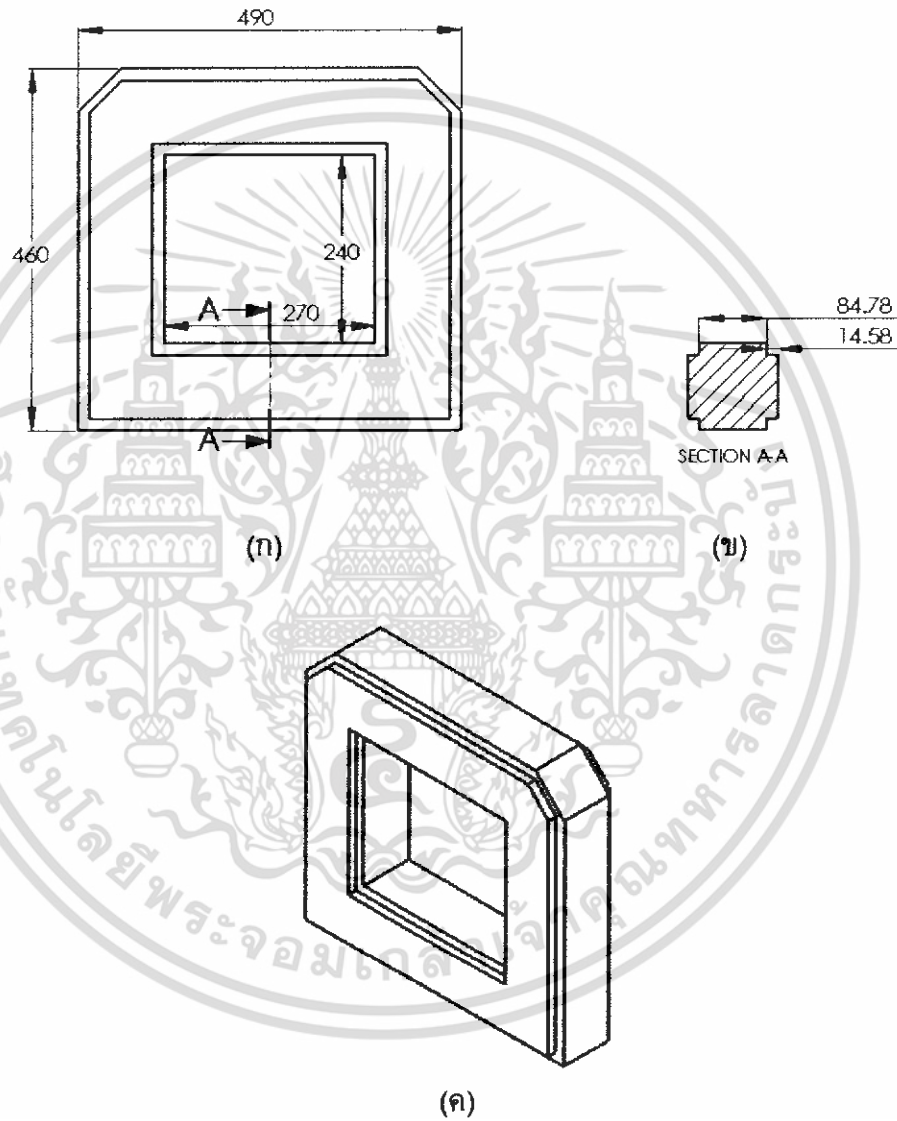
หลังจากคำนวณขนาดต่างๆ ของหม้อแปลงแล้ว บริเวณภายในและภายนอกของตัวถังหม้อแปลงจะเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าที่ส่วนต่างๆ ซึ่งค่าความเครียดเหล่านี้จะต้องมีค่าไม่เกินค่าวิกฤตของการเกิดการดีสชาร์จบางส่วนภายใน เพื่อให้ทราบความเครียดของสนามไฟฟ้าที่ส่วนต่างๆ เช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์การกระจายของเส้นแรงแม่เหล็ก จำเป็นต้องจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ การจำลองแบบนั้นจะพิจารณาการกระจายเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux) การกระจายสนามไฟฟ้า (Electric potential) และความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field) เป็น 3 ส่วน ที่สำคัญ คือ 1.แกนเหล็ก 2.บริเวณขดลวดแรงสูง 3.บริเวณตัวถัง ผลการจำลองแบบเป็นไปตามภาคผนวก ก



บทที่ 4 การประกอบสร้าง

4.1 แกนเหล็ก

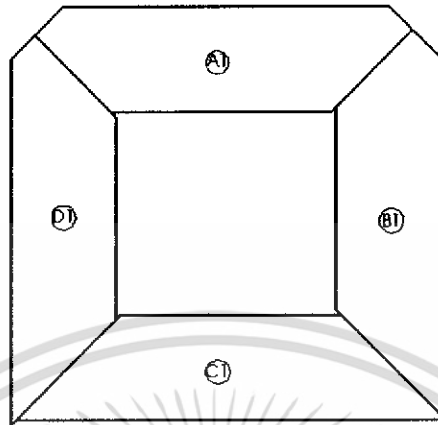
จากการออกแบบแกนเหล็กในบทที่ 3 ซึ่งรูปแบบและพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แกนเหล็ก

- (ก) ขนาดของแกนเหล็ก
- (ข) พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก
- (ค) ลักษณะของแกนเหล็กที่เรียงซ้อนกันอย่างสมบูรณ์

ซึ่งจากลักษณะของแกนเหล็กในรูปที่ 4.1 สามารถออกแบบการตัดแผ่นเหล็กได้เป็น 4 ลักษณะ ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งมีรายละเอียดของขนาดในการตัดแผ่นเหล็กดังตารางที่ 4.1

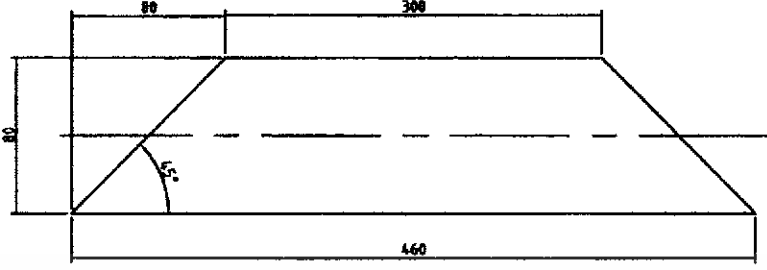
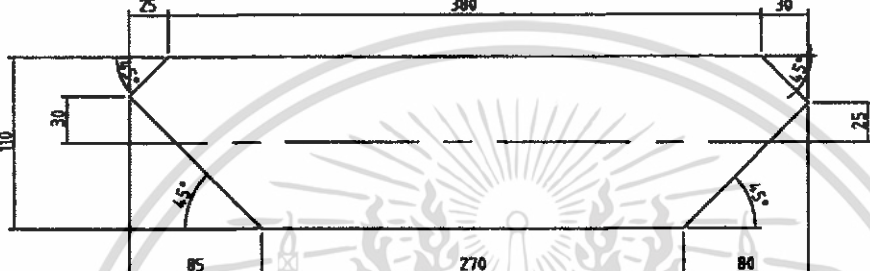

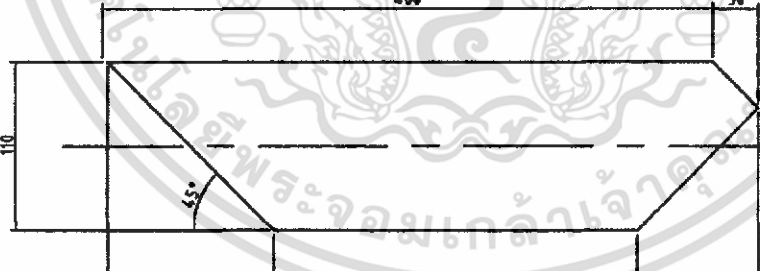
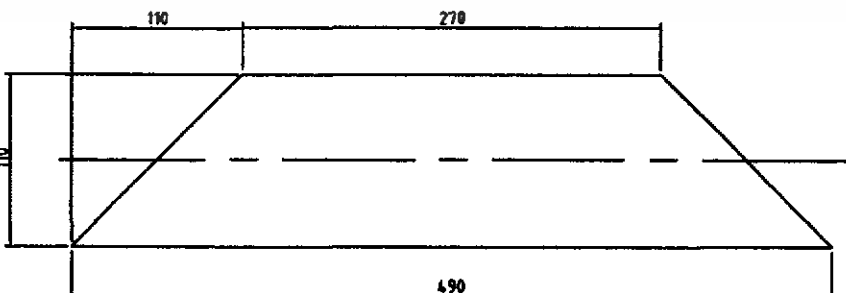


รูปที่ 4.2 ลักษณะการตัดแผ่นเหล็ก

ตารางที่ 4.1 จำนวนแผ่นเหล็กชนิดอนตามขนาดและรูปร่าง

ขนาดและรูปร่างของการตัดแผ่นเหล็ก	จำนวน(แผ่น)
	108
	108
	108

ตารางที่ 4.1 จำนวนแผ่นเหล็กชนิดคอนตามขนาดและรูปร่าง(ต่อ)

ขนาดและรูปร่างของการตัดแผ่นเหล็ก	จำนวน (แผ่น)
	108
	314
	314
	314
	314



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 4.3 การตัดแผ่นเหล็ก

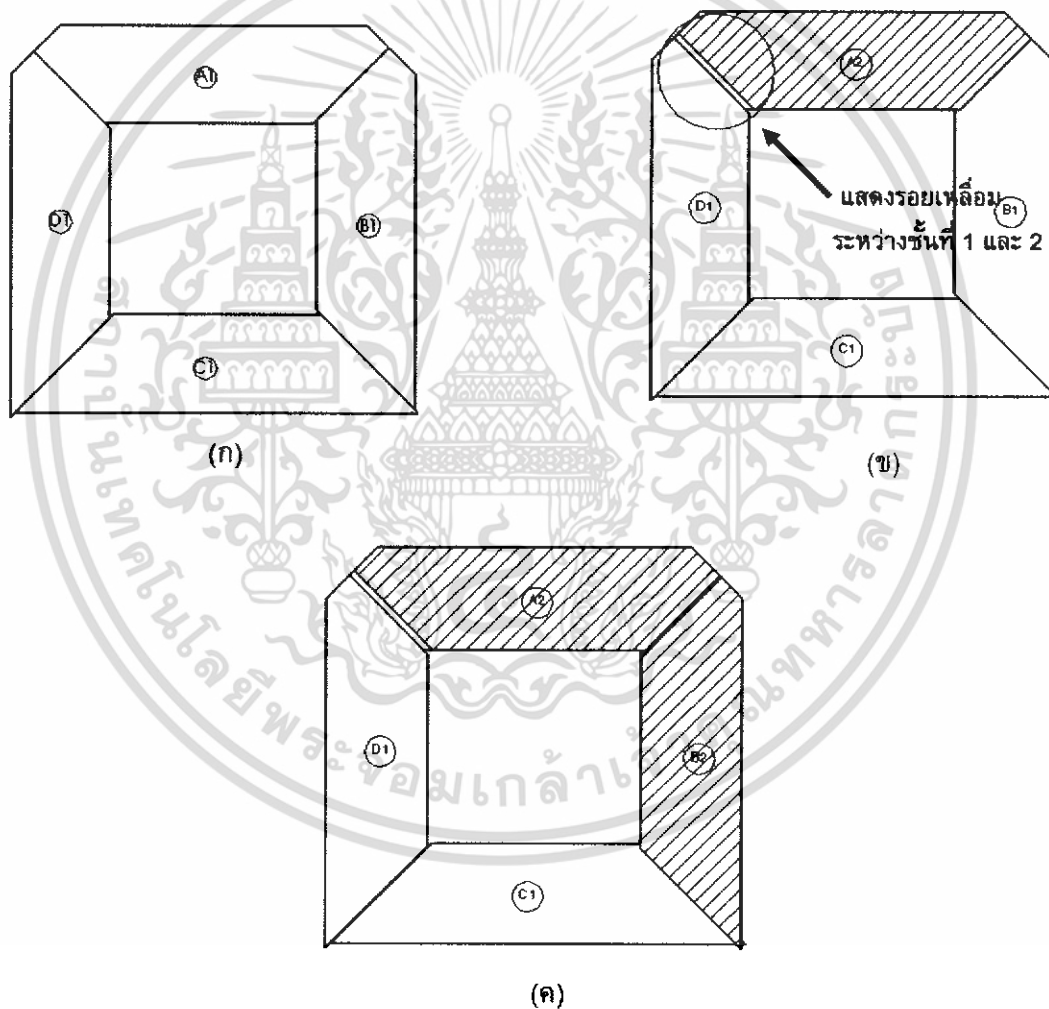
(ก) เครื่องตัดเหล็ก

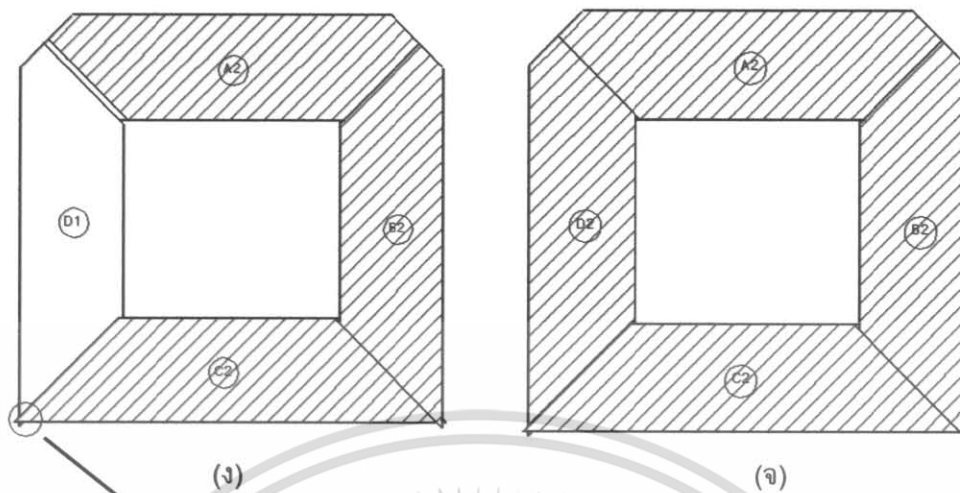
(ข), (ค) การตัดแผ่นเหล็ก

(ง) ตรวจสอบขนาดแผ่นเหล็ก

(จ), (ฉ) แผ่นเหล็กที่ตัดไว้เพื่อประกอบขึ้นเป็นแกนเหล็ก

การจัดวางแผ่นเหล็กที่ละลายแผ่นสลับกัน ทำให้มีช่องอากาศกว้างขึ้นและส่งผลถึงการไหลที่ไม่สะดวกของเส้นแรงแม่เหล็ก เส้นแรงแม่เหล็กบางส่วนจะวิ่งข้ามช่องอากาศบางส่วนจะวิ่งไปยังแผ่นเหล็กด้านข้าง เนื่องจากสภาพซึมซับได้ของแผ่นเหล็กมีค่าสูงกว่าอากาศมากทำให้แผ่นเหล็กบางแผ่นที่มีเส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่านมากกว่าค่าเฉลี่ยนั้นคือแกนเหล็กจะมีค่ากำลังสูญเสียเพิ่มขึ้นแต่การจัดวางแผ่นเหล็กที่ละลายแผ่นจะมีความยากลำบากและใช้เวลามากเนื่องจากแผ่นเหล็กมีความหนาแน่นน้อย ดังนั้นจึงใช้วิธีการวางแผ่นเหล็กที่ละ 2 แผ่นวิธีการเรียงแผ่นเหล็กแสดงดังรูปที่ 4.4





แสดงมุมแหลมที่เกิดขึ้นจากการเรียงเหล็กซ้อนกัน

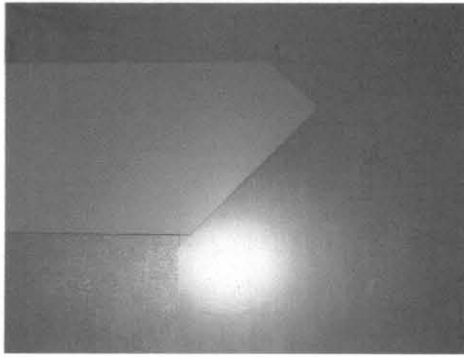
รูปที่ 4.4 วิธีการเรียงแผ่นเหล็กตามลำดับขั้นตอน (ก) - (จ)



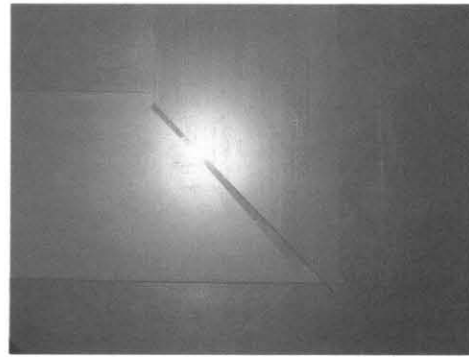
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

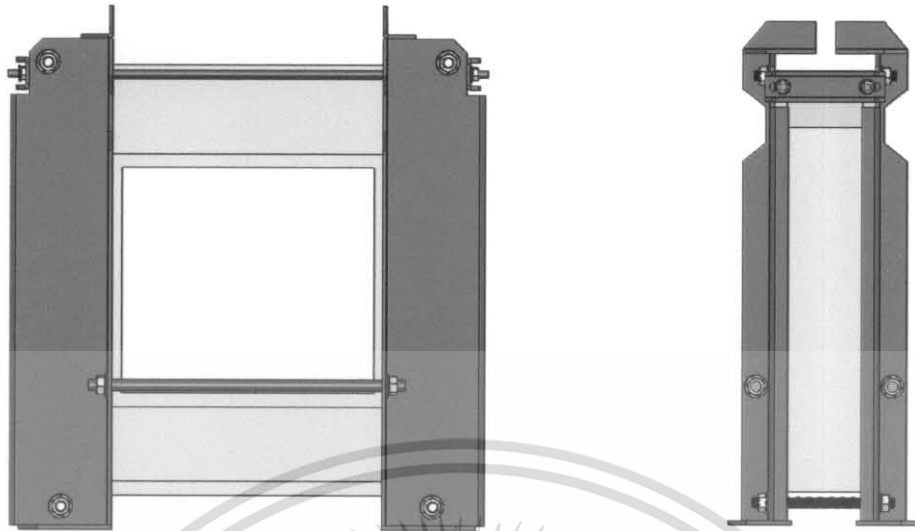


(จ)

รูปที่ 4.5 ทดลองเรียงแผ่นเหล็กตามแบบ

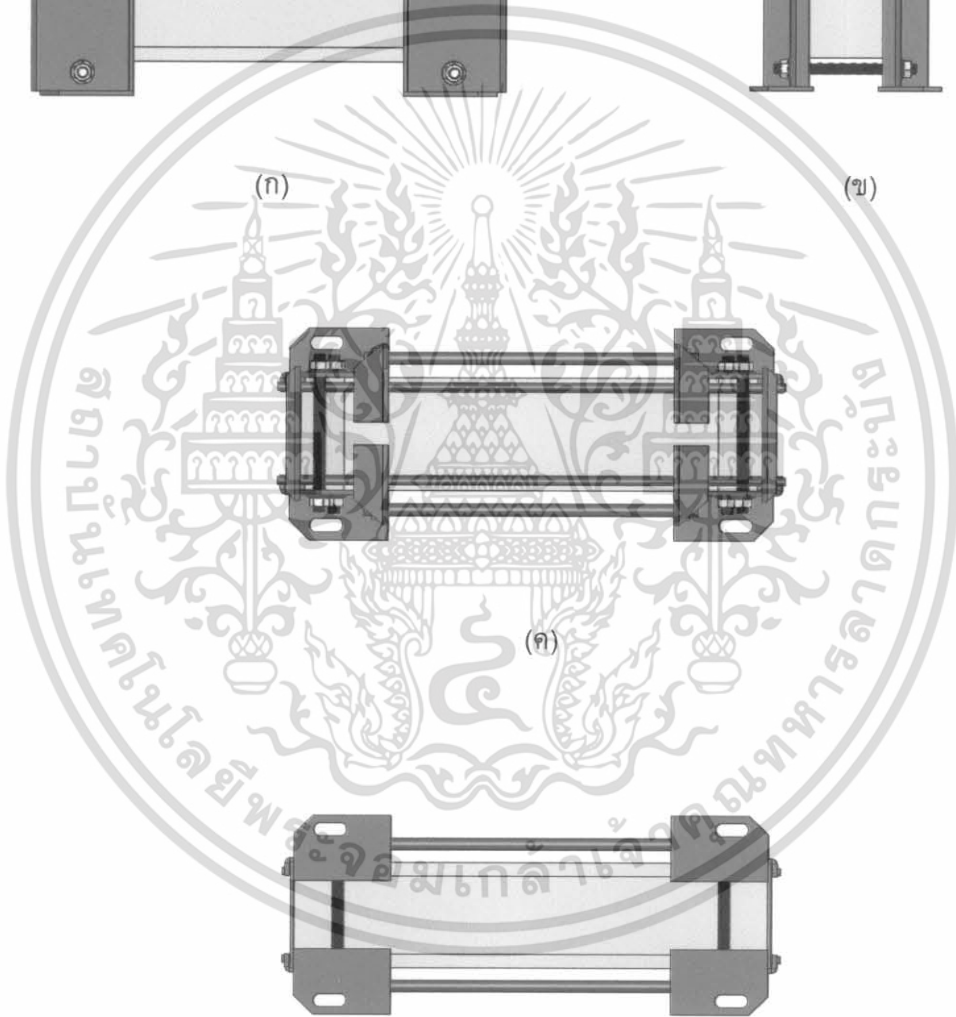
- (ก), (ข) ทดลองเรียงแผ่นเหล็กเพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการออกแบบ
 (ค) มุมแหลมที่เกิดขึ้นจากการเรียงแกนเหล็กซ้อนกันเช่นเดียวกับในรูปที่ 4.4
 (ง) การเชื่อมกันของแผ่นเหล็กระหว่างชั้นที่ 1 กับ 2 เช่นเดียวกับในรูปที่ 4.4
 (จ) แผ่นเหล็กที่เรียงตามแบบเช่นเดียวกับในรูปที่ 4.4

ก่อนที่จะทำการเรียงแกนเหล็กจริงได้นั้น จะต้องทำการเตรียมแคลมป์ยึดแกนเหล็กให้เรียบร้อยก่อน ซึ่งแคลมป์นั้นจะต้องทำหน้าที่ยึดแกนเหล็กทั้งหมดที่ทำการเรียงซ้อนกันจนได้ขนาดที่ต้องการ ให้ยึดติดกันอยู่ได้และยังช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับแกนเหล็กอีกด้วย เนื่องจากการประกอบขดลวดเข้ากับแกนเหล็กในลักษณะที่ออกแบบนี้ แกนเหล็กจะเป็นส่วนที่รับน้ำหนักของขดลวดอยู่ทั้งหมดโดยแคลมป์นี้จะทำการต่อลงดินเช่นเดียวกับแกนเหล็ก ดังนั้น ในการออกแบบแคลมป์จึงต้องคำนึงถึงระยะความปลอดภัยระหว่างแคลมป์กับขดลวดแรงสูงด้วย ลักษณะของการประกอบแคลมป์ยึดแกนเหล็กตามที่ได้ทำการออกแบบมีลักษณะดังรูปที่ 4.6



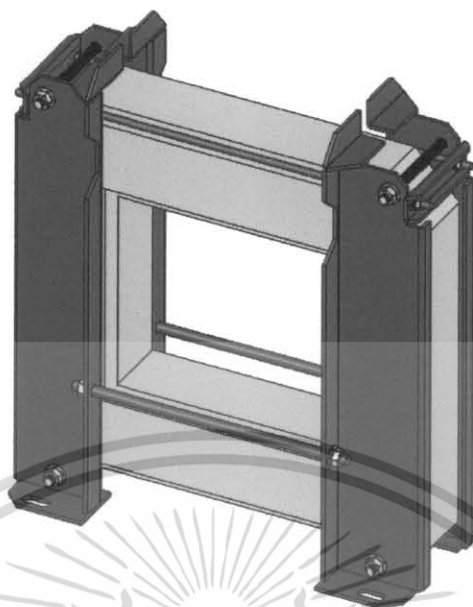
(ก)

(ข)



(ค)

(ง)



(จ)

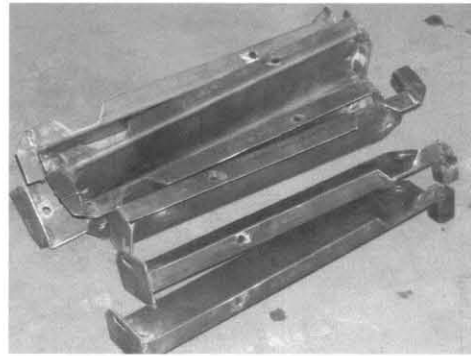
รูปที่ 4.6 การออกแบบแคลมป์ยึดแกนเหล็ก

- (ก) รูปด้านหน้าของแคลมป์
- (ข) รูปด้านข้างของแคลมป์
- (ค) รูปด้านบนของแคลมป์
- (ง) รูปด้านล่างของแคลมป์
- (จ) รูปการประกอบแคลมป์ยึดแกนเหล็ก

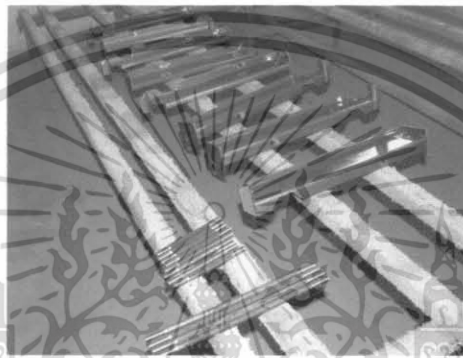
แคลมป์ยึดแกนเหล็กทำขึ้นจากแผ่นเหล็กหนา 4 มม. ตัดและพับในลักษณะดังรูป 4.7 โดยรายละเอียดของขนาดต่างๆของแคลมป์จะแสดงในภาคผนวก ค.13, ค.14, ค.15 และก่อนที่จะนำมาใช้งานจะเคลือบด้วยวานิช เพื่อป้องกันสนิมและในการประกอบแคลมป์เข้ากับแกนเหล็กนั้น ระหว่างแคลมป์กับแกนเหล็กจะใช้กระดาษอัดหนา 1 มม. เป็นฉนวนกันไว้เพื่อป้องกันการครบรอบทางไฟฟ้า



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.7 รูปการเตรียมแคลมป์

(ก), (ข) แคลมป์ด้านซ้ายและขวาทั้งหมดที่ประกอบขึ้นจากแผ่นเหล็กหนา 4 มม.

(ค) แคลมป์และสตั๊ดทั้งหมดถูกเคลือบด้วยวานิชเพื่อป้องกันสนิม

เมื่อเตรียมแผ่นเหล็กและแคลมป์เรียบร้อยแล้วจึงทำการเรียงแผ่นเหล็ก โดยจะเริ่มจากการนำแคลมป์มาวางรองด้านล่างก่อน จากนั้นใช้กระดาษฉนวนหนา 1 มม. ติดกับแคลมป์เพื่อเป็นฉนวนกันไม่ให้แกนเหล็กสัมผัสกับแคลมป์โดยตรง จากนั้นจึงเริ่มเรียงแผ่นเหล็กโดยวางซ้อนครั้งละ 2 แผ่น ตามที่ออกแบบตั้งกล่าวในข้างต้น เรียงซ้อนกันไปเรื่อยๆ โดยจะต้องพยายามให้รอยต่อของแผ่นเหล็กแต่ละแผ่นชิดกันให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ จนได้ขนาดความหนาตามที่ต้องการ แล้วนำแคลมป์ที่รองกระดาษฉนวนหนา 1 มม.แล้ว มาประกบเข้าตามแบบแล้วขันน็อตบีบให้แน่น



(ก)



(ข)



(ค)



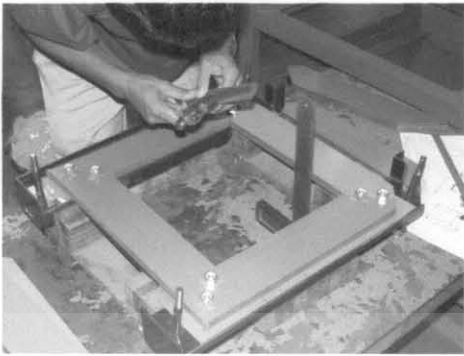
(ง)



(จ)



(ฉ)



(ข)



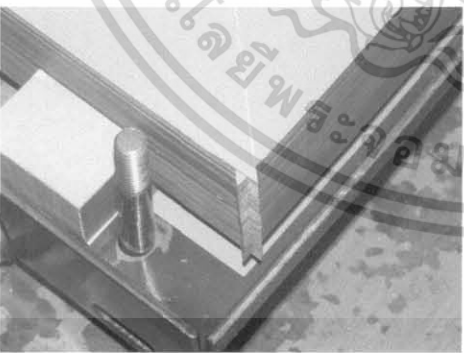
(ค)



(ง)



(ฉ)



(ช)



(ซ)



(๕)



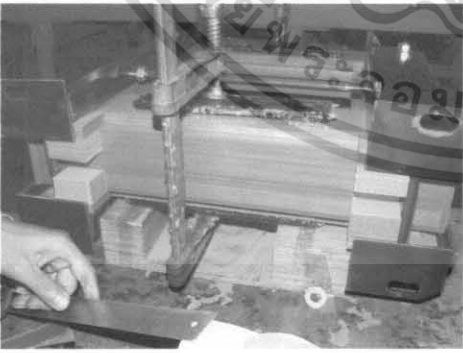
(๖)



(๗)



(๘)



(๙)



(๑๐)



(ก)



(ท)

รูปที่ 4.8 การเรียงแกนเหล็ก

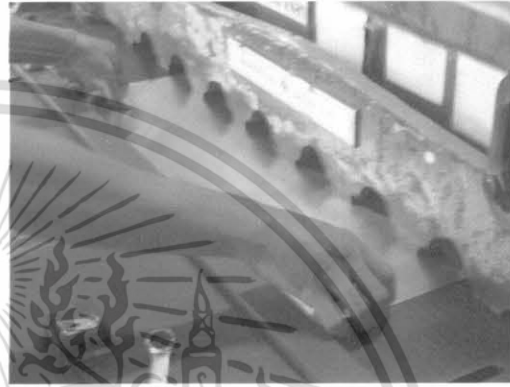
- (ก) นำแคลมป์มาวางรองก่อนเรียงแกนเหล็ก เพื่อให้ง่ายต่อการประกอบแคลมป์เมื่อเรียงแกนเหล็กเสร็จแล้ว
- (ข) ใช้กระดาษอัดหนา 1 มม. รองบนแคลมป์ก่อนวางแผ่นเหล็ก
- (ค) เริ่มเรียงแผ่นเหล็กชั้นที่ 1
- (ง) ตรวจสอบขนาดของแกนเหล็กตามรูปที่ 4.1 (ก)
- (จ), (ฉ) เรียงเหล็กซ้อนกันไปเรื่อยๆ ตามรูปที่ 4.4
- (ช) เมื่อเรียงแผ่นเหล็กซ้อนกันจนได้ความหนาพอประมาณแล้วใช้ค้อนค่อยๆ เคาะด้านนอกของแต่ละด้านของแกนเหล็กเพื่อให้แกนเหล็กเรียงชิดกันมากขึ้น
- (ซ), (ฅ) เมื่อเรียงแผ่นเหล็กหน้ากว้าง 80 มม. ได้ความหนาตามต้องการแล้วก็เรียงแผ่นเหล็กหน้ากว้าง 110 มม. ทับลงไปในลักษณะเดียวกัน
- (ญ) ระหว่างที่ทำการเรียงแผ่นเหล็กต้องมีการตรวจสอบทั้งความกว้าง, ยาวและความหนาอยู่เป็นช่วงๆ
- (ฎ), (ฏ) ลักษณะของมุมแกนเหล็กทั้งด้านบนและด้านล่าง
- (ฐ), (ฑ) เรียงแกนเหล็กซ้อนกันไปเรื่อยๆ จนได้ความหนาตามรูปที่ 4.1 (ข)
- (ฒ), (ณ), (ด) ประกอบแคลมป์ตามแบบและขันนอตยึดให้แน่น โดยด้านล่างจะเห็นได้ว่ามีกระดาษอัดหนาทำเป็นลักษณะชั้นบันไดรองแกนเหล็กไว้เพื่อป้องกันแกนเหล็กทรุดตัวเมื่ออยู่ในน้ำมันหม้อแปลง
- (ต), (ถ), (ท) จับแกนเหล็กวางตามรูปที่ 4.6 (จ) และทากาวยึดแกนเหล็กด้านบน ด้านล่างและด้านข้างอีกหนึ่งด้านโดยเหลือไว้ด้านหนึ่งเพื่อถอดออกสำหรับสวมขดลวด

4.2 ขดลวดแรงต่ำ

จากการออกแบบจำนวนขดลวดและลักษณะของการพันลวดซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 แล้วนั้น ในขั้นตอนของการประกอบสร้างขดลวดนั้นจะเริ่มจากการเตรียมฉนวนและเตรียมทำซีลด์ทั้งซีลด์ขั้วนิวทรัลและซีลด์ขั้วแรงสูงก่อน โดยซีลด์เกลือแรงดันที่บริเวณขดลวดเหล่านี้จะสร้างขึ้นจากการนำแผ่นทองแดงหนา 0.3 มม. มาตัดและม้วนเป็นวงกลม และที่ขอบทั้งสองจะปิดด้วยท่อทองแดงที่ตัดเป็นวงกลม ในลักษณะดังรูปที่ 4.9 โดยรายละเอียดและขนาดของการตัดแผ่นทองแดงจะแสดงไว้ในภาคผนวก



(ก)



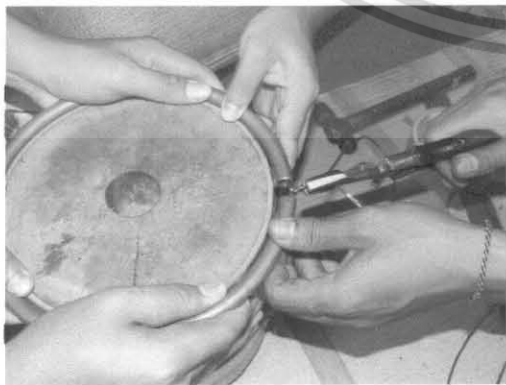
(ข)



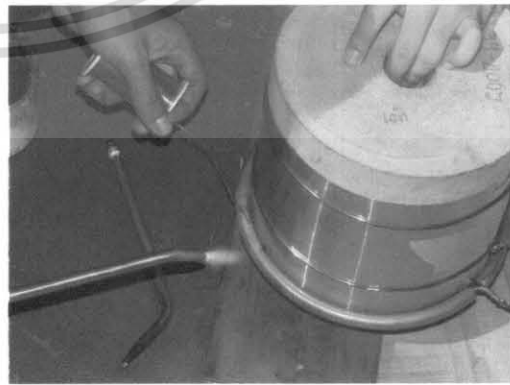
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.9 การเตรียมซิลด์ขั้วแรงสูงและซิลด์ขั้วนิวทรัล

- (ก) วัดขนาดแผ่นทองแดง หน้า 0.3 มม.
- (ข) ตัดแผ่นทองแดงตามขนาดที่ต้องการ
- (ค) ตัดท่อทองแดงเป็นวงกลม
- (ง) ม้วนแผ่นทองแดงเป็นวงกลม โดยใช้ลวดรัดไว้
- (จ) นำท่อทองแดงมาปิดขอบของแผ่นทองแดงทั้งสองด้าน โดยใช้ลวดรัดไว้
- (ฉ) เชื่อมท่อทองแดงกับแผ่นทองแดงเข้าด้วยกัน
- (ช) ซิลด์ขั้วนิวทรัลที่ประกอบเสร็จแล้ว
- (ซ) ซิลด์ขั้วแรงสูง ซึ่งจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าซิลด์ขั้วนิวทรัล
- (ฅ) เชื่อมท่อนำสายติดกับซิลด์ขั้วแรงสูง เพื่อนำปลายสายออกด้านบนผาถัง

การพันขดลวดแรงดันต่ำเริ่มจากการเตรียม mandrel ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับขนาดที่ได้คำนวณไว้ข้างต้นคือ 143 มม. ส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางในด้านตรงกัน

ข้ามจะให้มีขนาดเท่ากับ 144 มม. เนื่องจากเพื่อความสะดวกในการนำขดลวดออกจาก mandrel แสดงดังรูปที่ 4.10 จากนั้นทำการพันลวดตามแบบโดยเริ่มจากใช้กระดาษอัดหนา 3 มม.(Inside cylinder) พันรอบ mandrel เป็นทรงกระบอก 1 ชั้น แล้วเริ่มด้วยการพัน end insulation ซึ่งมีความหนา 1 มม. จำนวน 3 ชั้น ดังรูปที่ 4.11 จากนั้นพันขดลวดชั้นที่ 1 จำนวน 21 รอบ โดยเหลื่อมต้นสายไว้ 1 ม. แล้วปิดขอบด้วย end insulation อีกครั้งหนึ่ง ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 จะทำการพันเช่นเดียวกับชั้นที่ 1 โดยมีกระดาษฉนวนหนา 0.08 มม.(Layer insulation) จำนวน 3 ชั้นเป็นฉนวนกันระหว่าง layers เมื่อพันขดลวดและกระดาษฉนวนจนครบ 3 ชั้นแล้วจึงปิดด้วยกระดาษอัดหนา 1 มม.(Outside cylinder) จำนวน 1 ชั้น จากนั้นใช้กระดาษคอลลูเกตมีความหนา 3 มม. เพื่อใช้เป็นร่องน้ำมันระบายความร้อนแล้วจึงปิดด้วยกระดาษอัดหนา 1 มม.(Outside cylinder) โดยเหลื่อมปลายสายไว้ 1.2 เมตร วิธีการพันขดลวดแรงต่ำแสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.10 mandrel

11	19	490	6
11	19	510	6
11	19	530	6
A	B	L	QTY

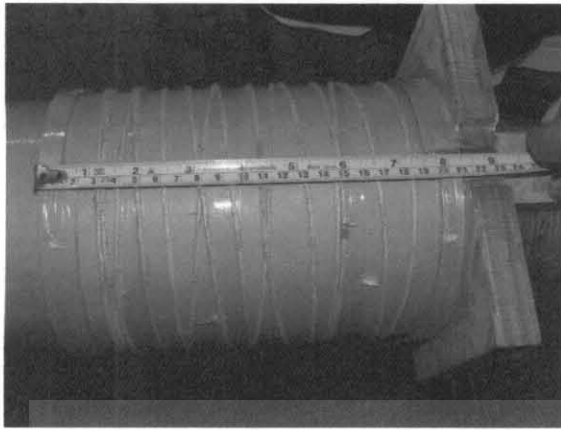
รูปที่ 4.11 end Insulation



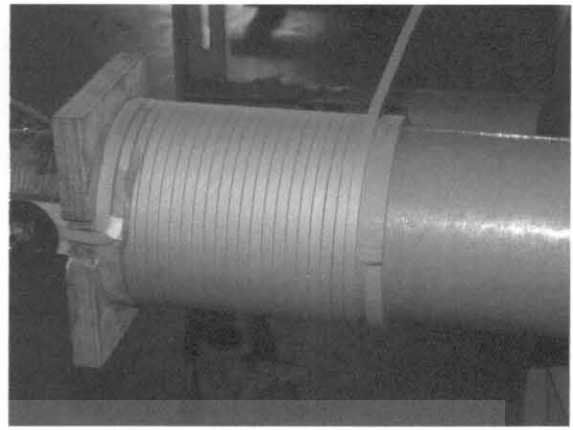
รูปที่ 4.12 แสดงแบบการพันขดลวดแรงต่ำ

(ก) ภาพตัดขวางแสดงส่วนประกอบของขดลวดแรงต่ำ

(ข) แสดงวิธีการพันขดลวดแรงต่ำ



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 4.13 การพันขดลวดแรงต่ำ

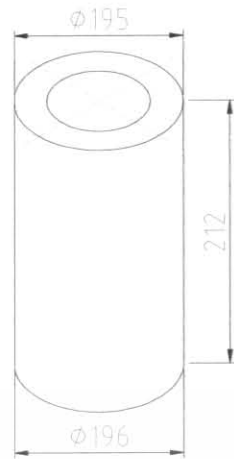
- (ก) mandrel ที่จัดเตรียมสำหรับพันลวดแรงดันต่ำ
- (ข) พันลวดแรงดันต่ำ
- (ค) พันกระดาษรองระหว่างชั้น
- (ง) พันกระดาษคอลลูเกต
- (จ) ขดลวดแรงต่ำที่เสร็จเรียบร้อยแล้ว

4.3 ขดลวดแรงสูง

การพันขดลวดแรงสูงใช้การพันแยกกับขดลวดแรงต่ำ ดังนั้นจึงต้องเริ่มจากการเตรียม mandrel เช่นเดียวกับขดลวดแรงต่ำโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 195 มม. เพื่อให้สามารถสวมเข้ากับขดลวดแรงต่ำได้สะดวก โดยก่อนเริ่มพันขดลวดแรงสูงจะต้องมีการใส่แกนกระดาษความหนา 1 มม.(Inside cylinder) เพื่อใช้เป็นแกนของขดลวดจากนั้นใช้กระดาษย่นความหนา 0.65 มม. (Creped paper) จำนวน 5 ชั้น พันรอบแกนกระดาษเพื่อจะใช้ห่อขดลวดเมื่อพันเสร็จ ป้องกันการไหลเวียนของน้ำมันภายในขดลวดแรงสูง ในชั้นต่อไปจะใส่ชีลด์ขั้วนิวทรัลเพื่อเป็นตัวป้องกันแรงดันเสิร์จและเกลี่ยแรงดันให้สม่ำเสมอและใช้กระดาษฉนวนพันจนเต็มช่องว่างของชีลด์ขั้วนิวทรัลจากนั้นจึงรองกระดาษฉนวนความหนา 0.08 มม.(Layer insulation) จำนวน 4 ชั้นก่อนที่จะเริ่มพันขดลวด การพันขดลวดแรงสูงจะแบ่งออกเป็น 3 ชั้น

จำนวน	รอบ	จำนวน	ชั้น
415	รอบ	30	ชั้น
365	รอบ	26	ชั้น
314	รอบ	23	ชั้น
157	รอบ	1	ชั้น

ก่อนที่จะเริ่มพันขดลวดในแต่ละชั้นจะใช้กระดาษฉนวนหนา 0.13 มม.จำนวน 3 ชั้นเพื่อเป็น end insulation ในระหว่างชั้นของขดลวดจะกั้นด้วยกระดาษฉนวนหนา 0.08 มม.จำนวน 2 ชั้นโดยในชั้นที่เป็นเลขคู่จะมีการพันขดลวดโดยแบ่งขดลวดออกเป็น 3 ส่วน ในแต่ละส่วนจะต้องมีการฉนวนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงดันที่แตกต่างระหว่างชั้นมีค่าสูงขึ้น การพันขดลวดในลักษณะนี้จะมีข้อดีคือสามารถประหยัดปริมาณของกระดาษฉนวนได้มาก เมื่อสิ้นสุดการพันลวดในแต่ละชั้นจะรองด้วยกระดาษย่น (Creped paper) เพื่อใช้ในการห่อเช่นเดียวกับตอนเริ่มต้น ในชั้นสุดท้ายจะพันลวดโดยสิ้นสุดที่ตรงกลางของชั้นเพื่อที่จะนำสายแรงสูงออกมาตรงกลางแล้วจึงปิดขดลวดที่พันเสร็จแล้วด้วยกระดาษฉนวนหนา 1 มม.(Outside cylinder) วิธีการพันขดลวดแรงสูงแสดงดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.14 mandrel



รูปที่ 4.15 end Insulation

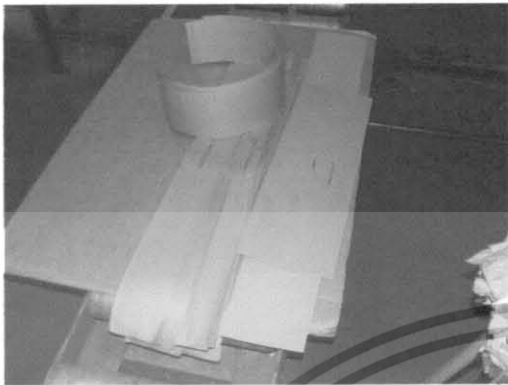
รูปที่ 4.16 ตำแหน่งของต้นและปลายลวดแรงสูง



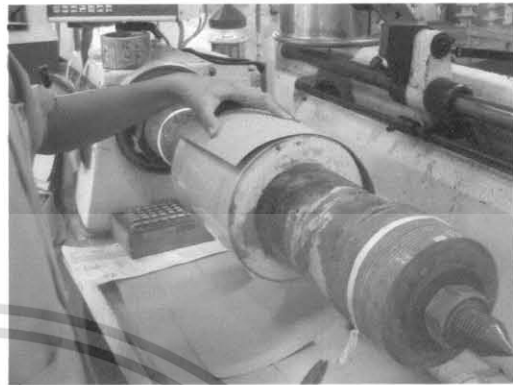
รูปที่ 4.17 แบบการพันขดลวดแรงสูง

(ก) ภาพตัดแสดงส่วนประกอบของขดลวดแรงสูง

(ข) แสดงวิธีการพันขดลวดแรงสูง



(ก)



(ข)



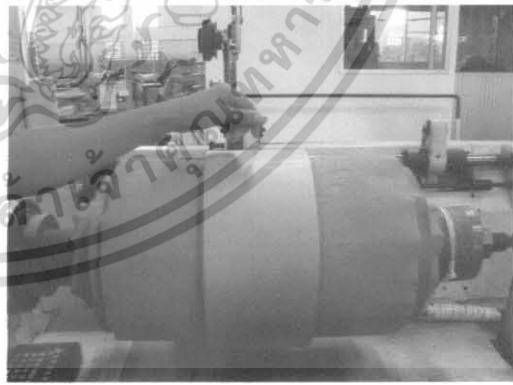
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 4.18 การพันขดลวดแรงสูง

- (ก) กระดาษฉนวนที่เตรียมไว้สำหรับพันขดลวดแรงสูง
- (ข) แกนขดลวดแรงสูง
- (ค) ใสชีลด์ขั้วนิวตริล
- (ง) การพันขดลวดแรงสูง
- (จ) ใช้กระดาษย่นรองระหว่างชั้นเพื่อห่อขดลวดแรงสูง
- (ฉ) เจาะรูกระดาษฉนวนให้ปลายสายออกตรงกึ่งกลางขดลวด

4.4 ขดลวดต่อควบ

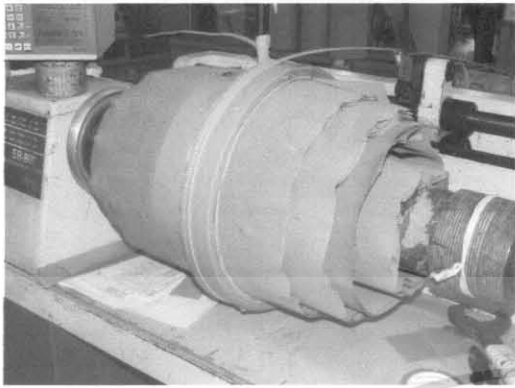
ขดลวดต่อควบจะพันทับขดลวดแรงสูงโดยแบ่งออกเป็น 2 ชุด จะทำการเริ่มพันจากด้านในออกมาด้านนอกตามแนวแกนและเว้นระยะห่างระหว่างขดลวดไว้ 2 cm เพื่อนำปลายสายทั้งหมดรวมทั้งปลายสายแรงสูงออกมาภายนอกโดยผ่านทางท่อใส่สายซึ่งเชื่อมติดอยู่กับชีลด์ขั้วแรงสูงหลังจากนั้นจึงห่อขดลวดทั้งหมดด้วยกระดาษย่นที่รองไว้ก่อนหน้านี้ (creeped paper) แล้วพันทับด้วยกระดาษริบบิ้นเพื่อความแน่นหนา ลักษณะการพันขดลวดต่อควบและลักษณะของการห่อกระดาษฉนวนแสดงดังรูปที่ 4.20



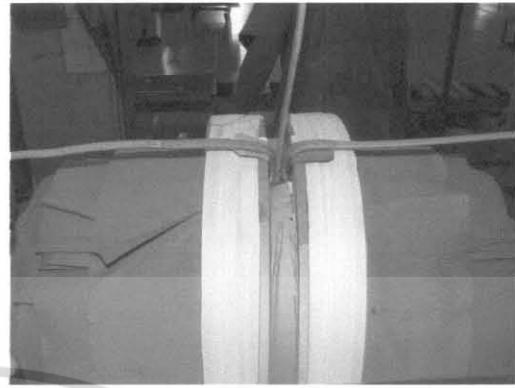
รูปที่ 4.19 สัญลักษณ์ของต้นและปลายขดลวดต่อควบ



รูปที่ 4.20 แบบการพันขดลวดต่อควบ



(ก)



(ข)



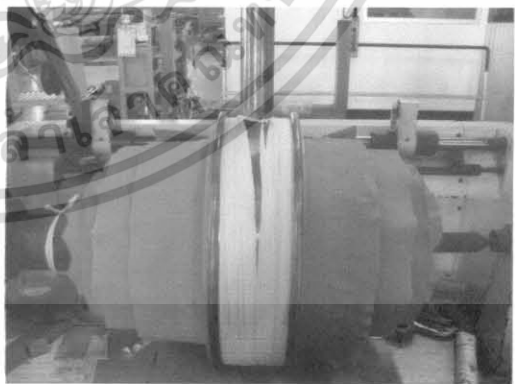
(ค)



(ง)



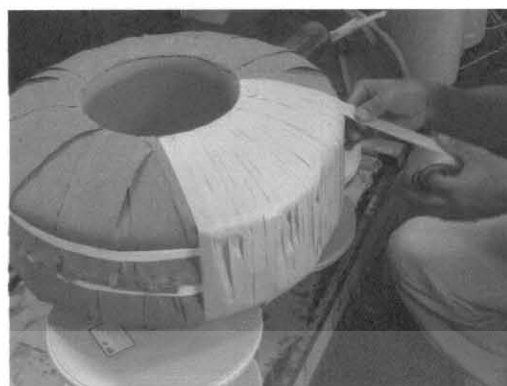
(จ)



(ฉ)



(ข)



(ช)

รูปที่ 4.21 การพันขดลวดต่อควบ

- (ก),(ข) การพันขดลวดต่อควบ
- (ค),(ง) การนำปลายสายของขดลวดทั้งหมดออกตรงกลาง
- (จ),(ฉ) การใส่ซิลด์ชั่วคราวสูงโดยให้ปลายสายออกทางท่อนำสาย
- (ช) ตัดกระดาษยื่นออกเป็นริ้ว เพื่อให้สามารถห่อหุ้มขดลวดได้
- (ซ) ใช้กระดาษริบบิ้นพันจนรอบขดลวด

4.5 ตัวถังและส่วนประกอบภายนอก

จากที่ได้ออกแบบไว้คือ หม้อแปลงนี้จะเป็นแบบถังฉนวนโดยใช้ท่อพีวีซี ฝา ด้านบนและด้านล่างใช้แผ่นเหล็กตัดและกลึงเป็นวงกลมและประกอบเข้ากับท่อพีวีซีโดยใช้แหวน ล็อคในลักษณะดังรูปที่ 4.22

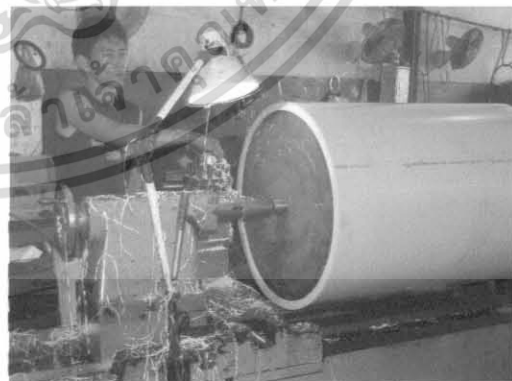
ในการเตรียมส่วนประกอบต่างๆ ของตัวถังหม้อแปลงนี้จะเริ่มจากการเตรียม ท่อพีวีซีขนาด 24 นิ้ว โดยทั่วไปจะผลิตและขายเป็นท่อนความยาวท่อนละ 4 เมตร ซึ่งจะต้องนำ ท่อพีวีซีนี้มาทำการตัดและเจาะร่องเพื่อใส่แหวนล็อค โดยการตัดท่อพีวีซีนี้ต้องการความเรียบที่ รอยตัดเพื่อไม่ให้เกิดการรั่วซึมของหม้อแปลง ดังนั้นจึงต้องทำการตัดท่อพีวีซีโดยใช้แท่นกลึง ขนาดใหญ่ดังรูปที่ 4.23 (ข) โดยรายละเอียดและขนาดของการตัดท่อพีวีซีจะแสดงไว้ใน ภาคผนวก ค.4



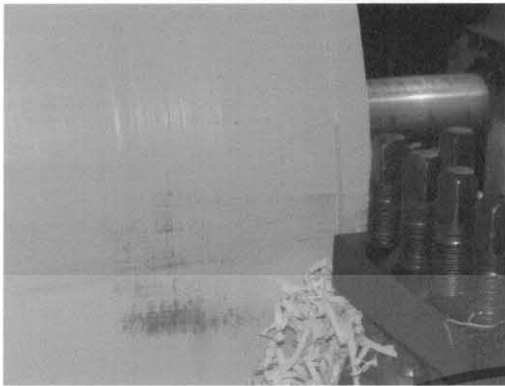
รูปที่ 4.22 การประกอบตัวถังเข้ากับฝาถังโดยใช้แหวนล็อก



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

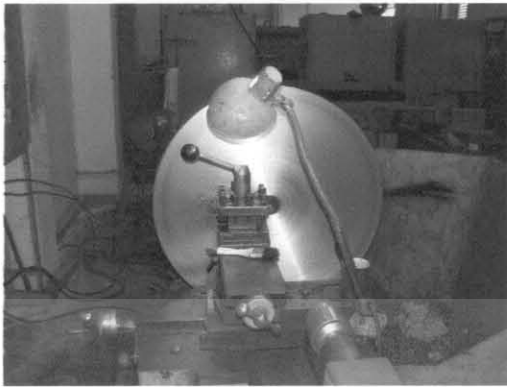
รูปที่ 4.23 การเตรียมตัวถังพีวีซี

- (ก) ท่อพีวีซีขนาด 24 นิ้ว ความยาว 4 ม.
- (ข) ตัดท่อพีวีซีให้มีความยาว 850 มม. โดยใช้แท่นกลึง
- (ค) เซาะร่องกว้าง 5 มม. ลึกลงไป 10 มม. เพื่อใส่แหวนล็อก
- (ง) ตัวถังพีวีซีที่เสร็จเรียบร้อยแล้ว

สำหรับส่วนประกอบอื่นๆ เช่น ฝาถังทางด้านบนและด้านล่าง แหวนล็อก จะเป็นงานโลหะทั้งหมด วัสดุที่ใช้จะเป็นแผ่นเหล็กขนาด 5 x 10 ฟุต ที่ความหนาต่างๆ กันแล้วแต่ชิ้นงาน นำมาตัดเป็นวงกลมและกลึงตามแบบโดยมีรายละเอียดดังในภาคผนวก ค.9 - ค.12 และเนื่องจากชิ้นงานทั้งหมดเป็นเหล็กธรรมดา ดังนั้น เพื่อให้สามารถใช้งานได้เป็นเวลานานจึงนำไปชุบซิงค์เพื่อป้องกันการเกิดสนิมก่อนการนำมาใช้งาน



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

(ช)

รูปที่ 4.24 การเตรียมส่วนประกอบอื่นๆ เช่น ฝาถัง และแหวนล็อก

- (ก) เตรียมแผ่นเหล็กขนาด 5×10 ฟุต
- (ข) ตัดแผ่นเหล็กเป็นวงกลม
- (ค) กิ่งเป็นวงกลมตามแบบในภาคผนวก ค.11
- (ง) ส่วนที่เป็นฝาถังด้านล่างนำมาเชื่อมติดกับขาตั้ง
- (จ) ส่วนที่เป็นฝาถังด้านบนนำมาเชื่อมติดกับท่อเติมน้ำมัน
- (ฉ) ชิ้นงานทั้งหมดนำไปชุบซิงค์เพื่อป้องกันสนิมก่อนการนำมาใช้งาน

หลังจากที่เตรียมตัวถังและฝาถังเรียบร้อยแล้วนำส่วนประกอบทั้งหมดมาประกอบกันและทำการบรรจุน้ำมันเพื่อทดสอบการรั่วซึมของตัวถังซึ่งหลังจากที่ได้ทำการทดลองบรรจุน้ำมันดูแล้วตัวถังที่ได้ทำการออกแบบสามารถบรรจุน้ำมันได้โดยไม่เกิดการรั่วซึมลักษณะของการประกอบตัวถังแสดงดังรูปที่ 4.25



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 4.25 ประกอบตัวถังเพื่อทดสอบการรั่วซึม

- (ก) ตัดประเก็นไม้ก๊อก หน้า 6 มม. เป็นวงกลม
- (ข) วางประเก็นที่ขอบของตัวถังพีวีซี ก่อนประกอบฝาถัง
- (ค) เติมน้ำมันหม้อแปลง
- (ง) เติมน้ำมันหม้อแปลงจนได้ระดับที่ต้องการ
- (จ) ปิดฝาถังและทิ้งไว้เพื่อตรวจสอบการรั่วซึม

4.6 การประกอบชุดลดเข้ากับแกนเหล็ก

ในการประกอบชุดลดเข้ากับแกนเหล็กใช้วิธีการถอดแกนเหล็กด้านข้างออกด้านหนึ่งแล้วสวมชุดลดแรงต่ำและชุดลดแรงสูงเข้ากับแกนเหล็กแล้วจึงเรียงแกนเหล็กปิดเข้าที่เดิม ใส่ล้อติดกับสลักเกลียวให้แน่นโดยใช้ลิ้มที่ทำจากกระดาษอัดเป็นตัวบังคับให้ชุดลดอยู่ตรงกึ่งกลางของแกนเหล็กด้านบน (Top Yoke) ลักษณะของการประกอบชุดลดเข้ากับแกนเหล็กแสดงดังรูปที่ 4.26 และเมื่อทำการประกอบกันเรียบร้อยแล้ว ดังในรูปที่ 4.26 (ณ) จะเรียกส่วนประกอบทั้งหมดนี้ว่า “ใส่หม้อแปลง”



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)



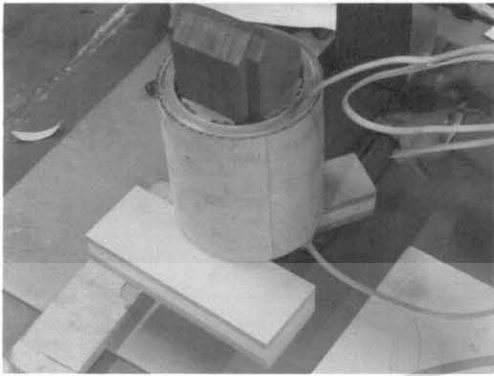
(ฉ)



(ช)



(ซ)



(ณ)



(ณ)



(ณ)



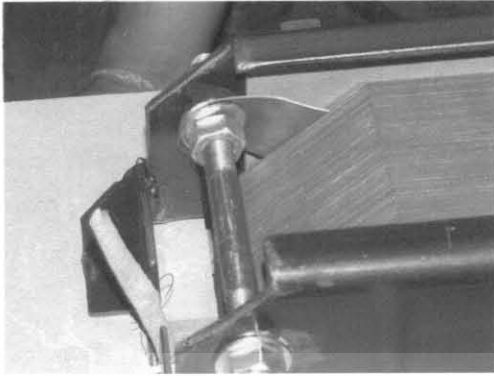
(ณ)



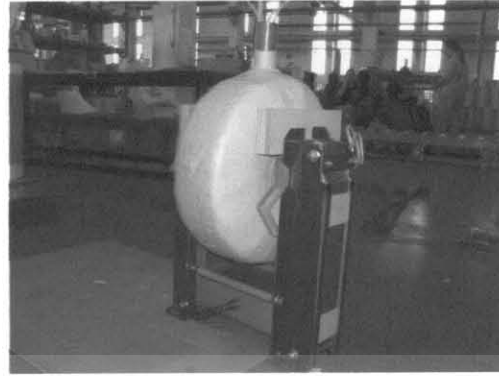
(ณ)



(ณ)



(ฅ)



(ณ)



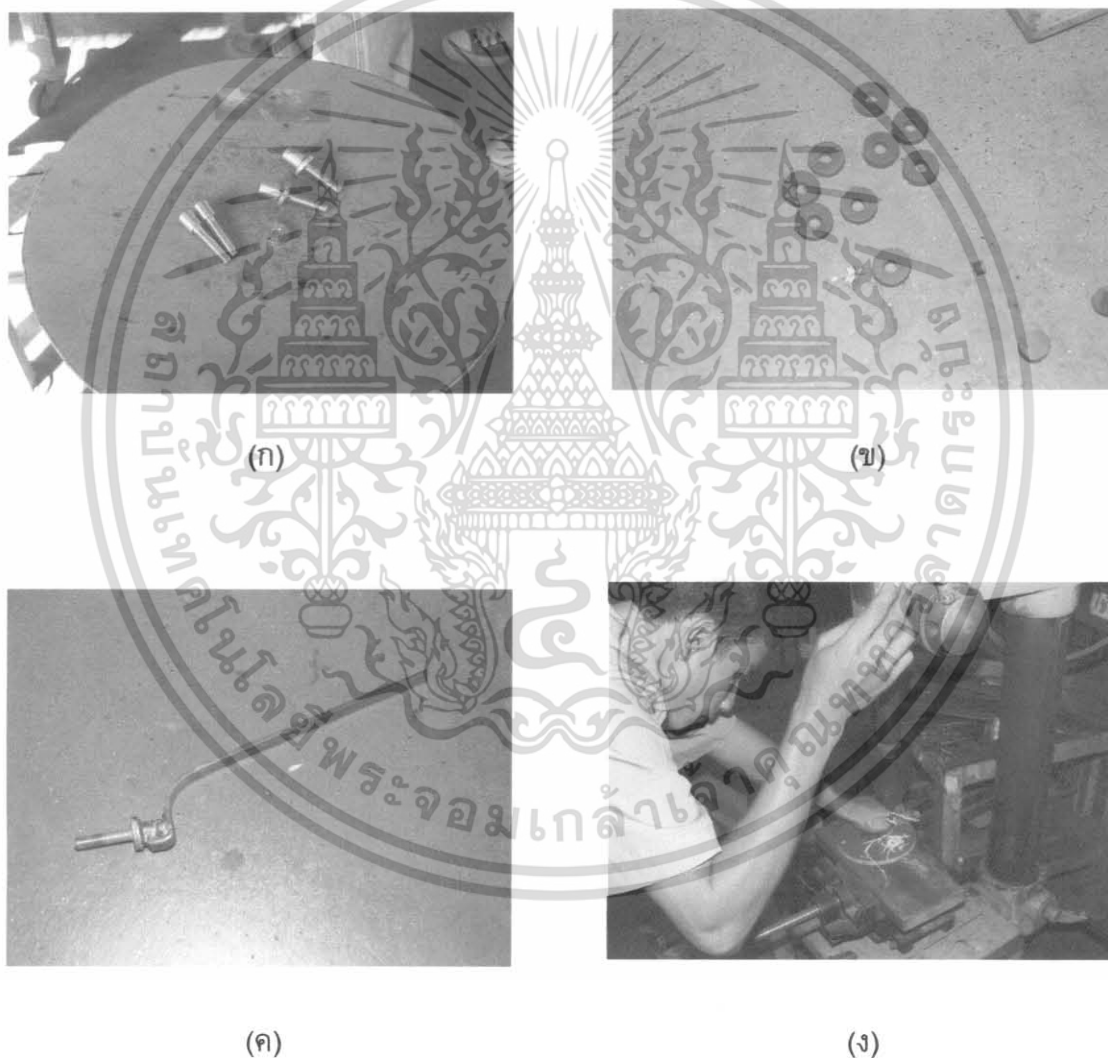
(ด)

รูปที่ 4.26 การประกอบขดลวดเข้ากับแกนเหล็ก

- (ก), (ข) วางแกนเหล็กในลักษณะที่สามารถถอดแกนเหล็กและสวมขดลวดได้ง่าย
- (ค) ใช้แม่แรงหนีบแกนเหล็กด้านข้างไว้ให้แน่นก่อนถอดแคลมป์
- (ง) ถอดแกนเหล็กด้านข้างซึ่งขณะนีวางตัวอยู่ด้านบนออก
- (จ) แกนเหล็กที่ถอดด้านข้างออกเรียบร้อยแล้ว
- (ฉ), (ช) สวมขดลวดแรงต่ำเข้ากับแกนเหล็ก
- (ซ), (ฅ) ใส่ลิ่มที่ทำจากกระดาษอัดเพื่อป้องกันไม่ให้ขดลวดเคลื่อนตัวได้ง่าย
- (ญ), (ฎ) สวมขดลวดแรงสูงเข้ากับแกนเหล็ก
- (ฏ), (ฐ) เรียงแกนเหล็กด้านข้างเข้าที่เดิม
- (ท) ประกอบแคลมป์เข้ากับแกนเหล็กเพื่อบีบขดลวดให้แน่น
- (ฑ) ส่วนที่ต่อลงกราว์นของแกนเหล็ก
- (ณ) ขดลวดที่ประกอบกับแกนเหล็กเรียบร้อยแล้ว
- (ด) พันเทปกาครอบแกนเหล็กด้านล่างเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับแกนเหล็ก

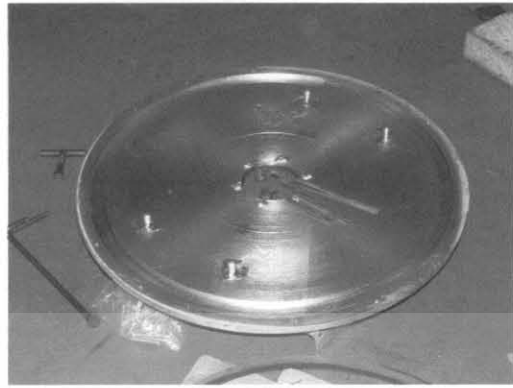
4.7 การต่อสาย

หลังจากที่ได้ประกอบขดลวดเข้ากับแกนเหล็กเข้าเรียบร้อยแล้วจะเป็นขั้นตอนของการต่อสายโดยจากการออกแบบในบทที่ 3 จะทำการต่อสายออกทางฝาด้านบนและด้านล่างของตัวถังหม้อแปลงโดยที่ฝาด้านล่างจะประกอบด้วยขั้วต่อสายทั้งหมด 3 ขั้ว คือ ปลายสายของขดลวดแรงต่ำ 2 เส้น และสายกราวน้อีก 1 เส้น ส่วนด้านบนจะประกอบด้วยปลายสายแรงสูง 1 เส้น และปลายสายของขดลวดต่อควบทั้ง 2 ขด อีก 4 เส้น ขั้วสายทั้งหมดจะใช้น็อตทองเหลือง โดยน็อตทองเหลืองนี้จะยึดอยู่กับแผ่นแบกกะไลต์ ที่ตัดเป็นวงกลมยึดอยู่ติดกับฝาดัง ลักษณะของการต่อสายแสดงดังรูปที่ 4.27





(จ)



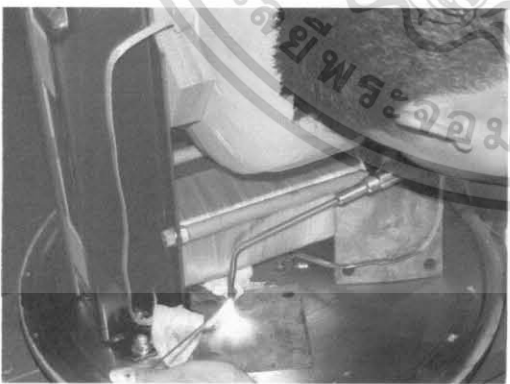
(ฉ)



(ค)



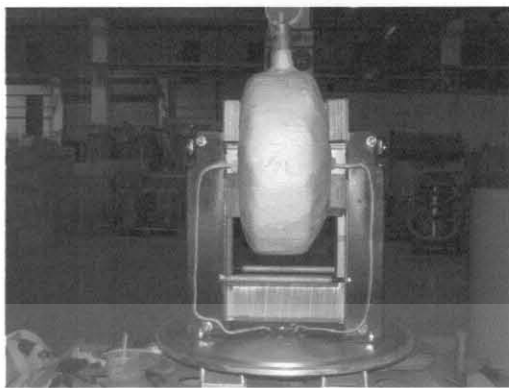
(ค)



(ง)



(ง)



(๘)



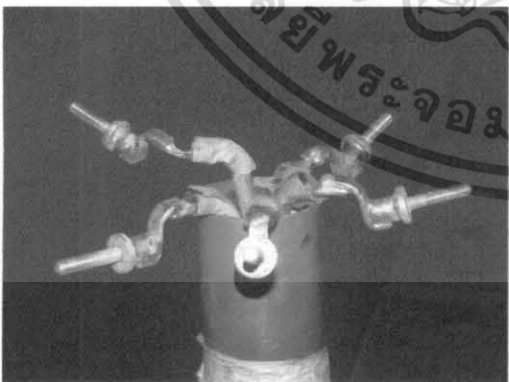
(๙)



(๑๐)



(๑๑)

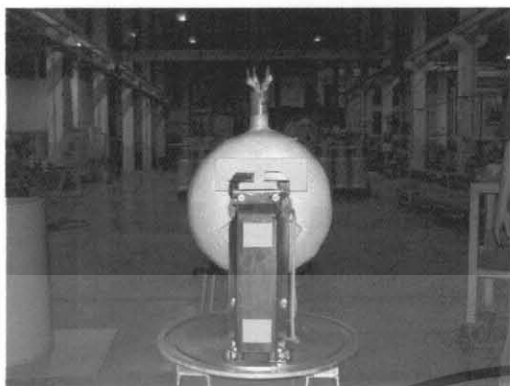


(๑๒)



(๑๓)





(ด)

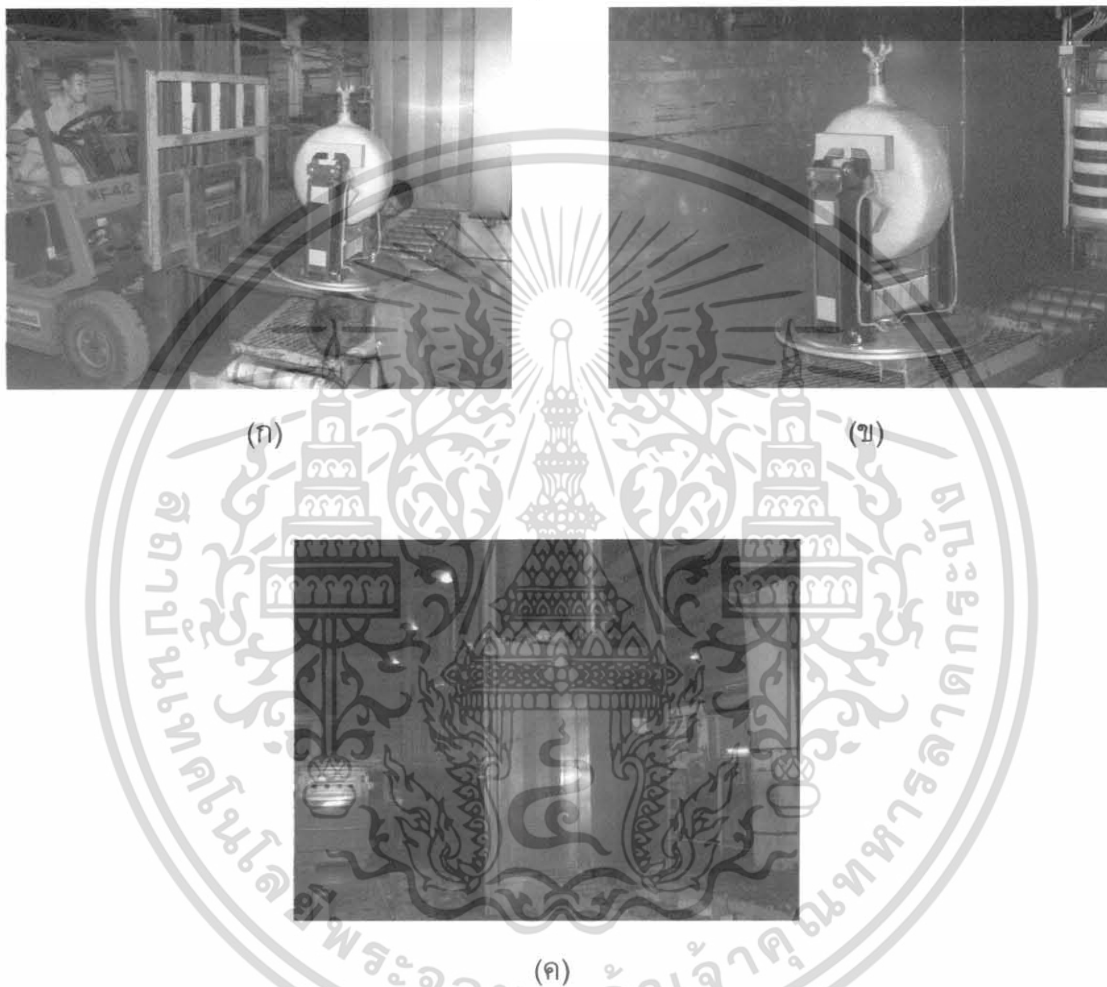


(ค)

รูปที่ 4.27 ขั้นตอนของการต่อสาย

- (ก) นี้อตทองเหลืองที่ใช้เป็นขั้วสาย
- (ข) ยางประเก็นรองหัวนี้อตทองเหลือง เพื่อกันน้ำมันรั่ว
- (ค) เชื่อมลวดทองแดงกับ นี้อตทองเหลือง เพื่อให้ต่อกับปลายขดลวดได้สะดวก
- (ง) แผ่นแบกกะไลต์ที่ตัดเป็นวงกลม และเจาะรูสำหรับติดขั้วสาย
- (จ) ติดแผ่นแบกกะไลต์เข้ากับฝาด้านล่าง
- (ฉ) ติดขั้วต่อสาย 3 ขั้วที่ฝาด้านล่าง
- (ช) นำไส้หม้อแปลงตั้งวางบนฝาด้านล่าง
- (ช) ขันน็อตยึดไส้หม้อแปลงกับฝาด้านล่างให้แน่น
- (ฉ) เชื่อมปลายขดลวดแรงต่ำเข้ากับขั้วสาย
- (ญ) ต่อปลายสายที่ต้องลงกราวด์ทั้งหมดไว้ที่จุดเดียวกัน
- (ฎ) ปลายขดลวดแรงต่ำที่เชื่อมเข้ากับขั้วสายเรียบร้อยแล้วทั้งสองปลาย
- (ฏ) วัดความยาวของปลายสายและตัดให้พอดีกับระยะความสูงของฝาด้านบน
- (จ) แผ่นแบกกะไลต์ที่ฝาด้านบน ซึ่งประกอบด้วยขั้วสาย 5 ขั้ว
- (ช) เชื่อมปลายขดลวดเข้ากับขั้วสาย
- (ฌ) ปลายสายทางด้านบนที่เชื่อมกับขั้วสายเรียบร้อยแล้วทั้ง 5 ขั้ว
- (ฉ) ทดลองประกอบเข้ากับแผ่นแบกกะไลต์ เพื่อวัดความสูงอีกครั้ง
- (ด) ภาพด้านข้างของไส้หม้อแปลงที่ทำการต่อสายเรียบร้อยแล้ว
- (ต) ภาพด้านหน้าของไส้หม้อแปลงที่ทำการต่อสายเรียบร้อยแล้ว

เมื่อทำการต่อสายทั้งหมดเรียบร้อยแล้วก็จะนำไส้หม้อแปลงเข้าอบเพื่อไล่ความชื้นที่อยู่ในชั้นฉนวนของขดลวดเพราะเมื่อใช้งานหม้อแปลง ความชื้นในฉนวนจะออกมาผสมในน้ำมันและความชื้นเหล่านี้เป็นสาเหตุของการดีสชาร์จบางส่วนและนำไปสู่การเบรกดาวนในที่สุด โดยจะทำการอบที่อุณหภูมิ 120°C ซึ่งจะเห็นได้ว่าจะทำการอบโดยที่ยังไม่ได้ประกอปกับตัวถังพีวีซี เนื่องจากว่าที่อุณหภูมิ 120°C นี้จะทำให้ท่อพีวีซีเสียสภาพได้



รูปที่ 4.28 การอบไล่ความชื้น

- (ก) ใช้รถยกส่วนประกอบทั้งหมด ที่ใช้ลมเป่าทำความสะอาดเรียบร้อยแล้วมาเข้าตู้อบ
- (ข) นำเข้าตู้อบในลักษณะวางตั้งอยู่ผาถึงด้านล่าง
- (ค) ตู้อบที่ใช้อบไล่หม้อแปลง

4.8 ประกอบตัวถัง ปิดฝาและเติมน้ำมัน

ในระหว่างที่ทำการอบไส้หม้อแปลงอยู่นั้นจะมีการนำไส้หม้อแปลงออกจากตู้อบ เพื่อทำการวัดค่าความต้านทานของฉนวนระหว่างขดลวดแต่ละขด และระหว่างขดลวดแต่ละขด กับแกนเหล็กที่เรียกว่า “การวัดค่าความต้านทานฉนวน” ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดไว้ในบทที่ 5 จนเมื่อได้ค่าความต้านทานคงที่แล้วจึงนำไส้หม้อแปลงออกมาทำประกอบกับตัวถังพีวีซีและเติมน้ำมันหม้อแปลงซึ่งการเติมน้ำมันหม้อแปลงนี้จะกระทำภายใต้สุญญากาศเพื่อป้องกันการเกิด ฟองอากาศแทรกอยู่ภายในฉนวนกระดาษกับน้ำมันโดยฟองอากาศเหล่านี้เป็นสาเหตุของการ ดิสชาร์จบางส่วนและนำไปสู่การเบรกดาวน์ในที่สุด



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)



(ข)



(ค)

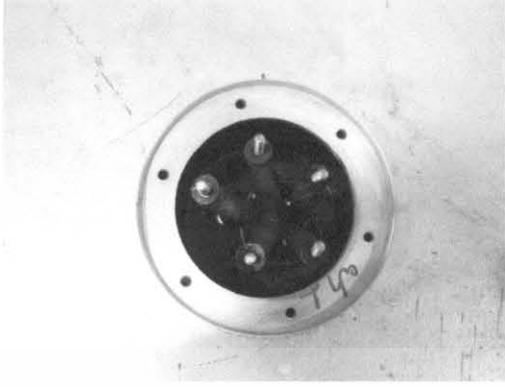
(ง)



(ฉ)



(ช)



(จ)



(ข)



(ค)

(ค)



(ง)

รูปที่ 4.29 ขั้นตอนของการประกอบตัวถัง ปิดฝาและเติมน้ำมัน

- (ก) หลังจากให้นำไส้หม้อแปลงออกจากตู้อบ ต้องขันน็อตบีบแคลมป์ให้แน่นอีกครั้ง
- (ข) วางประก็นกันน้ำมันที่ฝาด้านล่าง
- (ค) นำตัวถังพีวีซี มาครอบไส้หม้อแปลง
- (ง) ใส่แหวนล็อกและขันน็อตยึดให้แน่น
- (จ) นำเข้าห้องสุญญากาศ เพื่อเติมน้ำมันหม้อแปลง
- (ฉ) เติมน้ำมันหม้อแปลงภายในห้องสุญญากาศจนได้ระดับที่ต้องการ
- (ช) หลังจากที่ยังไว้สักครู่ ต้องเติมน้ำมันเพิ่มจนได้ระดับอีกครั้ง เนื่องจากน้ำมันมีการซึมเข้าไปในเนื้อกระดาษ ทำให้ระดับน้ำมันลดลง
- (ซ) ระดับน้ำมันต่ำจากฝาดังประมาณ 2 ซม. ตามที่ได้คำนวณไว้
- (ฌ) วางประก็นที่ขอบด้านบนตัวถัง ก่อนปิดฝา
- (ญ) ปิดฝาดัง
- (ฎ) ใส่ยางประก็นรองหัวน็อตทองเหลือง
- (ฏ) ขันน็อตยึดฝาดังให้แน่น
- (จ) วางแผ่นแบกกะไลต์และนำปลายสายขึ้นมาด้านบน
- (ช) ขันน็อตยึดแผ่นแบกกะไลต์ และขั้วสายให้แน่น
- (ฌ) หม้อแปลงที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว



บทที่ 5

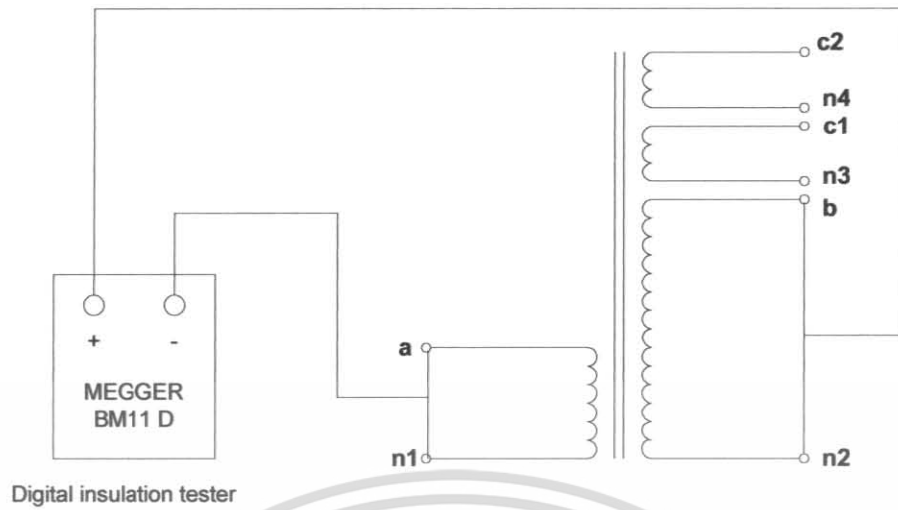
การทดสอบ

การทดสอบหม้อแปลงที่ประกอบสร้างขึ้น เพื่อตรวจว่าลักษณะคุณสมบัติของหม้อแปลงเป็นไปตามที่ออกแบบหรือไม่ 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) การวัดค่าสูญเสียกำลังไฟฟ้าและกระแสไม่มีโหลด
- 5) การวัดค่าสูญเสียกำลังไฟฟ้ามีโหลดและแรงดันอิมพีแดนซ์
- 6) การทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกิน
- 7) การทดสอบความคงทนต่อแรงดันจากตัวจ่ายอื่น
- 8) การทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม
- 9) การตรวจสอบรูปคลื่นแรงดัน
- 10) การทดสอบการใช้งาน

5.1 การวัดค่าความต้านทานฉนวน

การวัดค่าความต้านทานฉนวนใช้เครื่อง AVO MEGGER BM11D โดยจะทำการวัดในส่วนของฉนวนที่กั้นอยู่ระหว่างขดลวดแรงต่ำกับขดลวดแรงสูง ขดลวดแรงต่ำกับขดลวดต่อควบ ขดลวดแรงสูงกับขดลวดต่อควบ และขดลวดแต่ละขดกับส่วนที่ต่อลงดิน ซึ่งมีวงจรการทดสอบตามรูปที่ 5.1 การทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.2 และค่าความต้านทานฉนวนแสดงในตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.1 วงจรการทดสอบความต้านทานฉนวนระหว่างขดลวดแรงต่ำกับขดลวดแรงสูง



(ก)

(ข)

รูปที่ 5.2 การทดสอบค่าความต้านทานฉนวน

(ก) AVO MEGGER BM11D

(ข) การวัดค่าความต้านทาน

ตารางที่ 5.1 ค่าความต้านทานฉนวน

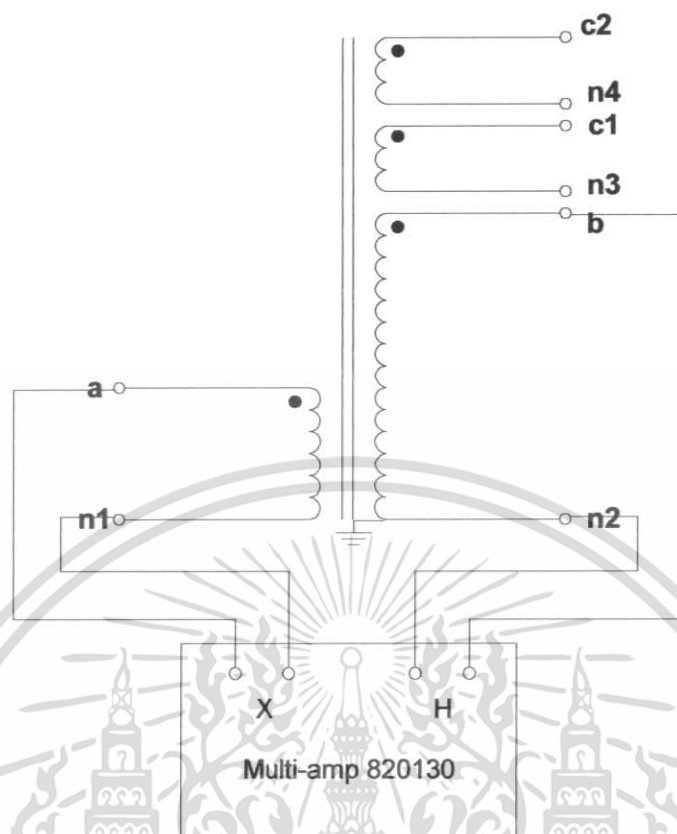
ขดลวดชุดที่ 1	ขดลวดชุดที่ 2	ค่าความต้านทาน ก่อนทำการอบ (MΩ)	ค่าความต้านทาน หลังทำการอบ 1 วัน(MΩ)	ค่าความต้านทานที่ มีค่าคงที่แล้ว (GΩ)
a-n1	b-n2	160	1,700	36.8
a-n1	c1-n3	151	2,100	59
a-n1	c2-n4	152	2,240	63.5
b-n2	c1-n3	37.6	75.5	19.7
b-n2	c2-n4	41.6	74	17.2
a-n1	แกน	42	121	43.4
b-n2	แกน	189	4,900	109
c1-n3	แกน	130	7,200	157
c2-n4	แกน	129	7,600	166

ในการทำการทดสอบค่าความเป็นฉนวนนั้น ใช้ระดับแรงดันของอุปกรณ์ที่ทำการทดสอบคือขนาด 2500 VDC โดยจะทำการทดสอบทีละ 2 ขด ขดแรกจ่ายแรงดันที่ 2500 VDC และขดที่สองเป็น 0 VDC เพื่อวัดค่าความเป็นฉนวนของฉนวนทั้งหมดที่กั้นอยู่ระหว่าง 2 ขดที่ทำการทดสอบ และในกรณีที่วัดค่าความเป็นฉนวนของขดลวดเทียบกับส่วนที่ต่อลงดิน จะจ่ายแรงดัน 2500 VDC ที่ขดลวด และ 0 VDC ที่ส่วนที่ต่อลงดิน ทำการวัดเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนกว่าค่าที่ได้จากการวัดในแต่ละครั้งจะมีค่าไม่เพิ่มขึ้น

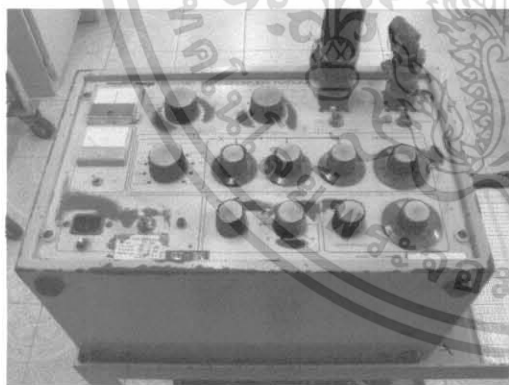
ขณะทำการอบจะเห็นได้ว่าเมื่อจำนวนชั่วโมงอบมากขึ้น จะทำให้ค่าความเป็นฉนวนเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากความชื้นในขดลวดและการคายฉนวนจะค่อยๆ ระบายออกไปขณะทำการอบ โดยเราจะทำการอบแล้ววัดค่าไปเรื่อยๆ จนกว่าค่าความต้านทานที่ได้จะมีค่าคงที่ นั้นแสดงให้เห็นว่าความชื้นที่มีอยู่ในขดลวดและการคายฉนวนได้ระเหยจนหมดไปแล้ว ซึ่งจะทำให้ได้ค่าความเป็นฉนวนที่มีค่ามากที่สุด

5.2 การวัดอัตราส่วนแรงดันและการตรวจสอบขั้ว

การวัดอัตราส่วนแรงดันและการตรวจสอบขั้วของขดลวดใช้เครื่อง MULTI-AMP 820130 TRANSFORMER RATIO METER MODEL TR 800 ซึ่งมีวงจรถอดสอบดังรูปที่ 5.3 การทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.4 และอัตราส่วนแรงดันที่วัดได้แสดงในตารางที่ 5.2 หม้อแปลงทดสอบที่สร้างมีขดลวดแรงดันต่ำ 1 ขด ขดลวดแรงดันสูง 1 ขด และขดลวดต่อควมอีก 2 ขด จึงจำเป็นต้องมีการวัดอัตราส่วนแรงดันและการทดสอบขั้ว



รูปที่ 5.3 วงจรการวัดอัตราส่วนแรงดันและการตรวจสอบขั้ว



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.4 การวัดอัตราส่วนแรงดันและการตรวจสอบขั้ว

(ก) MULTI-AMP 820130 TRANSFORMER RATIO METER

(ข) การวัดอัตราส่วนแรงดันและการตรวจสอบขั้ว

ตารางที่ 5.2 ค่าอัตราส่วนแรงดันของขดลวด

หม้อ แปลง ทดสอบ	อัตราส่วนแรงดัน ของขดลวด	อัตราส่วนแรงดัน		ความคลาด เคลื่อน (%)	ชั้ว
		การวัด	การคำนวณ		
ตัวที่ 1	แรงดันสูง:แรงดันต่ำ	459.02 : 1	460.4 : 1	+ 0.30	เหมือนกัน
	แรงดันต่ำ:ต่อควบ1	1.98 : 1	1.97 : 1	- 0.71	เหมือนกัน
	แรงดันต่ำ:ต่อควบ2	1.98 : 1	1.97 : 1	- 0.71	เหมือนกัน
	แรงดันต่ำ:ต่อควบ 1,2	1.03 : 1	1.02 : 1	- 0.97	เหมือนกัน

*** ต่อควบ 1,2 คือ การต่อขดลวดชุดที่ 1 อนุกรมกับขดลวดชุดที่ 2

5.3 การวัดค่าความต้านทานกระแสดรขงขดลวด

การวัดค่าความต้านทานกระแสดรขงใช้เครื่อง RESISTOMAT QT-07 ซึ่งมีวงจรการทดสอบดังรูปที่ 5.5 ภาพการทดสอบรูปที่ 5.6 และค่าที่วัดได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.3 โดยมีอุณหภูมิขณะทำการวัด 32.9°C

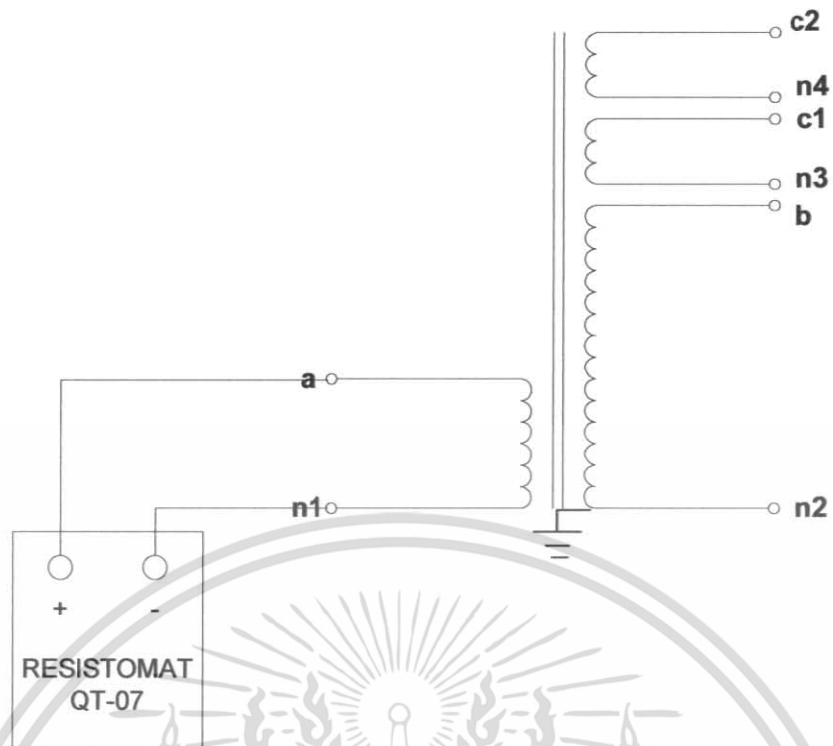
ความต้านทานที่อุณหภูมิ 75°C

$$R_{75^{\circ}\text{C}} = [(T_0 + 75) / (T_0 + 32.9)] \times R_{32.9^{\circ}\text{C}}$$

เมื่อ T_0 คือ อุณหภูมิที่ความต้านทานเสมือนมีค่าเป็นศูนย์ และสำหรับทองแดง

$T_0 = 234.5^{\circ}\text{C}$ ดังนั้น

$$R_{75^{\circ}\text{C}} = [(234.5 + 75) / (234.5 + 32.9)] \times R_{32.9^{\circ}\text{C}}$$



รูปที่ 5.5 วงจรการวัดค่าความต้านทานกระแสตรง



(ก)

(ข)

รูปที่ 5.6 การวัดค่าความต้านทานกระแสตรง

(ก) RESISTOMAT QT-07

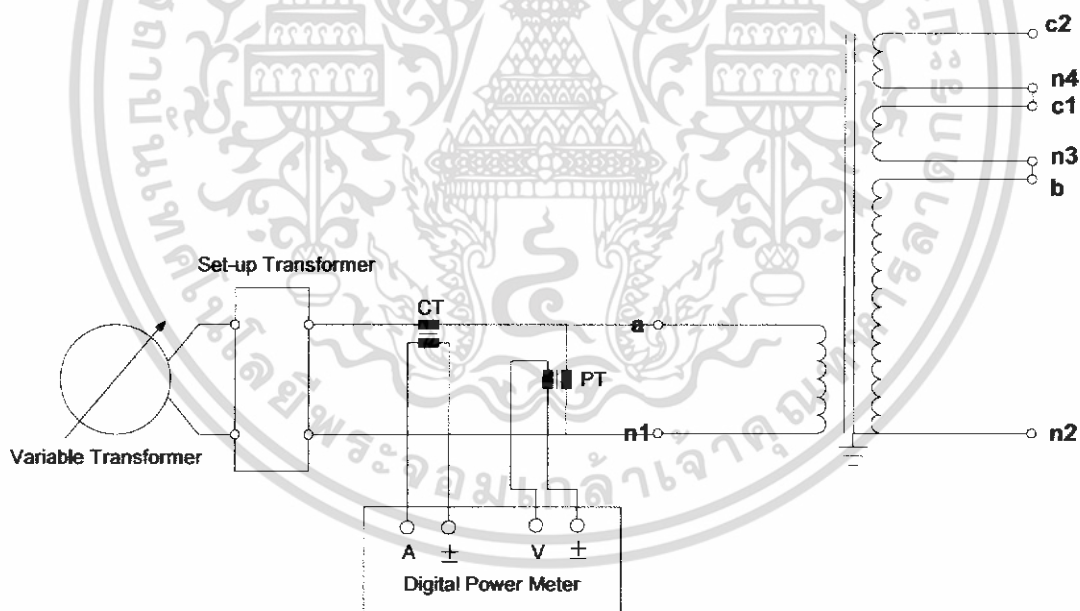
(ข) การวัดค่าความต้านทานกระแสตรง

ตารางที่ 5.3 ค่าความต้านทานกระแสตรงของขดลวด

หม้อแปลง ทดสอบ	ขดลวด	ค่าความต้านทานกระแสตรง (Ω)			ความคลาด เคลื่อน (%)
		การวัด		การคำนวณ 75°C	
		32.9°C	75°C		
ตัวที่ 1	แรงดันต่ำ	0.0328	0.0380	0.0330	-15.15 %
	แรงดันสูง	4890	5660	5524	-2.46 %
	ต่อควบ 1,2	0.0707	0.0878	0.0820	-7.07 %

5.4 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสไม่มีโหลด

การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสไม่มีโหลดใช้เครื่อง YOKOGAWA 2533 DIGITAL POWER METER เป็นการวัดค่าเมื่อหม้อแปลงไม่ได้จ่ายโหลด ที่แรงดันและความถี่ปกติ กำลังที่ป้อนเข้าเป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่มีค่าคงที่ ซึ่งมีวงจรการทดสอบดังรูปที่ 5.7 การทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.8 ส่วนรูปที่ 5.9 และรูปที่ 5.10 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์แรงดัน กระแส และค่าความสูญเสีย ค่าที่วัดได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.4



รูปที่ 5.7 วงจรการวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสไม่มีโหลด



(ก)



(ข)

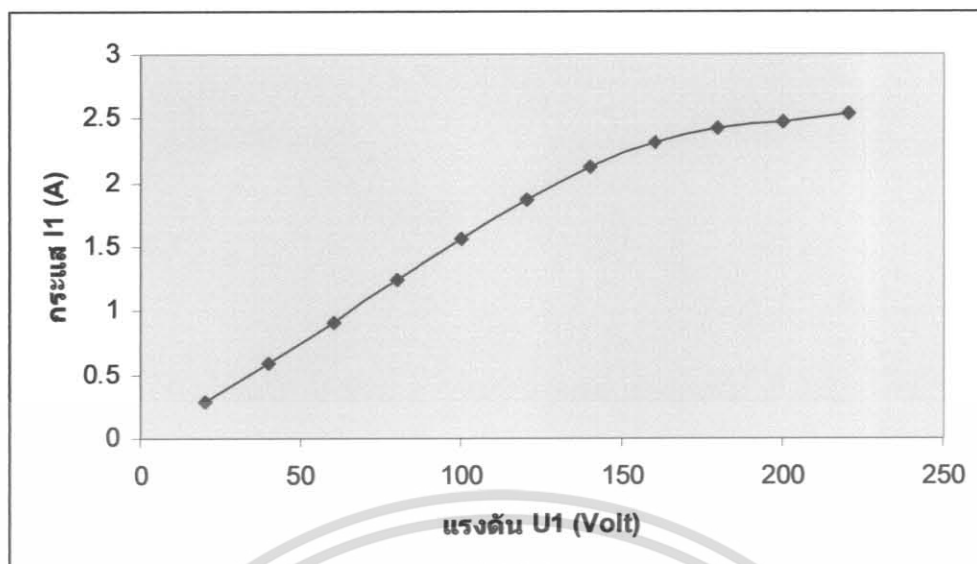
รูปที่ 5.8 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสไม่มีโหลด

(ก) YOKOGAWA 2533 DIGITAL POWER METER

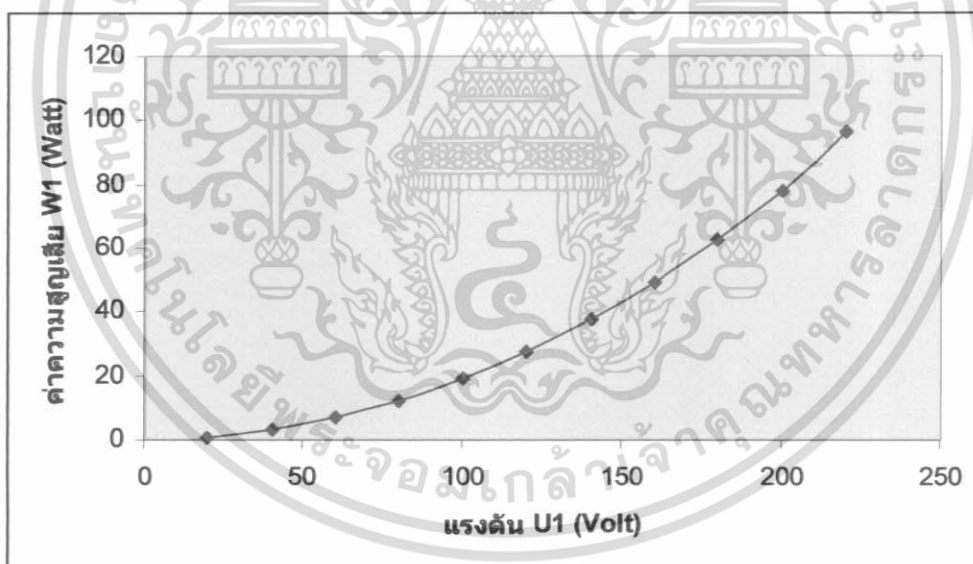
(ข) การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสไม่มีโหลด

ตารางที่ 5.4 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสไม่มีโหลด

U1 (Volt)	I1 (A)	W1 (Watt)
20	0.2866	0.79
40	0.5961	3.10
60	0.9155	6.90
80	1.2387	12.1
100	1.5630	19.0
120	1.8738	27.3
140	2.1220	37.3
160	2.3070	49.0
180	2.4310	62.5
200	2.4770	77.8
220	2.5360	96.4



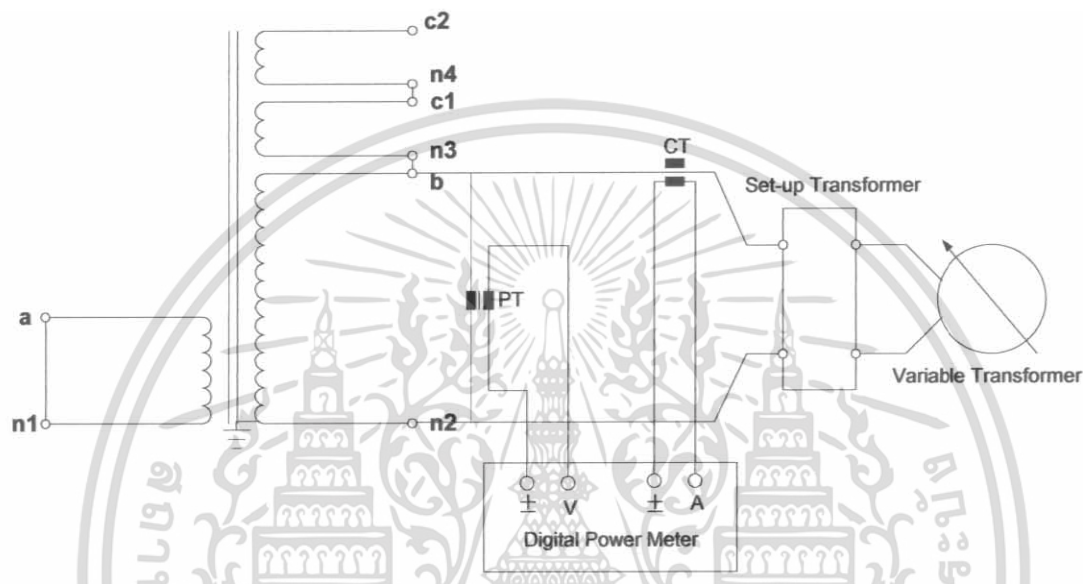
รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแส



รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและค่าความสูญเสียซึ่งความสูญเสียมีความคลาดเคลื่อนจากการออกแบบอยู่ -11.4%

5.5 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียมีโหลดและแรงดันอิมพีแดนซ์

การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียมีโหลดและแรงดันอิมพีแดนซ์ ใช้เครื่อง YOKOGAWA YEW 2533 DIGITAL POWER METER โดยการป้อนแรงดันให้ขดลวดแรงสูง จนกระทั่งกระแสทางด้านแรงสูงมีค่าเท่ากับกระแสพิกัด และลัดวงจรทางด้านขดลวดแรงต่ำ เปิด วงจรขดลวดต่อควบ ซึ่งมีวงจรการทดสอบตามรูปที่ 5.11 การทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.12 ส่วน รูปที่ 5.13 และรูปที่ 5.14 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์แรงดัน กระแส และค่าความสูญเสียค่าที่ วัดได้แสดงในตารางที่ 5.5 และสรุปค่าต่างๆ ในตารางที่ 5.6



รูปที่ 5.11 วงจรการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียมีโหลดและแรงดันอิมพีแดนซ์



(ก)



(ข)

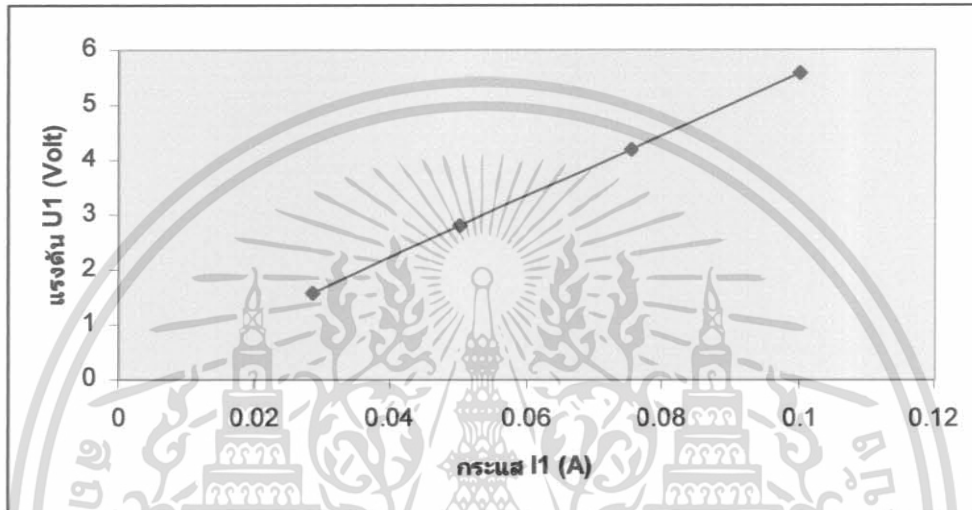
รูปที่ 5.12 การทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียมีโหลดและแรงดันอิมพีแดนซ์

(ก) YOKOGAWA YEW 2533 DIGITAL POWER METER

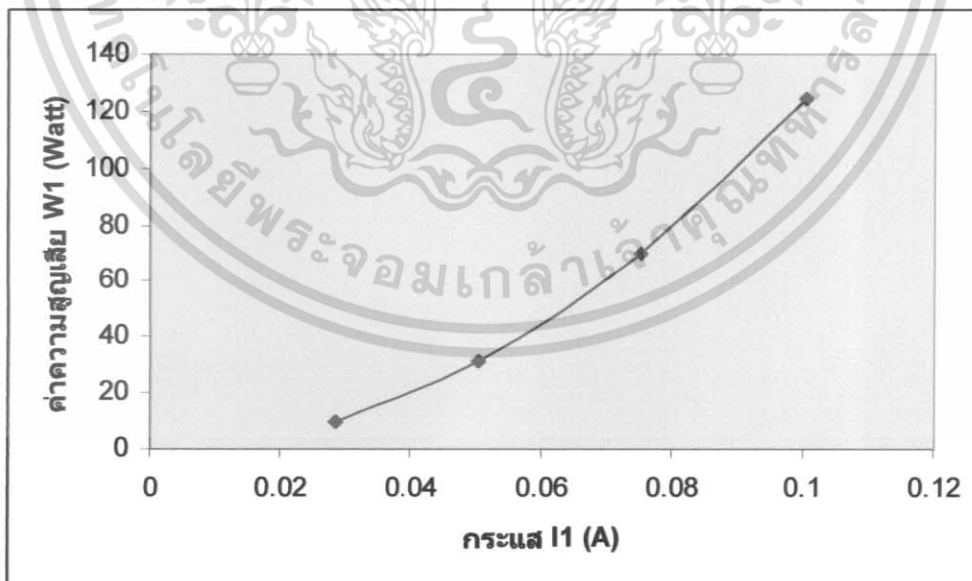
(ข) การทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียมีโหลด

ตารางที่ 5.5 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียมีโหลดและแรงดันอิมพีแดนซ์ อุณหภูมิขณะทดสอบ 29.3°C

V (kV)	I (A)	P (W)
1.583	0.0284	10
2.793	0.0502	31
4.185	0.0752	70
5.578	0.1003	124



รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน



รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและค่าความสูญเสียซึ่งความสูญเสียมีความคลาดเคลื่อนจากการออกแบบอยู่ -0.81%

จากข้อมูล

$$\text{แรงดันไฟฟ้าลัดวงจร } V_{sc} = 5.578 \text{ kV.}$$

$$\text{กำลังไฟฟ้าลัดวงจร } P_{sc} \text{ 29.3 } ^\circ\text{C} = 124 \text{ W.}$$

$$\text{กำลังไฟฟ้าป้อนเข้า } P_{sc} \text{ 29.3 } ^\circ\text{C} = P_{dc} \text{ 29.3 } ^\circ\text{C} + P_{stray} \text{ 29.3 } ^\circ\text{C}$$

เมื่อ

$$P_{dc} \text{ 29.3 } ^\circ\text{C} = \text{กำลังไฟฟ้าสูญเสียในความต้านทานกระแสตรงของขดลวดแรงดันรวม} \\ \text{กับขดลวดแรงสูงที่อุณหภูมิขดลวด 29.3 } ^\circ\text{C}$$

$$P_{stray} \text{ 29.3 } ^\circ\text{C} = \text{กำลังไฟฟ้าสูญเสียเสถียรย์ เมื่อมีโหลดที่อุณหภูมิขดลวด 29.3 } ^\circ\text{C}$$

$$P_{dc} \text{ 29.3 } ^\circ\text{C} = I_1^2 R_1(29.3 ^\circ\text{C}) + I_2^2 R_2(29.3 ^\circ\text{C})$$

$$P_{stray} \text{ 29.3 } ^\circ\text{C} = P_{sc} (29.3 ^\circ\text{C}) - P_{dc}(29.3 ^\circ\text{C})$$

$$P_{dc} \text{ 75 } ^\circ\text{C} = P_{dc}(29.3 ^\circ\text{C}) \times (234.5+75)/(234.5+29.3)$$

$$P_{stray} \text{ 75 } ^\circ\text{C} = P_{stray}(29.3 ^\circ\text{C}) \times (234.5+75)/(234.5+29.3)$$

$$P_{sc} \text{ 75 } ^\circ\text{C} = P_{dc}(75 ^\circ\text{C}) + P_{stray}(75 ^\circ\text{C})$$

$$Z_{sc} \text{ 29.3 } ^\circ\text{C} = V_{sc}/I_1 \text{ ที่ } 29.3 ^\circ\text{C} \text{ คิดเทียบทางด้านแรงสูง}$$

ความต้านทานสมมูลที่ 29.3 °C คิดเทียบทางด้านแรงสูง

$$X_{sc} \text{ 29.3 } ^\circ\text{C} = ((Z_{sc}(29.3 ^\circ\text{C}))^2 - (R_{sc}(29.3 ^\circ\text{C}))^2)^{1/2}$$

$$X_{sc} \text{ 75 } ^\circ\text{C} = X_{sc}(29.3 ^\circ\text{C})$$

$$R_{sc} \text{ 75 } ^\circ\text{C} = R_{sc}(29.3 ^\circ\text{C}) \times (234.5+75)/(234.5+29.3)$$

$$Z_{sc} \text{ 75 } ^\circ\text{C} = ((R_{sc}(75 ^\circ\text{C}))^2 + (X_{sc}(75 ^\circ\text{C}))^2)^{1/2}$$

เปอร์เซ็นต์แรงดันอิมพีแดนซ์ ที่ 75 °C

$$\mathcal{E}_{sc} = (I_1 Z_{sc}(75 ^\circ\text{C}) / V_1) \times 100\% \\ = 5.58\%$$

เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของ $\mathcal{E}_{sc} = [(ค่าที่คำนวณ-ค่าที่วัดได้)/ค่าที่คำนวณ] \times 100\%$
 $= -37.44\%$

ตารางที่ 5.6 สรุปค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิ 29.3 °C และ 75 °C

	29.3 °C	75 °C
P_{dc} (Watt)	116	136
P_{stray} (Watt)	7	6
R_{sc} (Ohm)	4,824.2889	5,658.4546
X_{sc} (Ohm)	55,571	55,571
Z_{sc} (Ohm)	55,780	55,858.34
\mathcal{E}_{sc} (%)	-	5.58
% ความคลาดเคลื่อน \mathcal{E}_{sc} (%)	-	-37.44

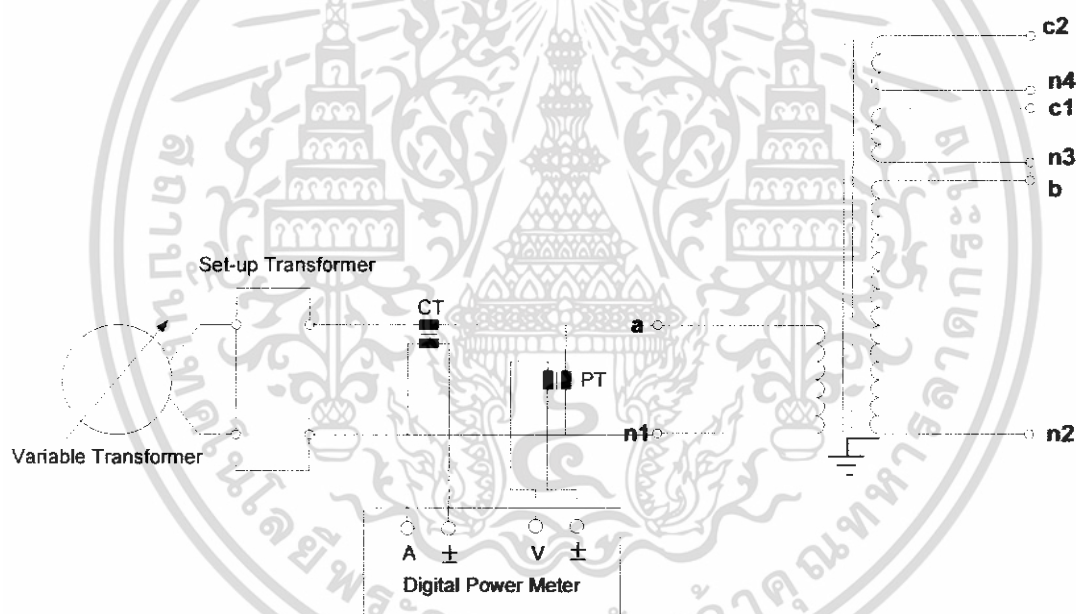
ค่าในตารางที่ 5.6

คำนวณจาก $I_1=0.1$ A	$R_1(29.3^\circ\text{C}) = 4,824.29 \ \Omega$
$I_2=45.45$ A	$R_2(29.3^\circ\text{C}) = 0.0328 \ \Omega$

5.6 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกินกระแสสลับ

การทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกินกระแสสลับ ใช้เครื่อง YOKOGAWA 2533 DIGITAL POWER METER เป็นการทดสอบค่าความคงทนของฉนวนระหว่างขดลวดกับขดลวด ชั้นของขดลวด ขดลวดกับดิน แรงดันที่ทำการทดสอบมีขนาด 120 kV 50 Hz (120% ของแรงดันที่พิกัด) โดยใช้เวลาทดสอบ 1 นาที ซึ่งมีวงจรการทดสอบดังรูปที่ 5.15

ผลการทดสอบ หม้อแปลงทดสอบมีความคงทนต่อแรงดันทดสอบ 120 kV ได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการฉนวนภายในของหม้อแปลงทดสอบมีค่าที่มากพอที่จะรับแรงดันเกินชั่วขณะได้

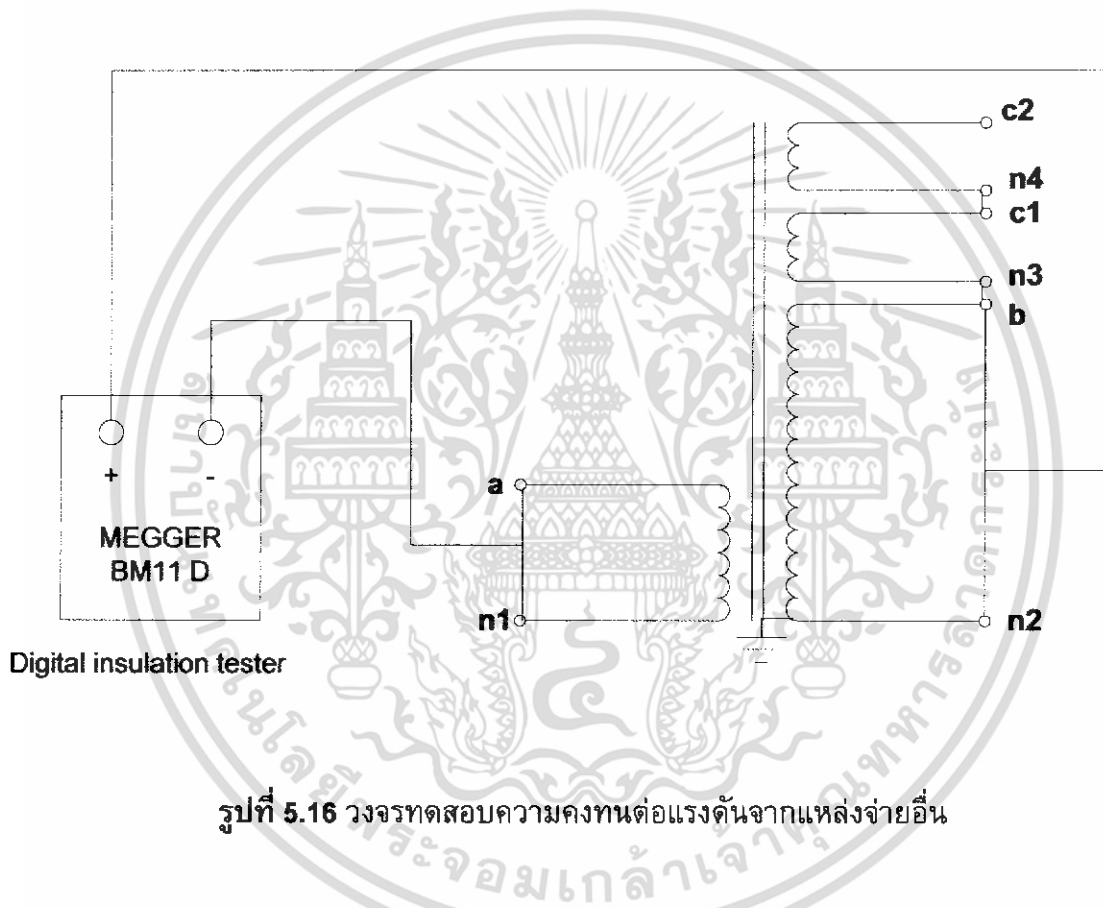


รูปที่ 5.15 วงจรทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกินกระแสสลับ

5.7 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันจากแหล่งจ่ายอื่น

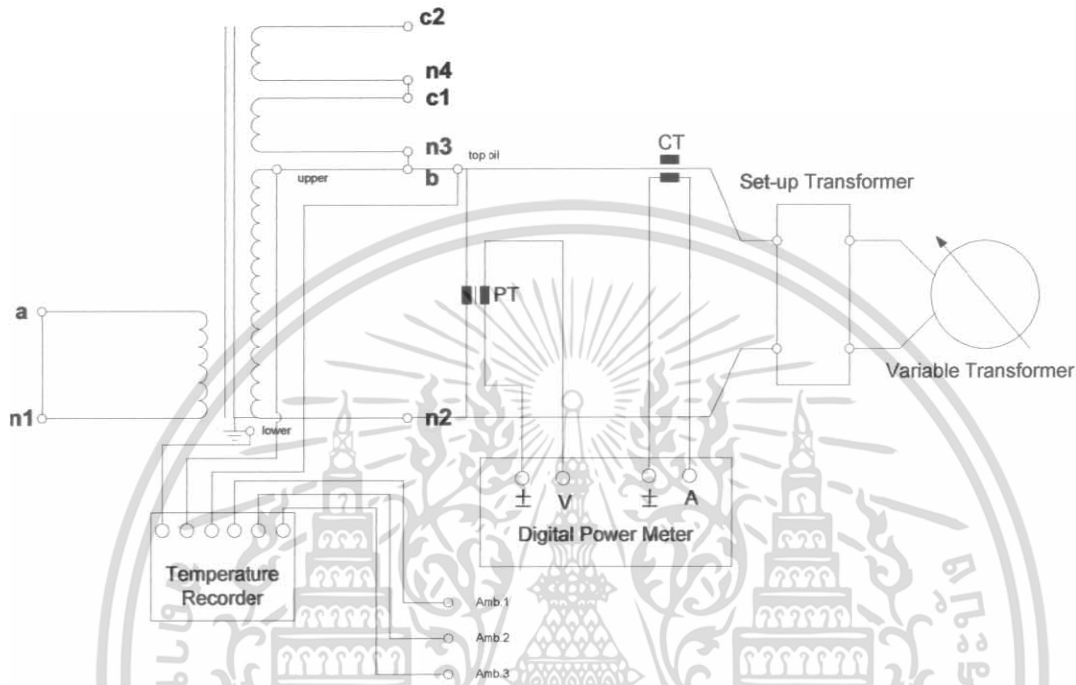
เป็นการทดสอบฉนวนที่กั้นระหว่างขดลวดแรงดันต่ำกับขดลวดแรงดันสูง และขดลวดแรงดันต่ำกับดิน โดยใช้ค่าแรงดันทดสอบ 2500 V ใช้เวลาทดสอบ 1 นาที ซึ่งมีวงจรการทดสอบดังรูปที่ 5.16

ผลการทดสอบ หม้อแปลงทดสอบสามารถทนต่อแรงดันทดสอบนี้ได้ แสดงว่าการฉนวนระหว่างขดลวดแรงดันต่ำกับขดลวดแรงดันสูง และระหว่างขดลวดแรงดันต่ำเทียบกับดิน มีค่าสูงมากพอที่จะรับแรงดันเกินชั่วขณะได้



5.8 การทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม

การทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม เป็นการทดสอบเฉพาะแบบ (type test) ที่พิกัดกระแส เพื่อดูอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิขณะใช้งานที่เวลาต่างๆ โดย จะทำการวัดที่ตำแหน่งต่างๆ จำนวน 6 ตำแหน่งด้วยกัน ดังนี้ ด้านบนผิวน้ำมัน ตัวถังด้านบน ตัวถังด้านล่าง และอุณหภูมิ โดยรอบอีก 3 ตำแหน่ง ซึ่งมีวงจรการทดสอบดังรูปที่ 5.17 การทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.17 วงจรทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.18 การทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม

(ก) YOKOGAWA YEW 2533 DIGITAL POWER METER

(ข) การทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม

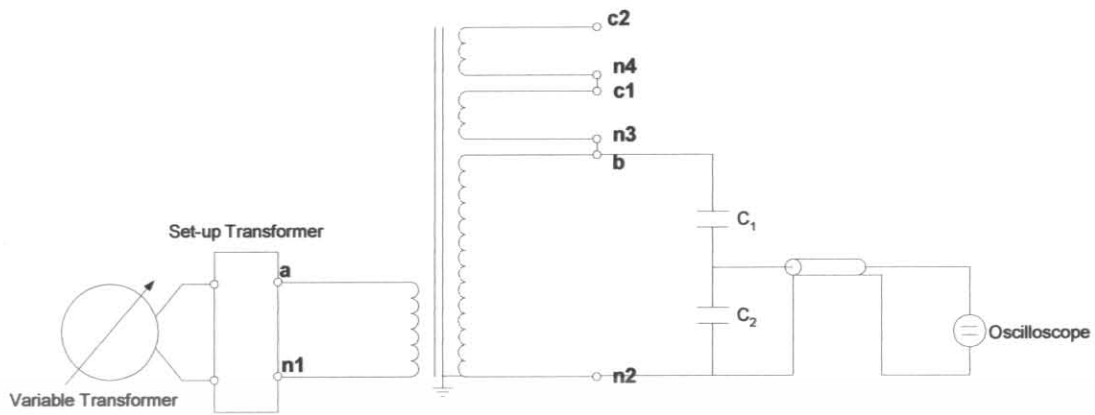
ตารางที่ 5.7 ค่ากำลังไฟฟ้าป้อนเข้าและค่าอุณหภูมิเพิ่ม

เวลา(ชม.)	อุณหภูมิ °C			กำลังไฟฟ้า ป้อนเข้า (Watt)
	T _{amb}	T _{oil}	อุณหภูมิเพิ่ม	
0.30	28.17	30.1	1.93	239
1.00	28.13	30.3	2.17	239
1.30	28.57	31.2	2.63	239
2.00	27.97	31.9	3.93	239
2.30	27.97	33.0	5.03	239
3.00	28.03	34.2	6.17	239

*** จากตารางค่าด้านบนจะเห็นได้ว่าการทดสอบเพียง 3 ชั่วโมง เนื่องจากว่าหลังจากชั่วโมงที่ 3 เครื่องวัดค่าอุณหภูมิเกิดความเสียหาย จึงไม่สามารถอ่านค่าของอุณหภูมิที่แท้จริงได้ ทำให้ต้องหยุดการทดสอบไป จากการวิเคราะห์ค่าของอุณหภูมิเพิ่ม ที่เกิดขึ้นแต่ละชั่วโมง จะเห็นได้ว่ามีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นประมาณชั่วโมงละ 2 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิภายนอกโดยรอบมีค่าอยู่ที่ 27-29 องศาเซลเซียส เพราะว่าทดสอบอยู่ภายในห้องทดลอง และตัวถัง PVC สามารถทนความร้อนได้ 75 องศาเซลเซียส ดังนั้นหม้อแปลงจะรับอุณหภูมิเพิ่มได้อีกประมาณ 46-48 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ดูแล้วกรณีใช้งานจริง โอกาสที่จะใช้งานที่พิกัดกระแสตลอดเวลาติดต่อกันเป็นเวลานานๆนั้น ค่อนข้างน้อยมาก ฉะนั้นอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลงจึงไม่เป็นปัญหาต่อการใช้งาน ในสภาวะการทดสอบปกติ

5.9 การตรวจสอบรูปคลื่นแรงดัน

ตรวจสอบรูปคลื่นแรงดันของหม้อแปลงด้วยเครื่อง Oscilloscope ว่ามีรูปคลื่นแรงดันใกล้เคียงกับคลื่นรูปไซน์ที่แรงดันกำหนดหรือไม่ ซึ่งมีวงจรการทดสอบตามรูปที่ 5.19 การทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.20 กราฟแสดงรูปคลื่นตามรูปที่ 5.21 รูปที่ 5.22 รูปที่ 5.23 และรูปที่ 5.24 ที่แรงดัน 10 kV, 50 kV, 70 kV, 80 kV ตามลำดับ



C_1, C_2 = ดีไวเตอร์แบบกะแปซิเตอร์

รูปที่ 5.19 วงจรตรวจสอบรูปคลื่นแรงดัน



(ก)

(ข)

รูปที่ 5.20 การต่อวงจรตรวจสอบรูปคลื่นแรงดัน

(ก) การต่อวงจรการทดสอบ

(ข) การทดสอบรูปคลื่นแรงดัน

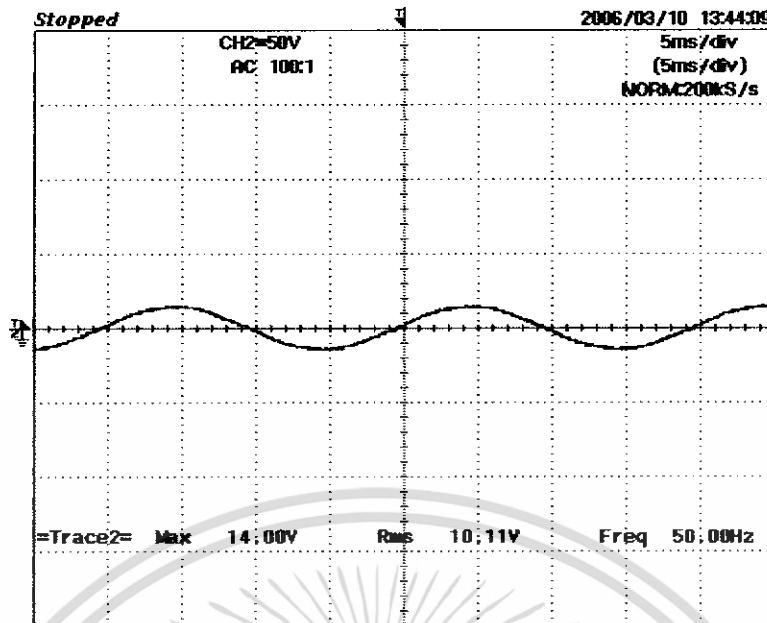
ค่าความคลาดเคลื่อนของรูปคลื่น

ที่ 10 kV คลาดเคลื่อน 2.08 %

ที่ 50 kV คลาดเคลื่อน 0.54 %

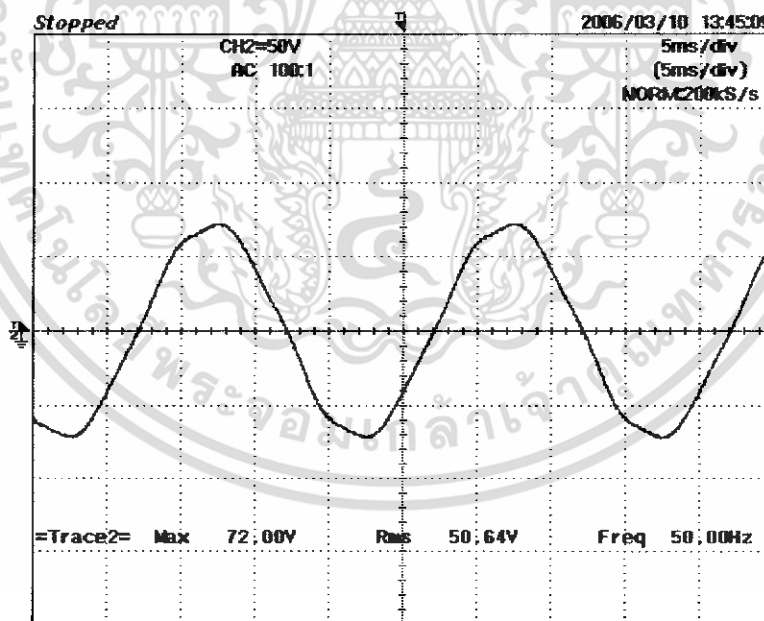
ที่ 70 kV คลาดเคลื่อน 0.27 %

ที่ 80 kV คลาดเคลื่อน 0.55 %



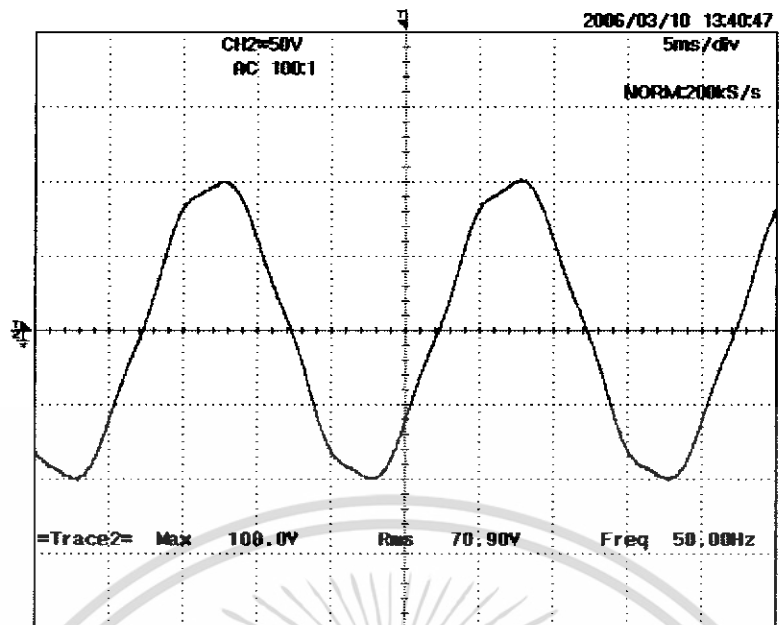
=Filter= Smoothing : ON BW : FULL
 =Offset= CH1 : 0.0V CH2 : -----
 =Record Length= Main : 10K Zoom : 10K
 =Trigger= Mode : AUTO Type : EDGE CH2 Delay : 0.0ns Hold Off : 0.2us

รูปที่ 5.21 รูปคลื่นแรงดันที่ 10 kV



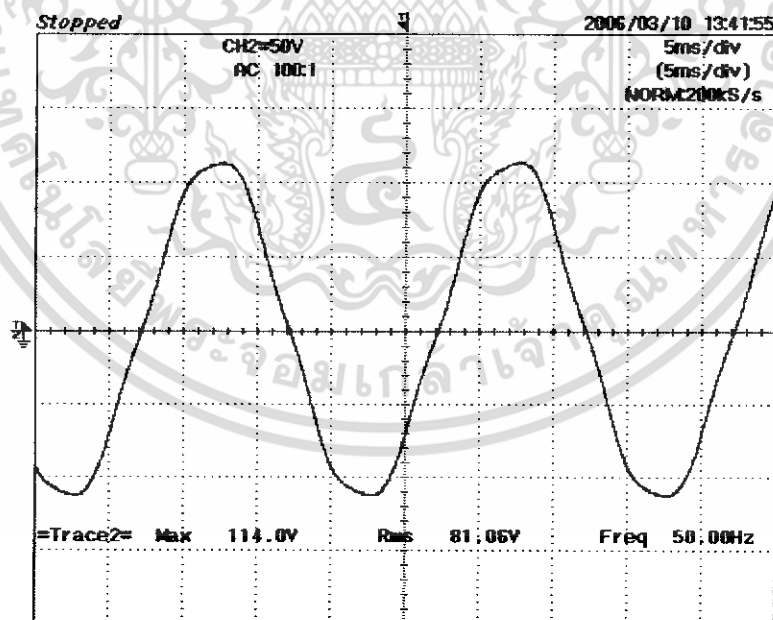
=Filter= Smoothing : ON BW : FULL
 =Offset= CH1 : 0.0V CH2 : -----
 =Record Length= Main : 10K Zoom : 10K
 =Trigger= Mode : AUTO Type : EDGE CH2 Delay : 0.0ns Hold Off : 0.2us

รูปที่ 5.22 รูปคลื่นแรงดันที่ 50 kV



=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger=
Smoothing : ON CH1 : 0.0V Main : 10K Mode : AUTO
BW : FULL CH2 : ----- Zoom : 10K Type : EDGE CH2 \uparrow
Delay : 0.0ns
Hold Off : MINIMUM

รูปที่ 5.23 รูปคลื่นแรงดันที่ 70 kV

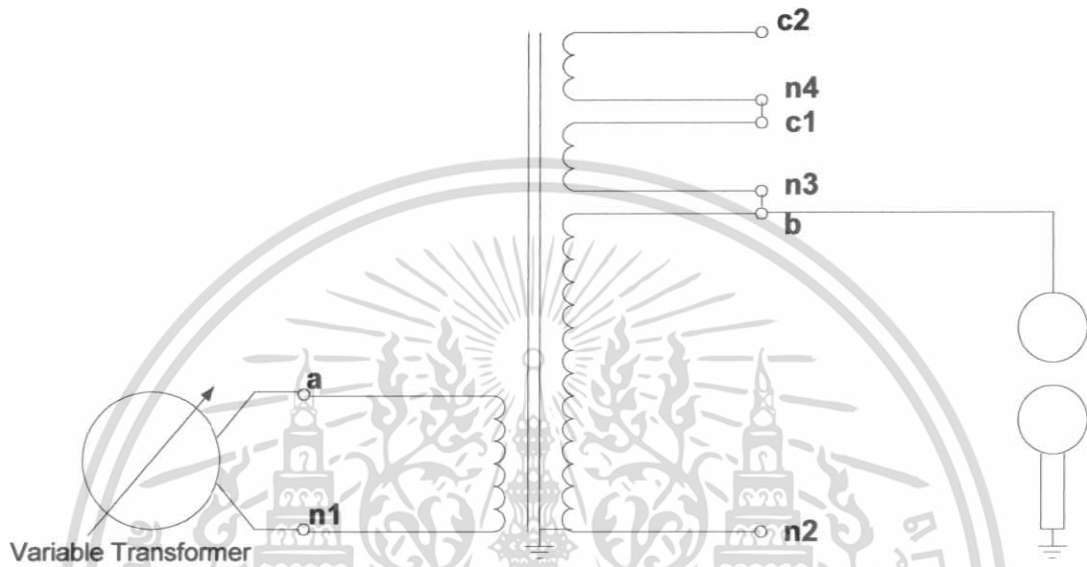


=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger=
Smoothing : ON CH1 : 0.0V Main : 10K Mode : AUTO
BW : FULL CH2 : ----- Zoom : 10K Type : EDGE CH2 \uparrow
Delay : 0.0ns
Hold Off : MINIMUM

รูปที่ 5.24 รูปคลื่นแรงดันที่ 80 kV

5.10 การทดสอบการเกิดวابلไฟของช่องว่างทรงกลม

นำหม้อแปลงทดสอบมาใช้งานโดยการเบรคดาวนผ่านแกปทรงกลม 10 ครั้ง ติดต่อกัน โดยแกปทรงกลมมีขนาด 25 ซม. ระยะแกป 4 ซม. บ้อนแรงดันทางด้านขดลวดแรงต่ำ โดยใช้หม้อแปลงปรับแรงดันจนเกิดการเบรคดาวน แล้วบันทึกค่าแรงดันทางด้านขดลวดแรงต่ำ ซึ่งมีวงจรดังรูปที่ 5.25 การทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.26 และผลการทดสอบตารางที่ 5.8



รูปที่ 5.25 วงจรทดสอบการใช้งาน



(ก)

(ข)

รูปที่ 5.26 การต่อวงจรทดสอบการใช้งานและการเบรคดาวนของแกปทรงกลม

(ก) วงจรการทดสอบ

(ข) การเบรคดาวนของแกปทรงกลม

ตารางที่ 5.8 ผลการทดสอบการใช้งานของหม้อแปลง

ครั้งที่	แรงดันที่เกิดเบรคดาว์น วัดทางด้านแรงต่ำ(V)	แรงดันที่เกิดเบรคดาว์น ทางด้านแรงสูง(kV)
1	157	72.066
2	161	73.902
3	161	73.902
4	161	73.902
5	166	76.197
6	167	76.656
7	166	76.197
8	166	76.197
9	165	75.738
10	165	75.738

ผลการทดสอบ

จากการทดสอบ 10 ครั้ง แรงดันเบรคดาว์นอยู่ที่ประมาณ 80 kV ปรากฏว่าหม้อแปลงใช้งานได้ดี

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

หม้อแปลงทดสอบที่ออกแบบและประกอบสร้างนี้ เป็นแบบถ่วงฉนวนโดยใช้ท่อ PVC เป็นตัวถังหม้อแปลง กระดาษคราฟท์เป็นฉนวนระหว่างชั้นขดลวด และน้ำมันหม้อแปลง เป็นฉนวนแทรกซึมและระบายความร้อน ในการออกแบบหม้อแปลงนี้ได้ทำการออกแบบเพื่อรองรับการต่อแบบชั้นบันไดในอนาคตเพื่อใช้งานที่ระดับแรงดัน 200 kV 10 kVA หม้อแปลงที่ได้ทำการประกอบสร้างนี้ได้ผ่านการทดสอบโดยการใช้งานจริง ปรากฏว่ามีคุณสมบัติและมีคุณภาพตามที่ได้ออกแบบไว้ทุกประการ ประการสำคัญคือ สามารถสร้างแรงดันสูงได้ตามที่กำหนด รูปคลื่นแรงดันก็มีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ ที่มีความแตกต่างจากรูปคลื่นพื้นฐานไม่เกิน 5% ตามที่มาตรฐานกำหนด การฉนวนมีความคงทนต่อแรงดันเกิน 120% ของแรงดันพิกัดได้ผลของการทดลองใช้งาน ทำการทดสอบให้เกิดการเบรกดาว์นผ่านช่องว่างทรงกลมด้วยแรงดัน 80 kV เป็นจำนวน 10 ครั้งต่อเนื่องกันได้เป็นอย่างดี ซึ่งมีค่าที่กำหนดและรายละเอียดของโครงสร้างดังต่อไปนี้

ตารางที่ 6.1 ค่ากำหนดของหม้อแปลง

ค่ากำหนด	หม้อแปลง 1 ตัว
กำลังไฟฟ้า S_n , kVA	10
แรงดัน – แรงดันต่ำ U_1 , V	220
แรงดันสูง U_2 , kV	100
ต่อควบ	220
กระแส – แรงดันต่ำ I_1 , A	45.45
แรงดันสูง I_2 , A	0.1
ต่อควบ	-
ความถี่ f , Hz	50
เปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าลัดวงจร ϵ_{sc} (%)	5.58

ตารางที่ 6.2 รายละเอียดของขดลวดและการจนวนของหม้อแปลง

รายละเอียด	ขดลวดแรงต่ำ	ขดลวดแรงสูง	ขดลวดต่อควบ
ชนิดการพัน	ชั้นทรงกระบอก	ชั้นทรงกระบอก	ชั้นทรงกระบอก
จำนวนขดลวด, ชุด	1	1	2
จนวนเส้นลวด	กระดาษจนวน	PVF	กระดาษจนวน
พื้นที่ภาคตัดขวางของขดลวดตัวนำ, mm ²	19.79	0.0962	19.79
ความหนาแน่นของกระแสของขดลวด ตัวนำ, A/mm ²	2.3	1	2.3
จำนวนรอบขดลวด, N รอบ	63	29,005	64
แรงดันสูงสุดต่อรอบ, V	3.5	3.5	3.5
แรงดันสูงสุดระหว่างชั้น, V	147	2,905	28
จนวนระหว่างชั้น(กระดาษกราฟ), mm	3*0.08	6*0.08	3*0.08
ความต้านทานกระแสตรงที่ 75°C (Ω)	0.038	5,660	0.0878

ตารางที่ 6.3 รายละเอียดของแกนเหล็ก

แผ่นเหล็กซิลิคอน (M-4), mm	0.27
พื้นที่ภาคตัดขวาง (A_{Fe}), m ²	0.01161
ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (B_0), wb/mm ²	1.4
กระแสขณะไม่มีโหลด (I_0), A	2.536
กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด (P_{Fe}), W	96.4

ตารางที่ 6.4 ตัวถัง

ท่อนจนวน พีวีซี, เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน, ซม.	57.92
ความหนา, ซม.	2.54
ความสูง, ซม.	85
ความคงทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิว กิโลโวลต์/ม.	400
อุณหภูมิเริ่มอ่อนตัว, °C	75

ตารางที่ 6.5 ผลของการทดสอบ

รายละเอียด	หม้อแปลงทดสอบ
ก) อัตราส่วนแรงดันของขดลวด - แรงดันสูง : แรงดันต่ำ	459.02 : 1
ข) ความคงทนต่อแรงดันเกินด้านแรงสูง ทดสอบ 120% ของแรงดันกำหนดเป็น เวลา 1 นาที คือ 120 kV	ผ่านการทดสอบ
ค) ความคงทนต่อแรงดันจากตัวจ่ายอื่น ทดสอบเฉพาะขดลวดแรงดันต่ำ ป้อนแรงดันเข้า 2500 kV 1 นาที	ผ่านการทดสอบ
ง) ทดสอบใช้งาน ใช้งานหม้อแปลงทดสอบโดยการจ่าย แรงดันจนเกิดการเบรคดาวนที่เกापทรง กลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 ซม. ระยะเกाप 4 ซม. ติดต่อกัน 10 ครั้ง	ผ่านการทดสอบ

6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

เนื่องจากว่าได้รับการสนับสนุนวัสดุอุปกรณ์และบุคลากรจากทางบริษัท ไทยทราฟิโ ซึ่งอยู่ที่ อ.แกลง จ.ระยอง จึงมีปัญหาเรื่องการเดินทางและเวลาการทำงานเพราะต้องอาศัยเครื่องจักรและเครื่องมือที่มีความเฉพาะด้านในการขึ้นรูปและประกอบสร้าง ทำให้ไม่สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องเต็มที่ จึงทำให้การวางแผนและดำเนินงานจริงเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นทำให้งานต้องล่าช้าออกไป ท่อ PVC ที่ใช้มีขนาดใหญ่ทำให้การขนส่งเคลื่อนย้ายเป็นไปได้อ่อนข้งลำบากจึงทำให้ในบางส่วนเกิดรอยขีดข่วนขึ้น ในการออกแบบส่วนที่เป็นวัสดุที่นำไฟฟ้าจะเลือกใช้เป็นสแตนเลสทั้งหมด แต่เมื่อทำการตรวจสอบราคาพบว่ามีราคาสูงมากจึงต้องเปลี่ยนมาใช้เหล็กชุบสารกันสนิมแทน ในการสั่งซื้อวัสดุ บางรายการต้องสั่งทำที่เป็นขนาดเฉพาะและเป็นจำนวนน้อยจึงใช้เวลาในการทำมาก และชิ้นส่วนบางชิ้นไม่สามารถทำได้เอง จึงต้องสั่งทำจากข้างนอก ซึ่งต้องใช้เวลาในการขนส่งและการทำค่อนข้งมาก แบบฝาดังที่ได้ออกแบบไปมีจำนวนรูยึดน้อยเกินไปจึงทำให้น้ำมันหม้อแปลงรั่วซึมผ่านระหว่างน็อตได้ จึงต้องเสียเวลาทำการเจาะรูเพิ่มแล้วทำการประกอบกลับเข้าไปใหม่

จากความสำเร็จการออกแบบและประกอบสร้าง หม้อแปลงทดสอบแบบถึงฉนวน มีน้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนแทรกซึมและระบายความร้อนนี้ สามารถที่จะทำการประกอบสร้างหม้อแปลงตัวที่ 2 ซึ่งมีลักษณะเดียวกันมาต่อใช้งานแบบขั้นบันไดได้ จะทำให้ได้ขนาดแรงดันที่สูงขึ้นเป็น 200 kV และการวิจัยที่น่าสนใจต่อไปคือ การออกแบบสร้างชุดควบคุม

ของหม้อแปลงทดสอบนี้ เพราะจะทำให้สามารถควบคุมการทำงานของหม้อแปลงได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ และช่วยให้หม้อแปลงมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น



เอกสารอ้างอิง

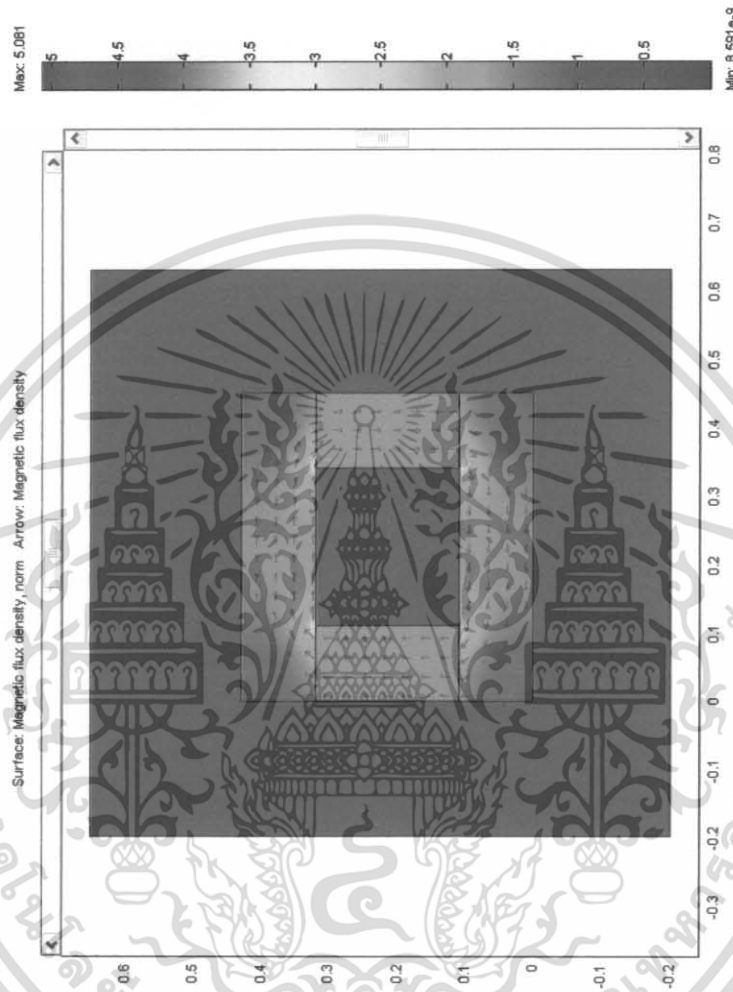
- [1] พีรจุฑ ยูทชโกวิท, การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบขนาด 300 kV 300 kVA, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, เมษายน 2544.
- [2] ASTM D877-87 (89) [7] Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using Disk Electrodes
- [3] ASTM D924-82(90) [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 ลวดทองแดงกลมตันเคลือบโพลีไวนิลฟอร์มัล
- [14] สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, เมษายน 2547.
- [15] สำรวย สังข์สะอาด, ปรีพจน์, หม้อแปลงทดสอบชั้นบันได 200 kV 10 kVA, รายงานผลการวิจัยทุนรัชดาภิเษกสมโภช, 2531.
- [16] Indrajit Dasgupta, **Design of Transformers**, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited ,2002.
- [17] มอก. 999-2533, ท่อพีวีซีแข็งสำหรับใช้ในงานอุตสาหกรรม, 2533
- [18] เอกสารประกอบการออกแบบหม้อแปลงบริษัทไทย ทราโม่ แมนูแฟคเจอร์ริง จำกัด
- [19] คมสัน เพ็ชรรักษ์, สุกิจ ชูชาญชัย, สุรพัฒน์ สุกัมภีรานนท์, อติศักดิ์ อัมพรกชกร, สุทธิชัย คุ่มวรชัย, แรงดันวาบไฟตามฉิวท่อพี.วี.ซี., การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20 ,จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- [20] Dieter Kind, Kurt Feser, **High-Voltage Test Techniques**, 2nd Ed., New Delhi :Shankar's Book Agency Pvt. Ltd., 1999.
- [21] รศ.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล, เอกสารประกอบคำบรรยาย **High Voltage Engineering**.



ภาคผนวก ก.

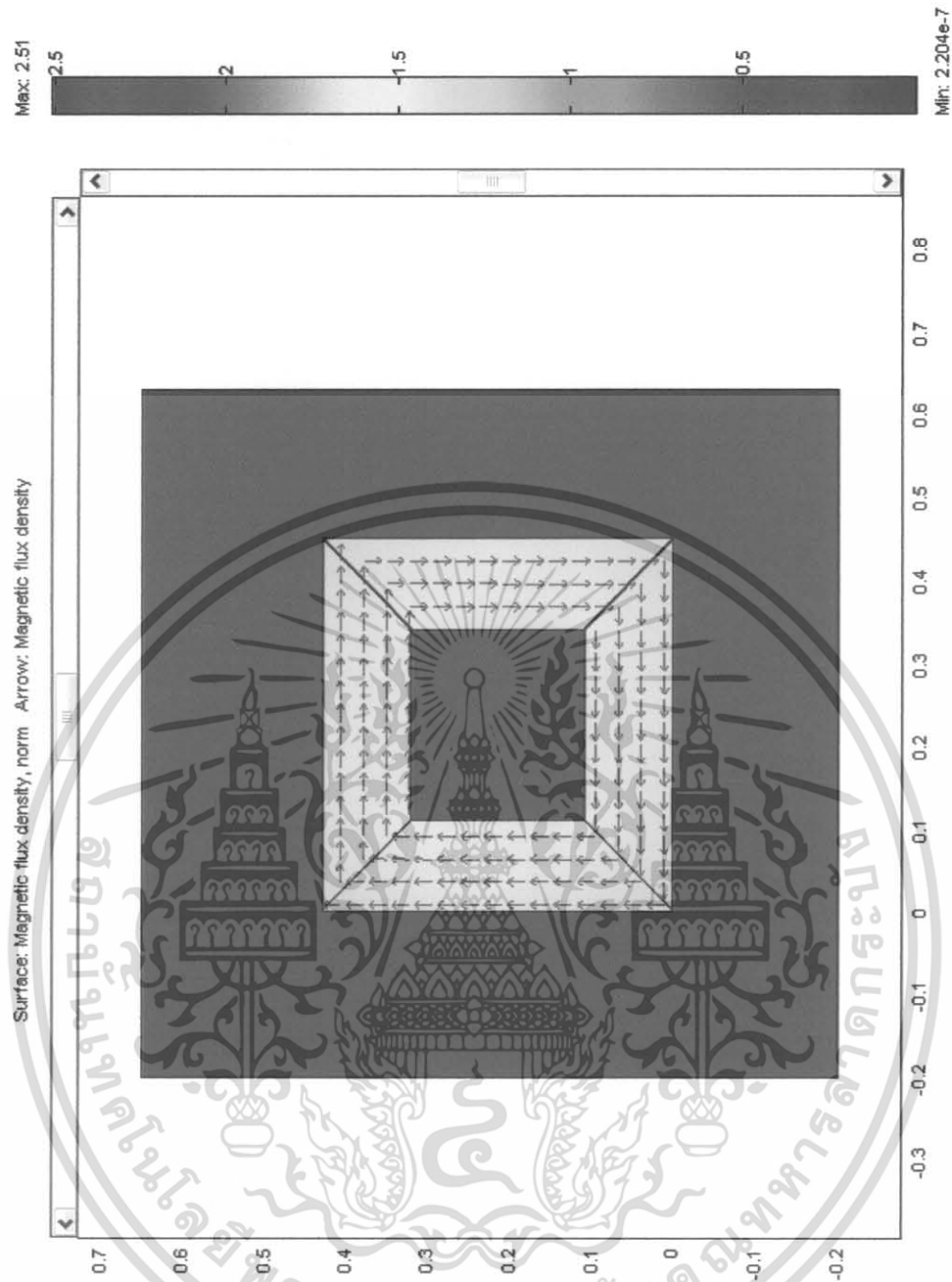
ผลการจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ก.1 การเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



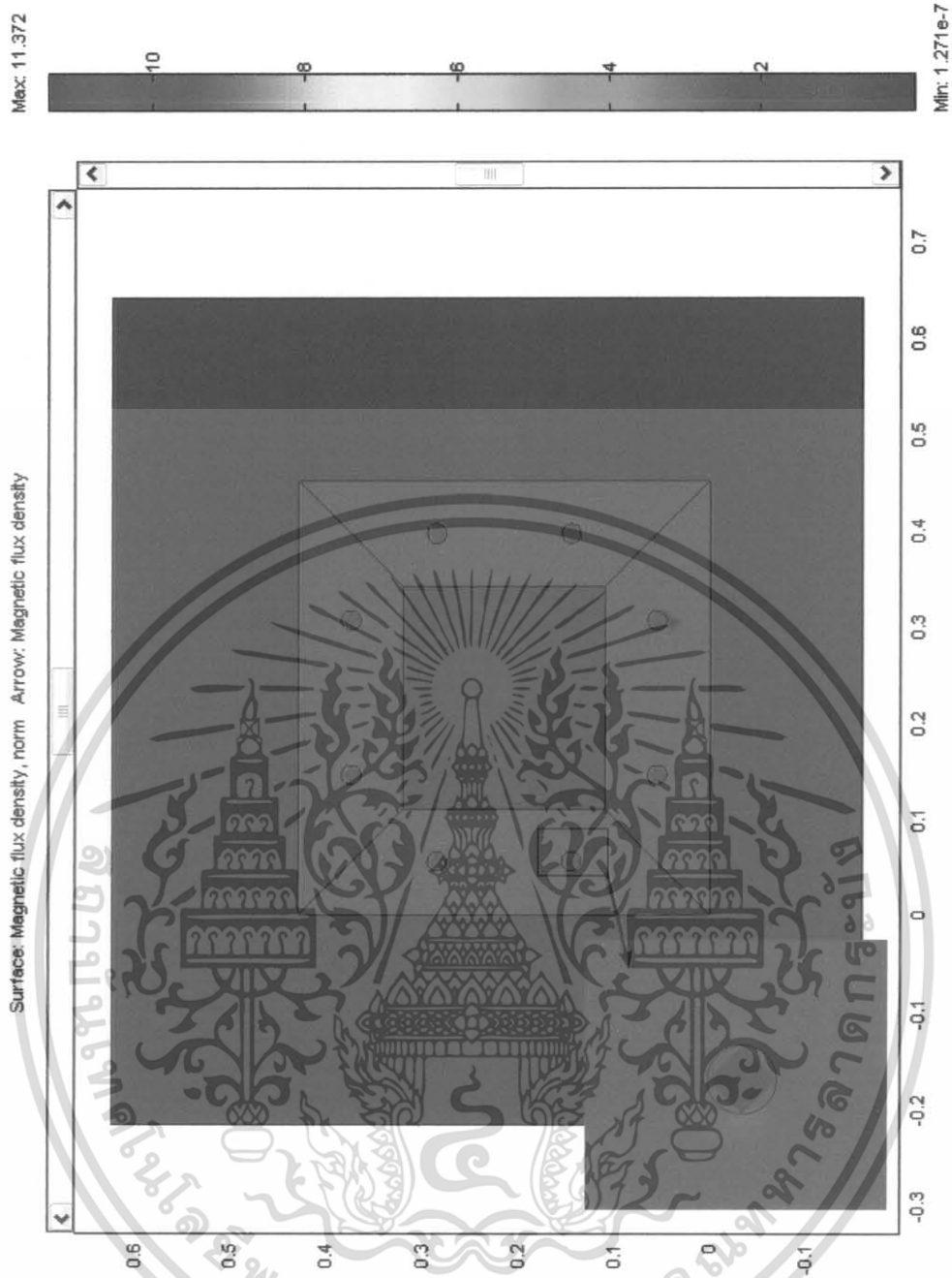
รูปที่ ก.1.1 การไหลของเส้นแรงแม่เหล็กที่มีการตัดแบบมุมฉาก

วัสดุที่ใช้ทำแกนเหล็ก	ลามิเนต ชนิด M-4	
ความสูงเฉลี่ย	350	mm
ความกว้างเฉลี่ย	380	mm
ลักษณะการตัด	90	degree
Relative permittivity ของแกนเหล็ก (ϵ_r)	1	
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก	1.4	Tesla



รูปที่ ก.1.2 การไหลของเส้นแรงแม่เหล็กที่มีการตัดแบบมุม 45 องศา

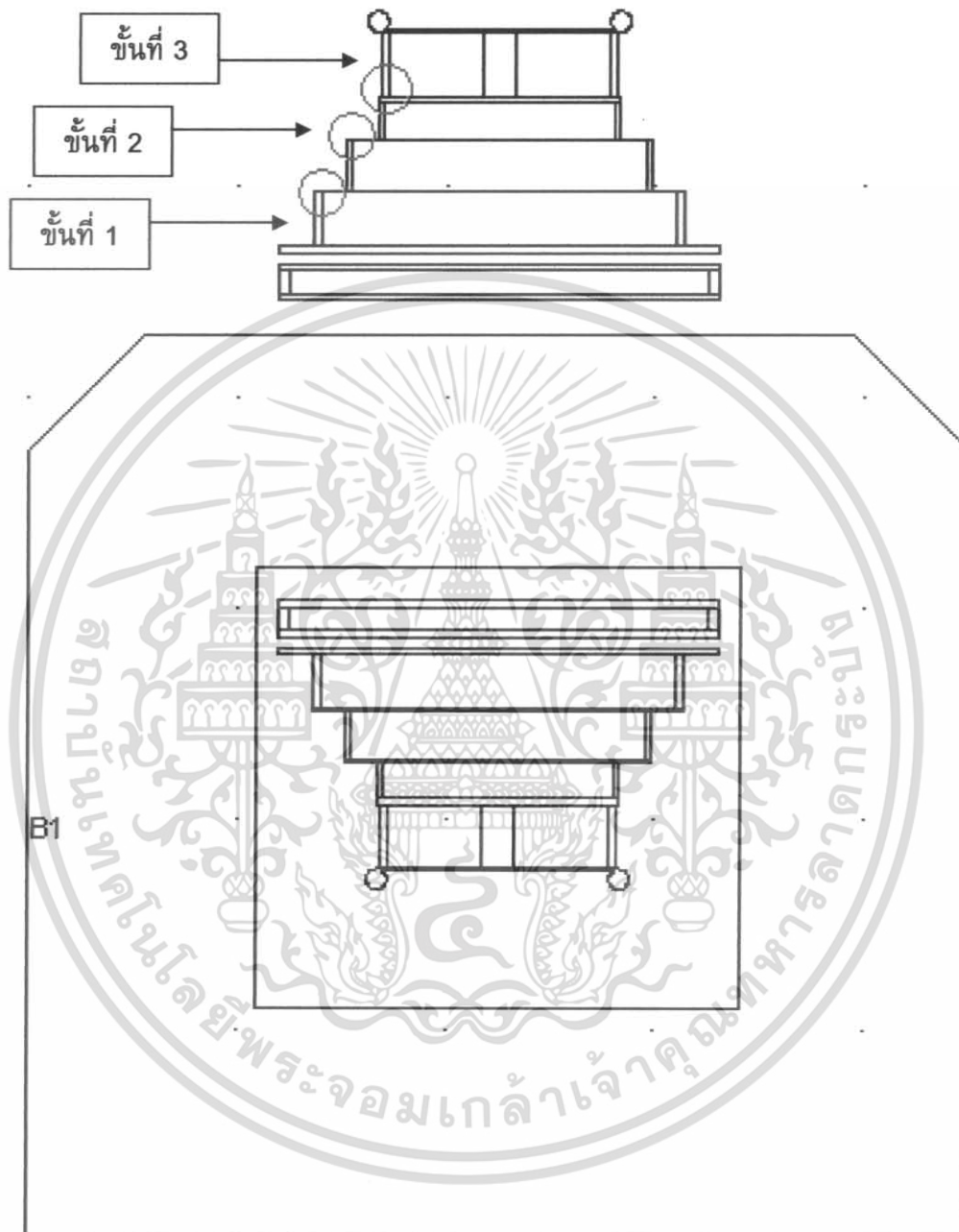
วัสดุที่ใช้ทำแกนเหล็ก	ลามีเนท ชนิด M-4
ความสูงเฉลี่ย	350 mm
ความกว้างเฉลี่ย	380 mm
ลักษณะการตัด	45 degree
Relative permittivity ของแกนเหล็ก (ϵ_r)	1
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก	1.4 Tesla



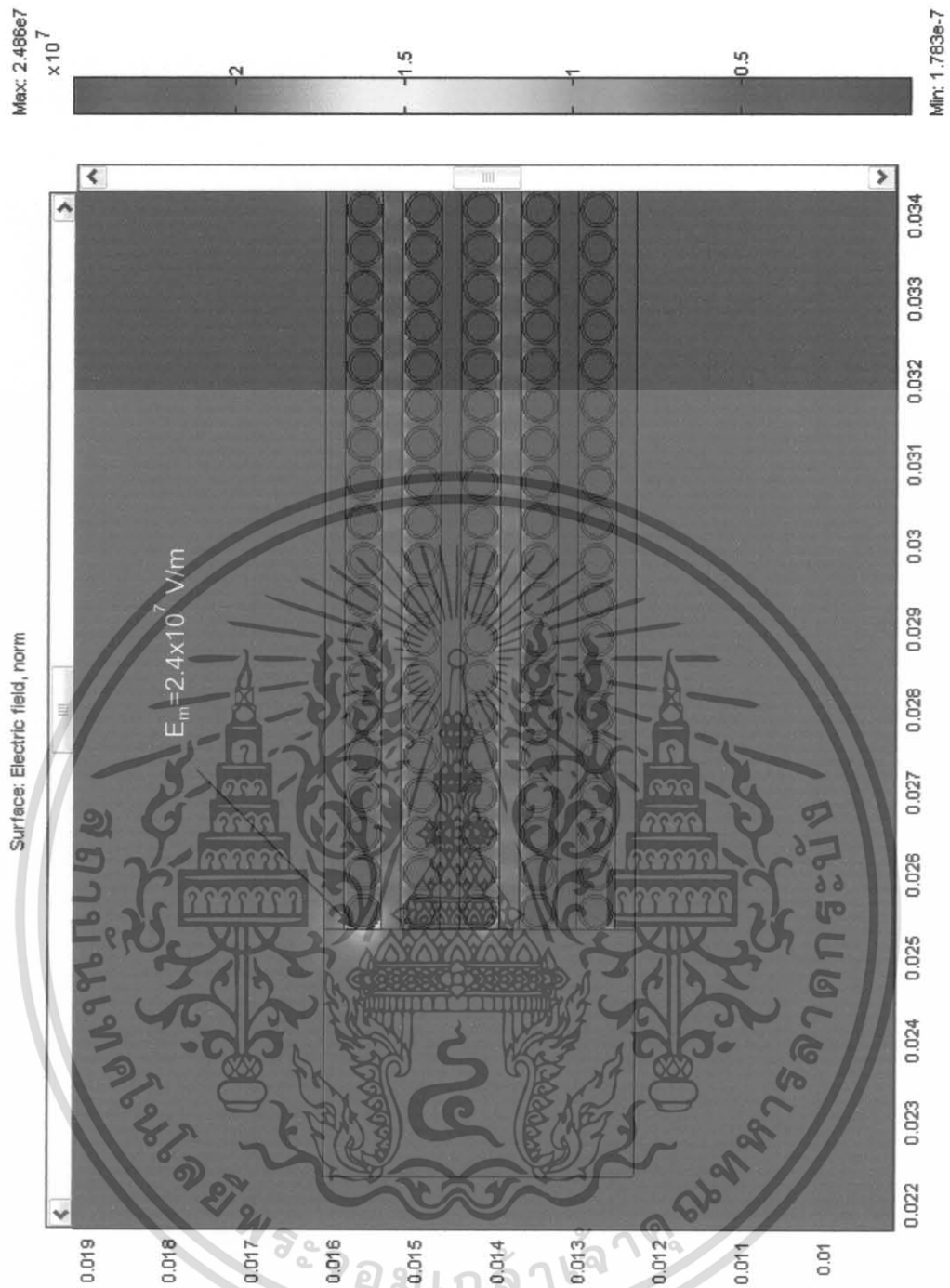
รูปที่ ก.1.3 การไหลของเส้นแรงแม่เหล็กที่มีการตัดแบบมุม 45 องศาและเจาะรู

วัสดุที่ใช้ทำแกนเหล็ก	ลามีเนท ชนิด M-4
ความสูงเฉลี่ย	350 mm
ความกว้างเฉลี่ย	380 mm
ลักษณะการตัด	90 degree
จำนวนรูที่เจาะ	8
Relative permittivity ของแกนเหล็ก (ϵ_r)	1
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก	1.4 Tesla

ก.2 การกระจายแรงดันไฟฟ้าของบริเวณขดลวดแรงสูง จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

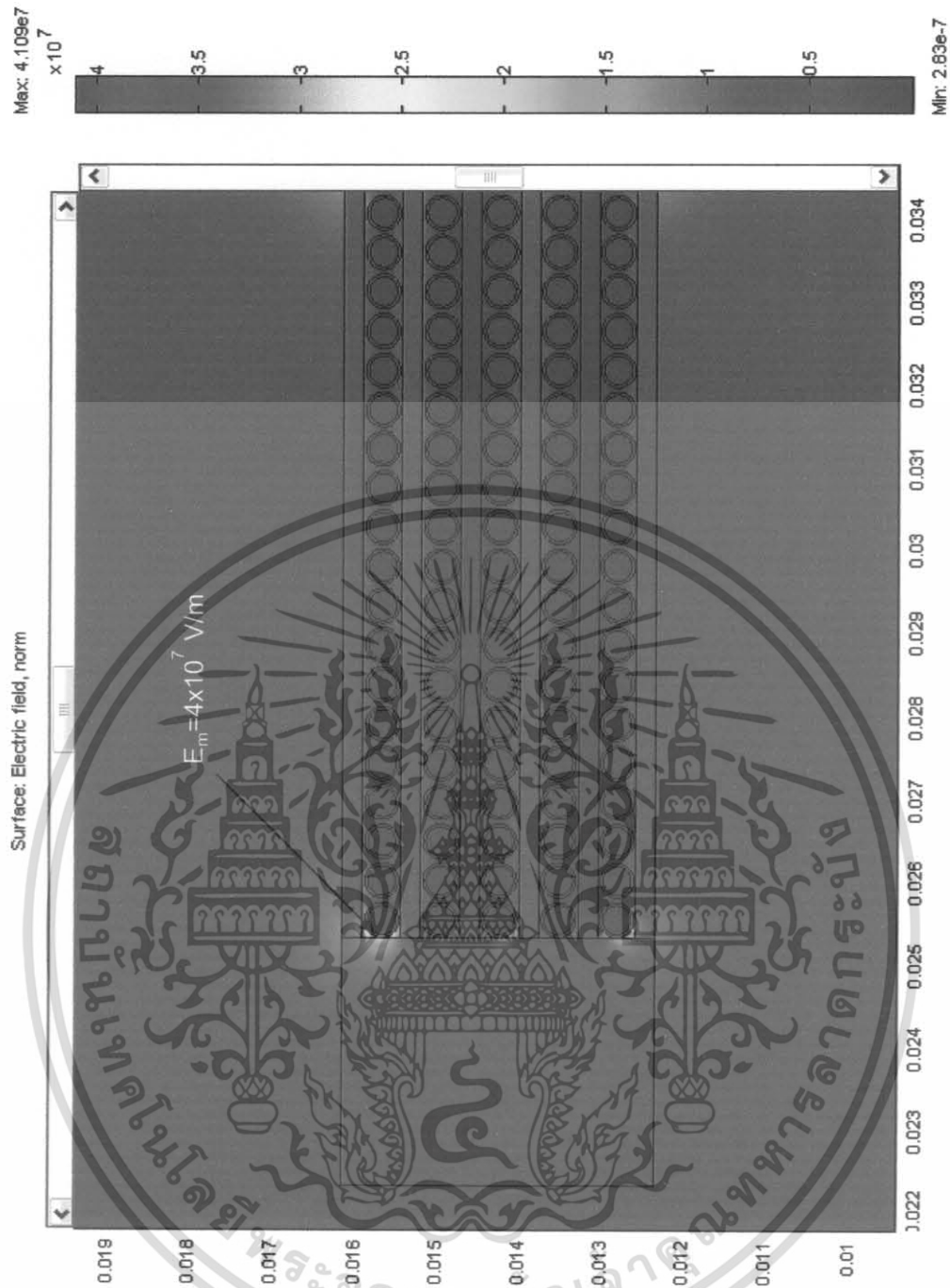


รูปที่ ก.2.1 บริเวณที่ทำการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field) ของบริเวณขดลวดแรงสูง



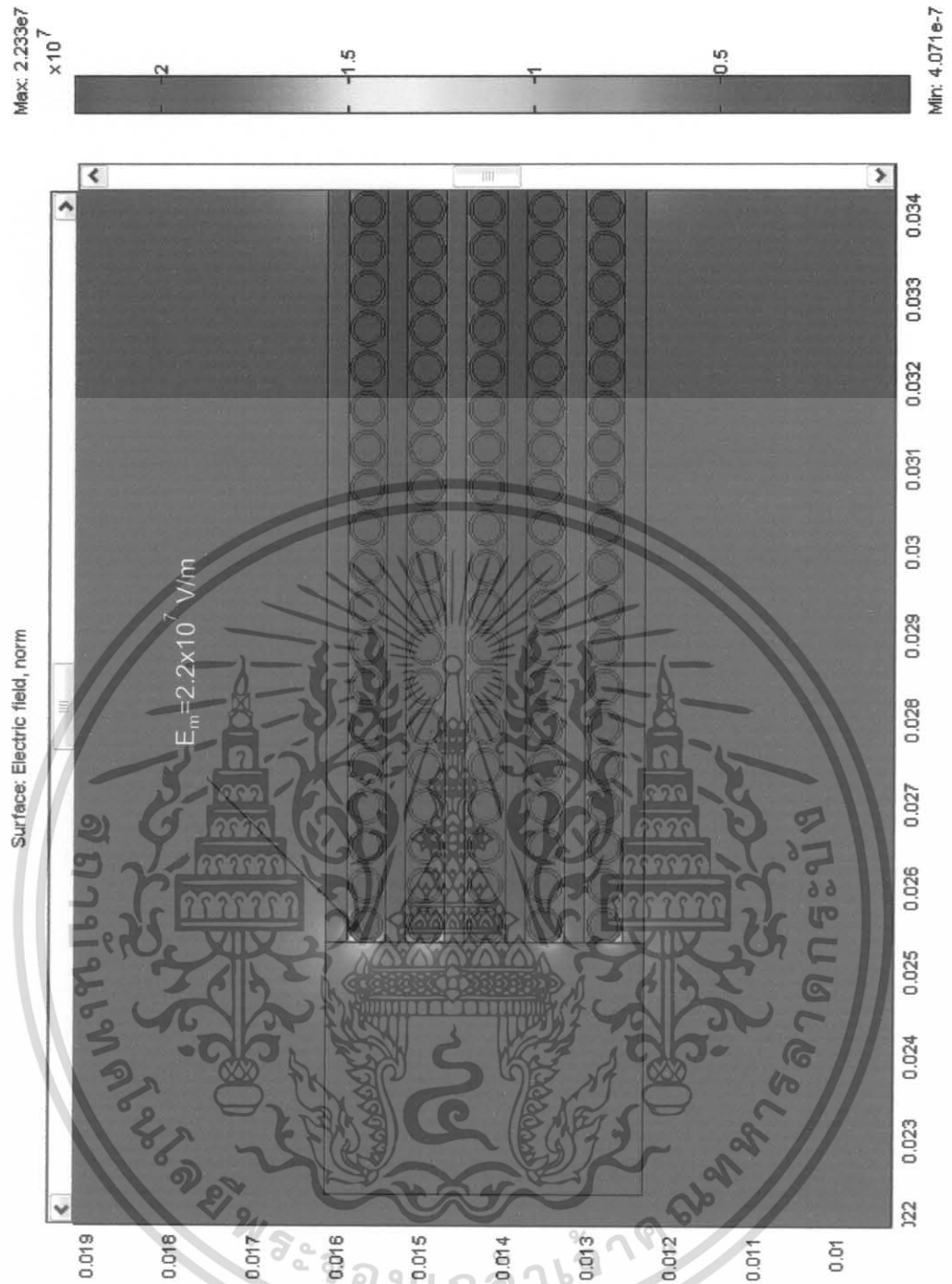
รูปที่ ก.2.2 ความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field) ของบริเวณขดลวดแรงสูงชั้นที่ 1

วัสดุที่ใช้เป็นลวดตัวนำ	Copper
สารฉนวนที่เคลือบลวดตัวนำ	PVF
วัสดุที่ใช้เป็นกระดาษฉนวน	Kraft paper
ค่าแรงดันต่อรอบ	3.5
จำนวนชั้นที่นำมาพิจารณา	5
ชั้นที่พิจารณา	1



รูปที่ ก.2.3 ความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field) ของบริเวณขดลวดแรงสูงชั้นที่ 2

วัสดุที่ใช้เป็นลวดตัวนำ	Copper
สารฉนวนที่เคลือบลวดตัวนำ	PVF
วัสดุที่ใช้เป็นกระดาษฉนวน	Kraft paper
ค่าแรงดันต่อรอบ	3.5
จำนวนชั้นที่นำมาพิจารณา	5
ชั้นที่พิจารณา	2



รูปที่ ก.2.4 ความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field) ของบริเวณขดลวดแรงสูงชั้นที่ 3

วัสดุที่ใช้เป็นลวดตัวนำ	Copper
สารฉนวนที่เคลือบลวดตัวนำ	PVF
วัสดุที่ใช้เป็นกระดาษฉนวน	Kraft paper
ค่าแรงดันต่อรอบ	3.5
จำนวนชั้นที่นำมาพิจารณา	5
ชั้นที่พิจารณา	3

ก.3 การกระจายแรงดันไฟฟ้าและความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณภายในหม้อแปลง จาก
การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



รูปที่ ก.3.1 การกระจายแรงดันไฟฟ้า (Electric potential) บริเวณภายในหม้อแปลง
เมื่อไมไลซีลต์ขั้วแรงสูงที่แรงดันสูงสุดเป็น 100 kV

วัสดุที่ใช้ทำแกนเหล็ก

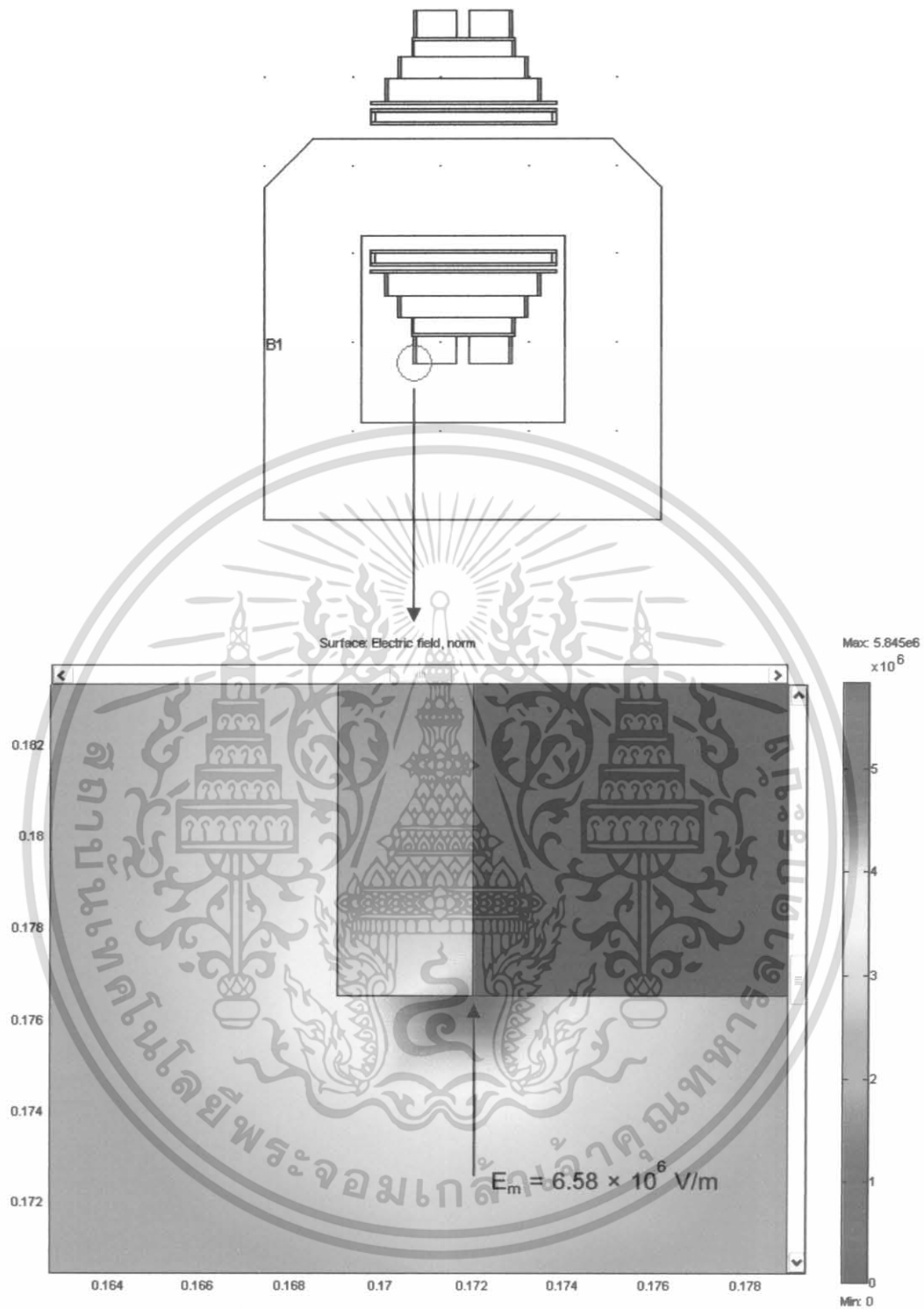
ลามิเนต ชนิด M-4

วัสดุที่ใช้เป็นลวดตัวนำ

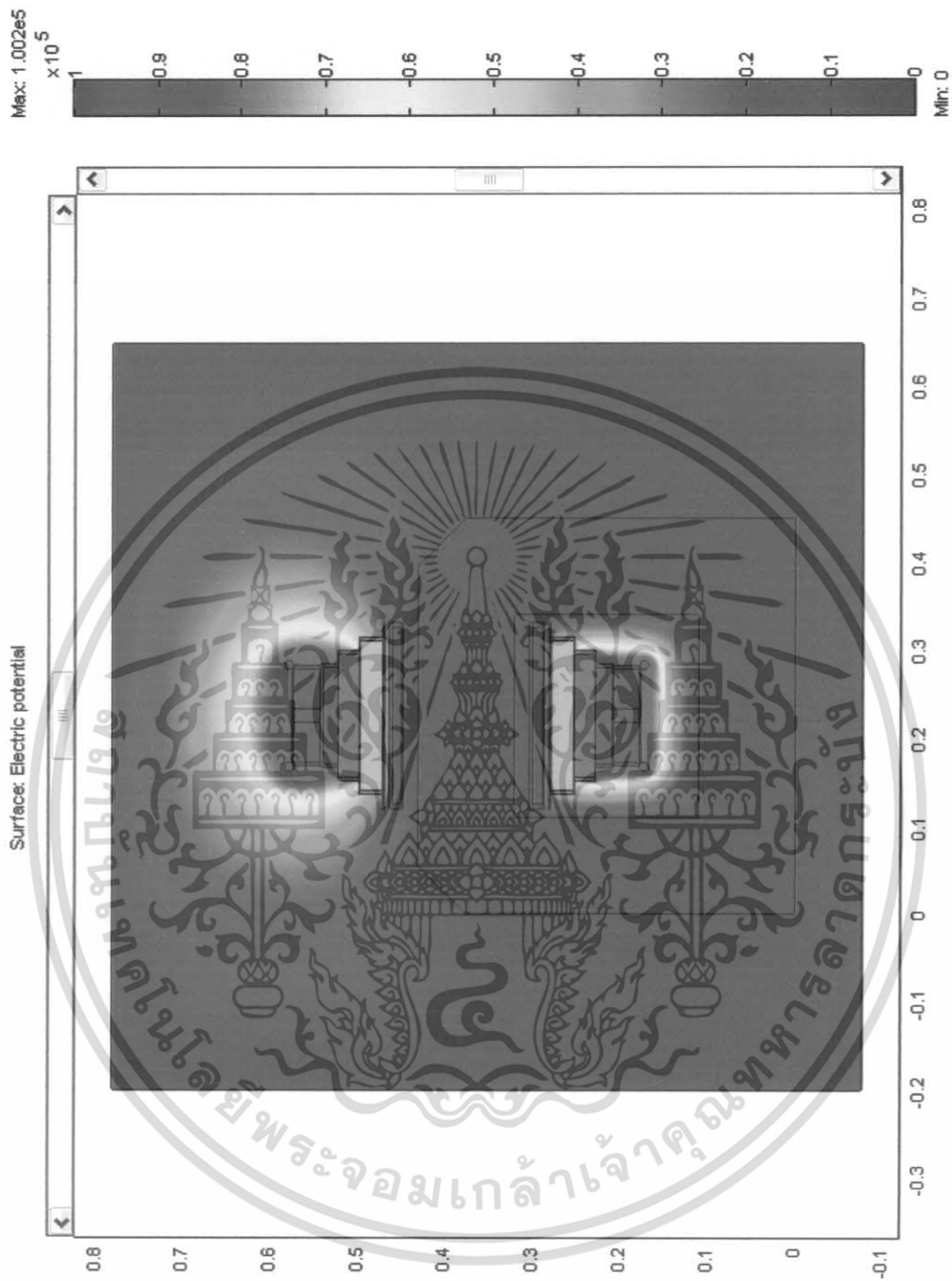
Copper

บริเวณปลายขดลวด

ไมมีซีลต์ขั้วแรงสูง



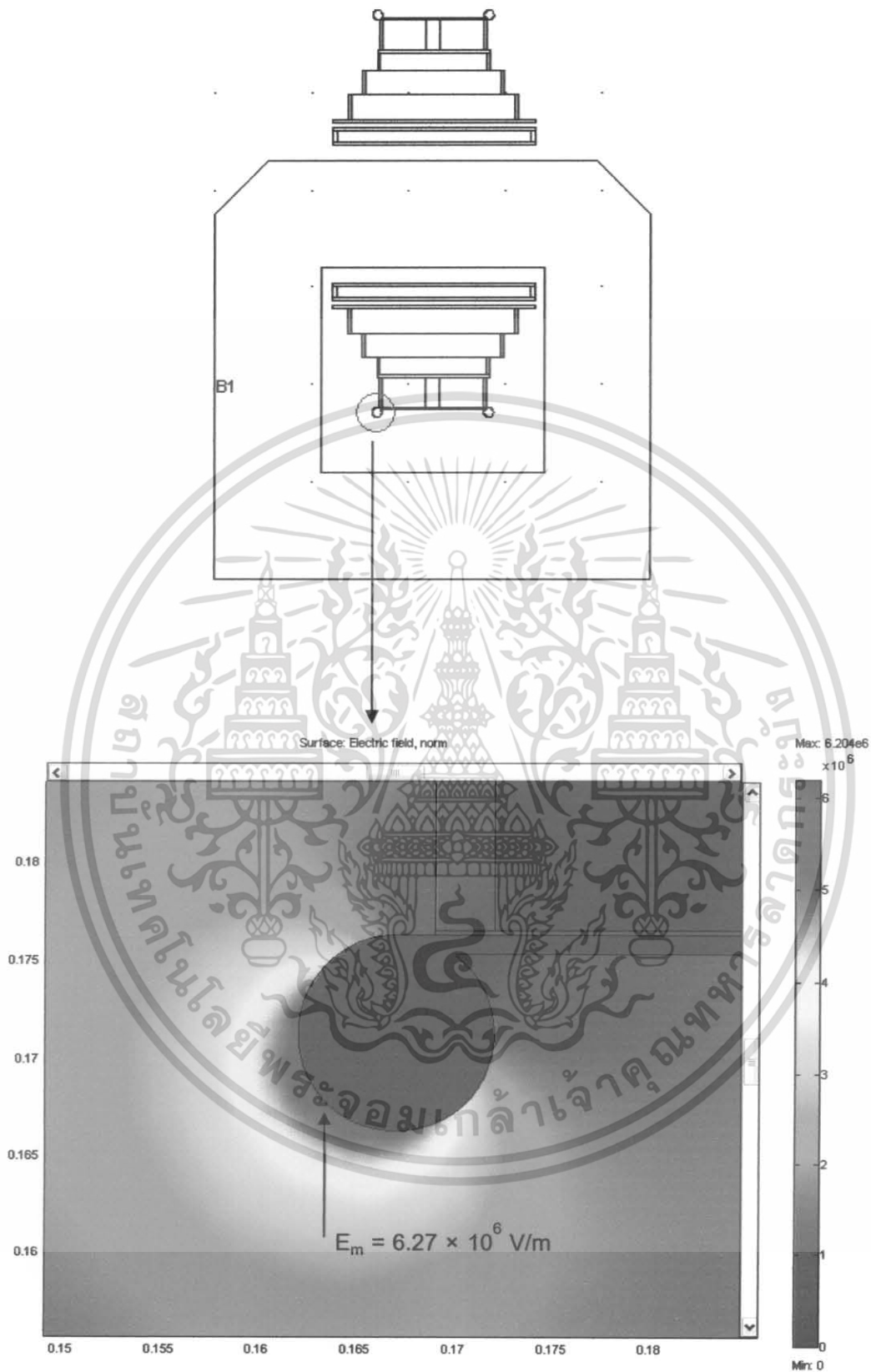
รูปที่ ก.3.2 ความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field) บริเวณปลายขดลวดต่อควบ
เมื่อไม่ใส่ซีลด์ขั้วแรงสูงที่แรงดันสูงสุดเป็น 100 kV



รูปที่ ก.3.3 การกระจายแรงดันไฟฟ้า (Electric potential) บริเวณภายในหม้อแปลง
เมื่อใส่ซิลต์ขั้วแรงสูงที่แรงดันสูงสุดเป็น 100 kV

วัสดุที่ใช้ทำแกนเหล็ก
วัสดุที่ใช้เป็นลวดตัวนำ
บริเวณปลายขดลวด

ลามิเนท ชนิด M-4
Copper
มีซิลต์ขั้วแรงสูง



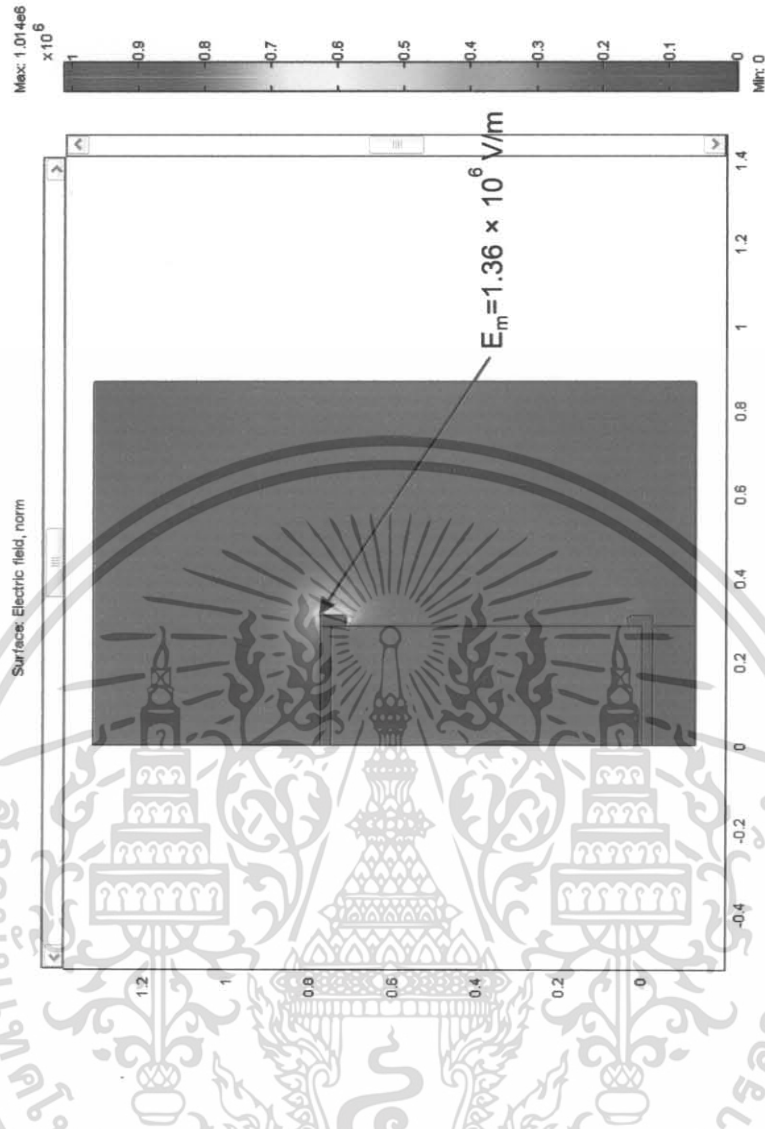
รูปที่ ก.3.4 ความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field) บริเวณปลายขดลวดต่อควบ
เมื่อใส่ซีลด์ขั้วแรงสูงที่แรงดันสูงสุดเป็น 100 kV

ก.4 การกระจายแรงดันไฟฟ้าของบริเวณตัวถังหม้อแปลง จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



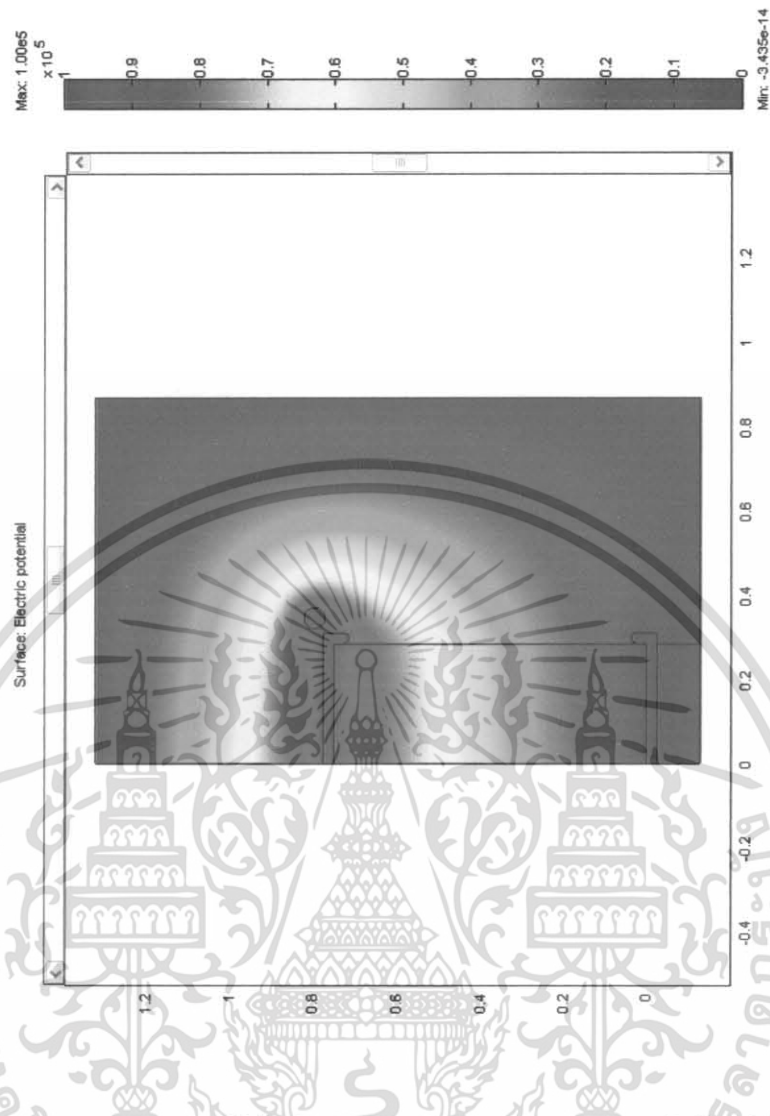
รูปที่ ก.4.1 การกระจายแรงดันไฟฟ้า (Electric potential) บริเวณตัวถังหม้อแปลง เมื่อไม่ใส่โคโรนาชิลด์ (Corona shield) ที่แรงดันสูงสุดเป็น 100 kV

วัสดุที่ใช้ทำฝาอิเล็กทรอนิกส์	อลูมิเนียม	
วัสดุที่ใช้ทำตัวถัง	PVC	
รัศมีของฝาอิเล็กทรอนิกส์	600	mm
รัศมีตัวถัง	500	mm
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



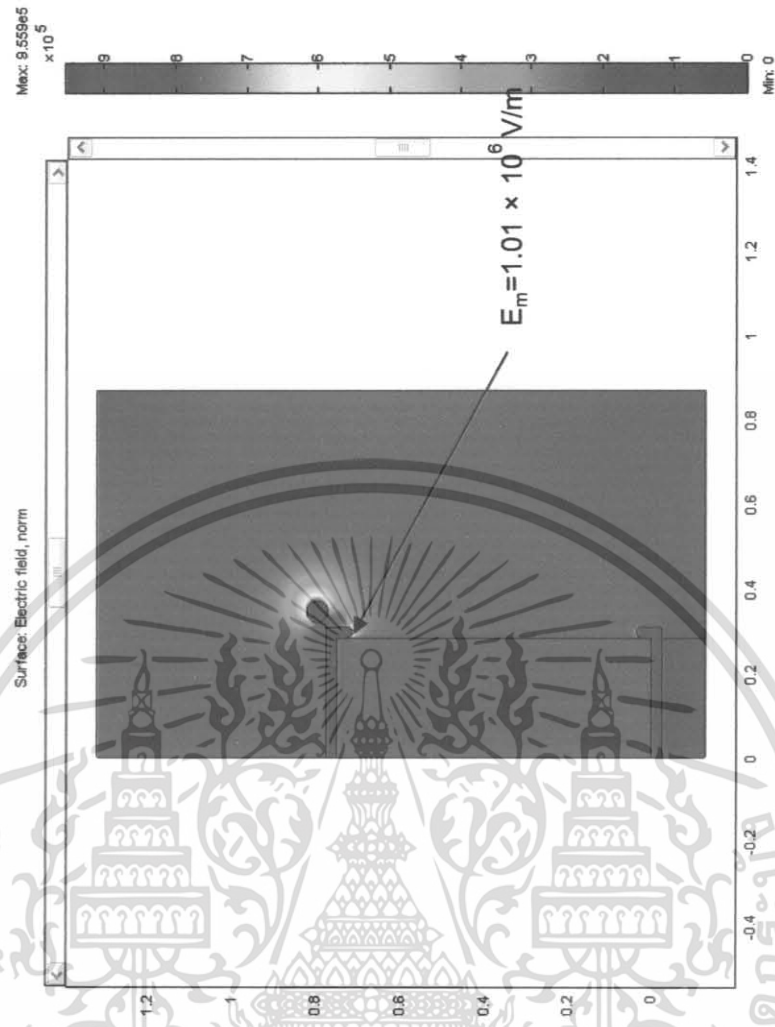
รูปที่ ก.4.2 ความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field) บริเวณตัวถังหม้อแปลง
เมื่อไม่ใส่โคโรนาชิลด์ (Corona shield) ที่แรงดันสูงสุดเป็น 100 kV

วัสดุที่ใช้ทำฝาอิเล็กทรอนิกส์	อลูมิเนียม	
วัสดุที่ใช้ทำตัวถัง	PVC	
รัศมีของฝาอิเล็กทรอนิกส์	600	mm
รัศมีตัวถัง	500	mm
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
ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด	1.36×10^6	V/m



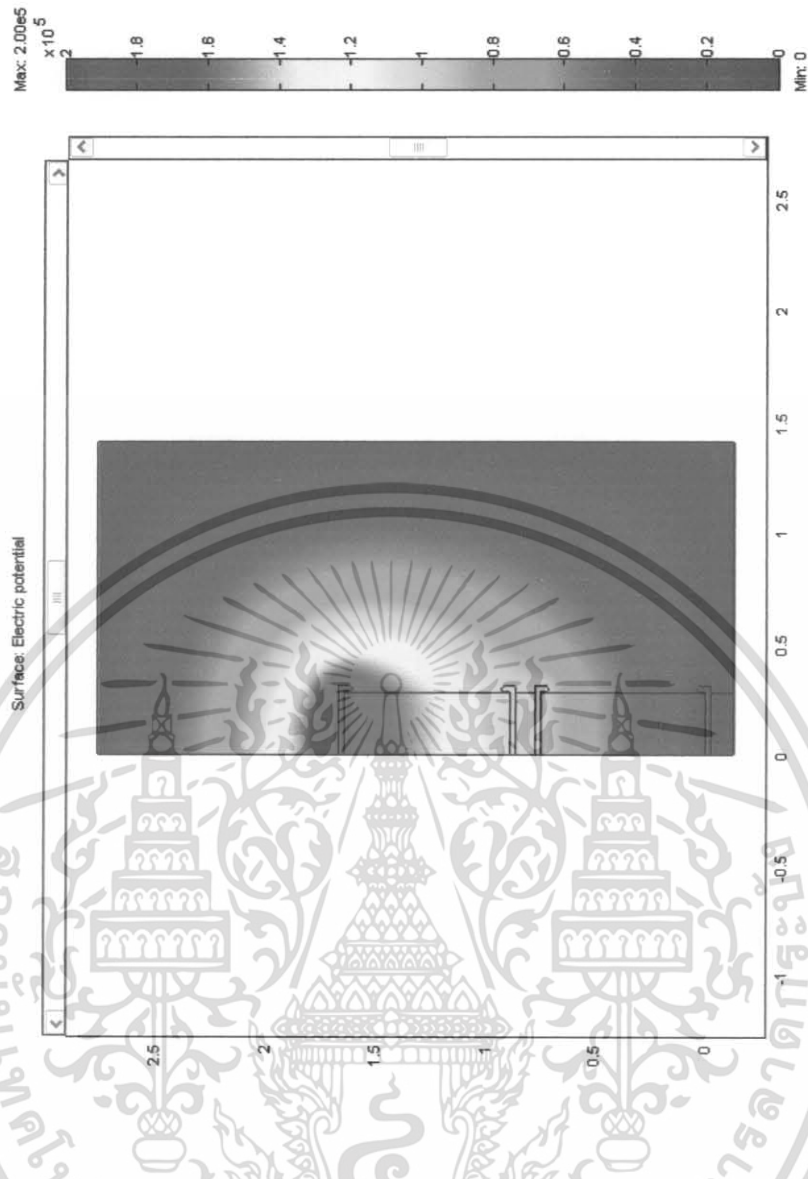
รูปที่ ก.4.3 การกระจายแรงดันไฟฟ้า (Electric potential) บริเวณตัวถังหม้อแปลง
เมื่อใส่โคโรนาชีลด์ (Corona shield) ที่แรงดันสูงสุดเป็น 100 kV

วัสดุที่ใช้ทำฝาอิเล็กทรอนิกส์	อลูมิเนียม	
วัสดุที่ใช้ทำตัวถัง	PVC	
วัสดุที่ใช้ทำโคโรนาชีลด์	อลูมิเนียม	
รัศมีของฝาอิเล็กทรอนิกส์	600	mm
รัศมีตัวถัง	500	mm
รัศมีของโคโรนาชีลด์	25	mm
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



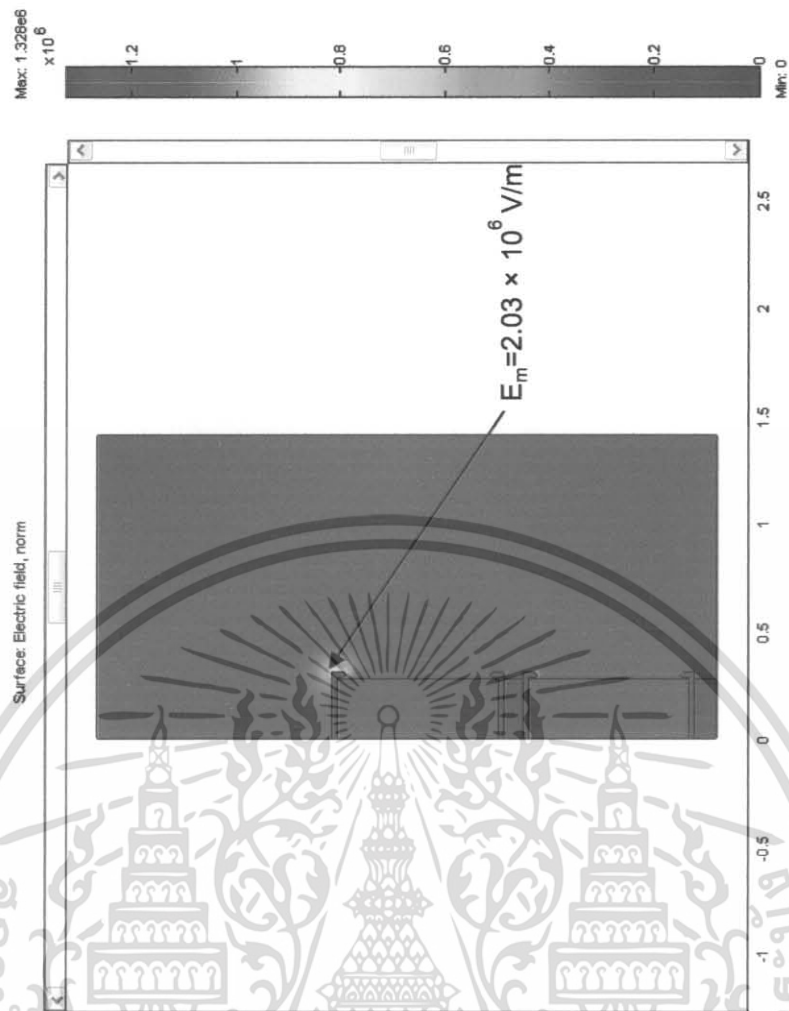
รูปที่ ก.4.4 ความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field) ของบริเวณตัวถังหม้อแปลง
เมื่อไม่ใส่โคโรนาชิลด์ (Corona shield) ที่แรงดันสูงสุดเป็น 100 kV

วัสดุที่ใช้ทำฝาอิเล็กทรอนิกส์	อลูมิเนียม	
วัสดุที่ใช้ทำตัวถัง	PVC	
วัสดุที่ใช้ทำโคโรนาชิลด์	อลูมิเนียม	
รัศมีของฝาอิเล็กทรอนิกส์	600	mm
รัศมีตัวถัง	500	mm
รัศมีของโคโรนาชิลด์	25	mm
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
ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด	1.36×10^6	V/m



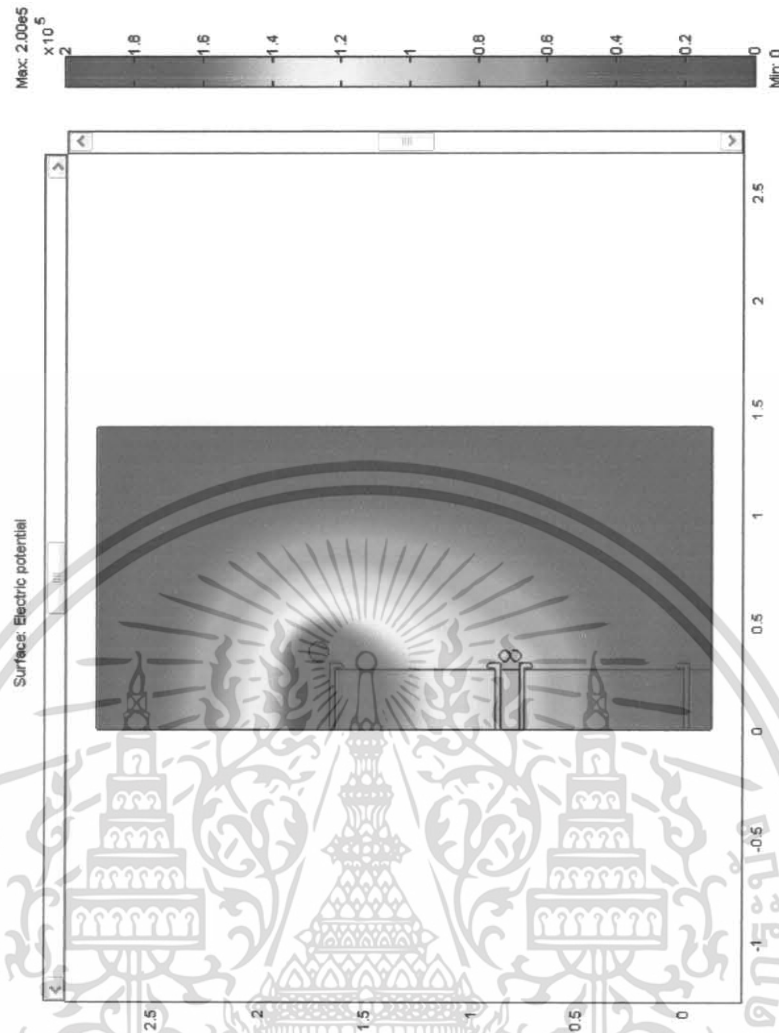
รูปที่ ก.4.5 การกระจายแรงดันไฟฟ้า (Electric potential) บริเวณตัวถังหม้อแปลง
เมื่อไม่ใส่โคโรนาชิลด์ (Corona shield) ที่แรงดันสูงสุดเป็น 200 kV

วัสดุที่ใช้ทำฝาอิเล็กทรอนิกส์	อลูมิเนียม	
วัสดุที่ใช้ทำตัวถัง	PVC	
รัศมีของฝาอิเล็กทรอนิกส์	600	mm
รัศมีตัวถัง	500	mm
Relative permittivity ของอลูมิเนียม (ϵ_r)	1	
Relative permittivity ของ PVC (ϵ_r)	4.3	
Conductivity ของฝาอิเล็กทรอนิกส์ (σ)	3.774×10^7	S/m
แรงดันไฟฟ้าบริเวณหัวอิเล็กทรอนิกส์ตัวบน	200	kV
แรงดันไฟฟ้าบริเวณรอยต่ออิเล็กทรอนิกส์	100	kV



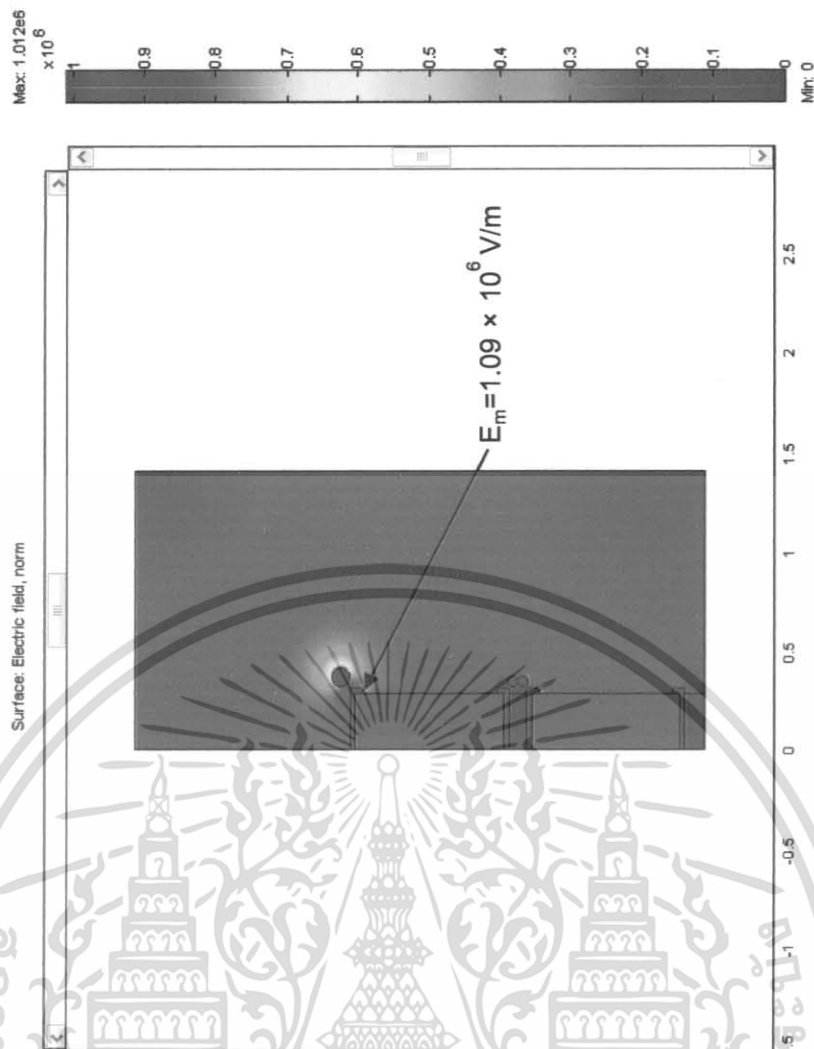
รูปที่ ก.4.6 ความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field) บริเวณตัวถังหม้อแปลง
เมื่อไม่ใส่โคโรนาชิลด์ (Corona shield) ที่แรงดันสูงสุดเป็น 200 kV

วัสดุที่ใช้ทำฝาอิเล็กทรอนิกส์	อลูมิเนียม	
วัสดุที่ใช้ทำตัวถัง	PVC	
รัศมีของฝาอิเล็กทรอนิกส์	600	mm
รัศมีตัวถัง	500	mm
Relative permittivity ของอลูมิเนียม (ϵ_r)	1	
Relative permittivity ของ PVC (ϵ_r)	4.3	
Conductivity ของฝาอิเล็กทรอนิกส์ (σ)	3.774×10^7	S/m
แรงดันไฟฟ้าบริเวณขั้วอิเล็กทรอนิกส์ตัวบน	200	kV
แรงดันไฟฟ้าบริเวณรอยต่ออิเล็กทรอนิกส์	100	kV
ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด	2.03×10^6	V/m



รูปที่ ก.4.7 การกระจายแรงดันไฟฟ้า (Electric potential) บริเวณตัวถังหม้อแปลงเมื่อใส่
โคโรนาชิลด์ (Corona shield) ที่แรงดันสูงสุดเป็น 200 kV

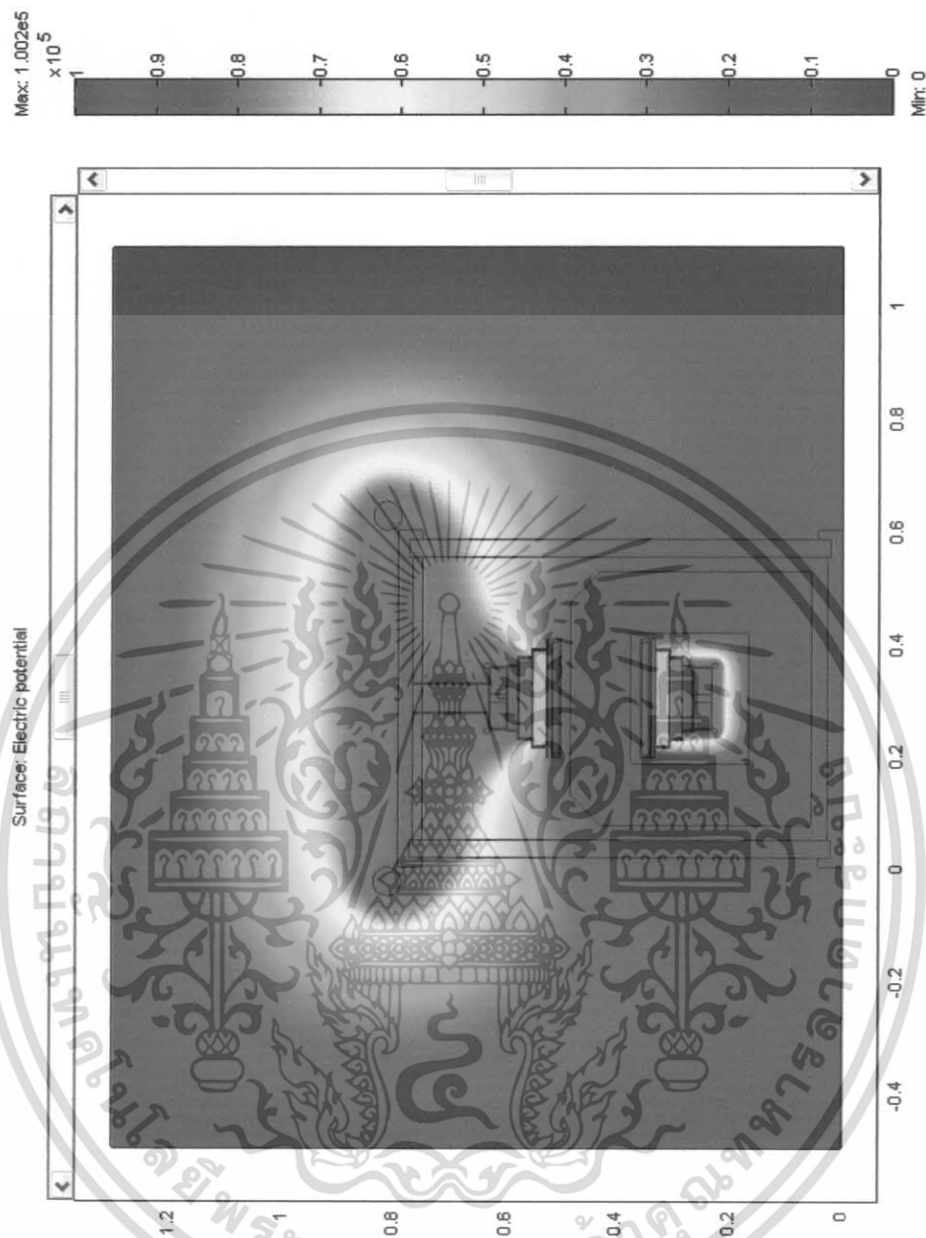
วัสดุที่ใช้ทำฝาอิเล็กทรอนิกส์	อลูมิเนียม	
วัสดุที่ใช้ทำตัวถัง	PVC	
วัสดุที่ใช้ทำโคโรนาชิลด์	อลูมิเนียม	
รัศมีของฝาอิเล็กทรอนิกส์	600	mm
รัศมีตัวถัง	500	mm
รัศมีของโคโรนาชิลด์	25	mm
Relative permittivity ของอลูมิเนียม (ϵ_r)	1	
Relative permittivity ของ PVC (ϵ_r)	4.3	
Conductivity ของฝาอิเล็กทรอนิกส์ (σ)	3.774×10^7	S/m
แรงดันไฟฟ้าบริเวณขั้วอิเล็กทรอนิกส์ตัวบน	200	kV
แรงดันไฟฟ้าบริเวณรอยต่ออิเล็กทรอนิกส์	100	kV



รูปที่ ก.4.8 ความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field) บริเวณตัวถังหม้อแปลง เมื่อใส่โคโรนาชิลด์ (Corona shield) ที่แรงดันสูงสุดเป็น 200 kV

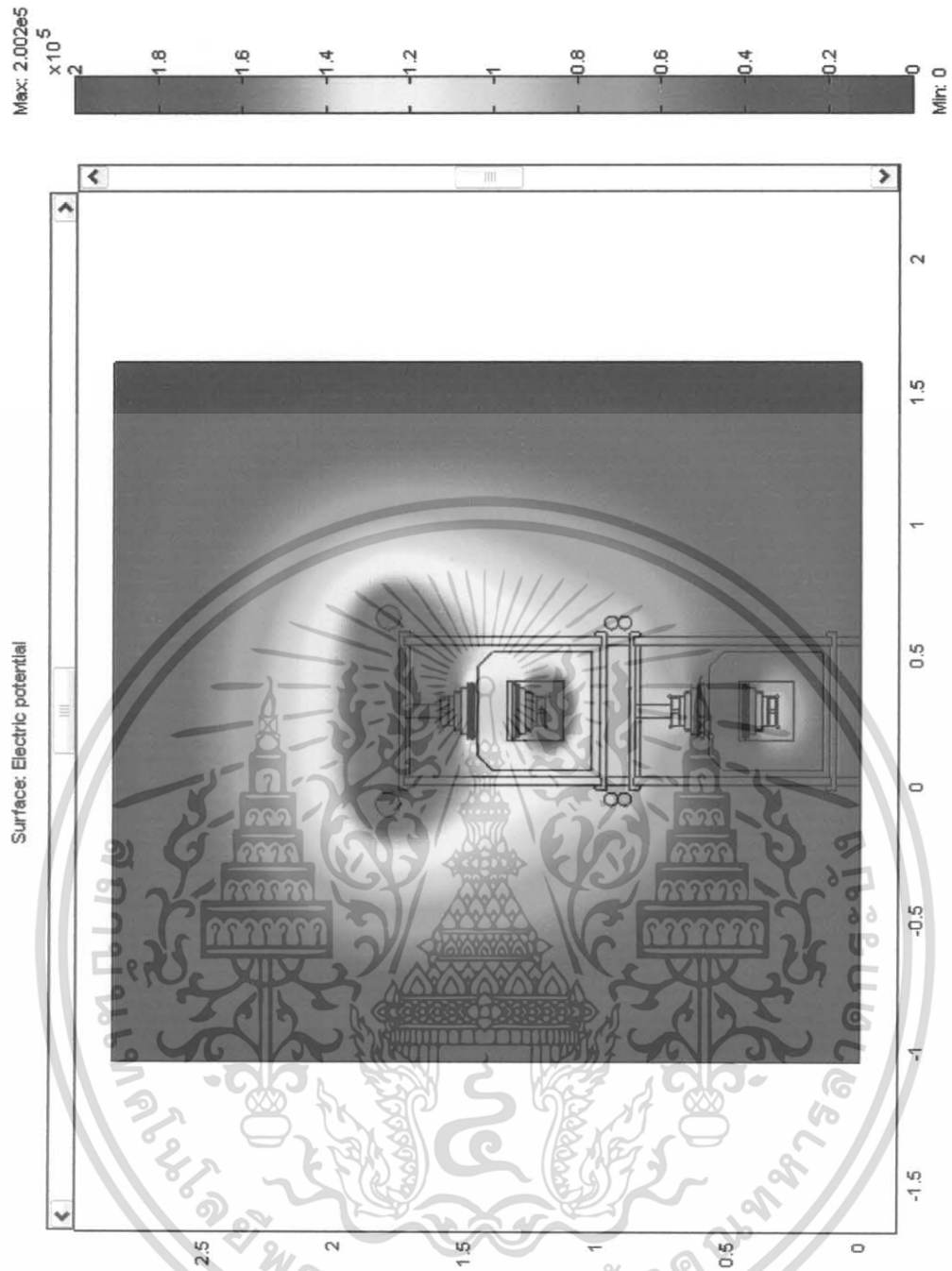
วัสดุที่ใช้ทำฝาอิเล็กทรอนิกส์	อลูมิเนียม	
วัสดุที่ใช้ทำตัวถัง	PVC	
วัสดุที่ใช้ทำโคโรนาชิลด์	อลูมิเนียม	
รัศมีของฝาอิเล็กทรอนิกส์	600	mm
รัศมีตัวถัง	500	mm
รัศมีของโคโรนาชิลด์	25	mm
Relative permittivity ของอลูมิเนียม (ϵ_r)	1	
Relative permittivity ของ PVC (ϵ_r)	4.3	
Conductivity ของฝาอิเล็กทรอนิกส์ (σ)	3.774×10^7	S/m
แรงดันไฟฟ้าบริเวณขั้วอิเล็กทรอนิกส์ตัวบน	200	kV
แรงดันไฟฟ้าบริเวณรอยต่ออิเล็กทรอนิกส์	100	kV
ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด	1.09×10^6	V/m

ก.5 การกระจายแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงจากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



รูปที่ ก.5.1 การกระจายแรงดันไฟฟ้า (Electric potential) ของหม้อแปลงที่แรงดันสูงสุด เป็น 100 kV

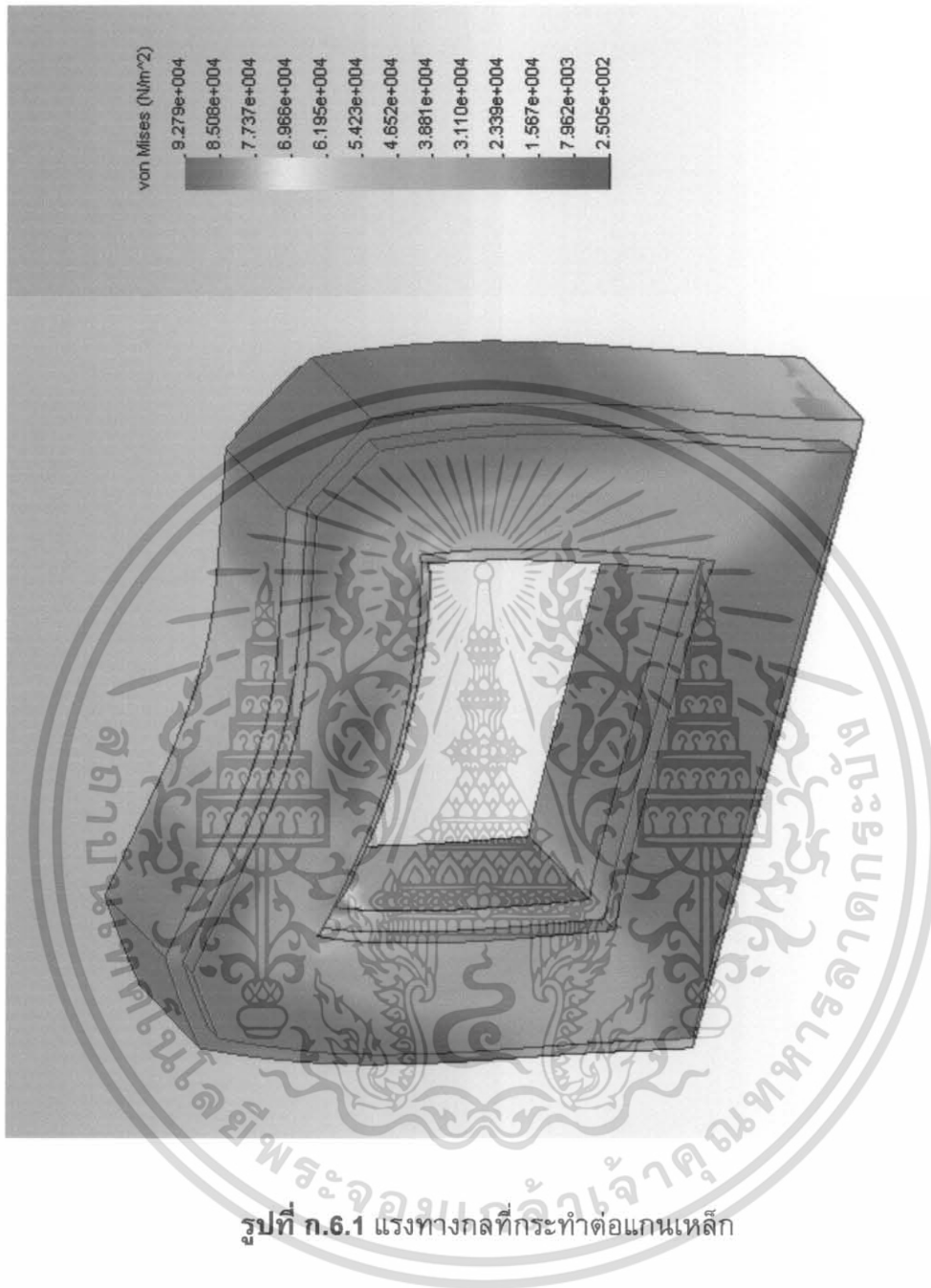
วัสดุที่ใช้ทำตัวถังฉนวน	PVC	
วัสดุที่ใช้ทำลวดตัวนำ	Copper	
วัสดุที่ใช้ทำฝาอิเล็กทรอนิกส์	อลูมิเนียม	
วัสดุที่ใช้ทำโครนาซีลด์	อลูมิเนียม	
จำนวนหม้อแปลง	1	ตัว
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด	100	kV



รูปที่ ก.5.2 การกระจายแรงดันไฟฟ้า (Electric potential) ของหม้อแปลงที่แรงดันสูงสุด เป็น 200 kV

วัสดุที่ใช้ทำตัวถังฉนวน	PVC	
วัสดุที่ใช้ทำลวดตัวนำ	Copper	
วัสดุที่ใช้ทำฝาอิเล็กทรอนิกส์	อลูมิเนียม	
วัสดุที่ใช้ทำโครนาซีลด์	อลูมิเนียม	
จำนวนหม้อแปลง	2	ตัว
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด	200	kV

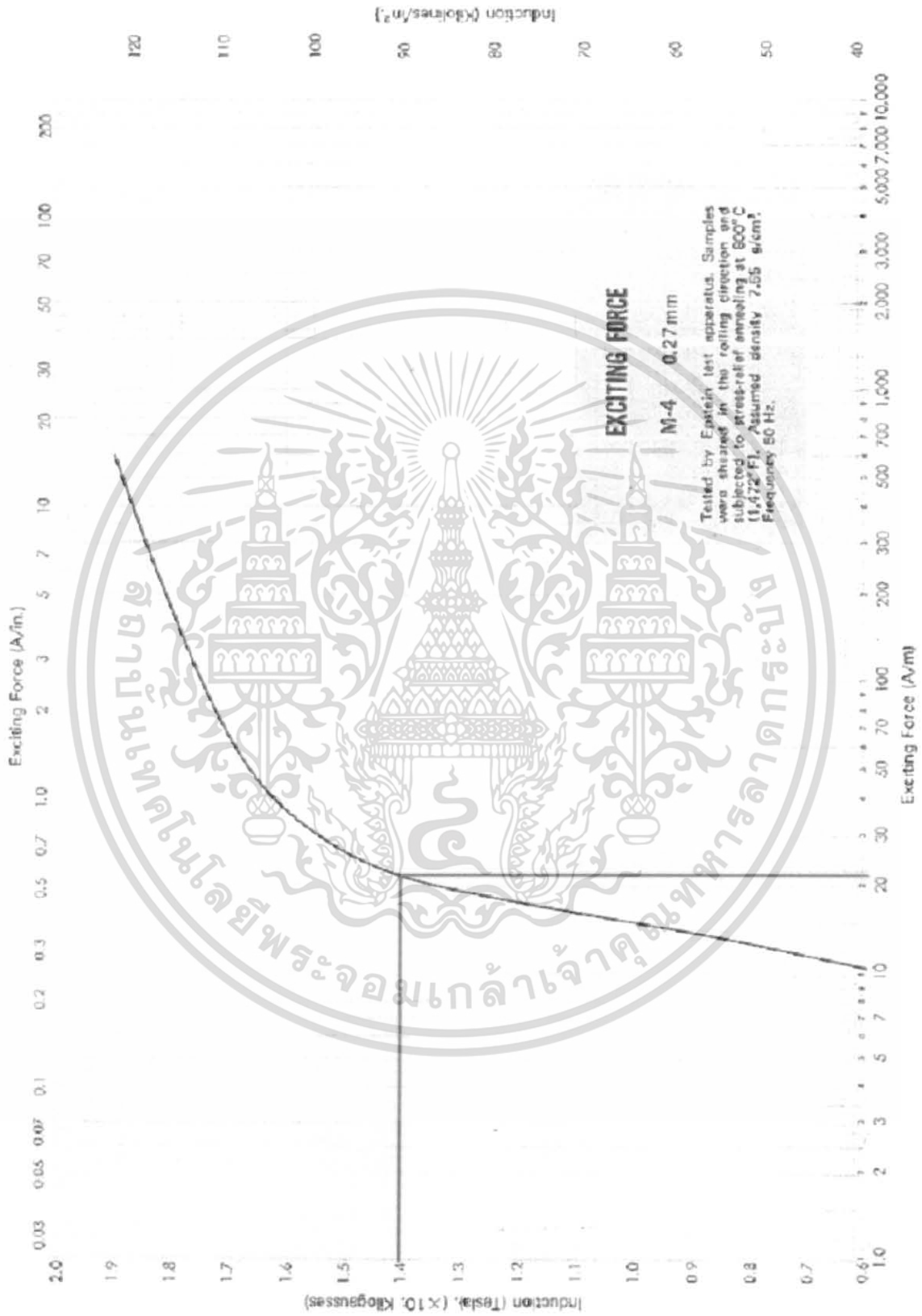
ก.6 แรงทางกลที่กระทำต่อแกนเหล็ก จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



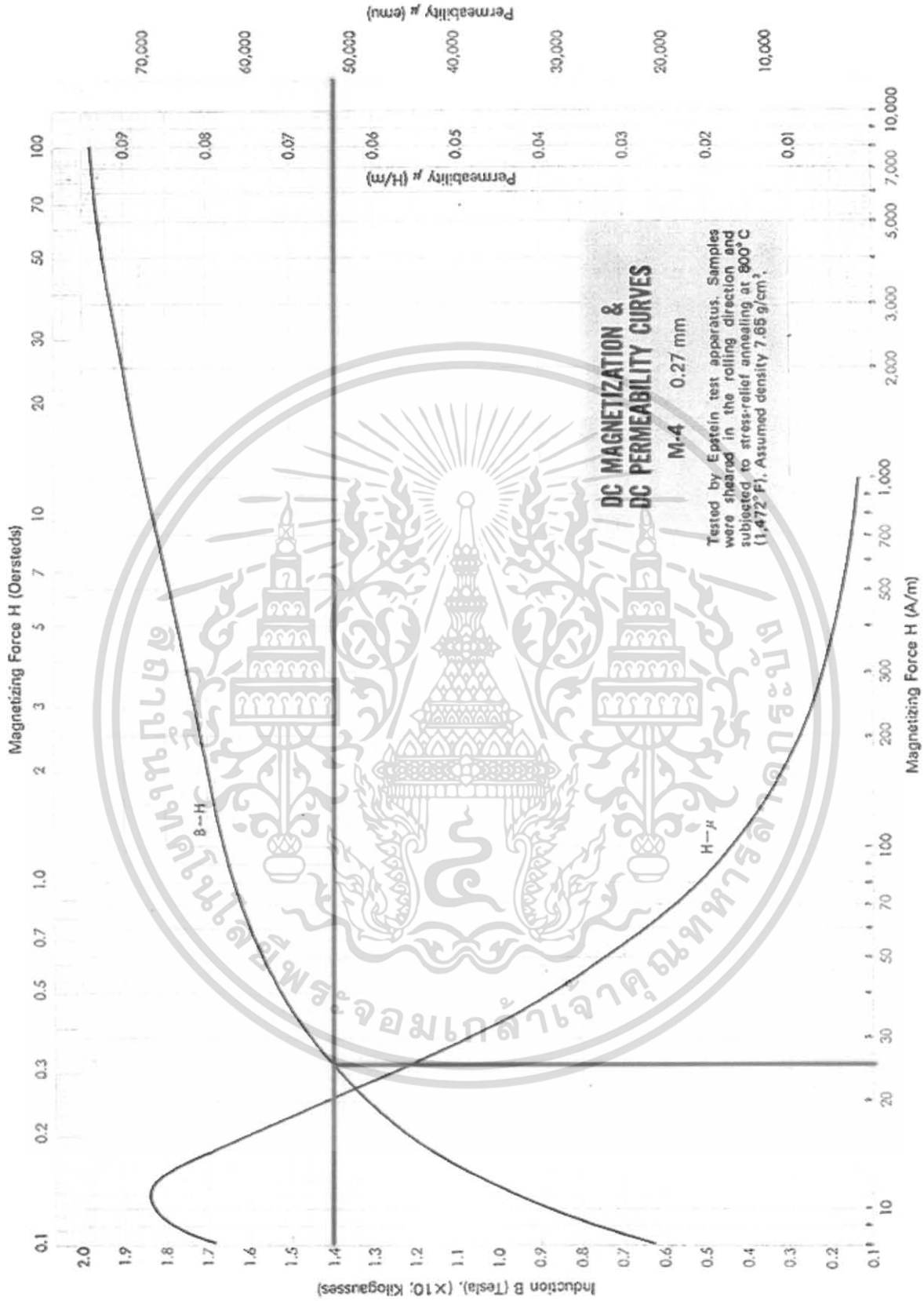
รูปที่ ก.6.1 แรงทางกลที่กระทำต่อแกนเหล็ก

วัสดุที่ใช้ทำแกนเหล็ก	เหล็ก	
ความสูงเฉลี่ย	320	mm
ความกว้างเฉลี่ย	340	mm
การตัดมุมแกนด้านบน	45	degree
แรงที่กระทำต่อแกนเหล็ก	500	neuton

ภาคผนวก ข
คุณสมบัติของวัสดุที่ได้จากผู้ผลิต



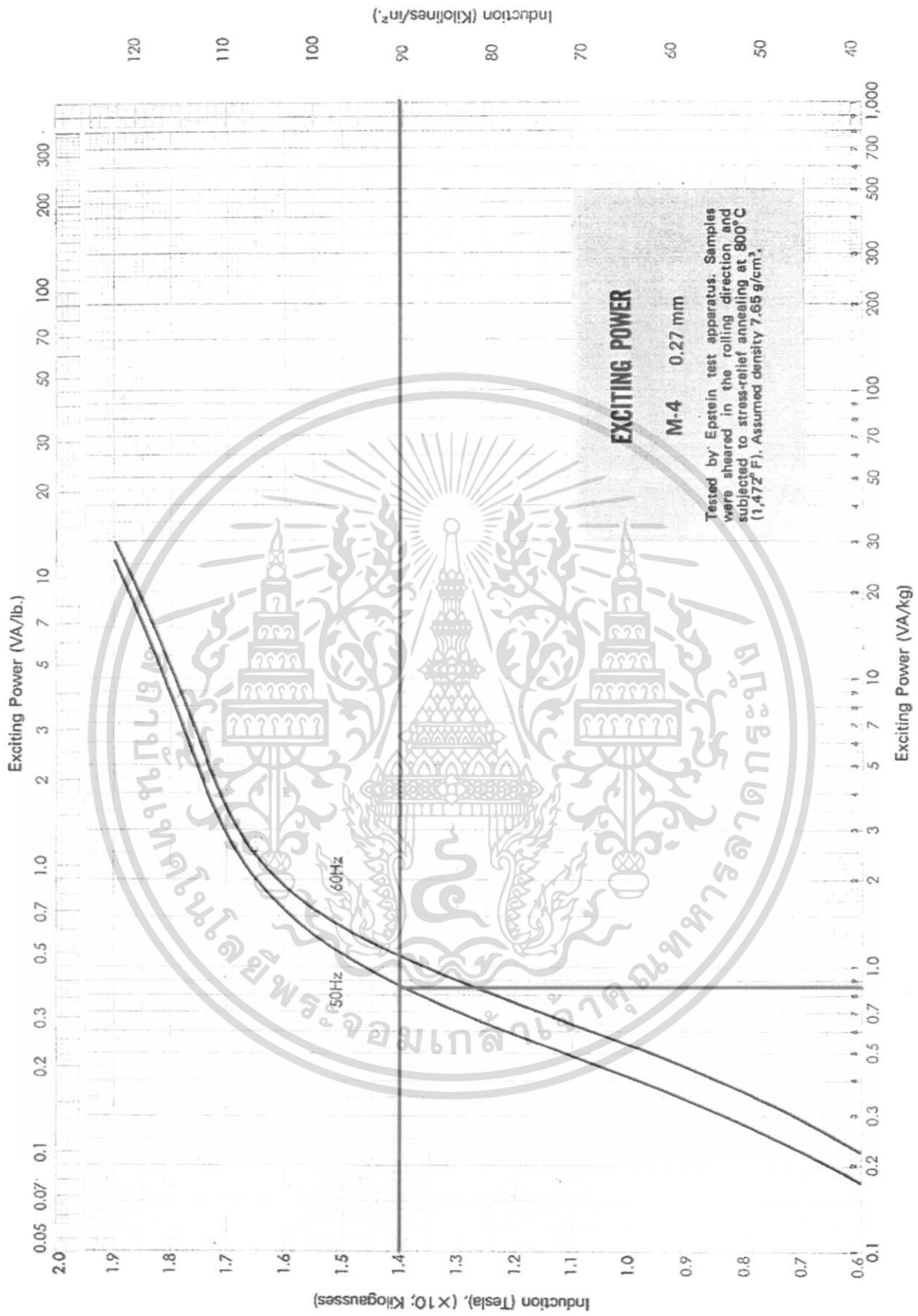
รูปที่ ข.1 กราฟ Exciting Force (A/m)



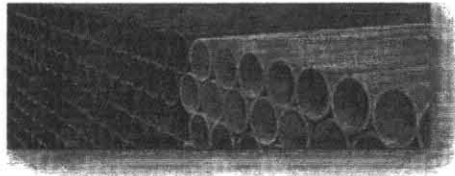
รูปที่ ๒.๒ กราฟ Magnetizing Force (A/m)



รูปที่ ๓.๓ กราฟ Core Loss (W/kg)



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



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 (½")	22±0.15	-	2.0±0.20	2.5±0.20	4000	-	0.72	0.88	
20 (¾")	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 (1¼")	42±0.15	1.5±0.15	2.0±0.20	3.1±0.25		1.09	1.44	2.17	
40 (1½")	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 (2½")	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	30.96	50.37	76.43
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:

- 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.
- Pipe length differs from the standard 4000 mm can be made. Please contact our sales department for special arrangement.
- Weight per length in the table above are approximated values.

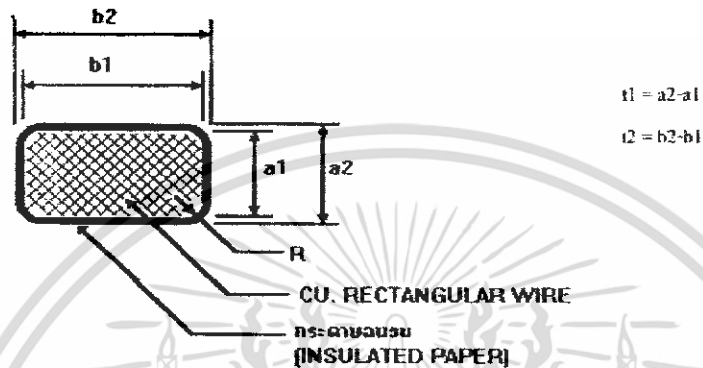
รูปที่ ข.5 ขนาดท่อพีวีซีที่ใช้เป็นตัวอย่างของหม้อแปลง

ลวดสี่เหลี่ยมทองแดงหุ้มกระดาษ

ขอบเขตการใช้งาน ใช้สำหรับการพันคอยล์ สำหรับ OIL-IMMERSED TRANSFORMER

คุณสมบัติที่เจาะจง ใช้มาตรฐาน BS 4653

แบบชิ้นงานและขนาด



รายละเอียดของรายการวัสดุ หมายเหตุชิ้นงาน "ลวดสี่เหลี่ยมทองแดงหุ้มกระดาษ" / ความหนา x ความกว้าง

ORIGINAL

Revision	01	STANDARDS PART MANUAL	TTS - 03
Date		คู่มือชิ้นส่วนมาตรฐาน	
QA Manager		บริษัท ไทย ทรานโซ รมบูเฟคเจอริง จำกัด	Page 1 of 5
FN Manager		THAI TRAF0 MANUFACTURING CO.,LTD.	

รูปที่ ข.6 ขนาดลวดสี่เหลี่ยมทองแดงหุ้มกระดาษที่ใช้เป็นขดลวดแรงต่ำ

ขนาดเส้นผ่า				ความหนา กระดาษชดเชย t1 และ t2 (ม.ม.)	ความลื่นหน @ 20 °C (m ² /m) Maximum	%การยืดตัว Elongation 30cm gauge length (%)	รีทัม ความโค้ง R (ม.ม.)	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	0.8814	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	3.70	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 0031-0525-0090 คู่มือชิ้นส่วนมาตรฐาน	TTS - 03
Date	15/05/2007		
QA Manager		บริษัท ไทย ทรานส์ ฟลักซ์เจอร์ริง จำกัด	Page 2 of 5
EN Manager		THAI TRAFU MANUFACTURING CO.,LTD.	

รูปที่ ข.7 ขนาดของลวดสี่เหลี่ยมทองแดงหุ้มกระดาษที่ใช้เป็นขลวดแรงต่ำ(ต่อ)

ขนาดลำนำ (mm)				ความหนา กระดาษทอง (1 และ 2 (mm.))	ความต้านทาน @ 20 ° C (mΩ/m) 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	6.90	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	0.6609	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	1.3611	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	9.20	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

ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) สูงสุด = 255 N/mm²

Revision	01	STANDARDS PART MANUAL ภูมิชิ้นส่วนมาตรฐาน	TTS - 03
Date			
QA Manager		บริษัท ไทย ทร่าไฟ แมนูแฟคเจอร์ริง จำกัด	Page 3 of 5
EN Manager		THAI TRAFU MANUFACTURING CO.,LTD.	

รูปที่ ข.8 ขนาดลวดสี่เหลี่ยมทองแดงหุ้มกระดาษที่ใช้เป็นขดลวดแรงต่ำ(ต่อ)

ขนาดตัวอักษร (มม.)				ความหนา กระดาษ (1 และ 2 มม.)	ความต้านทาน (ที่ 20 °C (กม.2/กม.) Maximum	%การยืดตัว Elongation 30cm gauge length (%)	ดัชนี ความโค้ง R (มม.)	หมายเลขชิ้นส่วน
a1		b1						
mm	mm	mm	mm					
3.17	0.03	8.30	0.07	0.5	0.7064	Min.35	0.80	0031-0531-0083
3.17	0.03	8.60	0.05	0.5	1.6182	Min.35	0.80	0031-0531-0038
3.17	0.02	11.40	0.07	0.5	0.5088	Min.35	0.80	0031-0531-0114
3.17	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	5.60	0.05	0.5	1.0433	Min.35	0.80	0031-0535-0050
3.50	0.05	5.90	0.05	0.5	0.9445	Min.35	0.80	0031-0535-0055
3.50	0.05	6.00	0.05	0.5	0.8660	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	0.8308	Min.35	1.00	0031-0536-0060
3.60	0.05	6.00	0.07	0.5	0.5590	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	0.6881	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

ค่าความต้านแรงดึง (Tensile Strength) สูงสุด 255 N/mm²

ORIGINAL

Revised	01	STANDARDS PART MANUAL	TTS-05
Date		ศูนย์รับส่งมาตรฐาน	
By Manager		บริษัท ไทย ทรานโซ แมนูแฟคเจอร์ จำกัด	Page 4 of 5
PN Number		THAI TRAF0 MANUFACTURING CO.,LTD.	

รูปที่ ข.9 ขนาดลวดสี่เหลี่ยมทองแดงหุ้มกระดาษที่ใช้เป็นขลวดแรงต่ำ(ต่อ)

ลวดอาบน้ำยา

คุณสมบัติพื้นฐาน

1 ชื่อทั่วไป	PVF ลวดทองแดงเคลือบโพลีไวนิล ฟอร์มัล (Polyvinyl Formal Copper Wire)
มาตรฐาน	JIS C3202 หรือ มอก. 82-2527
ชนิด	ทนน้ำมันหม้อแปลง
ขนาด	เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 ถึง 3.20 มม.
ระดับอุณหภูมิใช้งาน	E 120 องศา C
ความหนาของฟิล์มน้ำยา	JIS Class 1

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

ORIGINAL

รายละเอียดของรายการวัสดุ

หมายเลขชิ้นส่วน / ลวดอาบน้ำยา / ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

Revision	03	STANDARDS PART MANUAL	TTS - 02
Date	19 ก.ค. 2544	คู่มือชิ้นส่วนมาตรฐาน	
QA Manager		บริษัท ไทย ทรานโฟ แมนูแฟคเจอร์ริง จำกัด	Page 1 of 3
EN Manager		THAI TRAFU MANUFACTURING CO.,LTD.	

รูปที่ ข.10 ขนาดลวดอาบน้ำยาที่ใช้เป็นขดลวดแรงสูง

ENAMELLED WIRE DATA (METRIC UNIT)

漆包線漆膜厚度及外徑 (公制)

CONDUCTOR		TYPE 0		TYPE I		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	3.388	0.034	0.338	-	-
-	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	0.596	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	0.429
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	0.012	0.298	0.009	0.284
-	0.24	0.020	0.306	0.012	0.288	0.009	0.274
34	0.23	0.020	0.298	0.012	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 ข.11 ขนาดลวดอาน้ำยาที่ใช้เป็นขดลวดแรงสูง(ต่อ)

1. PVF (E 120 °C)

เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	พิถีตต่อ (มม.)	Min. dielectric breakdown voltage (kV)	Class 1		ความต้านทาน สูงที่ 20 °C (mΩ/m)	Min. elongation %	หมายเลขชิ้นส่วน
			ความหนาฟิล์ม (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	1.612	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

* คิวววดที่ดึงจากบริษัท siam pacific electric wire & cable

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

รูปที่ ข.12 ขนาดลวดอาบนํ้าที่ใช้เป็นขดลวดแรงสูง(ต่อ)

กระดาษฉนวน

ขอบเขตการใช้งาน สักขณะรองกระดาษฉนวนที่ไ้ม้งออกเป็น 4 ประเภท ดังนี้

INSULATION PAPER (KRAFT PAPER)

ใช้เป็นฉนวนกันระหว่างชั้น (layer) ของขดลวด หรือกันระหว่างขดลวดแรงต่ำและขดลวดแรงสูง

PRESS BOARD

- 1 ใช้เป็นฉนวนปิดหัวและท้ายของขดลวด
- 2 ใช้ทำกระดาษลูกฟูก หรือกระดาษรองน้ำมัน เพื่อการไหลหมุนเวียนของน้ำมัน ช่วยในการระบายความร้อน
- 3 เป็นฉนวน ในการรองรับระหว่างขดลวดและโครงสร้าง
- 4 ใช้ในการฉนวนขึ้นรูป สำหรับพันขดลวดแรงต่ำ หรือขดลวดแรงสูง

CREPED PAPER



ใช้สำหรับพันสายตัวนำ ที่ต้องการความยืดหยุ่น

THERMOPOX

ใช้เป็นฉนวน (insulation layer) สำหรับแผ่น Foil แบบ double sides

คุณสมบัติพื้นฐาน : ใ้มีมาตรฐาน 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 ทรานโฟ แบบบัพเตจอร์ริง จำกัด	Page 1 of 14
EN Manager		THAI TRAF0 MANUFACTURING CO.,LTD.	

รูปที่ ข.13 ขนาดและคุณสมบัติกระดาษฉนวน

INSULATION PAPER / PRESS BOARD ที่ใช้ตามมาตรฐานดังต่อไปนี้

JIS C-2305 (class 2)

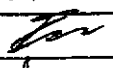

Thickness (mm.)	Density g/cm ³	Tensile strength		Elongation		Moisture content %	Ash content %	Dielectric break- down strength		Shrinkage %		
		MPa		%				kV/mm		MD	CD	TD
		Min.	Min.	Min.	Min.			Max.	Max.	AVE.	Min.	Max.
0.13-0.8	0.95-1.30	70	30	1.5	4.0	10.0	1.0	9.0	6.5	1.0	2.0	8.0
0.8 ≤ t ≤ 3.0	0.95-1.30	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 ค่าที่ต้องการ ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 1

Revision	01	STANDARDS PART MANUAL	TTS - 22
Date	๒๑ ก.ย. ๒๕๕๒	คู่มือชิ้นส่วนมาตรฐาน	
QA Manager		บริษัท ไทย ทรานโซฟอร์เมชัน จำกัด	Page 2 of 14
EN Manager		THAI TRAFU MANUFACTURING CO.,LTD.	

รูปที่ ข.14 ขนาดและคุณสมบัติกระดาษฉนวน(ต่อ)

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 ฟอรั่ม
THAI TRAFU CO.,LTD

THERMOKRAFT - INSULATING PAPER

WEDMANN

Nr.

K 61-1 E

(1)

Copyright by H. Weidmann Ltd, 8640 Rapperswil, Switzerland

รูปที่ ข.15 ขนาดและคุณสมบัติกระดาษฉนวน(ต่อ)

	THERMOKRAFT uncalendered	THERMOKRAFT calendered
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 Ø 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 ทรานส์ จำกัด
THAI TRAF0 CO.,LTD.

THERMOKRAFT - INSULATING PAPER



No.

K 61-2 E
(1)

รูปที่ ข.16 ขนาดและคุณสมบัติกระดาษฉนวน(ต่อ)

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 จำกัด
THAI TRAFU CO.,LTD.

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

WEIDMANN

No.

K 12 - 1 E
(2)

Copyright by H. Weidmann Ltd, 8640 Rapperswil, Switzerland

รูปที่ ข.17 ขนาดและคุณสมบัติกระดาษฉนวน(ต่อ)

4. TECHNICAL DATA

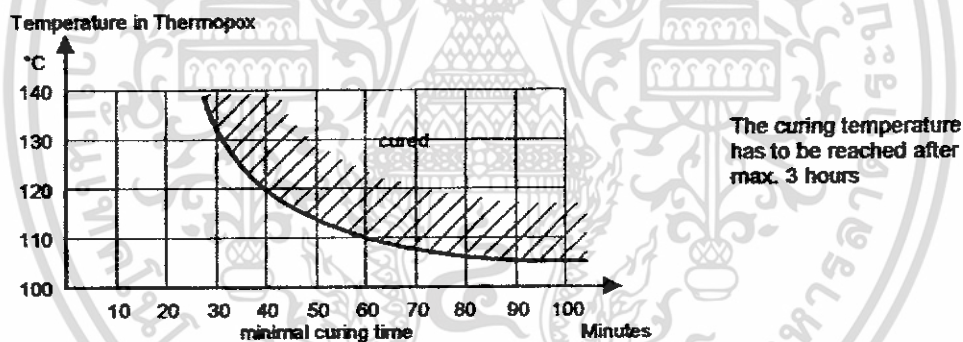
4.1 Physical characteristics

		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.

ttc บริษัท ไทย ทร่าฟ จำกัด
THAI TRAF CO.,LTD.

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

Copyright by H. Weidmann Ltd, 8640 Rapperswil, Switzerland

รูปที่ ข.18 ขนาดและคุณสมบัติกระดาษฉนวน(ต่อ)

น้ำมันหม้อแปลง

ขอบเขตการใช้งาน

ใช้ในหม้อแปลง OIL-FILLED TRANSFORMER

ความปลอดภัยและข้อควรระวัง

ควรใช้ให้ถูกต้องตามคำแนะนำของผู้ผลิต ว่าด้วยมาตรฐานทางสุขลักษณะที่ดี ทั้งในด้านส่วนบุคคล 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

12.0/66 Max.

100 deg C cst/sus

3.0/36 Max.

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 ข.19 คุณสมบัติพื้นฐานน้ำมันหม้อแปลง

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. Antioxidant 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-1-530A 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 ข.20 คุณสมบัติน้ำมันหม้อแปลง(ต่อ)

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 ข.21 คุณสมบัติน้ำมันหม้อแปลง(ต่อ)

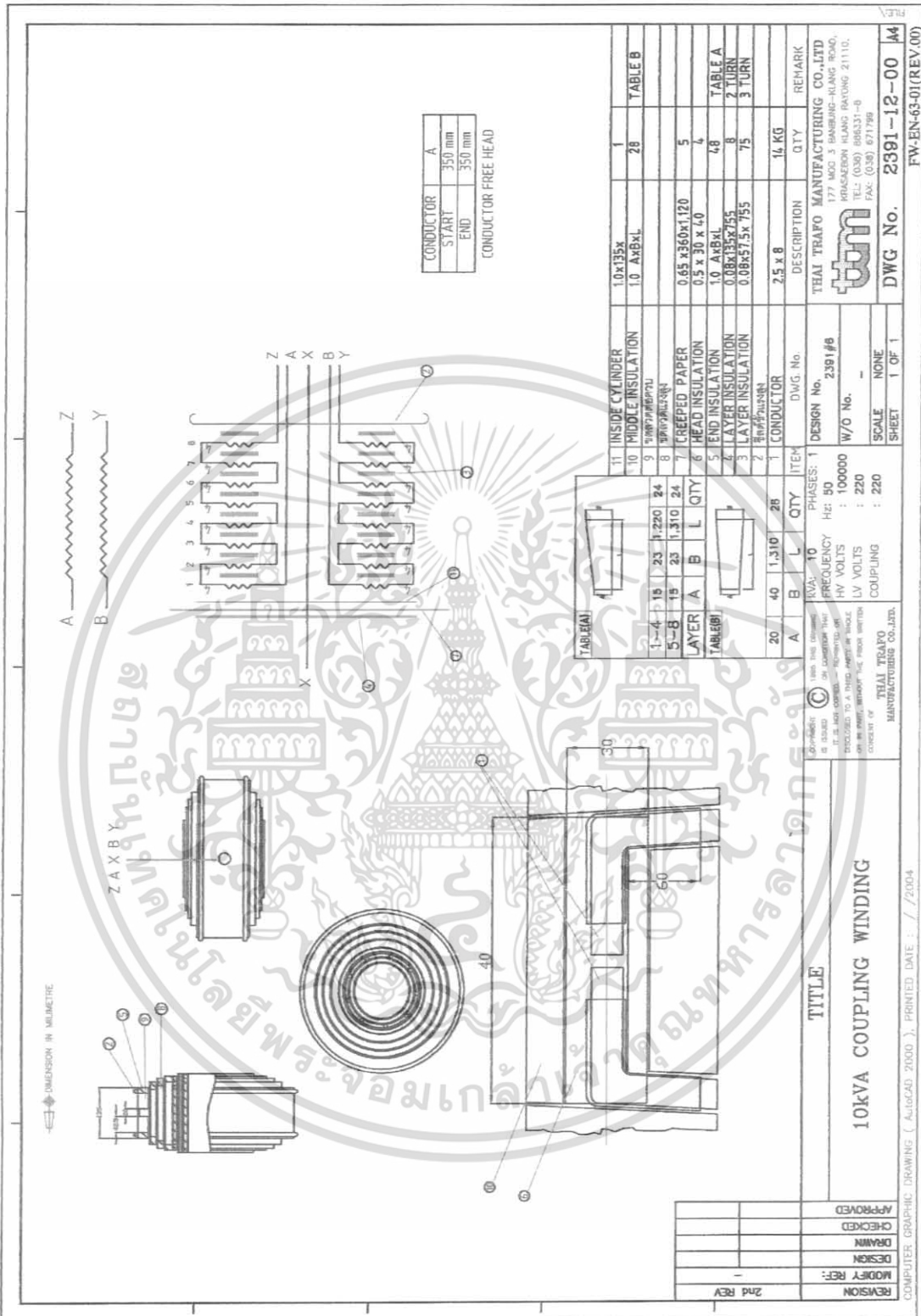
Table 3/ Chemical Properties of Shell Diala® Oils

	ASTM Method	Requirement		Diala A	Diala AX
		Type I	Type II		
Oxidation Inhibitor Content, %w	D2668 or				
2,6-ditertiary butyl paracresol	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
NA- 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 ³ /C/mL	D1903	0.0007-0.0008	0.00075
Resistivity, cm	D1169		2000*10 ¹²
@ 25°C			50*10 ¹²
@ 100°C			
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/		
@ 100°F, SUS	D2161		58.8
@ 210°F, SUS			34.1
@ 100°F, cSt			10.5
@ 100°C, cSt	D445		2.38
Steam Emulsion No.	D1935		15
Sulfur, %w	D2622		0.07
Molecular Weight	D2503		261
Refractive Index	D1218		1.4815
Viscosity-Gravity Constant	D2140		0.865
Viscosity Index	D2270		45

รูปที่ ข.22 คุณสมบัติน้ำมันหม้อแปลง(ต่อ)



CONDUCTOR	A
START	350 mm
END	350 mm
CONDUCTOR FREE HEAD	

11	INSIDE CYLINDER	1.0x135x	1	TABLE B
10	MIDDLE INSULATION	1.0 AxBxL	28	TABLE B
9	ชั้นกระดาษรอง			
8	ชั้นกระดาษรอง			
7	CREEPED PAPER	0.65 x360x1,120	5	
6	HEAD INSULATION	0.5 x 30 x 4.0	4	
5	END INSULATION	1.0 AxBxL	48	TABLE A
4	LAYER INSULATION	0.08x135x755	8	2 TURN
3	LAYER INSULATION	0.08x57.5x 755	75	3 TURN
2	ชั้นกระดาษรอง			
1	CONDUCTOR	2.5 x 8	14 KG	

TABLE(A)		TABLE(B)	
1-4	15	23	1,220
5-8	15	23	1,310
LAYER A	B	L	QTY
TABLE(B)			
20	40	1,310	28
A	B	L	QTY

DESIGN No. 2391 #8
W/O No. -
SCALE NONE
SHEET 1 OF 1

THAI TRAPO MANUFACTURING CO.,LTD
177 Moo 3 BANBANG-KLANG ROAD,
INDUSRIAL PLANS RAYONG 21110,
TEL: (030) 886331-8
FAX: (030) 871799

DWG No. 2391-12-00 M4
FW-EN-63-01 (REV.00)

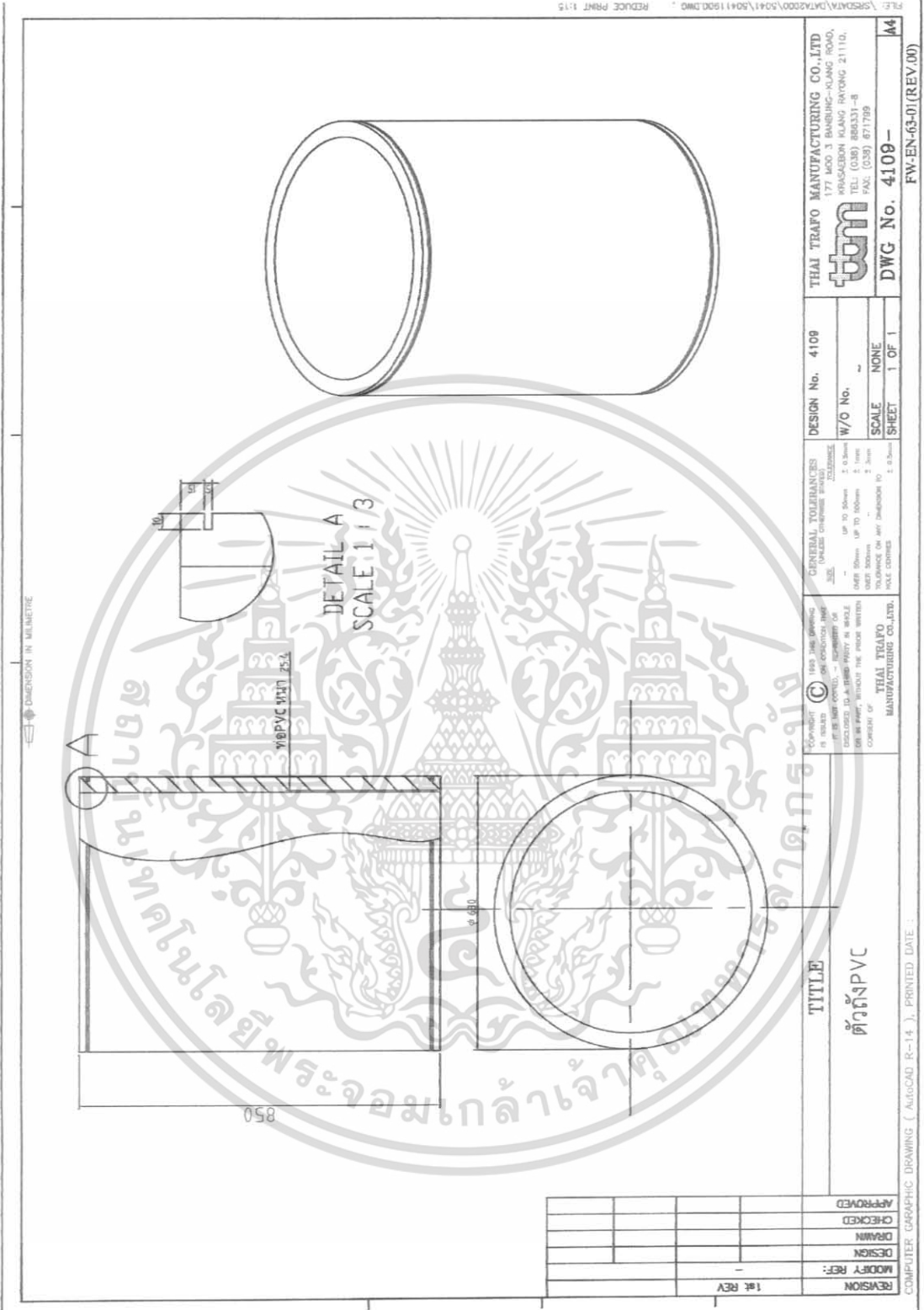
10kVA COUPLING WINDING

PHASES: 1
FREQUENCY Hz: 50
HV VOLTS : 100000
LV VOLTS : 220
COUPLING : 220

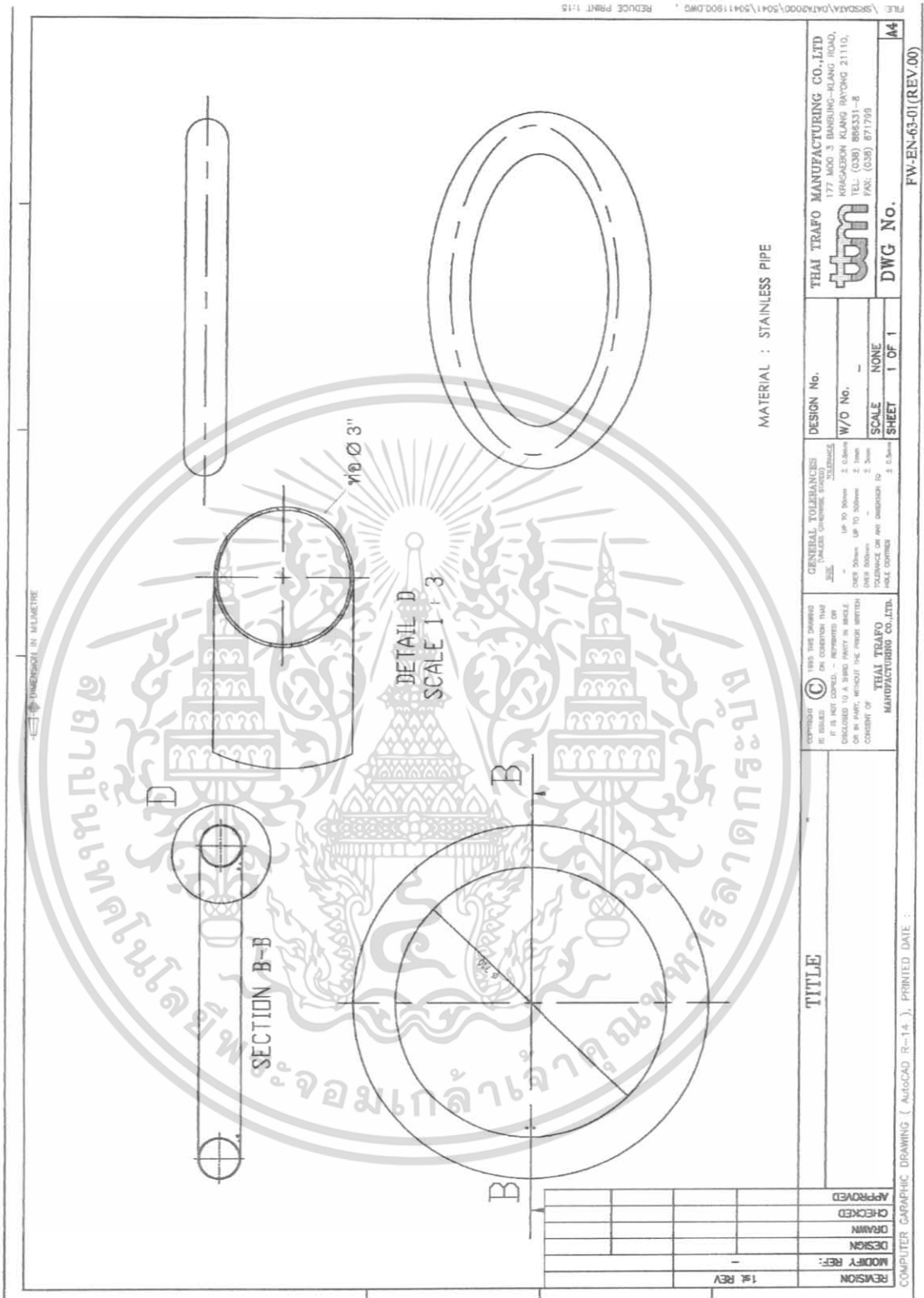
THAI TRAPO MANUFACTURING CO.,LTD

REVISION	MODIFY REF.	DESIGN	CHECKED	APPROVED
2nd REV	-	-	-	-

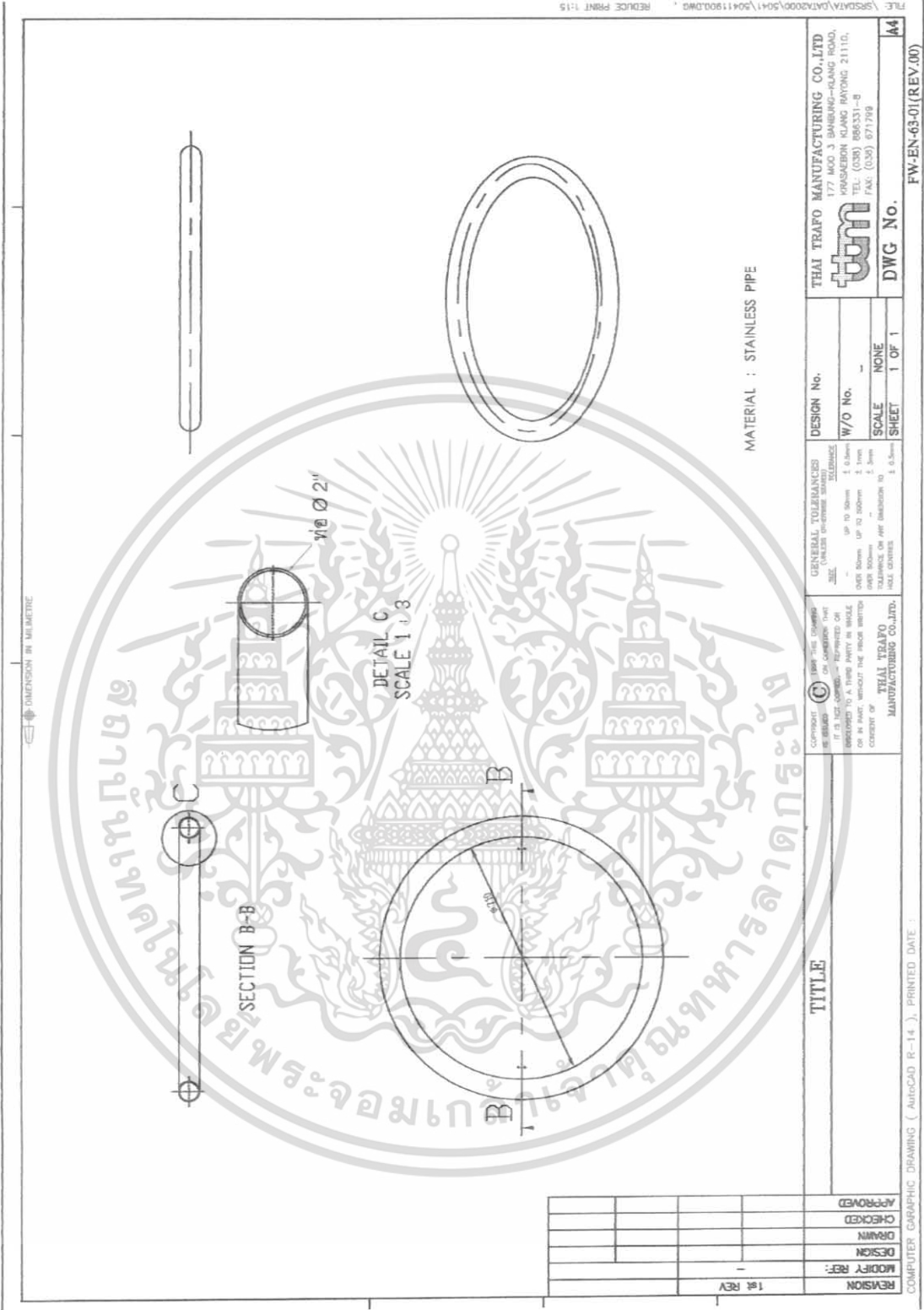
รูปที่ ค.3 ภาพขนาดและวิธีการพันขดลวดต่อควบ



รูปที่ ค.4 แบบและขนาดของตัวถังหม้อแปลง



รูปที่ ค.5 แบบและขนาดของโคโรนาซีลด์ตีวบน



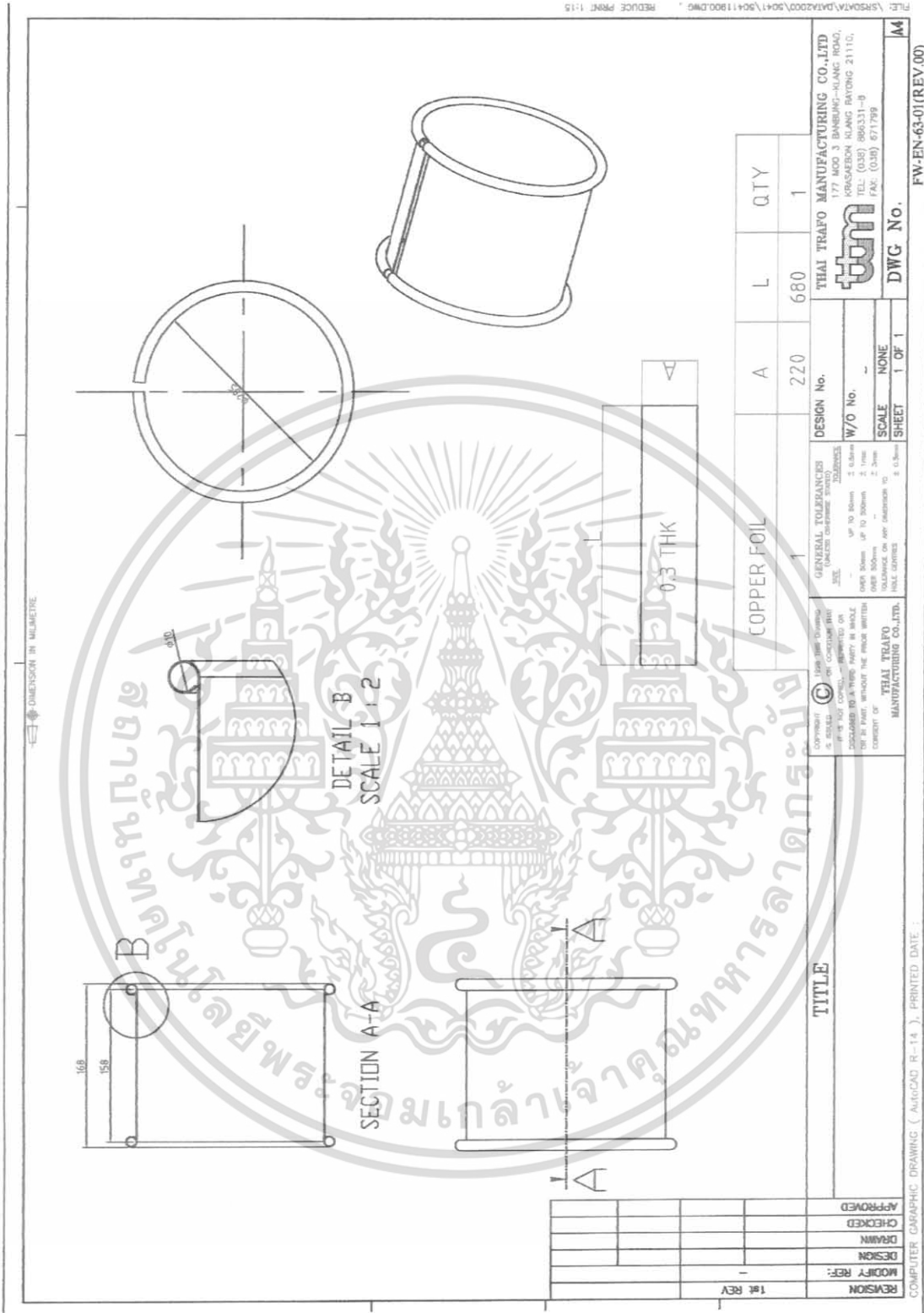
รูปที่ ค.6 แบบและขนาดของโคโรนาซิลด์ตัวล่าง

REVISION	1st REV				
MODIFY REF:					
DESIGN					
DRAWN					
CHECKED					
APPROVED					

THAI TRAPO MANUFACTURING CO.,LTD 177 MOO 3 BANBUNG-KANG ROAD, KUSAGRON KANG RAYONG 21110, TEL: (038) 886331-8 FAX: (038) 871790		DESIGN No.	
THAI TRAPO MANUFACTURING CO.,LTD		W/O No.	
SCALE NONE		SHEET	1 OF 1
DWG No.		A4	

TITLE	
GENERAL TOLERANCES UNLESS SPECIFIED	
SIZE	UP TO 30mm ± 0.3mm
OVER 30mm UP TO 100mm	± 0.5mm
OVER 100mm	± 1.0mm
HOLE DIA	± 0.1mm
HOLE DEPTH	± 0.5mm

FILE: \\SSDATA\DATA2000\5041\50411900.DWG , REDUCE PRINT 1:15



รูปที่ ค.7 แบบและขนาดของซีลด์ซ์ขันนิตร์ล

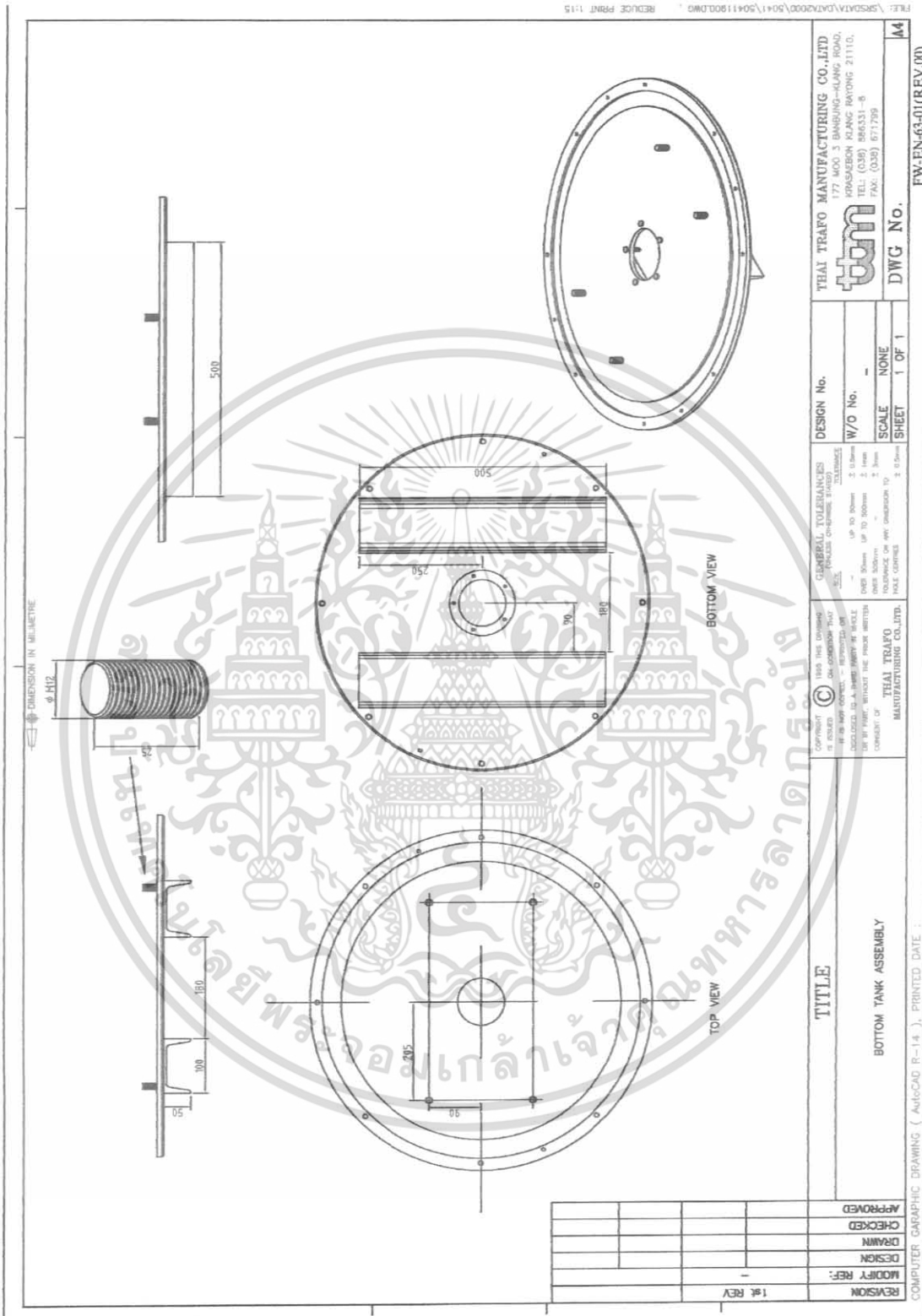
FILE: \SR50A7\DATA\2007\2041\90411900.DWG . REDUCE PRINT 1:15



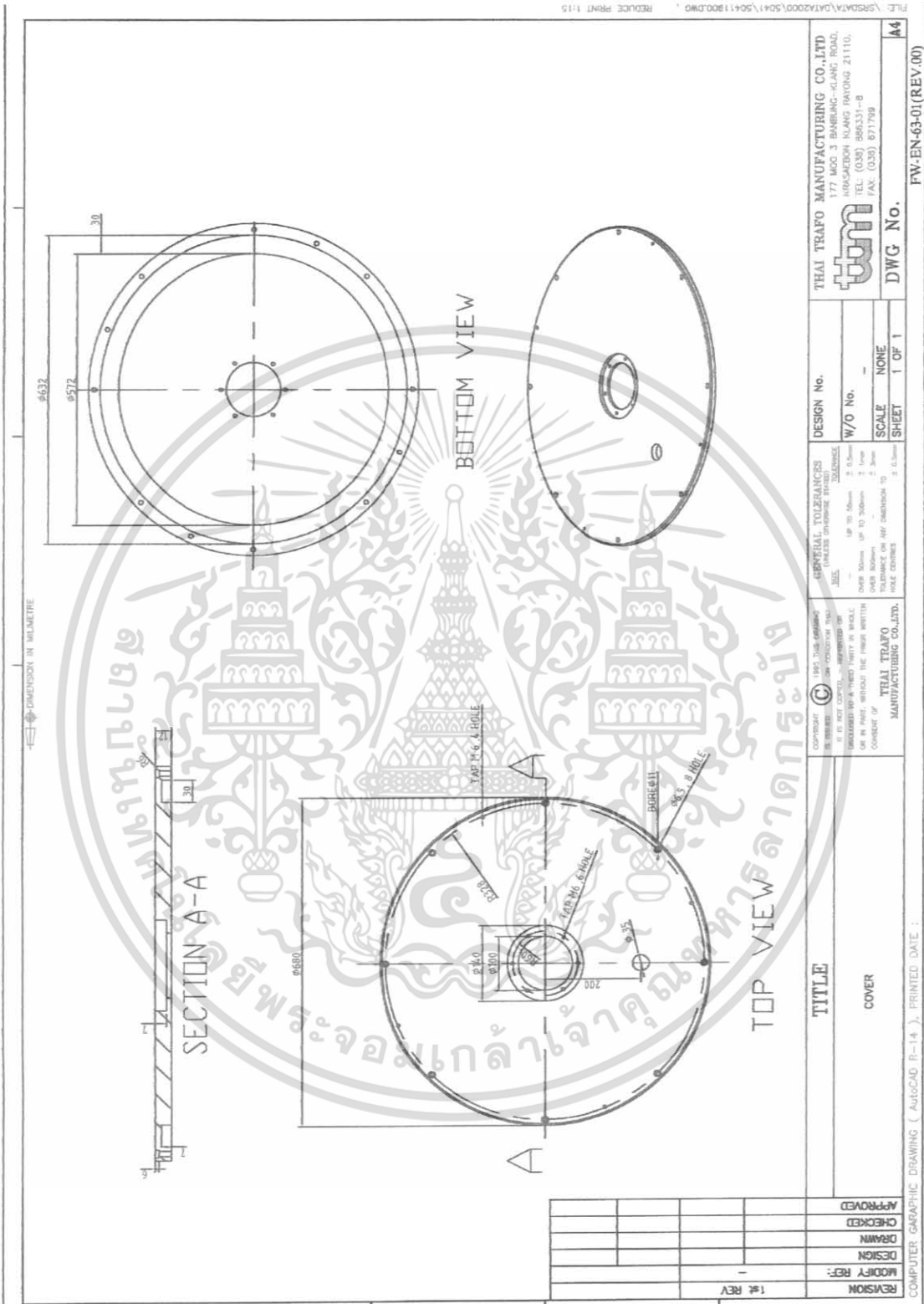
รูปที่ ค.10 แบบและขนาดของแหวนล็อก

REVISION	1st REV				
MODIFY REF:					
DESIGN					
DRAWN					
CHECKED					
APPROVED					

TITLE แหวนล็อก		GENERAL TOLERANCES (UNLESS OTHERWISE SPECIFIED) FINE UP TO 60mm ± 0.1mm MEDIUM UP TO 250mm ± 0.2mm COARSE UP TO 300mm ± 0.3mm HOLE DIMENSIONS ± 0.1mm		DESIGN No. - W/O No. - SCALE NONE SHEET 1 OF 1	
COMPANY © 1999 Thai Trafu Manufacturing Co., Ltd. If it is not covered, prohibited or restricted by a third party in whole or in part, without the express written consent of THAI TRAFU MANUFACTURING CO., LTD.		THAI TRAFU MANUFACTURING CO., LTD. 177 Moo 6, Bangrak-Khao-I-Boad, Krakraon Klang Baiyong 2 1110, TEL. (038) 886331-4 FAX. (038) 871789		DWG No. FW-EN-65-01 (REV.00)	



รูปที่ ค.11 แบบและขนาดของอิเล็กทรอนิกส์ตัวล่าง



รูปที่ ค.12 แบบและขนาดของอิเล็กทรอนิกส์ตัวบน

REVISION	MODIFY REF:	DESIGN	DRAWN	CHECKED	APPROVED
1st REV	-	-	-	-	-
TITLE COVER					
Copyright © 1993, Thai Trafo Manufacturing Co., Ltd. All rights reserved. This drawing is the property of Thai Trafo Manufacturing Co., Ltd. and is not to be reproduced or used in any form without the prior written consent of Thai Trafo Manufacturing Co., Ltd.					
TOLERANCES UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS UP TO 300mm ± 0.1mm DIMENSIONS OVER 300mm ± 0.2mm HOLE DIMENSIONS TO HOLE CENTER ± 0.1mm					
THAI TRAFO MANUFACTURING CO., LTD. 177 Moo 3 BAMBING-KLANG ROAD, KIRASABON KLANG BAYONG 21110, TEL: (038) 866331-8 FAX: (038) 871799					
DESIGN No.					44
W/O No.					1 OF 1
SCALE NONE					DWG No.
SHEET					FW-EN-63-01(REV.00)

