

การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบไฟฟ้าแรงสูงพิกัด 100 kV 30 kVA

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A HIGH-VOLTAGE TESTING
TRANSFORMER WITH RATING OF 100 kV AND 30 kVA



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรที่ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ปีการศึกษา 2563

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A HIGH-VOLTAGE TESTING
TRANSFORMER WITH RATING OF 100 kV AND 30 kVA



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
2020

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปีการศึกษา 2563

การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบไฟฟ้าแรงสูงพิกัด 100 kV 30 kVA

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A HIGH-VOLTAGE TESTING TRANSFORMER WITH
RATING OF 100 kV AND 30 kVA



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รศ.ดร.พีรฤทธิ ยูทธิโกวิท

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญาโทปีการศึกษา 2563

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบไฟฟ้าแรงสูงพิกัด 100 kV 30 kVA

ผู้จัดทำ



- | | |
|--------------|----------------|
| 1. นายพงศธร | เต็มเตชาติพงศ์ |
| 2. นายวงศธร | พิมพ์ภรณ์ |
| 3. นายวิหวัศ | ฐานวัฒน์กิจ |
| 4. นายศรุต | สรรพาว์ตร |

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.พีรุดิ ยูธโกวิท)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบไฟฟ้าแรงสูงพิกัด 100 kV 30 kVA

นายพงศธร	เติมเตชาติพงศ์
นายวงศธร	พิมพ์ภรณ์
นายวิทวัส	ฐานวัฒนกิจ
นายศรุต	สรรพาว์ตร
รศ.ดร.พีรวุฒิ	ยุทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2563	

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบไฟฟ้าแรงสูงพิกัด 100 kV 30 kVA โดยหม้อแปลงทดสอบเป็นอุปกรณ์หนึ่งในวงจรทดสอบที่แพงและสำคัญที่สุด ดังนั้น การออกแบบและการสร้างหม้อแปลงทดสอบไฟฟ้าแรงสูงสามารถช่วยประหยัดงบประมาณแทนที่จะซื้อแบบหม้อแปลงสำเร็จรูป ถึงอย่างนั้นหม้อแปลงทดสอบต้องมีความน่าเชื่อถือเพื่อให้แน่ใจว่าสามารถใช้ในการทดสอบได้จริงโดยเฉพาะอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้าแรงสูง การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจะต้องเป็นไปตามมาตรฐานซึ่งได้แก่ การทดสอบประจำ และ การทดสอบพิเศษ บางอย่างตามที่ต้องการ การทดสอบการคายประจุบางส่วนเป็นหนึ่งในการทดสอบพิเศษที่ระบุว่าคุณสมบัติของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเสื่อมสภาพขนาดไหน ดังนั้นหม้อแปลงทดสอบไฟฟ้าแรงสูงต้องมีการคายประจุบางส่วนน้อยกว่า 5 pC ที่ 100 kV จึงจะสามารถทดสอบการคายประจุบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้าแรงสูงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Design and Construction of a High-voltage Testing Transformer with Rating of 100 kV and 30 kVA

Mr.Pongsatorn Termtachatipongsa

Mr.Wongsatorn Pimkan

Mr.Witthawat Thanwatthanakit

Mr.Sarut Sunpawatr

Associate.Prof.Dr.Peerawut Yutthagowith Advisor

ABSTRACT

This project presents the design and construction of a High-voltage testing transformer with rating of 100 kV and 30 kVA. The testing transformer is one of the most expensive and important High-voltage testing circuits. Therefore, the design and construction of a High-voltage testing transformer can save money instead of buying a finished model. Even so, this testing transformer must have reliable. To ensure that it can be used in the actual test, especially electrical equipment that is installed in a high voltage system. However, High-voltage equipment testing must be according to the standards including routine tests and some special tests. A Partial discharge testing is one of the special tests that indicated how insulation of High-voltage equipment degradation. Thus, a High-voltage testing transformer must have partial discharge less than 5 pC at 100 kV. As a result, partial discharge detection in the electrical equipment that is installed in a high voltage system can be possible.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งดีของ รองศาสตราจารย์ ดร.พีรภูมิ ยุทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รวมไปถึง ดร.ปณณวิทย์ ฉายศิริ ที่ได้กรุณาให้ข้อคิด และข้อเสนอแนะในเรื่องการทำงานวิจัยที่ถูกต้อง และได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไข ให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แล้วเสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอบคุณบริษัท ซีซี หม้อแปลงไฟฟ้า จำกัด ที่ได้เป็นกำลังหลักในการประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบที่ได้ทำการออกแบบร่วมกับผู้จัดทำให้เสร็จเรียบร้อยตามกำหนดเวลาที่วางไว้ อีกทั้งยังคงช่วยเหลือและสนับสนุนสถานที่ในการศึกษาเพื่อให้ผู้จัดทำมีความสะดวกในการวิจัยมากที่สุด

ขอบคุณอาจารย์ปรีชา ชูสว่าง อาจารย์ที่ปรึกษาในการออกแบบหม้อแปลงทดสอบ ประจำบริษัท ซีซี หม้อแปลงไฟฟ้า จำกัด รวมไปถึงพนักงานทุก ๆ คนที่คอยช่วยเหลือให้คำปรึกษาในการออกแบบหม้อแปลงทดสอบเพื่อให้หม้อแปลงทดสอบที่ออกแบบมาให้มีประสิทธิภาพที่ดี

ขอบคุณ คุณศรัณย์ พินทอง วิศวกรประจำบริษัท ซีซี หม้อแปลงไฟฟ้า จำกัด ที่คอยช่วยเหลือติดต่อประสานงานและให้คำแนะนำในการออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบไฟฟ้าแรงสูง

ขอบคุณนักศึกษาปริญญาเอก ประจำห้องทดสอบไฟฟ้าแรงสูง ที่คอยให้ความช่วยเหลือในการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า ทั้งยังให้ความรู้เกี่ยวกับการใช้โปรแกรมจำลองการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า และคอยให้ความช่วยเหลือในการเบิกใช้อุปกรณ์เครื่องมือในการทำงาน

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในการเงินให้นำไปใช้การศึกษาวิจัย อีกทั้งขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ และผู้ที่เกี่ยวข้องทั้งหมด ที่ให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VI
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตการวิจัย	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 หลักการทำงานหม้อแปลง	3
2.2 หม้อแปลงทดสอบ	4
บทที่ 3 การออกแบบสร้างหม้อแปลงทดสอบ	10
3.1 การออกแบบแกนเหล็ก	10
3.2 การออกแบบขดลวดแรงต่ำ	25
3.3 การออกแบบขดลวดแรงสูง	29
3.4 การตัดกระดาษฉนวน ลีม และวงกลม	34
3.5 การออกแบบตัวถังและฝาภายนอก	44
3.6 การคำนวณปริมาตรน้ำมันหม้อแปลง	47
3.7 การถ่ายเทความร้อน	48
3.8 การคำนวณแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ (%Z)	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลีขณทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and ^{IV} cite the document when use.

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.9 การคำนวณกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{SC})	52
3.10 การคำนวณกำลังไฟฟ้าลัดวงจร (S_{SC})	53
3.11 การคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าและการกระจายตัวของเส้นแรงแม่เหล็กด้วยการโปรแกรมจำลองในคอมพิวเตอร์	53
บทที่ 4 การประกอบสร้าง	54
4.1 แกนเหล็ก	54
4.2 ขดลวดแรงต่ำ	58
4.3 ขดลวดแรงสูง	62
4.4 การประกอบขดลวดเข้ากับแกนเหล็ก	65
4.5 ตัวถังและส่วนประกอบภายนอก	70
4.6 การต่อสายและการเติมน้ำมัน	73
4.7 ผลการทดลอง	77
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	78
5.1 สรุป	78
5.2 ข้อเสนอแนะ	80
เอกสารอ้างอิง	82
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ	83
ภาคผนวก ข คุณสมบัติของวัสดุ	88
ภาคผนวก ค แบบและโครงสร้าง	98
ภาคผนวก ง ผลการจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	106
ประวัติผู้เขียน	118

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบวงจรแม่เหล็กไฟฟ้า	2
2.2 หม้อแปลงแบบหุ้มด้วยฉนวนแห้ง	7
2.3 หม้อแปลงแบบจุ่มน้ำมัน	8
2.4 ไดอะแกรมการต่อหม้อแปลงทดสอบแบบชั้นบันได	9
3.1 ภาพตัดขวางพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก	12
3.2 ภาพตัดขวางพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กหลังคำนวณความหนาของการเรียงเหล็ก	15
3.3 ชั้นของแกนเหล็ก	16
3.4 ขนาดหน้าตัดของแกนเหล็กและการกำหนดชั้นเหล็กที่จะตัด	18
3.5 แบบแผ่นเหล็กแบบ A	19
3.6 แบบแผ่นเหล็กแบบ B	20
3.7 แบบแผ่นเหล็กแบบ C	21
3.8 แบบแผ่นเหล็กแบบ D	21
3.9 ความยาวรอบเฉลี่ยของแกนเหล็ก	22
3.10 ภาคตัดขนาดขดลวดแรงต่ำ	25
3.11 ภาพตัดขวางขดลวดแรงสูง	30
3.12 ภาพจำลองระยะห่างของลิมในแต่ละส่วน (mm)	35
3.13 ส่วนประกอบต่าง ๆ โดยแสดงเพียงด้านเดียว สำหรับใช้ในการลำดับการจัดวางลิม (mm)	36
3.14 ส่วนประกอบต่าง ๆ ที่ใช้ในการจัดลำดับการวางลิม (mm)	38
3.15 ขนาดของวงกลมใหญ่ (mm)	39
3.16 ขนาดของวงกลม (mm)	40
3.17 ภาพใช้กำกับในตารางสำหรับอ่านขนาดของลิมในส่วนต่าง ๆ	41
3.18 ขนาดของแผ่นเบกาไลท์ (mm)	42
3.19 ขนาดของแผ่น Leg insulation (mm)	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลึกทั้งห้าฉบับให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and VI cite the document when use.

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.20 ขนาดของแผ่น Angular ring (mm)	43
3.21 ภาพจำลองของตัวถังและภาพมองมุมสูงของตัวถัง	44
3.22 การออกแบบส่วนของฝาถัง	46
3.23 การต่อระหว่างฝาถังและบุชชิ่ง	46
3.24 ภาพรวมของการออกแบบตัวถังและฝาถัง	47
3.25 แสดงค่าตัวแปรใช้ในการคำนวณหาปริมาตรน้ำมันของฝาถัง	48
4.1 ขนาดของแกนเหล็ก	54
4.2 ลักษณะของแกนเหล็ก	54
4.3 แผ่นเหล็กที่ใช้ทำแกนเหล็ก	55
4.4 การปฏิบัติงานจริง	56
4.5 แคลมป์ยึดแกนเหล็ก	57
4.6 ขนาดของชุดลวดแรงต่ำทั้ง 2 ชุด	58
4.7 ขนาดของชุดลวดแรงต่ำ	59
4.8 การพันชุดลวดแรงต่ำทั้ง 2 ชุด	59
4.9 การปฏิบัติงานจริง	61
4.10 ขนาดของชุดลวดย่อย	62
4.11 เส้นผ่านศูนย์กลางลวดแรงสูง	63
4.12 การพันชุดลวดแรงสูงต่อ 1 ชุดลวดย่อย	63
4.13 การปฏิบัติงานจริง	64
4.14 แบบจำลองการคำนวณ	66
4.15 ชิ้นงานเมื่อประกอบชุดลวดเข้ากับแกนเหล็กเรียบร้อยแล้ว	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and VII cite the document when use.

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 การปฏิบัติงานจริง	69
4.17 ภาพจำลองของตัวถังและภาพมองมุมสูงของตัวถัง	70
4.18 ส่วนประกอบภายนอกของหม้อแปลงทดสอบ	72
4.19 ขั้นตอนการปฏิบัติงานจริงในการต่อสายตัวนำและการเติมน้ำมัน	75
4.20 ขั้นตอนการทดลอง Ratio test	77



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and VIII cite the document when use.

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 กระแสสูงสุดที่ใช้ทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าความถี่ต่ำ	5
2.2 ค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุฉนวนและอุปกรณ์ไฟฟ้า	6
3.1 จำนวนและความหนาของแผ่นเหล็กแบบ A	19
3.2 จำนวนและความหนาของแผ่นเหล็กแบบ B	20
3.3 จำนวนและความหนาของแผ่นเหล็กแบบ C	21
3.4 จำนวนและความหนาของแผ่นเหล็กแบบ D	21
3.5 สรุปลักษณะของแกนเหล็ก	24
3.6 สรุปลักษณะขดลวดแรงต่ำ	29
3.7 จำนวนรอบสะสมตามแต่ละชั้น	31
3.8 สรุปลักษณะขดลวดแรงสูง	34
3.9 ขนาดของลิมที่ใช้ในการประกอบทำลิม	40
4.1 Test results	77
5.1 ข้อมูลทั่วไปของหม้อแปลงทดสอบ 100 kV 30 kVA	78
5.2 รายละเอียดของขดลวดและฉนวนหม้อแปลงทดสอบ 100 kV 30 kVA	79
5.3 รายละเอียดของแกนเหล็กหม้อแปลงทดสอบ 100 kV 30 kVA	79
5.4 ตัวถังหม้อแปลงทดสอบ 100 kV 30 kVA	79
5.5 ผลการทดสอบหม้อแปลงทดสอบ 100 kV 30 kVA	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันอุปกรณ์แรงสูงในประเทศไทยมีการผลิตอยู่เป็นจำนวนมากและจะต้องมีการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าเพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดหรือมาตรฐาน กล่าวคือ อุปกรณ์ไฟฟ้าจะต้องใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย เมื่อนำไปใช้งานต้องสามารถคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ ซึ่งในการทดสอบจำเป็นต้องใช้หม้อแปลงทดสอบ และในการทดสอบทั่วไป ๆ ไป หม้อแปลงจะทำงานได้ถึงประมาณ 60 kV จากนั้นจะเริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วน ซึ่งในการทดสอบสายเคเบิลใต้ดินของระบบ 33 kV จะต้องทำการทดสอบที่ 70 kV ซึ่งได้เกิดดิสชาร์จบางส่วนแล้วอาจส่งผลให้มีการเบรกดาวน์เกิดขึ้นได้ ดังนั้นส่วนใหญ่จะเป็นการสั่งซื้อจากต่างประเทศเนื่องจากมีประสิทธิภาพดี แต่มีราคาแพง ซึ่งในความเป็นจริงนั้นบริษัทผลิตหม้อแปลงภายในประเทศสามารถผลิตหม้อแปลงทดสอบที่มีประสิทธิภาพขึ้นเองได้

ด้วยเหตุนี้จึงเป็นแนวคิดให้ออกแบบหม้อแปลงทดสอบไฟฟ้าแรงสูงขนาดพิกัด 100 kV 30 kVA เพื่อใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงตามมาตรฐานกำหนด โดยเป้าหมายหลักคือต้องการให้ใช้งานที่ 100 kV โดยไม่เริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วน อีกทั้งยังใช้เป็นสื่อการเรียนรู้สำหรับผู้ที่ต้องการศึกษาเกี่ยวกับหม้อแปลงทดสอบไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งการที่จะทำงานที่ 100 kV โดยไม่เกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้นนั้นจำเป็นต้องมีการคำนวณจนอย่างละเอียดถี่ถ้วน พร้อมทั้งจำลองด้วยโปรแกรมที่สามารถหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าก่อนที่จะนำไปทดสอบในลำดับถัดไปเพื่อใช้งานจริง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบไฟฟ้าแรงสูงขนาดพิกัด 100 kV 30 kVA
- 1.2.2 ใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีพิกัดสูงถึง 100 kVA โดยไม่เกิดดิสชาร์จบางส่วน
- 1.2.3 ใช้เป็นสื่อการเรียนรู้สำหรับผู้ที่ต้องการศึกษาเกี่ยวกับหม้อแปลงทดสอบไฟฟ้าแรงสูง

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการออกแบบและส่วนประกอบหม้อแปลงทดสอบ
- 1.3.2 ออกแบบโครงสร้างหม้อแปลงทดสอบไฟฟ้าแรงสูงขนาดพิกัด 100 kV 30 kVA
- 1.3.3 ประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบไฟฟ้าแรงสูงขนาดพิกัด 100 kV 30 kVA
- 1.3.4 ทดสอบลักษณะและสมบัติการใช้งานตามที่มาตรฐาน IEC กำหนด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอวิธีออกแบบและประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบขนาดพิกัด 100 kV 30 kVA เนื่องจากประเทศไทยการออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบยังไม่เป็นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ห้ามทำซ้ำโดยไม่ขออนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

แพร่หลายมากนัก ดังนั้นผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้สามารถนำไปศึกษาและประยุกต์ใช้ในการออกแบบและประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบได้

1.4.2 ส่วนใหญ่หม้อแปลงทดสอบนั้นจะสั่งซื้อจากต่างประเทศ เนื่องจากมีประสิทธิภาพที่ดี แต่ผู้ผลิตมีเพียงไม่กี่รายเท่านั้น ซึ่งหากประเทศไทยสามารถออกแบบและผลิตหม้อแปลงทดสอบได้จะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายจากภานานาเข้าและค่าขนส่ง

1.4.3 สามารถใช้งานหม้อแปลงทดสอบที่แรงดันไฟฟ้า 100 kV โดยที่ยังไม่เริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วน

1.4.4 ใช้เป็นสื่อการเรียนรู้สำหรับผู้ที่ต้องการศึกษาเกี่ยวกับหม้อแปลงทดสอบไฟฟ้าสูงแรง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

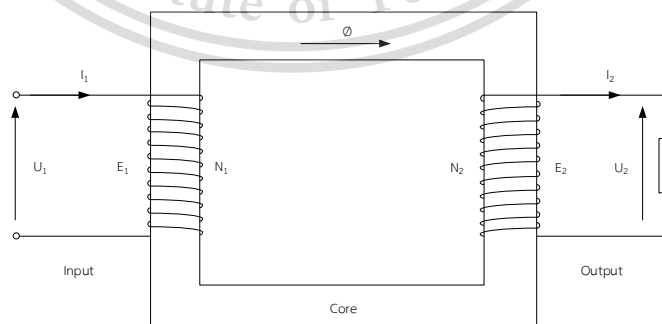
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการทำงานของหม้อแปลง

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากแรงดันระดับหนึ่งไปอีกระดับหนึ่ง อาจจะเป็นการเพิ่มแรงดันหรือลดแรงดันก็ได้ เช่นหม้อแปลงขดลวดแยก หลักการทำงานของหม้อแปลงจะอาศัยการเหนี่ยวนำของขดลวด ที่อยู่ในสนามแม่เหล็ก และมีขดลวดสองชุด โดยที่ชุดหนึ่งจะเป็นชุดทางด้านป้อนแรงดันเข้าและอีกชุดหนึ่งจะเป็นชุดทางด้านแรงดันออก พันอยู่กันแกนเหล็ก ดังรูปที่ 2.1 นอกจากนี้จะมีขดลวดและแกนเหล็กแล้วยังจะมีฉนวนซึ่งถือว่าเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในอุปกรณ์แรงสูงทุกชนิด

กำหนด	ϕ	คือ ฟลักซ์แม่เหล็ก
	N_1	คือ จำนวนรอบขดลวดด้านป้อนเข้า
	N_2	คือ จำนวนรอบขดลวดด้านจ่ายออก
	U_1	คือ แรงดันที่ป้อนเข้า
	U_2	คือ แรงดันที่ป้อนออก
	E_1	คือ แรงดันที่เหนี่ยวนำด้านป้อนเข้า
	E_2	คือ แรงดันที่เหนี่ยวนำด้านจ่ายออก
	I_1	คือ กระแสด้านป้อนเข้า
	I_2	คือ กระแสด้านป้อนออก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบวงจรแม่เหล็กไฟฟ้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำบนขดลวดเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์

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

เมื่อป้อนแรงดันกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ให้กับขดลวดทางด้านกำลังไฟฟ้าเข้าจะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กเป็นรูปคลื่นไซน์ด้วย

$$f(t) = f_{\max} \sin \omega t \quad (2.2)$$

จะได้แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดอีกชุดหนึ่งด้านจ่ายกำลังไฟฟ้าออกโดยเปลี่ยนไปตามเวลา คือ

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

จะเห็นว่าแรงดันเหนี่ยวนำ $e(t)$ จะมีมุมหน้าหน้าเส้นฟลักซ์แม่เหล็ก $\varphi(t)$ เป็นมุมทางไฟฟ้า 90° หรือเท่ากับ $\pi/2$ แรงเหนี่ยวนำเป็นค่า rms คือ

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

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

โดยที่ $f_{\max} = B_{\max} A$

จะได้สมการพื้นฐานของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดของหม้อแปลงคือ

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

2.2 หม้อแปลงทดสอบ

หม้อแปลงทดสอบเป็นหม้อแปลงที่ใช้สร้างแรงดันสูงเพื่อใช้สำหรับการทดสอบวัสดุฉนวนหรืออุปกรณ์ที่จะนำไปใช้ในระบบไฟฟ้าแรงสูง โดยทั่วไปจะเป็นแบบเฟสเดียวที่มีกำลังไฟฟ้าต่ำเมื่อเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแต่มีแรงดันสูง แรงดันทางด้านจ่ายออกจะขึ้นกับแรงดันทางด้านจ่ายเข้าซึ่งจะใช้เป็นหม้อแปลงปรับแรงดัน (regulator)

2.2.1 หม้อแปลงทดสอบจะกำหนดด้วย

- 1) แรงดันที่ป้อนเข้า (V_i) และแรงดันที่จ่ายออก (V_o)
- 2) กระแสที่ป้อนเข้า (I_i) และกระแสที่ป้อนออก (I_o)
- 3) กำลังไฟฟ้าที่กำหนดของหม้อแปลง (S)
- 4) แรงดันลัดวงจร (Short circuit voltage, E_{sc}) เมื่อเกิดวาบไฟตามผิว หรือ

เบรกดาวนที่วัสดุทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

5) ระดับแรงดันที่โคโรนาเริ่มเกิด (Corona inception level)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) ความถี่ (f)

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.2.2 ขนาดของแรงดันที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ

การกำหนดขนาดแรงดันทดสอบ ขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันทดสอบสูงสุดที่มีโอกาสที่จะใช้งานจริง อย่างน้อยที่สุดต้องสูงกว่าค่าแรงดันที่คงทนอยู่ได้ของวัสดุทดสอบ ที่ใช้กับแรงดันที่กำหนดให้ดังแสดงในตารางที่ 1.1-1.2 ซึ่งแรงดันที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบควรจะสูงกว่าแรงดันทดสอบประมาณ 10-20%

ทางด้านแรงดันป้อนเข้าของหม้อแปลงทดสอบด้านแรงดันต่ำ ควรจะเลือกกำหนดตามระบบแรงดันที่มีให้ เช่น 220 380 หรือ 500 V ในกรณีที่หม้อแปลงทดสอบที่มีกำลังสูง ๆ เช่น 500kVA ขึ้นไป แรงดันป้อนเข้าอาจจะมีค่าสูงถึง 2,000 หรือ 3,000 V

รูปคลื่นแรงดันทดสอบกระแสสลับที่เปลี่ยนไปตามเวลา $U(t)$ อาจจะแตกต่างไปจากรูปคลื่นไซน์ได้ ฉะนั้น ลักษณะของแรงดันทดสอบอาจอธิบายได้ด้วยค่ายอดและค่า rms ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.6

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

เมื่อ T คือเวลาช่วงคาบของแรงดันรูปคลื่นแรงดันนี้อาจแตกต่างไปจากรูปคลื่นไซน์ได้ไม่เกิน 5% ของค่ายอดรูปคลื่นพื้นฐาน

2.2.3 กระแสของหม้อแปลงทดสอบ

กระแสที่กำหนดหม้อแปลงทดสอบ ขึ้นอยู่กับวัสดุทดสอบ กล่าวคือ วัสดุทดสอบบางชนิดใช้กระแสมาก บางชนิดใช้กระแสน้อย ฉะนั้นหม้อแปลงทดสอบจะต้องสามารถที่จะจ่ายกระแสให้กับวัสดุทดสอบได้ ตัวอย่างกระแสสูงสุดที่ใช้ทดสอบดังตารางที่ 2.1

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.2.4 ขนาดกำลังไฟฟ้าที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ

การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของวัสดุหรืออุปกรณ์ จะต้องทดสอบโดยการติดตั้งให้เหมือนหรือใกล้เคียงกับสภาพใช้งานจริง แรงดันควรเป็นรูปไซน์อุปกรณ์หรือวัสดุฉนวนทั้งหลายในด้านไฟฟ้าแรงสูง อาจถือได้ว่ามีลักษณะเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า คือ มีค่าเก็บประจุ ฉะนั้นโหนดของหม้อแปลงจึงเป็นตัวเก็บประจุ กระแสจึงเป็นแบบเก็บประจุ (Capacitive current) หากการฉนวนไม่ดีพอทนต่อแรงดันไม่ได้ก็จะเกิดการเบรกดาวน์ สปาร์ก เจาะทะลุ ลัดวงจร กระแสลัดวงจรจะต้องมากพอ เพื่อให้สามารถที่จะสังเกตเห็นถึงความบกพร่องที่เกิดขึ้นได้ ฉะนั้น กำลังของหม้อแปลงและกำลังไฟฟ้ลัดวงจรต้องให้สอดคล้องกัน

ความจุทางไฟฟ้าหรือค่าเก็บประจุ ที่เป็นโหนดของหม้อแปลงประกอบด้วยความจุทางไฟฟ้าทดสอบ อุปกรณ์วัด และสายต่อ รวมทั้งค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์ (Stray capacitance) ฉะนั้นกำลังไฟฟ้าที่จะต้องใช้ในการทดสอบจะต้องใช้ในการทดสอบจะคำนวณได้จากสมการ

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

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

โดย S คือ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ (kVA)

C คือ ค่าความจุไฟฟ้ารวม (pF)

U_t คือ แรงดันทดสอบ (kV_{rms})

f คือ ค่าความถี่ของแรงดัน (Hz)

กำลังไฟฟ้าที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ ควรจะต้องมีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าที่จะต้องป้อนให้กับโหนด คือ จะต้องคำนึงถึงแฟกเตอร์ปลอดภัย (safety factor) เพื่อให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงทดสอบใช้ได้นาน ๆ ค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบอาจประมาณได้จากตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุฉนวนและอุปกรณ์ไฟฟ้า

วัสดุฉนวนและอุปกรณ์ไฟฟ้า	ค่าความจุไฟฟ้า(pF)
-ลูกถ้วยฉนวนธรรมดา	10-100
-ปลอกฉนวนตัวนำ	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

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการ โทร. 0-2327-8141

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.2.5 โครงสร้างและฉนวนหม้อแปลงทดสอบ

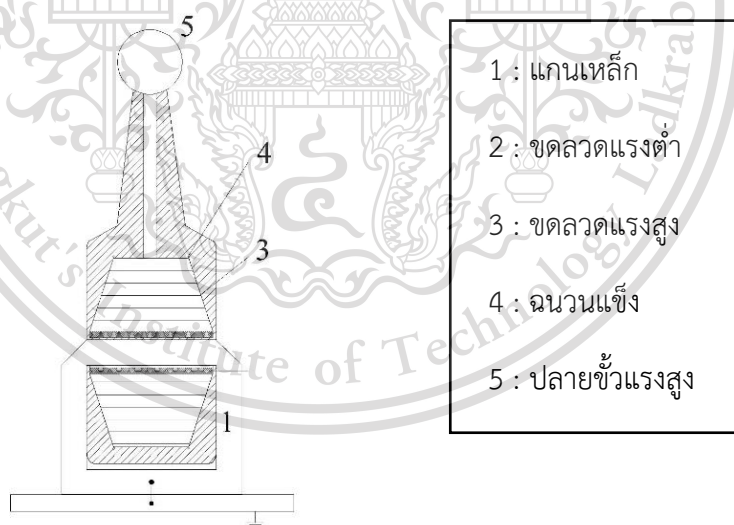
หม้อแปลงทดสอบทั่วไปเป็นเฟสเดียว ประกอบด้วยขดลวด 2 ขด คือ ป้อนแรงดันเข้า (ด้านแรงดันต่ำ) และขดจ่ายแรงดันออก(ด้านแรงดันสูง) ขดลวดทั้งสองจะพันอยู่บนหม้อแปลงธรรมดา คือ การฉนวน ถ้าแรงดันไม่เกิน 100 kV การฉนวนอาจเป็นแบบแห้ง หรือหุ้มขดลวดและแกนเหล็กด้วยสารสังเคราะห์ได้ เช่น อีพ็อกซี ดังรูปที่ 2.2 และ 2.3 หม้อแปลงที่มีแรงดันสูงขึ้น ขดลวดแต่ละขดรับแรงดัน 50 ถึง 100 kV การฉนวนจะเป็นกระดาษชุบน้ำมัน แกนเหล็กและขดลวดจะจุ่มอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง ที่บรรจุอยู่ในถังโลหะหรือถังฉนวน

1. แบบหุ้มฉนวนแห้ง

แกนเหล็กจะต่อลงดิน ขดลวดแรงดันต่ำจะพันติดกับแกนเหล็ก ขดลวดแรงสูงจะพันทับขดลวดแรงต่ำ นั่นคือ ขดลวดแรงสูงจะอยู่ห่างแกนเหล็ก ขดลวดรอบที่มีแรงดันสูงจะอยู่ห่างจากแกนเหล็กหรือส่วนที่ต่อลงดินมากขึ้น การฉนวนจะเพิ่มขึ้นตามแรงดัน

2. แบบจุ่มน้ำมัน

ขดลวด แกนเหล็ก และส่วนประกอบทั้งหมดจะจุ่มอยู่ในน้ำมันซึ่งบรรจุอยู่ในถังโลหะหรือฉนวน ในกรณีที่ใช้ถังโลหะต้องใช้ปลอกฉนวนนำสายแรงสูงออกนอกถัง ถ้าใช้ถังฉนวนจะไม่ต้องใช้ปลอกฉนวนนำสายออกด้านนอก

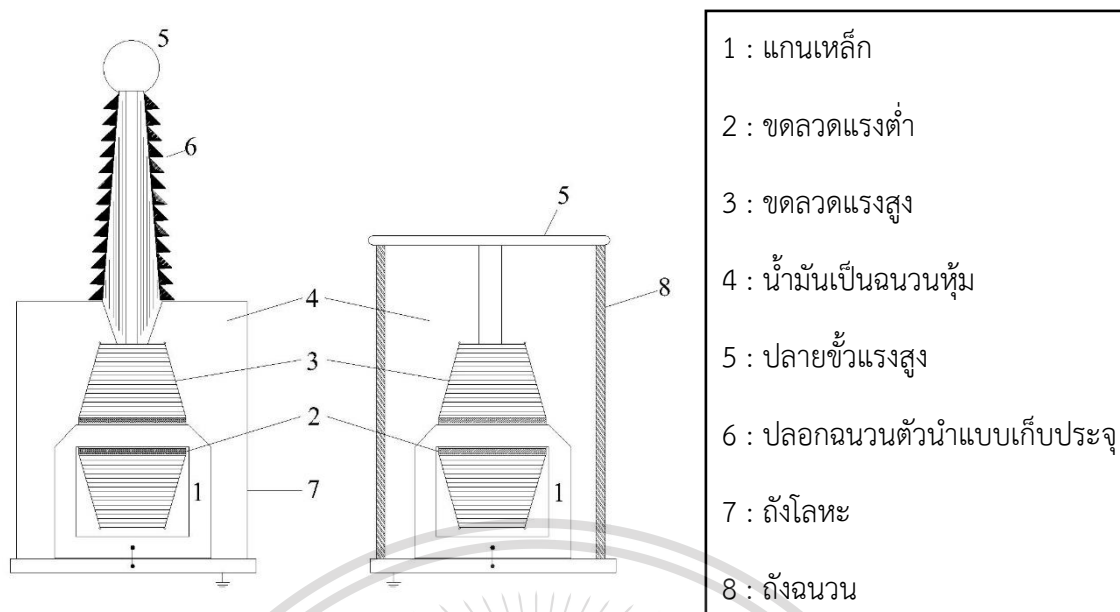


รูปที่ 2.2 หม้อแปลงแบบหุ้มด้วยฉนวนแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.3 หม้อแปลงแบบจุ่มน้ำมัน

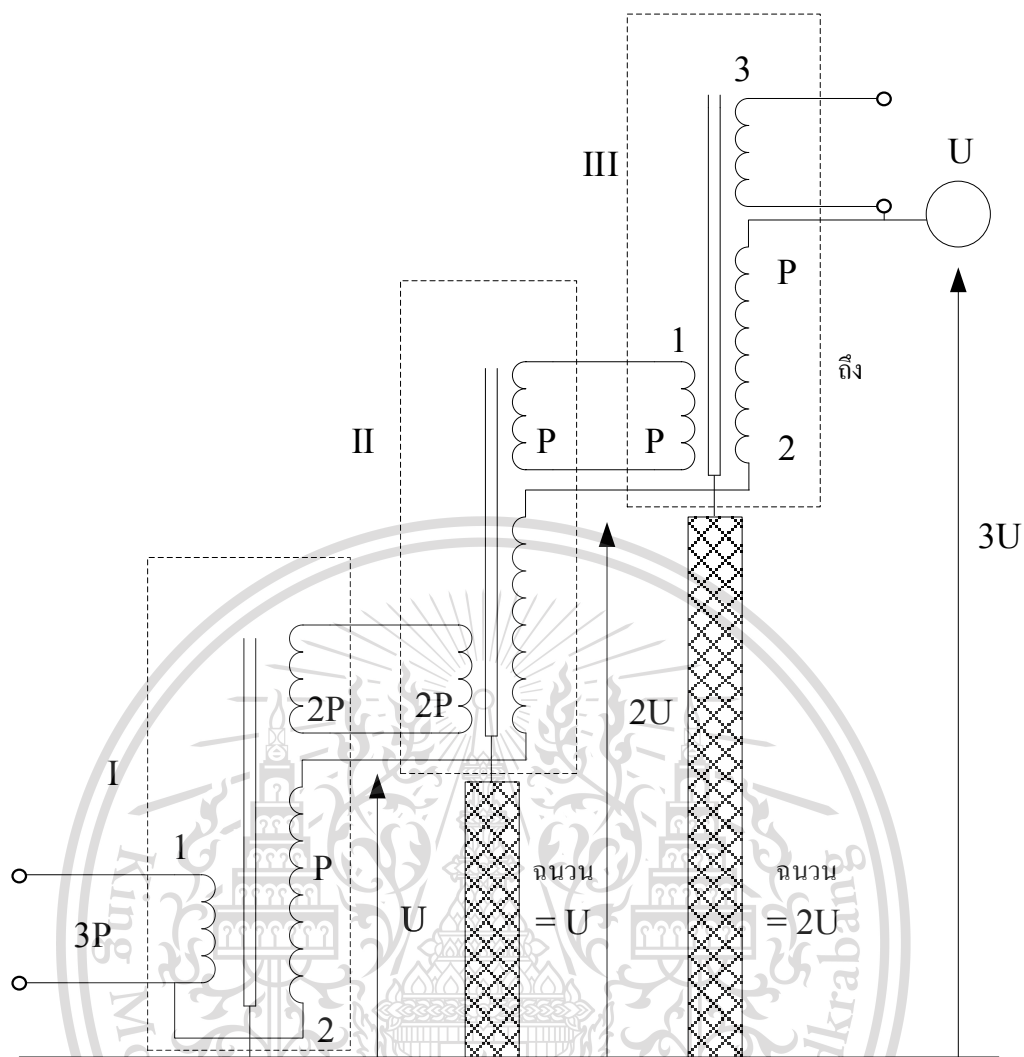
2.2.6 หม้อแปลงต่อแบบชั้นบันได

ในกรณีที่ต้องการใช้แรงดันสูงขึ้นไฟ มักจะใช้หลาย ๆ ตัวมาเสริมกันเรียกว่าต่อแบบชั้นบันได จะต้องใช้หม้อแปลงแบบที่มีขดลวดต่อควบคุม (coupling winding) การฉนวนหม้อแปลงเมื่อต่อแบบชั้นบันได 3 ชั้น ดังรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.4 ไดอะแกรมการต่อหม้อแปลงทดสอบแบบขั้นบันได

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 3

การออกแบบสร้างหม้อแปลงทดสอบ

3.1 การออกแบบแกนเหล็ก

แกนเหล็กทำหน้าที่เป็นทางผ่านของเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งแผ่นเหล็กที่ใช้ทำหม้อแปลงจะมี ส่วนผสมของซิลิกอนเพื่อรักษาความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กและแกนเหล็กจะสร้างจากแผ่น เหล็กบางเรียงต่อกันหลายชั้น เพื่อลดการสูญเสียบนแกนเหล็กที่ส่งผลให้เกิดความร้อนขึ้นหรือที่ เรียกว่ากระแสไหลวนบนแกนเหล็ก ซึ่งความหนาของแผ่นเหล็กคือ 0.27 mm

การทดสอบนั้นรูปคลื่นแรงดันทดสอบต้องใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์มากที่สุด จึงใช้ค่าความ หนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก B_c เท่ากับ 1 Wb/m^2 เนื่องจากค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่ เหล็กในแกนเหล็ก B_c จะอิ่มตัวประมาณ 1.4 Wb/m^2 พื้นที่ภาคตัดขวางแกนเหล็กสามารถคำนวณ ได้จากสมการ 3.1

$$A_{Fe} = C \sqrt{S_n / f} \quad (3.1)$$

เมื่อ C คือ ค่าฟอร์มแฟกเตอร์ของหม้อแปลงซึ่งจากโรงงานจะใช้ค่าประมาณ $7 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{J}^{-1/2}$ สำหรับหม้อแปลงแบบน้ำมัน

$$\begin{aligned} A_{Fe} &= 7 \times 10^{-4} \sqrt{30 \times 10^3 / 50} \\ &= 0.01715 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

การออกแบบหน้าตัดแกนเหล็กทำเป็นทั้งหมด 8 ชั้น คือ รูปสี่เหลี่ยมภายในวงกลมเนื่องจาก จะสามารถใช้ประสิทธิภาพได้สูงกว่าพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม และเหตุผลทางกายภาพทำให้ สามารถพันขดลวดเป็นวงกลมได้ง่ายขึ้น ลดการเสียดสีระหว่างขดลวดกับแกนเหล็ก และขณะใช้งาน เมื่อเกิดแรงระหว่างขดลวดก็绝不会ทำให้ขดลวดเสียรูป แต่การตัดแกนเหล็กที่มีจำนวนชั้นมากเกินไป จะทำให้ยากต่อการเรียงแกนเหล็ก ซึ่งประเมินจำนวนชั้นนั้นจะประเมินจากแกนเหล็กที่มีอยู่ภายใน โรงงาน ความยุ่งยากในการตัดและเรียงแกนเหล็ก

ในการใช้แกนเหล็กที่ทำด้วยแผ่นเหล็กบางมาอัดซ้อนกันนี้ จะมีผลทำให้ความหนาแน่นเส้น แรงแม่เหล็กน้อยกว่าการใช้แผ่นเหล็กแบบหล่อเป็นชิ้นเดียวดังนั้นค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่ เหล็กจะเปลี่ยนแปลงตามความหนาของแผ่นเหล็ก ซึ่งแผ่นเหล็กขนาด 0.27 mm ใช้ค่า Stacking factor เท่ากับ 0.97

ค่า Stacking factor แผ่นเหล็กชนิด M-4 จากบริษัทผู้ผลิตมีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ใช้ค่าแฟกเตอร์แกนเหล็กในวงกลม

$$F_{CU} = 0.92\%$$

เส้นผ่านศูนย์กลางภาคตัดขวางของแกนเหล็กหาได้จากสมการ 3.2

$$\begin{aligned} D &= \sqrt{\frac{A_{Fe} \times 4}{\pi \times F_{cu} \times F_s}} \\ &= \sqrt{\frac{0.01715 \times 4}{\pi \times 0.92 \times 0.97}} \\ &= 0.1523 \text{ m} \end{aligned} \quad (3.2)$$

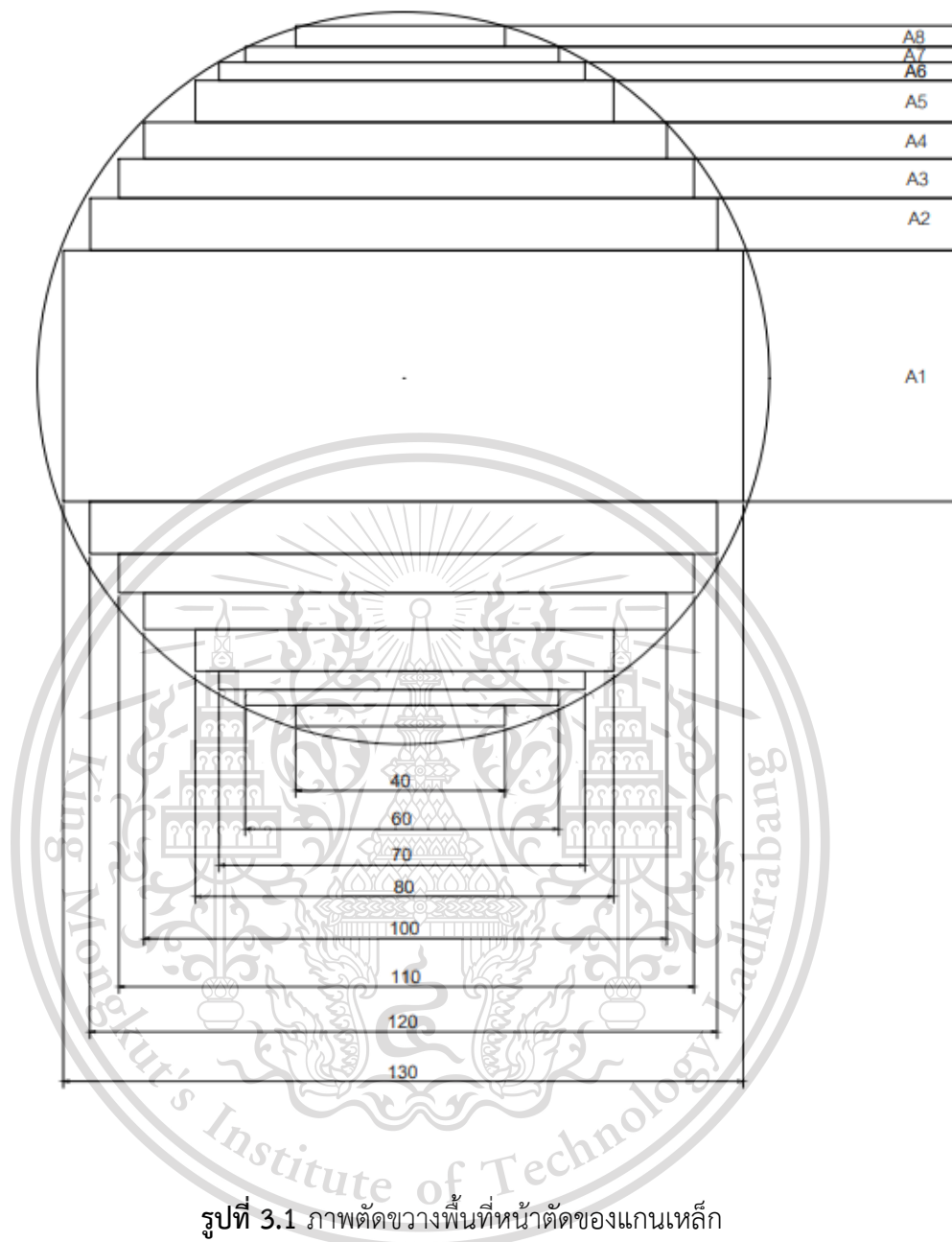
จากการคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางภาคตัดขวางของแกนเหล็กมีค่าเท่ากับ 156.4 mm แต่เนื่องจากการใช้แกนเหล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากนั้นจะทำให้ต้องใช้ขดลวดจำนวนมาก จากการสอบถามบริษัทเกี่ยวกับราคาขดลวดกับแกนเหล็กได้ข้อมูลว่าแกนเหล็กมีราคาที่สูง จึงพิจารณาว่าจะลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนเหล็กและเพิ่มจำนวนรอบของขดลวด ซึ่งพิจารณาร่วมกับรูปร่างของ หม้อแปลง จากการคำนวณหลายครั้ง ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภาคตัดขวางของแกนเหล็กมีค่าเท่ากับ 140 mm

หน้าเหล็กมีขนาด 130 mm 120 mm 110 mm 100 mm 80 mm 70 mm 60 mm และ 40 mm ตามลำดับชั้น ซึ่งจะพิจารณาจากขนาดเครื่องตัดเหล็กที่มีอยู่ในโรงงาน ซึ่งจะแสดงเป็นภาคตัดขวางสี่เหลี่ยมในวงกลมได้ดังรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.1 ภาพตัดขวางพื้นที่หน้าตัดของแกนหลัก

$$A1 = \sqrt{D^2 - 130^2} = \sqrt{140^2 - 130^2}$$

$$= 51.96 \text{ mm}$$

เลือกใช้ 48 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$2A_2 = \sqrt{D^2 - 120^2} - A_1 = \sqrt{140^2 - 120^2} - 48$$

$$= 24.11$$

$$A_2 = 12.055 \text{ mm}$$

เลือกใช้ 10 mm

$$2A_3 = \sqrt{D^2 - 110^2} - (A_1 + 2A_2)$$

$$= \sqrt{140^2 - 110^2} - (48 + 20)$$

$$= 18.60$$

$$A_3 = 9.3 \text{ mm}$$

เลือกใช้ 7.5 mm

$$2A_4 = \sqrt{D^2 - 100^2} - (A_1 + 2A_2 + 2A_3)$$

$$= \sqrt{140^2 - 100^2} - (48 + 20 + 15)$$

$$= 14.98$$

$$A_4 = 7.49 \text{ mm}$$

เลือกใช้ 7 mm

$$2A_5 = \sqrt{D^2 - 80^2} - (A_1 + 2A_2 + 2A_3 + 2A_4)$$

$$= \sqrt{140^2 - 80^2} - (48 + 20 + 15 + 14)$$

$$= 17.89$$

$$A_5 = 8.95 \text{ mm}$$

เลือกใช้ 8 mm

$$2A_6 = \sqrt{D^2 - 70^2} - (A_1 + 2A_2 + 2A_3 + 2A_4 + 2A_5)$$

$$= \sqrt{140^2 - 70^2} - (48 + 20 + 15 + 14 + 16)$$

$$= 8.24$$

$$A_6 = 4.12 \text{ mm}$$

เลือกใช้ 3.5 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$\begin{aligned}
 2A7 &= \sqrt{D^2 - 60^2} - (A1 + 2A2 + 2A3 + 2A4 + 2A5 + 2A6) \\
 &= \sqrt{140^2 - 60^2} - (48 + 20 + 15 + 14 + 16 + 7) \\
 &= 6.49
 \end{aligned}$$

$$A7 = 3.25 \text{ mm}$$

เลือกใช้ 3 mm

$$\begin{aligned}
 2A8 &= \sqrt{D^2 - 60^2} - (A1 + 2A2 + 2A3 + 2A4 + 2A5 + 2A6 + 2A7) \\
 &= \sqrt{140^2 - 60^2} - (48 + 20 + 15 + 14 + 16 + 7 + 6) \\
 &= 8.16
 \end{aligned}$$

$$A8 = 4.08 \text{ mm}$$

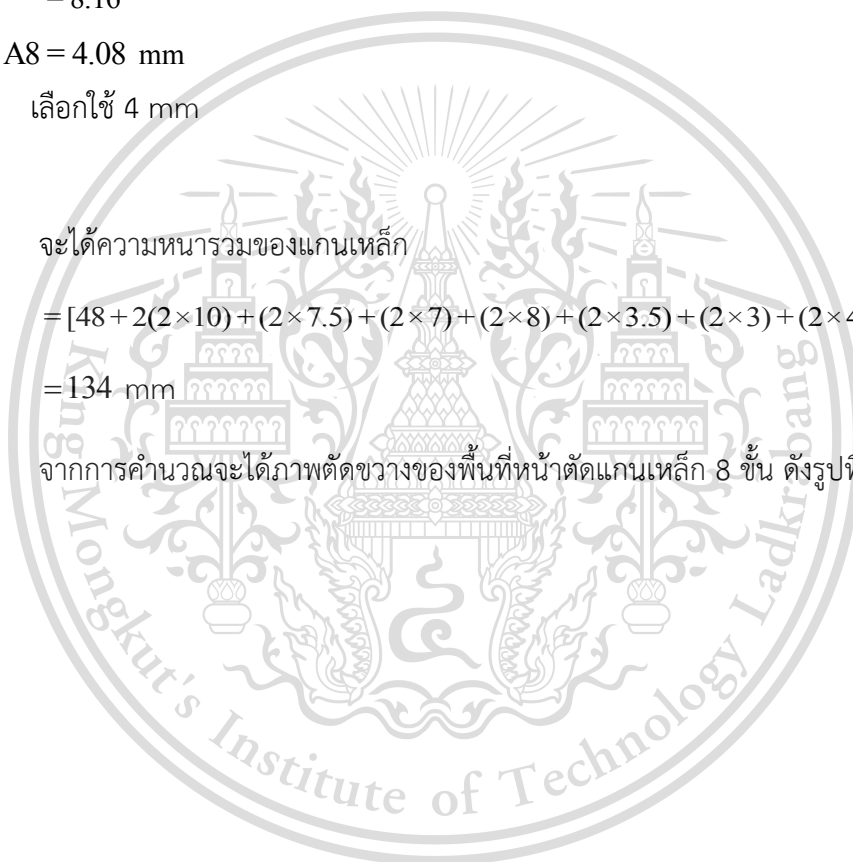
เลือกใช้ 4 mm

ดังนั้น

จะได้ความหนารวมของแกนเหล็ก

$$\begin{aligned}
 &= [48 + 2(2 \times 10) + (2 \times 7.5) + (2 \times 7) + (2 \times 8) + (2 \times 3.5) + (2 \times 3) + (2 \times 4)] \\
 &= 134 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

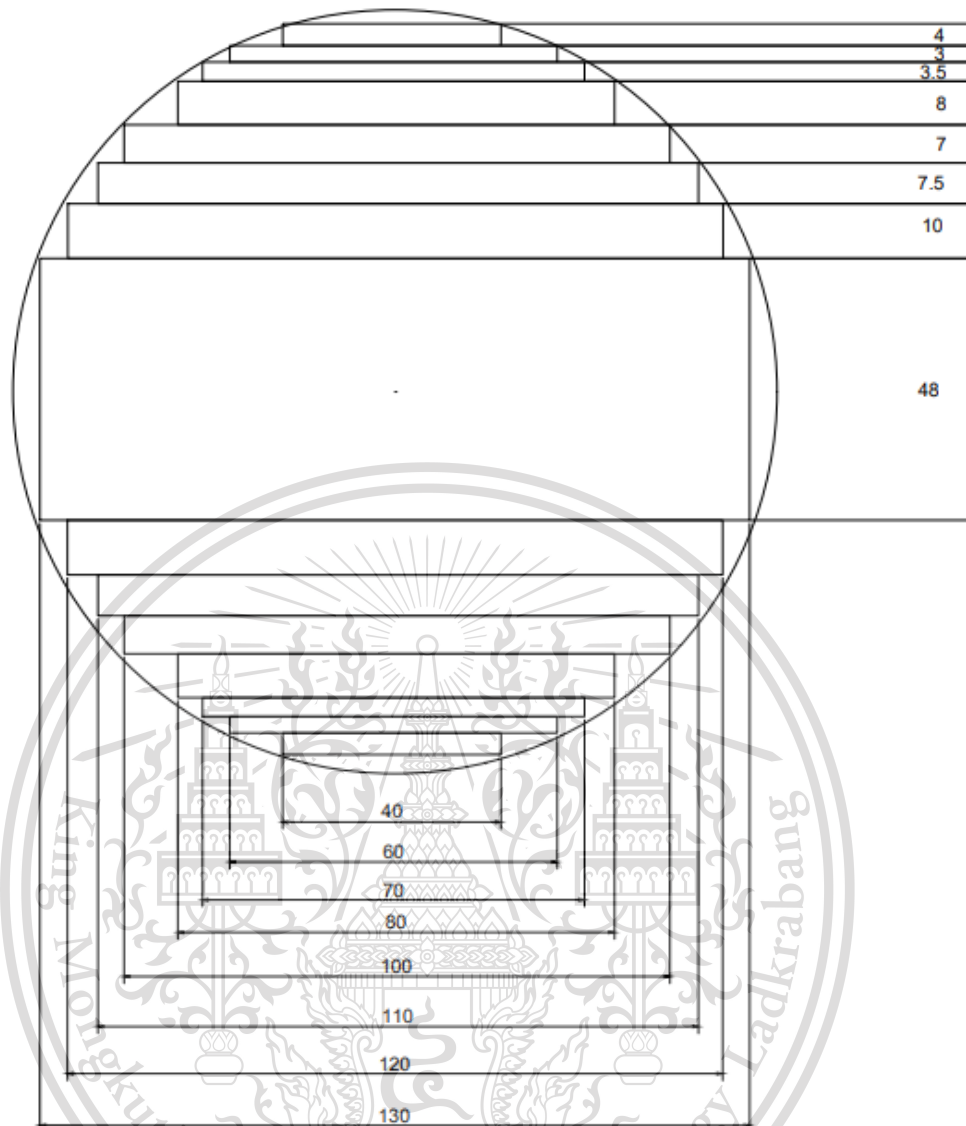
จากการคำนวณจะได้ภาพตัดขวางของพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก 8 ชั้น ดังรูปที่ 3.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.2 ภาพตัดขวางพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กหลังคำนวณความหนาของการเรียงเหล็ก

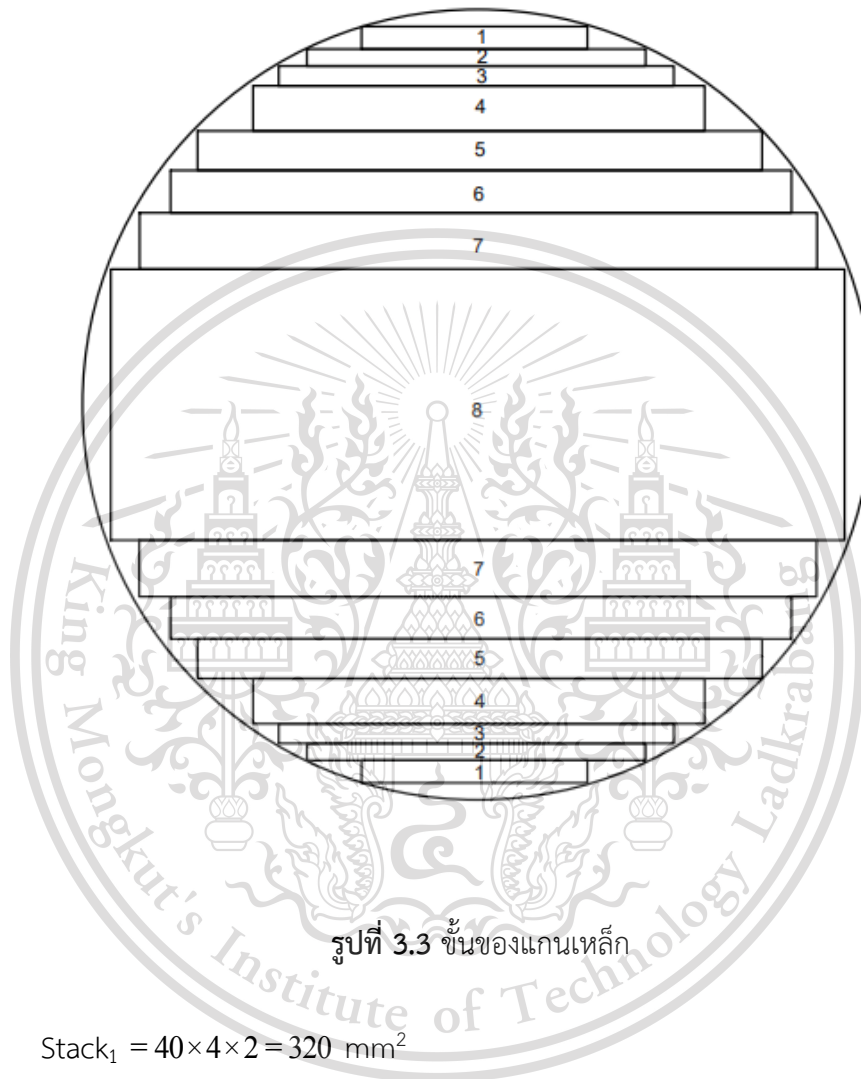
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.1.1 คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดและความหนาของแกนเหล็ก

การคำนวณพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กจะแบ่งแกนเหล็กออกเป็น 8 ส่วน ตามจำนวนชั้นของแผ่นเหล็ก ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ชั้นของแกนเหล็ก

$$\text{Stack}_1 = 40 \times 4 \times 2 = 320 \text{ mm}^2$$

$$\text{Stack}_2 = 60 \times 3 \times 2 = 360 \text{ mm}^2$$

$$\text{Stack}_3 = 70 \times 3.5 \times 2 = 490 \text{ mm}^2$$

$$\text{Stack}_4 = 80 \times 8 \times 2 = 1,280 \text{ mm}^2$$

$$\text{Stack}_5 = 100 \times 7 \times 2 = 1,400 \text{ mm}^2$$

$$\text{Stack}_6 = 110 \times 7.5 \times 2 = 1,650 \text{ mm}^2$$

$$\text{Stack}_7 = 120 \times 10 \times 2 = 2,400 \text{ mm}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$Stack_g = 130 \times 48 = 6,240 \text{ mm}^2$$

∴ จะได้ความหนารวมของแกนเหล็ก

$$= 320 + 360 + 490 + 1,280 + 1,400 + 1,650 + 2,400 + 6,240$$

$$= 14,140 \text{ mm}^2$$

ดังนั้นขนาดพื้นที่หน้าตัดจริงของแกนเหล็ก

$$A_{Leg} = F_s \times A_M \quad (3.3)$$

$$= 0.97 \times 14,140$$

$$= 13,715.8 \text{ mm}^2$$

เส้นสนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก

$$\phi = B \times A_{Leg} \quad (3.4)$$

$$= 1 \times 13,715.8 \times 10^{-6}$$

$$= 0.0137 \text{ Wb}$$

แกนเหล็กที่ใช้เป็นแบบเชลล์ (Shell type transformer) ลักษณะของขดลวดจะพันที่แกนกลางของเหล็กและแกนเหล็กของหม้อแปลงจะต้องติดตั้งนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการฉนวนจะพันขดลวดแรงต่ำไว้ด้านใน และพันขดลวดแรงสูงไว้ด้านนอก

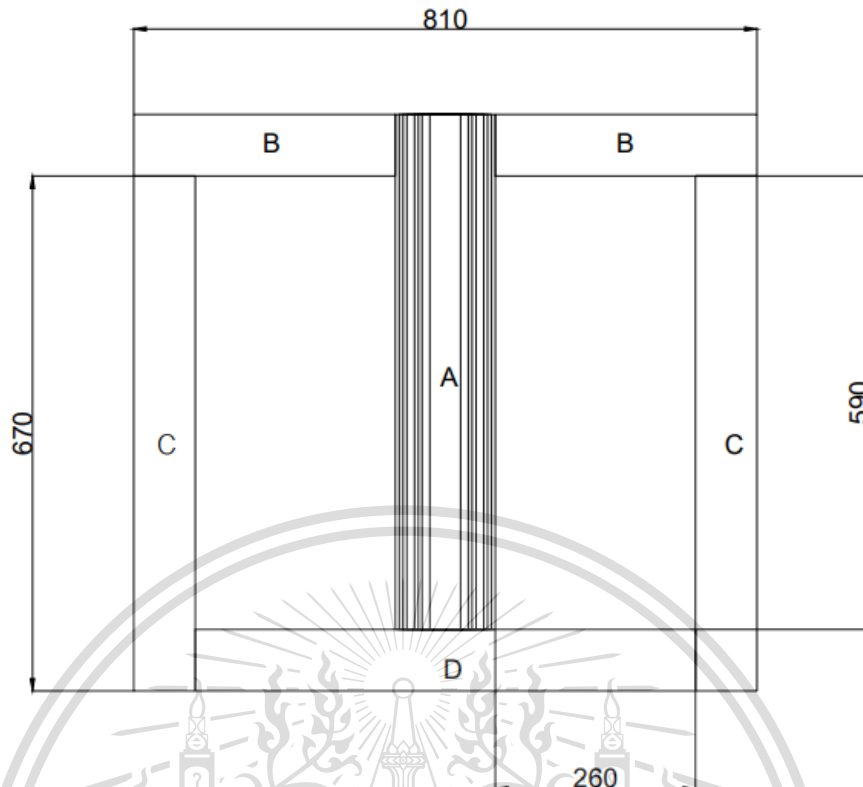
ความสูงของช่องหน้าต่างจะขึ้นอยู่กับความสูงของคอยล์แรงสูงซึ่งจากการคำนวณความสูงของคอยล์แรงสูงแต่ละขดลวดย่อย รวมกับความสูงของลิมจะได้ความสูงมีค่าเท่ากับ 390 mm ความต่างศักย์สูงสุดของขดลวดเมื่อเทียบกับแกนเหล็กมีค่า 100 kV_{rms} จากภาคผนวก ข.1 ความคงทนต่อสนามไฟฟ้าสูงสุดภายในน้ำมันหม้อแปลงมีค่า 30 kV_{rms}/mm ซึ่งจะต้องมีการเผื่อค่า safety factor 150% จากการสอบถามบริษัทผู้ผลิตได้มีการออกแบบไว้ที่ 1 kV_{rms}/mm เนื่องจากในการผลิตอาจมีฝุ่นละอองหรือวัสดุเข้าไปเจือปนในน้ำมันทำให้ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ในน้ำมันลดลง ดังนั้นจึงได้ออกแบบความสูงของช่องหน้าต่างมีค่าเท่ากับ 590 mm

ความกว้างของช่องหน้าต่างจะขึ้นอยู่กับความหนาของคอยล์แรงสูงหักด้วยรัศมีแกนเหล็กซึ่งมีค่าเท่ากับ 137.5 mm หลักการออกแบบจะคล้ายกับความสูงของช่องหน้าต่าง แต่ในแนวกว้างของช่องหน้าต่างจะมีการฉนวนที่น้อยกว่าแนวสูงจึงออกแบบความกว้างของช่องหน้าต่างมีค่าเท่ากับ 260 mm ดังรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.4 ขนาดหน้าตัดของแกนเหล็กและการกำหนดชั้นเหล็กที่จะตัด

การออกแบบแกนเหล็กนั้นจะแบ่งแกนเหล็กออกเป็น 4 แบบ โดยแผ่นเหล็กที่ใช้เป็นแผ่นเหล็ก silicon M-4 จากรูปด้านบนจะเห็นได้ว่าแผ่นเหล็กแบบ C และ D นั้น จะมีอยู่ขนาดเดียวแต่แผ่นเหล็กแบบ A และ B นั้นจะแบ่งออกเป็น 8 ขนาดตามจำนวนชั้นของแกนเหล็ก เพื่อให้สามารถใช้ประสิทธิภาพได้สูงกว่าพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม และเหตุผลทางกายภาพทำให้สามารถพันขดลวดเป็นวงกลมได้ง่ายขึ้น ลดการเสียดสีระหว่างขดลวดกับแกนเหล็ก และขณะใช้งานเมื่อเกิดแรงระหว่างขดลวดก็จะไม่ทำให้ขดลวดเสียรูป

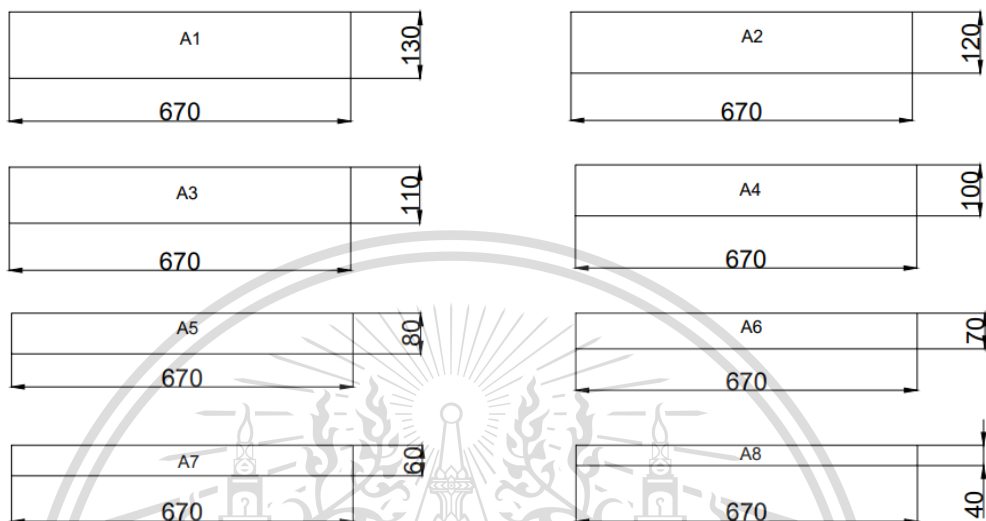
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.1.2 จำนวนและขนาดของแผ่นเหล็ก

การออกแบบแกนเหล็ก A จะมีขนาดต่างกันตามจำนวนชั้นของแกนเหล็ก (mm) ดังรูปที่ 3.5 และตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.5 แบบแผ่นเหล็กแบบ A

ตารางที่ 3.1 จำนวนและความหนาของแผ่นเหล็กแบบ A

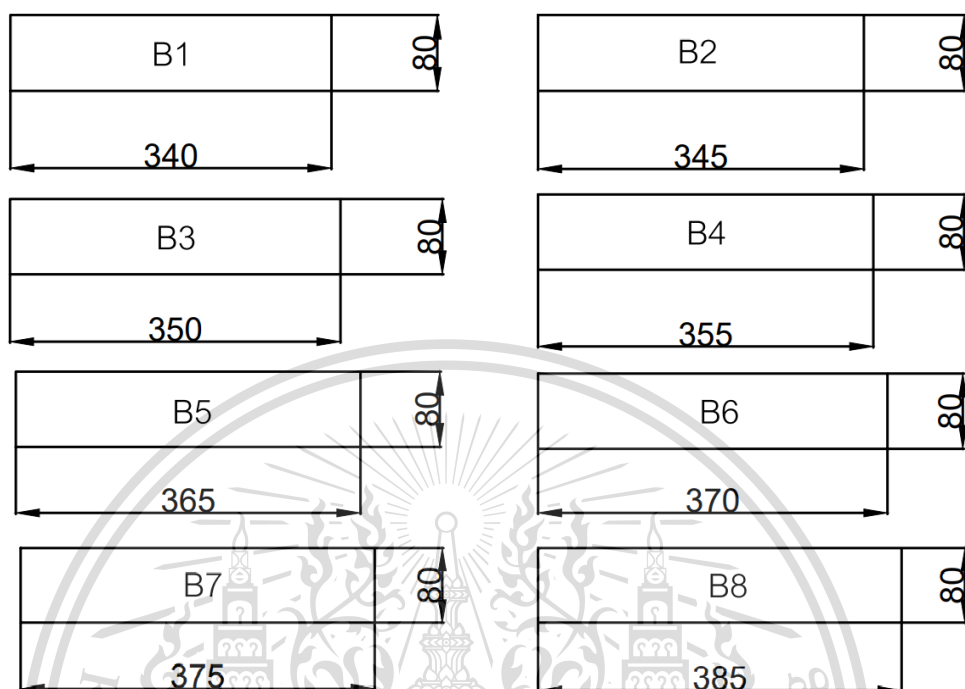
แบบ	ความหนา	จำนวน(แผ่น)
A1	48	180
A2	10×2	76
A3	7.5×2	56
A4	7×2	52
A5	8×2	60
A6	3.5×2	28
A7	3×2	20
A8	4×2	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การออกแบบแกนเหล็กแบบ B จะใช้ขนาดความกว้างเหล็กเท่ากับ 80 mm จะมีความยาวแตกต่างกันไปตามจำนวนชั้นของแผ่นเหล็กแบบ A ดังรูปที่ 3.6 และตารางที่ 3.2 (mm)



รูปที่ 3.6 แบบแผ่นเหล็กแบบ B

ตารางที่ 3.2 จำนวนและความหนาของแผ่นเหล็กแบบ B

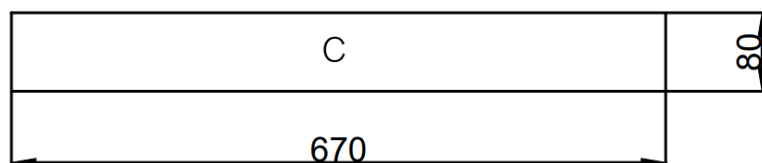
แบบ	ความหนา	จำนวน(แผ่น)
B1	48×2	360
B2	(10×2)×2	152
B3	(7.5×2)×2	112
B4	(7×2)×2	104
B5	(8×2)×2	120
B6	(3.5×2)×2	56
B7	(3×2)×2	40
B8	(4×2)×2	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การออกแบบแกนเหล็กแบบ C จะใช้ขนาดความกว้างเหล็กเท่ากับ 80 mm ดังรูปที่ 3.7 และตารางที่ 3.3

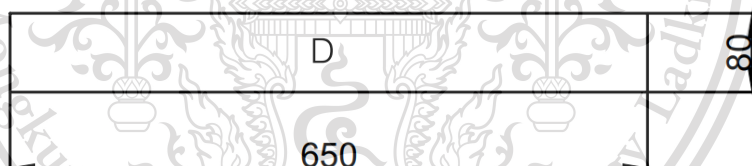


รูปที่ 3.7 แบบแผ่นเหล็กแบบ C

ตารางที่ 3.3 จำนวนและความหนาของแผ่นเหล็กแบบ C

แบบ	ความหนา	จำนวน(แผ่น)
C	134x2	1008

การออกแบบแกนเหล็กแบบ D จะใช้ขนาดความกว้างเหล็กเท่ากับ 80 mm ดังรูปที่ 3.8 และตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.8 แบบแผ่นเหล็กแบบ D

ตารางที่ 3.4 จำนวนและความหนาของแผ่นเหล็กแบบ D

แบบ	ความหนา	จำนวน(แผ่น)
D	134	504

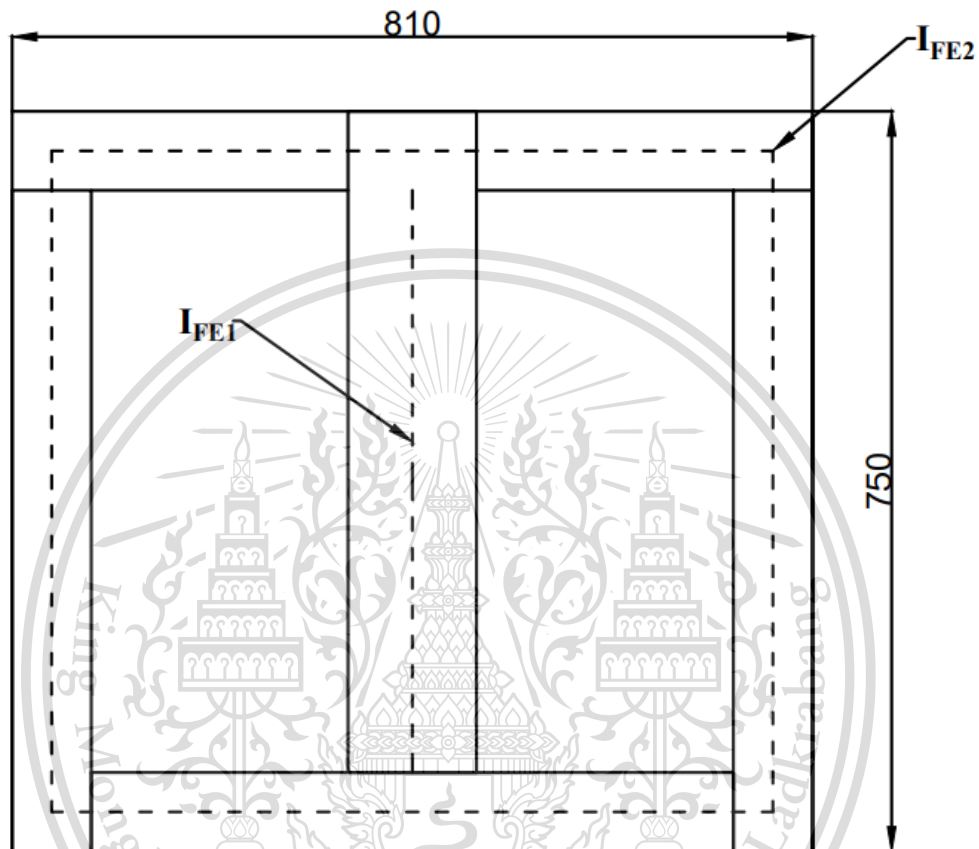
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.1.3 คำนวณความยาวรอบเฉลี่ย

แบ่งการคำนวณความยาวรอบเฉลี่ยออกเป็น 2 ลักษณะ คือบริเวณแกนเหล็กตรงกลางและแกนเหล็กส่วนที่เหลือเนื่องจากการออกแบบแกนเหล็กเป็นแบบเชลล์ (Shell type) ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ความยาวรอบเฉลี่ยของแกนเหล็ก

$$I_{FE1} = 750 - 160 \\ = 590 \text{ mm}$$

$$I_{FE2} = [2 \times (810 - 80)] + [2 \times (750 - 80)] \\ = 2,800 \text{ mm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.1.4 คำนวณปริมาตรและน้ำหนักของแกนเหล็ก

คำนวณปริมาตรแกนเหล็กจากสมการที่ 3.5 และ 3.6

$$\begin{aligned} V_{C1} &= A_{M1} \times F_s \times I_{FE1} \\ &= 14,140 \times 10^{-2} \times 0.97 \times 59 \\ &= 8,092.322 \text{ cm}^3 \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} V_{C2} &= A_{M2} \times F_s \times I_{FE2} \\ &= (80 \times 134) \times 10^{-2} \times 0.97 \times 280 \\ &= 29,115.520 \text{ cm}^3 \end{aligned} \quad (3.6)$$

ปริมาตรแกนเหล็กรวมจากสมการที่ 3.7

$$\begin{aligned} V_C &= V_{C1} + V_{C2} \\ &= 8,092.322 + 29,115.520 \\ &= 37,207.842 \text{ cm}^3 \end{aligned} \quad (3.7)$$

น้ำหนักแกนเหล็กคิดจากความหนาแน่น 7.65 g/cm^3 (ภาคผนวก ข.8)

$$\begin{aligned} W_C &= (V_C \times \text{Density}) / 1,000 \\ &= (37,207.842 \times 7.65) / 1,000 \\ &= 284.640 \text{ kg} \end{aligned} \quad (3.8)$$

3.1.5 คำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กหาได้จากกราฟผู้ผลิตเหล็กซิลิคอนซึ่งแสดงในภาคผนวกที่ ข.6 กำลังไฟฟ้าสูญเสียต่อน้ำหนักแกนเหล็กที่ 1 Wb/m^2 มีค่าเท่ากับ 0.32 W/kg

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียของแกนเหล็ก (P_C)

$$\begin{aligned} P_C &= 0.32 \times W_C \\ &= 0.32 \times 284.640 \\ &= 91.0848 \text{ W} \end{aligned} \quad (3.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.1.6 คำนวณ Exciting Volt-Ampere ในแกนเหล็ก

Exciting Volt-Ampere จากกราฟในภาคผนวก ข.7 ในแกนเหล็กที่ 1 Wb/m^2 มีค่าเท่ากับ 0.41 VA/kg ดังนั้น Exciting Volt-Ampere ในแกนเหล็ก (P_{VA})

$$\begin{aligned} P_{VA} &= 0.41 \times W_C & (3.10) \\ &= 0.41 \times 284.640 \\ &= 116.7024 \text{ VA} \end{aligned}$$

3.1.7 คำนวณกระแสป้อนเข้าขณะ No-Load

$$\begin{aligned} I_\phi &= P_{VA} / U_1 & (3.11) \\ &= 116.7024 / 220 \\ &= 0.5305 \end{aligned}$$

ตารางที่ 3.5 สรุปลักษณะของแกนเหล็ก

ชนิดของแกนเหล็ก	M-4
พื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็กตามรูปทรงเรขาคณิต (mm^2)	14,140
เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนเหล็กที่นำขดลวดมาพัน (mm)	140
พื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็กจริง (mm^2)	13,715.8
ความยาวเฉลี่ยของแกนเหล็ก (mm)	590
ปริมาตรของแกนเหล็ก (mm^3)	8,092.322
มวลของแกนเหล็ก (kg)	284.640
การวางแผ่นเหล็ก	2 ชั้น 2
ความหนาของแผ่นเหล็กแต่ละแผ่น (mm)	0.27
กำลังไฟฟ้าสูญเสียของแกนเหล็ก (W)	91.0848
Exciting Volt-Ampere ในแกนเหล็ก (VA)	116.7024
กระแสป้อนเข้าขณะ No-Load (A)	0.5305
ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (T)	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.2 การออกแบบขดลวดแรงต่ำ

ขดลวดแรงต่ำเป็นขดลวดที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดใหญ่กว่าขดลวดแรงสูงเนื่องจากมีกระแสที่มากกว่า โดยจะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมทองแดงที่ถูกห่อหุ้มไว้ด้วยกระดาษฉนวนหนา 0.3 mm ซึ่งในส่วนขั้นตอนการออกแบบและการคำนวณจะแสดงดังต่อไปนี้

3.2.1 จำนวนขนาดขดลวดแรงต่ำ

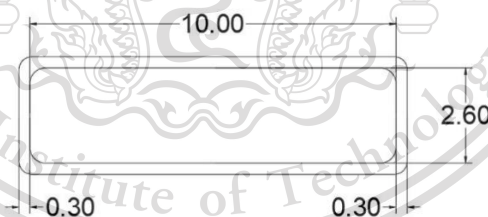
ในหม้อแปลงที่มีขนาดพิกัดไม่เกิน 50 kVA ที่ขดลวดมีการระบายความร้อนโดยการแทรกซึมของน้ำมันหม้อแปลง จะกำหนดความหนาแน่นกระแสในขดลวดอยู่ในช่วง 2.0 – 2.8 A/mm²

$$\begin{aligned} \text{ขนาดขดลวดแรงต่ำที่ } J = 2 \quad \text{จะได้} \quad A_{J=2.0} &= \frac{60}{2} \\ &= 30 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ขนาดขดลวดแรงต่ำที่ } J = 2.8 \quad \text{จะได้} \quad A_{J=2.8} &= \frac{60}{2.8} \\ &= 21.43 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

ดังนั้นขนาดพื้นที่ขดลวดแรงต่ำที่ใช้จะอยู่ในช่วง 21.43 ถึง 30 mm²

เมื่อทราบช่วงของขนาดพื้นที่ขดลวดแรงต่ำ จึงได้นำไปพิจารณาหาขนาดขดลวดที่มีความเหมาะสมกับช่วงดังกล่าวที่ได้คำนวณมา โดยในโรงงานผู้ผลิตได้มีขนาดของขดลวดแรงต่ำที่มีความเหมาะสมอยู่ที่ 2.6×10 mm ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ภาคตัดขนาดขดลวดแรงต่ำ

3.2.2 จำนวนรอบของขดลวดแรงต่ำ

$$\text{จำนวนขดลวดแรงต่ำ} = \frac{250}{4.44 \times 50 \times 13715.8 \times 10^{-6} \times 1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน 82 รอบ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.2.3 คำนวณความหนาแน่นกระแสในขดลวดแรงต่ำ

โดยจะเริ่มจากการคำนวณพื้นที่หน้าตัดของขดลวดแรงต่ำ $2.6 \times 10 = 26 \text{ mm}^2$ และนำมาลบออกด้วยส่วนมุมที่หายไปจะได้ $26 - 0.52 = 25.48 \text{ mm}^2$

$$\text{ดังนั้นจะได้ความหนาแน่นกระแสเป็น } \frac{60}{25.48} = 2.35 \text{ A/mm}^2$$

3.2.4 การพันขดลวดแรงต่ำ

จำนวนขดลวดมี 2 ชุดพันชุดละ 2 ชั้น เพื่อให้ขดลวดแรงต่ำสามารถต่อได้ทั้งอนุกรมและขนาน

ชุดที่ 1 : ชั้นที่ 1 41 รอบ

 ชั้นที่ 2 41 รอบ

รวม 82 รอบ

ชุดที่ 2 : ชั้นที่ 1 41 รอบ

 ชั้นที่ 2 41 รอบ

รวม 82 รอบ

3.2.5 คำนวณความหนาของขดลวดแรงต่ำ

โดยขดลวดแรงต่ำในแต่ละชั้นจะมีความหนาดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ความหนาขดลวดแรงต่ำ} &= (\text{ความหนาของขดลวดรวมฉนวน} \times \text{จำนวนชั้นการพัน}) \\ &\quad + \text{กระดาศฉนวนระหว่างชั้น} \\ &= [(2.6 + 0.6) \times 2] + (0.13) \\ &= 6.53 \text{ mm} \end{aligned}$$

3.2.6 ฉนวนในการพันขดลวดแรงต่ำ

1. กระดาศฉนวนแรงต่ำ 1.0x2 รอบ
2. กระดาศระหว่างชั้น(กาว) 0.13x1 แผ่น
3. กระดาศฉนวนระหว่างขดลวดแรงต่ำชุดที่ 1 กับ ชุดที่ 2 0.5x2 รอบ
4. ร่องน้ำมัน (1) 3.2x1 แผ่น
5. กระดาศคั่นระหว่างแรงสูง และแรงต่ำ (1) 0.5x3 รอบ
6. ซีลด์ทองแดง 0.5x1 รอบ
7. กระดาศคั่นระหว่างแรงสูง และแรงต่ำ (2) 0.5x15 รอบ
8. ร่องน้ำมัน (2) 3.2x1 แผ่น
9. กระดาศคั่นระหว่างแรงสูง และแรงต่ำ (3) 0.5x15 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังเป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันฯ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.2.7 เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของขดลวดแรงต่ำ

จากการคำนวณแกนเหล็กทำให้ทราบถึงเส้นผ่านศูนย์กลางแกนเหล็กเป็น 140 mm โดยมีการเผื่อระยะไว้สำหรับสวมขดลวดอีก 1.5 mm และจำเป็นต้องมีการพันลวดขดลวดแรงต่ำอีก โดยใช้กระดาษฉนวนที่มีความหนา 1 mm จำนวน 2 รอบ

$$\begin{aligned} \text{จะได้ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของขดลวดแรงต่ำ} &= 140 + (1.5 \times 2) + (2 \times 2) \\ &= 147 \text{ mm} \end{aligned}$$

3.2.8 เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขดลวดแรงต่ำ

การคำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขดลวดแรงต่ำสามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 จากการคำนวณที่กล่าวมาข้างต้นทำให้ทราบเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของขดลวดแรงต่ำมีค่าเป็น 147 mm โดยถัดมาจะทำการพันขดลวดแรงต่ำชุดที่ 1 ซึ่งมีความหนาเป็น 6.53 mm

$$\begin{aligned} \text{เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขดลวดแรงต่ำ} &= 147 + (6.53 \times 2) \\ &= 160.06 \text{ mm} \end{aligned}$$

ขั้นที่ 2 ทำการพันกระดาษฉนวนคั่นระหว่างขดลวดชุดที่ 1 และขดลวดชุดที่ 2 ซึ่งมีความหนา 0.5 mm จำนวน 2 รอบ เพื่อป้องกันการเชื่อมถึงกันระหว่างขดลวด หลังจากนั้นทำการพันขดลวดชุดที่ 2 หนา 6.53 mm ทับไปบนฉนวนคั่น

$$\begin{aligned} \text{เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขดลวดแรงต่ำ} &= 160.06 + (1 \times 2) + (6.53 \times 2) \\ &= 175.12 \text{ mm} \end{aligned}$$

ขั้นที่ 3 ทำการเสริมร่องน้ำมันเข้าไปซึ่งมีความหนา 3.2 mm เพื่อระบายความร้อนให้กับขดลวดแรงต่ำพันทับด้วยกระดาษสูงต่ำหนา 0.5 mm จำนวน 3 รอบ และนำซิลด์ทองแดงหนา 0.5 mm จำนวน 1 รอบมาพันทับอีกทีเพื่อช่วยให้กระแสไหลลงสู่กราวด์เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น

$$\begin{aligned} \text{เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขดลวดแรงต่ำ} &= 175.12 + (3.2 \times 2) + (1.5 \times 2) + (0.5 \times 2) \\ &= 185.52 \text{ mm} \end{aligned}$$

ขั้นที่ 4 พันกระดาษสูงต่ำสลับกับร่องน้ำมันซึ่งมีความหนา 0.5 mm จำนวน 15 รอบ และ 3.2 mm ตามลำดับ และปิดท้ายด้วยกระดาษสูงต่ำหนา 0.5 mm จำนวน 15 รอบ เพื่อใช้สำหรับการทนแรงดันไฟฟ้าในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์กับหม้อแปลง

$$\text{เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขดลวดแรงต่ำ} = 185.52 + (7.5 \times 2) + (3.2 \times 2) + (7.5 \times 2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ดังนั้นจะได้เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขดลวดแรงต่ำเป็น 221.92 mm แต่ในทางปฏิบัตินั้นได้มีการเผื่อระยะต่าง ๆ เพื่อให้เกิดความเหมาะสมมากที่สุดจึงทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขดลวดแรงต่ำมีค่าเป็น 235 mm

3.2.9 ความยาวของขดลวดแรงต่ำ

จาก 3.2.8 ได้เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขดลวดแรงต่ำเป็น 235 mm นำมาหารรัศมีเฉลี่ยได้เป็น

$$\begin{aligned} \text{รัศมีเฉลี่ย} &= \frac{(147 + 235)}{2 \times 2} \\ &= 95.5 \text{ mm} \end{aligned}$$

และนำมาหาความยาวรอบเฉลี่ย

$$\begin{aligned} \text{ความยาวรอบเฉลี่ย} &= 2 \times \pi \times r & (3.12) \\ &= 2 \times \pi \times 95.5 \\ &= 600.044 \text{ mm} \end{aligned}$$

ความต้านทานขดลวดแรงต่ำ

$$\begin{aligned} R &= \rho \frac{l}{A} & (3.13) \\ &= 0.0172 \times 10^{-6} \Omega \times \text{m} \times \frac{82 \times 600.044 \text{ mm}}{26 \text{ mm}^2} \\ &= 0.033 \Omega \end{aligned}$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดแรงต่ำ

$$\begin{aligned} \text{กรณีต่ออนุกรม} \quad P_{\text{CU,LV}} &= I_{\text{LV}}^2 R & (3.14) \\ &= 120^2 \times 0.033 \\ &= 475.2 \text{ W} \end{aligned}$$

กรณีต่อขนาน

$$\begin{aligned} P_{\text{CU,LV}} &= I_{\text{LV}}^2 R \\ &= 60^2 \times 0.033 \\ &= 118.8 \text{ W} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 3.6 สรุปลักษณะขดลวดแรงต่ำ

ชนิดของวัสดุ	ลวดทองแดง
ขนาดของตัวนำ (mm ²)	2.6×10
จำนวนรอบต่อขด (รอบ)	82
จำนวนขดลวด (ขด)	2
จำนวนชั้นต่อขด (ชั้น)	2
จำนวนรอบต่อชั้น	41
ความหนาแน่นระหว่างชั้น (mm)	0.13
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของขดลวด (mm)	147
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขดลวด (mm)	235
รัศมีเฉลี่ยของขดลวด (mm)	95.5
ความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวด (mm)	600.044
กำลังสูญเสียในขดลวด (W)	อนุกรม 475.2 , ขนาน 118.8

3.3 การออกแบบขดลวดแรงสูง

ขดลวดแรงสูงเป็นขดลวดที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็กกว่าขดลวดแรงต่ำ โดยจะใช้ลวดทองแดงอาบ
น้ำยา PVF ซึ่งในการพันขดลวดแรงสูงจะต้องมีร่องน้ำมันเพื่อให้ระบายความร้อนที่เกิดขึ้น โดยจะมี
ร่องน้ำมันทุก ๆ 17 ชั้น ซึ่งขั้นตอนการคำนวณจะแสดงดังต่อไปนี้

3.3.1 จำนวนรอบของขดลวดแรงสูง

$$\text{กรณีต่ออนุกรมที่ด้านแรงต่ำ} : \frac{164 \times 100,000}{500} = 32,800 \text{ รอบ}$$

$$\text{กรณีต่อขนานที่ด้านแรงต่ำ} : \frac{82 \times 100,000}{250} = 32,800 \text{ รอบ}$$

3.3.2 จำนวนรอบต่อขดลวดย่อย

$$\text{ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ขดลวดย่อย เมื่อคิดจำนวนรอบต่อขดลวดย่อย จะได้ } \frac{32,800}{4} = 8,200$$

รอบ/ขดลวดย่อย

3.3.3 จำนวนจำนวนรอบต่อชั้น

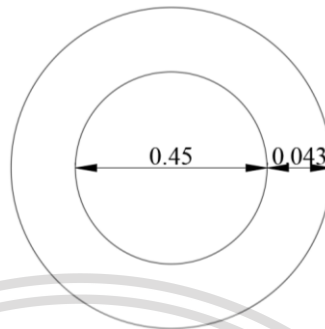
ซึ่งเส้นลวดที่ใช้ในด้านขดลวดแรงสูงจะเป็นลวดอาบน้ำยาเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.493 mm
ดังรูปที่ 3.11 แต่เนื่องจากการปฏิบัติงานจริงต้องมีการเผื่อเส้นผ่านศูนย์กลางไว้เป็น 0.5 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับปฏิบัติงานจริงขดลวดอาจไม่ชัดเจนตามที่ได้อ้างไว้ ซึ่ง 1 ขดลวดย่อย มีความกว้าง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

78 mm แต่ได้มีการเผื่อระยะหัวท้ายไว้ฝั่งละ 10 mm จะเหลือระยะที่ให้พื้นขดลวดคือ 58 mm จะได้ $\frac{58}{0.493} = 117.65$ รอบ หรือคำนวณแบบในเชิงปฏิบัติ $\frac{58}{0.5} = 116$ รอบ



รูปที่ 3.11 ภาพตัดขวางขดลวดแรงสูง

3.3.4 จำนวนจำนวนชั้น

การคำนวณชั้นของขดลวดต้องคำนึงถึงเรื่องแรงดันตกคร่อมระหว่างชั้นด้วยซึ่งจะมีการคำนวณในลำดับถัดไป ซึ่งยิ่งจำนวนชั้นมากก็ยิ่งดีจะส่งผลให้แรงดันตกคร่อมระหว่างชั้นลดลง เพราะเวลาฉนวนระหว่างชั้นรับแรงดันตกคร่อมระหว่างชั้นจริง ๆ จะมีค่าเป็น 2 เท่า เนื่องจากมีกระแสทั้งไปและกลับ $\frac{8,200}{116} = 70.68$ ชั้น คิดเป็น 71 ชั้น

3.3.5 จำนวนความหนาแน่นกระแสในขดลวดแรงสูง

โดยเริ่มจากการคำนวณพื้นที่หน้าตัดของขดลวดออบน้ำยาก่อน $\frac{0.45 \times 0.45}{4} \times \frac{22}{7} = 0.16$ mm² จะได้ความหนาแน่นกระแส $\frac{0.3}{0.16} = 1.875$ A/mm²

3.3.6 การพันขดลวดแรงสูงในแต่ละชั้น

ในชั้นที่ 1 จะมีการเว้นระยะหัวท้ายไว้ฝั่งละ 20 mm เพื่อให้ขดลวดแรงสูงห่างจากกราวด์มากขึ้นและลดความเครียดจากการป้อนแรงดันเข้าครั้งแรก ดังนั้นขดลวดในชั้นที่ 1 จะมีจำนวนไม่ได้เท่าที่คำนวณไว้แต่จะมีการนำไปขดเชยในชั้นถัด ๆ ไป และชั้นสุดท้ายจะมีจำนวนเป็นรอบที่เหลือโดยจะมีจำนวนรอบดังตารางที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 3.7 จำนวนรอบสะสมตามแต่ละชั้น

ชั้น	รอบ	ชั้น	รอบ	ชั้น	รอบ	ชั้น	รอบ
1	70	19	2,190	37	4,295	55	6,385
2	188	20	2,309	38	4,410	56	6,503
3	305	21	2,429	39	4,529	57	6,622
4	424	22	2,548	40	4,645	58	6,729
5	543	23	2,668	41	4,756	59	6,841
6	663	24	2,786	42	4,872	60	6,958
7	781	25	2,906	43	4,998	61	7,072
8	901	26	3,024	44	5,109	62	7,190
9	1,021	27	3,143	45	5,227	63	7,302
10	1,139	28	3,261	46	5,345	64	7,420
11	1,258	29	3,380	47	5,463	65	7,530
12	1,375	30	3,480	48	5,578	66	7,647
13	1,495	31	3,598	49	5,697	67	7,758
14	1,612	32	3,706	50	5,811	68	7,875
15	1,731	33	3,826	51	5,929	69	7,991
16	1,849	34	3,943	52	6,031	70	8,109
17	1,967	35	4,062	53	6,151	71	8,200
18	2,070	36	4,176	54	6,270		

3.3.7 ฉนวนในการพันขดลวดแรงสูง

1. กระดาษฉนวน(ใน) 1.0x2 รอบ
2. กระดาษระหว่างชั้น(กาว) 0.13x1 แผ่น
3. ร่องน้ำมัน (1) 3.2x1 แผ่น
4. ร่องน้ำมัน (2) 3.2x1 แผ่น
5. ร่องน้ำมัน (3) 3.2x1 แผ่น
6. กระดาษฉนวน(นอก) 0.5x4 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.3.8 คำนวณแรงดันตกคร่อมระหว่างชั้น

$$\text{แรงดันต่อ 1 ชุดลดย่อย} \frac{100,000}{4} = 25,000 \text{ V}$$

$$\text{แรงดันต่อชั้น} \frac{25,000}{71} = 352.1 \text{ V}$$

$$\text{แรงดันระหว่างรอบเฉลี่ย} \frac{352.1}{116} = 3.0351 \text{ V}$$

3.3.9 เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขดลวดแรงสูง

ขั้นที่ 1 จากการคำนวณที่กล่าวมาข้างต้นทำให้ทราบเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขดลวดแรงสูงมีค่าเป็น 235 mm ซึ่งจะมีการเผื่อระยะน้ำมันไว้อีก 20 mm

$$\begin{aligned} \text{จะได้เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขดลวดแรงสูง} &= 235 + (20 \times 2) \\ &= 275 \text{ mm} \end{aligned}$$

ขั้นที่ 2 ทำการพันกระดาษฉนวน(ไน) 1 mm จำนวน 2 รอบ

$$\begin{aligned} \text{จะได้เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขดลวดแรงสูง} &= 275 + (2 \times 2) \\ &= 279 \text{ mm} \end{aligned}$$

ขั้นที่ 3 ทำการพันขดลวดชุดที่ 1 ซึ่งมีความหนา 0.493 จำนวน 17 ชั้น ระหว่างนั้นจะมีการแทรกของกระดาษฉนวนด้วยซึ่งมีความหนา 0.13 mm จำนวน 17 ชั้น

$$\begin{aligned} \text{เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขดลวดแรงสูง} &= 279 + (8.38 \times 2) + (2.21 \times 2) \\ &= 300.18 \text{ mm} \end{aligned}$$

ขั้นที่ 3 ทำการเสริมร่องน้ำมันที่ 1 ซึ่งมีความหนา 3.2 mm เพื่อระบายความร้อน และพันขดลวดชุดที่ 2 ซึ่งหนา 0.493 จำนวน 17 ชั้น ระหว่างนั้นจะมีการแทรกของกระดาษฉนวนด้วยซึ่งมีความหนา 0.13 mm จำนวน 17 ชั้น

$$\begin{aligned} \text{เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขดลวดแรงสูง} &= 300.18 + (3.2 \times 2) + (8.38 \times 2) + (2.21 \times 2) \\ &= 327.76 \text{ mm} \end{aligned}$$

ขั้นที่ 4 ทำการเสริมร่องน้ำมันที่ 2 ซึ่งมีความหนา 3.2 mm เพื่อระบายความร้อน และพันขดลวดชุดที่ 3 ซึ่งหนา 0.493 จำนวน 17 ชั้น ระหว่างนั้นจะมีการแทรกของกระดาษฉนวนด้วยซึ่งมีความหนา 0.13 mm จำนวน 17 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$\begin{aligned} \text{เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกขดลวดแรงสูง} &= 327.76 + (3.2 \times 2) + (8.38 \times 2) \\ &+ (2.21 \times 2) \\ &= 355.34 \text{ mm} \end{aligned}$$

ขั้นที่ 5 ทำการเสริมร่องน้ำมันที่ 3 ซึ่งมีความหนา 3.2 mm เพื่อระบายความร้อน พ้นขดลวดชุดที่ 4 ซึ่งหนา 0.493 จำนวน 20 ชั้น ระหว่างนั้นจะมีการแทรกของกระดาษฉนวนด้วยซึ่งมีความหนา 0.13 mm จำนวน 20 ชั้น และมีกระดาษฉนวน(นอก)

$$\begin{aligned} \text{เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกขดลวดแรงสูง} &= 355.34 + (3.2 \times 2) + (9.86 \times 2) + (2.6 \times 2) \\ &+ (2 \times 2) \\ &= 388.66 \text{ mm} \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขดลวดแรงสูงเป็น 388.66 mm แต่ในทางปฏิบัตินั้นได้มีการเผื่อระยะต่าง ๆ เพื่อให้เกิดความเหมาะสมมากที่สุดจึงทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขดลวดแรงสูงมีค่าเป็น 405 mm

3.3.10 ความยาวของขดลวดแรงสูง

จาก 3.3.9 ได้เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขดลวดแรงสูงเป็น 405 mm นำมาหารรัศมีเฉลี่ยได้เป็น

$$\begin{aligned} \text{รัศมีเฉลี่ย} &= \frac{(275 + 405)}{2 \times 2} \\ &= 170 \text{ mm} \end{aligned}$$

และนำมาหาความยาวรอบเฉลี่ย

$$\begin{aligned} \text{ความยาวรอบเฉลี่ย} &= 2 \times \pi \times r & (3.15) \\ &= 2 \times \pi \times 170 \\ &= 1,068.1415 \text{ mm} \end{aligned}$$

ความต้านทานขดลวดแรงสูง

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (3.16)$$

$$= 0.0172 \times 10^{-6} \Omega \times \text{m} \times \frac{32,800 \times 1,068.1415 \text{ mm}}{0.16 \text{ mm}^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขายเชิงพาณิชย์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดแรงสูง

$$\begin{aligned}
 P_{\text{CU,HV}} &= I^2_{\text{HV}} R & (3.17) \\
 &= 0.3^2 \times 3,766.27 \\
 &= 338.96 \text{ W}
 \end{aligned}$$

ตารางที่ 3.8 สรุปลักษณะขดลวดแรงสูง

ชนิดของวัสดุ	ลวดทองแดง
ขนาดของตัวนำ (mm ²)	0.45
ฉนวนห่อหุ้มเส้นลวด	PVF
จำนวนรอบต่อชุดลวดย่อย (รอบ)	32,800
จำนวนชุดลวดย่อย (ชุด)	4
จำนวนชั้นต่อชุดลวดย่อย (ชั้น)	71
จำนวนรอบต่อชั้น	ตามตารางที่ 3.7
ความหนาฉนวนระหว่างชั้น (mm)	0.13
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของขดลวด (mm)	235
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขดลวด (mm)	405
รัศมีเฉลี่ยของขดลวด (mm)	170
ความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวด (mm)	1068.1415
กำลังสูญเสียในขดลวด (W)	338.96

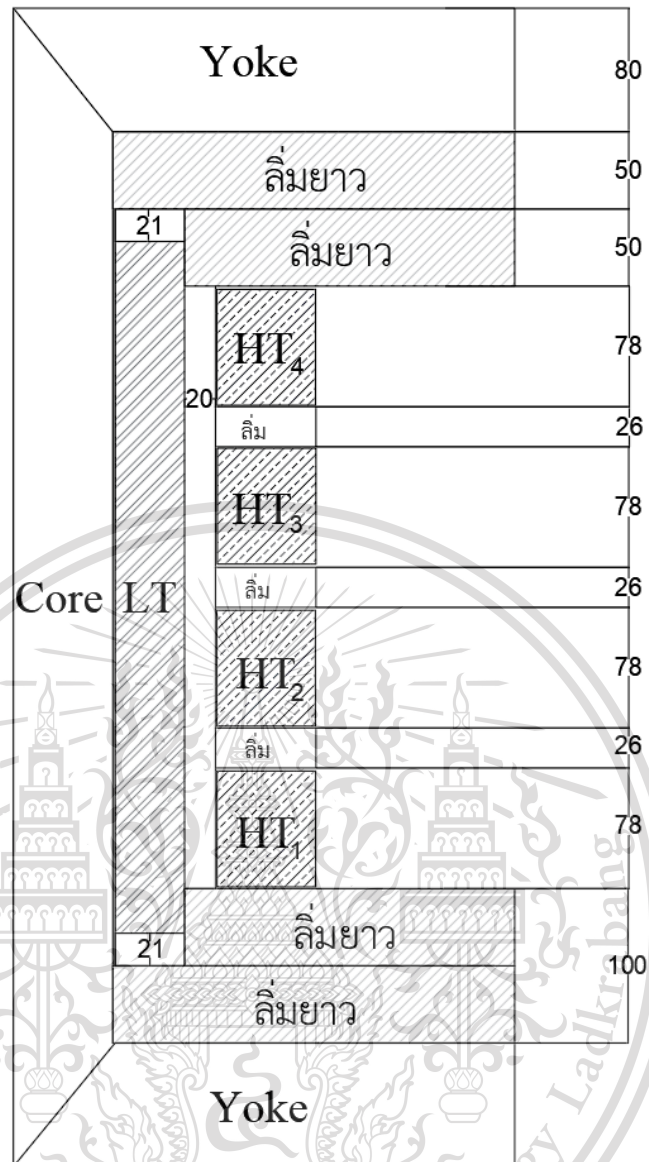
3.4 การตัดกระดาษฉนวน ลี้ม และวงกลม

ส่วนของลี้มได้มีการออกแบบมาเพื่อใช้ในการรับแรงกดทับ และยังใช้สำหรับเป็นช่องว่างในการระบายความร้อนโดยให้น้ำมันไหลผ่านสำหรับส่วนของขดลวดแรงดันสูง และในส่วนของลี้มนี้ยังมีฉนวนที่มีคุณสมบัติสำหรับการป้องกันความเครียดที่เกิดขึ้นกับตัวขดลวดแรงสูงได้ ซึ่งในลี้มแต่ละส่วนจะทนแรงดันได้เท่ากันซึ่งในทุก ๆ ระยะ 1 mm ของฉนวนนั้นจะทนแรงดันได้เท่ากับ 1,000 V ดังนั้นจากรูปที่ 3.12 จะพบว่าระยะห่างของลี้มซึ่งจะแบ่งระยะของลี้มได้ทั้งหมด 2 ระยะด้วยกัน จะแบ่งได้คือ 1.ระยะ 26 mm และ 2.ระยะ 100 mm ซึ่งระยะ 26 mm นั้นสามารถทนได้ 26,000 V และระยะ 100 mm นั้นสามารถทนแรงดันได้ 100,000 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.12 ภาพจำลองระยะห่างของลิมในแต่ละส่วน (mm)

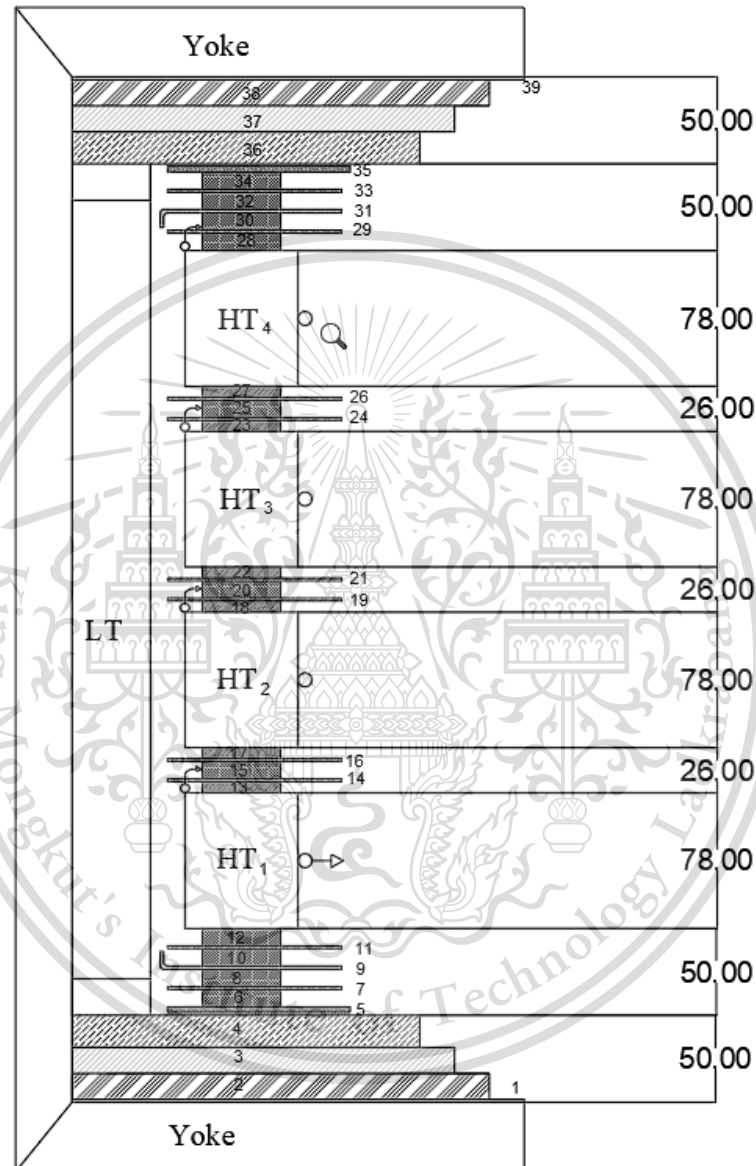
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.4.1 ส่วนประกอบในลิ้ม

ในการอธิบายจะดังรูปที่ 3.13 เป็นรูปประกอบการอธิบายเพื่อให้เข้าใจถึงส่วนประกอบต่าง ๆ ของชิ้นงาน



รูปที่ 3.13 ส่วนประกอบต่าง ๆ โดยแสดงเพียงด้านเดียว
สำหรับการใช้ในการลำดับการจัดวางลิ้ม (mm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โดยตัวเลขที่แสดงจากรูปที่ 3 คือส่วนต่าง ๆ ดังนี้

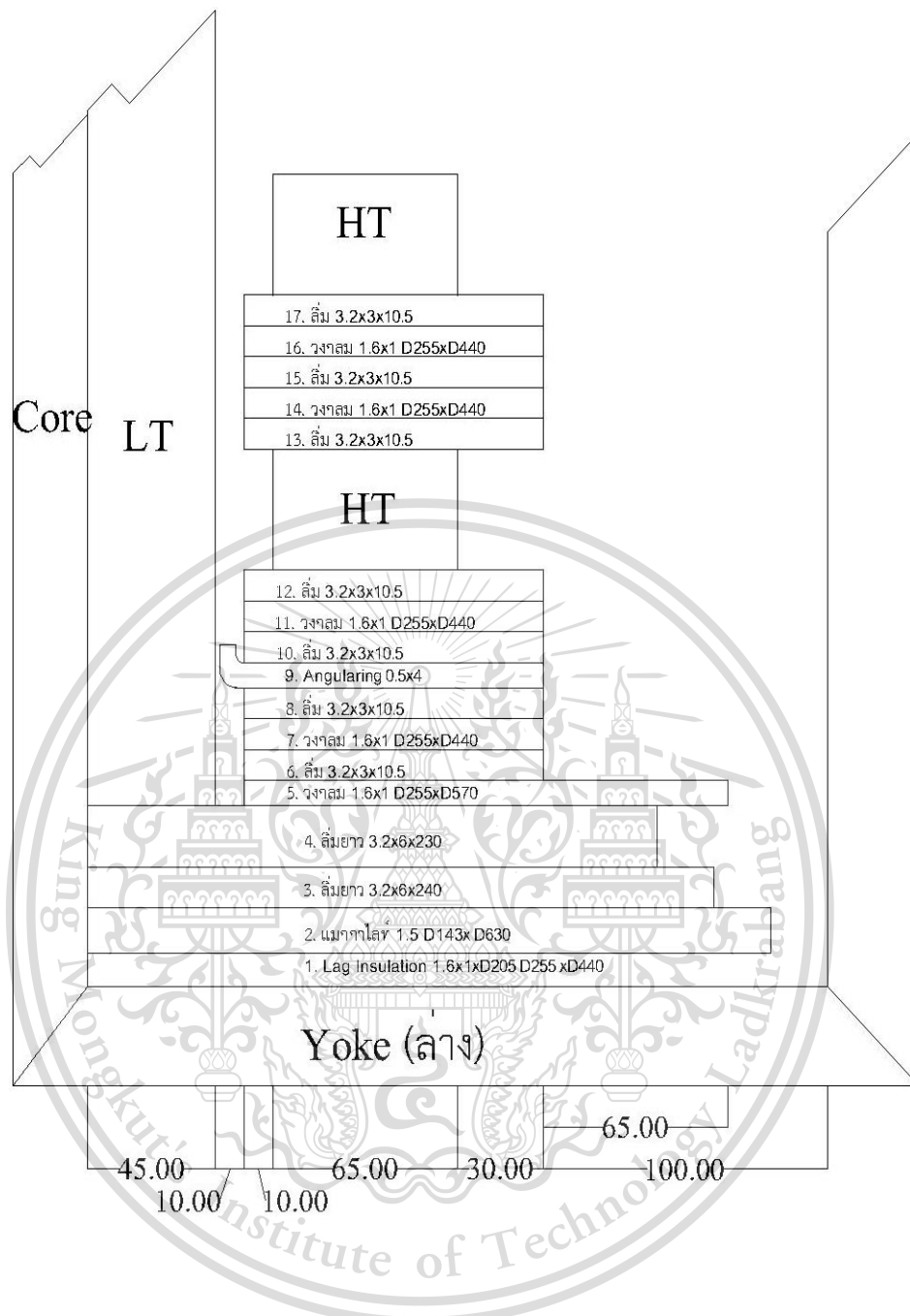
- | | |
|------------------|---|
| 1,39 | คือ Leg Insulation มีความหนา 1.6 mm |
| 2,38 | คือ เบกาไลท์ มีความหนา 15 mm |
| 3,37 | คือ ลิ่มที่มีความหนา 3.2 mm จำนวน 4 แผ่นวางซ้อนทับกัน |
| 4,36 | คือ ลิ่มที่มีความหนา 3.2 mm จำนวน 6 แผ่นวางซ้อนทับกัน |
| 5,35 | คือ วงกลม(ใหญ่)ฉนวนที่มีความหนาเท่ากับ 3.2 mm จำนวน 1 แผ่น |
| 6,8,10,12,15,20, | |
| 25,28,30,32,34 | คือ ลิ่มที่มีความหนา 3.2 mm จำนวน 3 แผ่นวางซ้อนทับกัน |
| 7,11,14,16,19, | |
| 21,24,26,29,33 | คือ วงกลมฉนวนมีความหนา 1.6 mm จำนวน 1 แผ่นวางซ้อนทับกัน |
| 9,31 | คือ Angular ring ซึ่งจะป้องกันไม่ให้เกิดการ Flash over เกินขึ้น |
| 13,17,18,22,23, | |
| 27 | คือ ลิ่มที่มีความหนา 3.2 mm จำนวน 2 แผ่นวางซ้อนทับกัน |

ซึ่งจากรูปที่ 3.13 นั้นสามารถทราบระยะความยาว ของส่วนประกอบต่าง ๆ ของแต่ละชั้นที่เกิดจากการประกอบขึ้นส่วนต่าง ๆ ของลิ่มซึ่งจะดังรูปที่ 3.14 โดยจะมีคำอธิบายประกอบของชั้นส่วนในในแต่ละชั้น ซึ่งในบางชั้นส่วนของอุปกรณ์นั้นจะเป็นแบบลักษณะที่ใกล้เคียงกันในชั้นถัด ๆ ไปของช่องว่างที่ใช้สำหรับป้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.14 ส่วนประกอบต่าง ๆ ที่ใช้ในการจัดลำดับการวางลิ้ม (mm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.4.1.1 วงกลม (ใหญ่)

จากรูปที่ 3.13 เป็นส่วนของตัวเลขที่ 5 และ 35 ซึ่งจะใช้ในการรับแรงกดทับที่เกิดจากการวางขดลวดแรงดันสูง และใช้ในการป้องกันความเครียดที่เกิดขึ้นบนขดลวดที่ใช้สำหรับการต่ออนุกรมกับขดลวดแรงดันสูงซึ่งในการออกแบบจะใช้วงกลมใหญ่ที่มีความหนา 3.2 mm มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในขนาด 255 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมด้านนอกขนาด 570 mm จำนวน 6 วงใช้ประกบบนและล่างระหว่างขดลวดทั้งด้านแรงดันต่ำและด้านแรงดันสูง ซึ่งจะได้ขนาดดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ขนาดของวงกลมใหญ่ (mm)

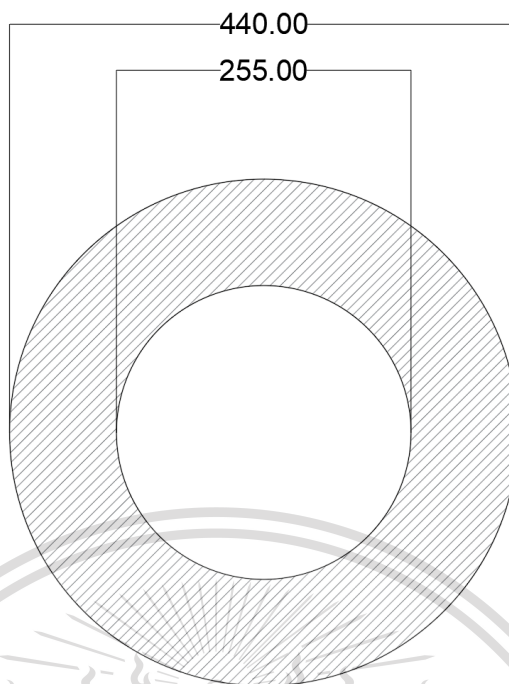
3.4.1.2 วงกลม

จากรูปที่ 3.13 เป็นส่วนของตัวเลขที่ 7 11 14 16 19 21 24 26 29 และ 33 เพื่อใช้ในการรับแรงกดทับที่เกิดจากการวางขดลวดแรงดันสูง และใช้ในการป้องกันความเครียดที่เกิดขึ้นบนขดลวดที่ใช้สำหรับการต่ออนุกรมกับขดลวดแรงดันสูงซึ่งในการออกแบบจะใช้วงกลมที่มีความหนา 1.6 mm มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในขนาด 255 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมด้านนอกขนาด 440 mm จำนวน 10 วงใช้ประกบบนและล่าง ซึ่งจะได้ดังรูปที่ 3.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.16 ขนาดของวงกลม (mm)

3.4.1.3 ลิม

จะใช้ในการรับแรงกดทับที่เกิดจากการวางขดลวดแรงดันสูงและยังเป็นส่วนที่จะใช้สำหรับการไหลผ่านของน้ำมันเพื่อใช้ในการระบายความร้อนของขดลวดด้วย ซึ่งในส่วนนี้จะแบ่งลิมได้ทั้งหมด 4 ขนาด ซึ่งจะมีความยาวเป็นไปตามตารางที่ 3.9

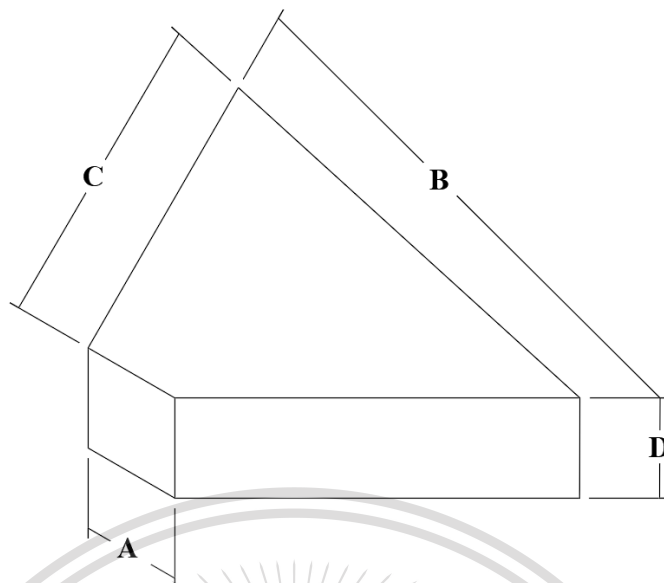
ตารางที่ 3.9 ขนาดของลิมที่ใช้ในการประกอบทำลิม

หมายเลข	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	จำนวน (ชิ้น)
3,37	30	60	240	13	16
4,36	30	60	230	20	16
6,8,10,12,15,20, 25,28,30,32,34	30	50	105	10	90
13,17,18,22,23,27	30	50	105	6.4	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.17 ภาพใช้กำกับในตารางสำหรับอ่านขนาดของลิ้มในส่วนต่าง ๆ

3.4.1.4 วงกลมเบกาไลท์

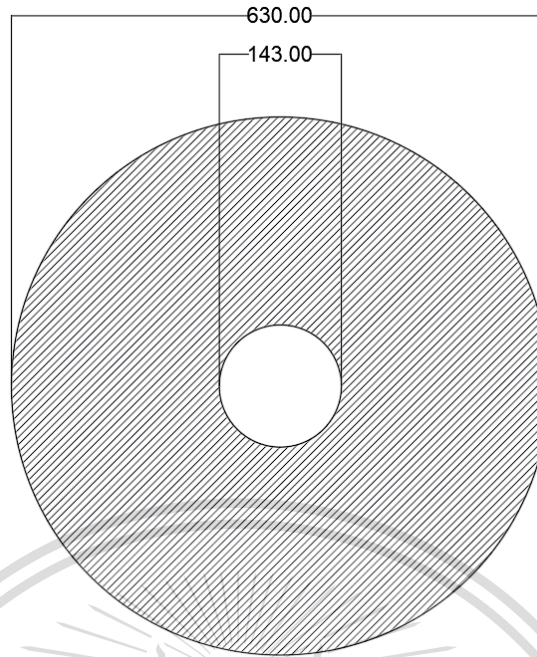
จากรูปที่ 3.13 เป็นส่วนของตัวเลขที่ 2 และ 28 ซึ่งจะใช้สำหรับติดตั้งใกล้กับ ยอร์ก บนและล่างของแกนเหล็กเพื่อใช้เป็นฉนวนป้องกันการเกิดการลัดวงจรและสำหรับรองรับแรงกดทับจากขดลวดแรงสูงได้ เนื่องจากตัวเบกาไลท์นั้นมีความชื้นที่ค่อนข้างน้อยส่งผลทำให้เกิดการเบรกดาวน์ได้ยากกว่าการปล่อยลอยอย่างเดียว

ซึ่งในการออกแบบจึงได้เลือกขนาดของเบกาไลท์ดังรูปที่ 3.18 ซึ่งมีความหนา 15 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงในมีขนาด 134 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกมีขนาด 630 mm ใช้จำนวน 2 แผ่นสำหรับประกบทางด้านบนและด้านล่างของขดลวดแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

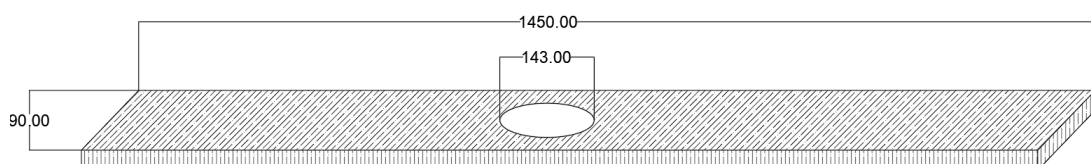


รูปที่ 3.18 ขนาดของแผ่นเบกาไลท์ (mm)

3.4.1.5 Leg Insulation

จากรูปที่ 3.13 เป็นส่วนของตัวเลขที่ 1 และ 39 ซึ่งจะใช้เพื่อเป็นฉนวนในการป้องกันไม่ให้เกิดแรงสูงเชื่อมต่อกับหรือได้มีการสัมผัสกับแกนเหล็ก โดยจะออกแบบให้อยู่ในรูปตัว U แล้วนำมาประกบกัน 2 เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการสัมผัสของขดลวดด้านแรงดันสูงกับ โดยจะมีการประกบในส่วนช่องทาง ยอร์ก ด้านล่างก่อนเพื่อจะได้เข้าสู่ขั้นตอนการประกอบในส่วนของไส้หม้อแปลงต่อไปแล้วปิดด้วยฉนวนที่ประกบกันเช่นเดียวกันส่วนทางด้านล่างเป็นอันสิ้นสุด

ซึ่งในการออกแบบหาขนาดของแผ่นกระดาษได้ดังนี้ ขนาดความหนาของแผ่นกระดาษ 1.6 mm และ ความยาวของแผ่นกระดาษกว้าง 90 mm และ ยาว 1,450 mm และบริเวณตรงกลางจะมีการเจาะรูเพื่อใช้สำหรับสอดแกนเหล็กไว้ ดังรูปที่ 3.19 โดยจะใช้ทั้งหมด 2 แผ่น



รูปที่ 3.19 ขนาดของแผ่น Leg insulation (mm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.4.1.5 Angular ring (กระดาศกระโปรง)

จากรูปที่ 3.13 เป็นส่วนของตัวเลขที่ 9 และ 31 ซึ่งจะใช้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดกระแสลัดวงจร โดยจะจัดทำทั้งหมด 2 แผ่นด้วยกันโดยจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ภายในขนาด 205 mm และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ภายนอกขนาด 440 mm และจะตั้งรูปที่ 3.20 จะมีการทำการงอซึ่งจากการออกแบบนั้นจะเริ่มงอที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 255 mm และแผนกระดาศนี้มีความหนา 0.5 mm



รูปที่ 3.20 ขนาดของแผ่น Angular ring (mm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

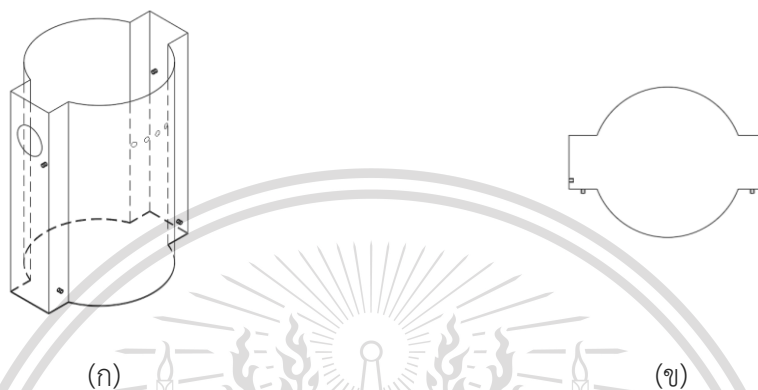
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.5 การออกแบบตัวถังและฝาภายนอก

3.5.1 ส่วนตัวถัง

การออกแบบตัวถังซึ่งจะเลือกใช้ถังโลหะเหล็กซึ่งจะทำการออกแบบให้มีรูปทรงใกล้เคียงกับไส้หม้อแปลงรวมถึงแกนเหล็ก ซึ่งจากการออกแบบเลือกใช้เหล็กหนา 5 mm ใช้สำหรับการนำไปทำเป็นผนังของตัวถัง ซึ่งจากการออกแบบจะมีรูปทรงของตัวถังเป็นไปดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 ภาพจำลองของตัวถังและภาพมุมมองสูงของตัวถัง เมื่อ (ก) ภาพมุมมองโดยรวมของถัง (ข) ภาพมุมมองด้านมุมสูง

จากการออกแบบทิศทางการวางของบุชซึ่งแรงต่ำจะทำให้มีการต่อออกบริเวณข้างถังดังรูปที่ 3.21 ซึ่งจะทำให้ง่ายต่อการเชื่อมต่อสายแรงต่ำเพื่อนำไปใช้งาน และสายไฟแรงต่ำจะไม่สัมผัสกับสายไฟด้านแรงสูง จึงทำให้ไม่เกิดการลัดวงจรได้ ซึ่งจากการออกแบบนั้นจะทำให้ใช้งานได้ง่าย และสะดวกยิ่งขึ้น

โดยที่รูปทรงของตัวถังที่ออกแบบมานั้น ผู้ออกแบบต้องการทำให้รูปทรงที่มีลักษณะใกล้เคียงกับแกนเหล็ก และไส้ของหม้อแปลง เพื่อลดการเคลื่อนย้ายของไส้ในของหม้อแปลง ซึ่งระยะห่างที่ใกล้ที่สุดระหว่างขดลวดแรงสูง ซึ่งส่วนวงกลมจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 700 mm และปีกจะมีความกว้างเท่ากับ 250 mm ยาวเท่ากับ 40 mm

จากข้อมูลของน้ำมันฉนวนที่เลือกมานั้นน้ำมันสามารถทนต่อแรงที่ได้ที่ 70 V/mm สามารถคำนวณหาระยะห่างที่น้อยที่สุดที่สามารถทนการเกิดการเบรกดาวนี้ได้ที่พิกัดตั้งสมการที่ 3.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$\Delta L = \frac{V_r}{V_0} \quad (3.18)$$

โดยที่ ΔL คือ ระยะห่างที่น้อยที่สุดที่สามารถทนได้

V_r คือ ค่าแรงดันที่พิกัด

V_0 คือ ค่าแรงดันที่น้ำมันสามารถทนได้

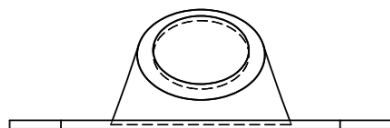
$$\begin{aligned} \text{จากสมการที่ 3.18 สามารถหาค่าระยะห่างที่น้อยที่สุด} &= \frac{100 \times 10^3}{70} \\ &= 142.85 \text{ mm} \end{aligned}$$

จากการคำนวณที่กล่าวมานั้นทำให้ได้ระยะห่างที่สามารถทนต่อการเกิดการเบรกดาวนผ่านน้ำมันจนลงไปที่ตัวถังได้ ซึ่งทางผู้ออกแบบได้ทำการเผื่อระยะห่างออกมาได้เป็นค่าเท่ากับ 145 mm

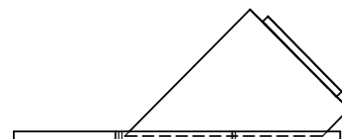
จากการออกแบบให้ตัวถังจะมีความสูงเท่ากับ 1,000 mm ซึ่งจากการใช้งานจริงจะทำให้ระยะห่างของฝาถังอยู่ที่ 250 mm ซึ่งจะเป็นระยะห่างที่ทำให้ขั้วของสายแรงสูง หรือส่วนของปลายของบุชซึ่งนั้นไม่เกิดการเบรกดาวนไปยังฝาถังได้ซึ่งเป็นไปตามการคำนวณ และบริเวณปีกของตัวถังจะมีการติดตั้งแอนด์โฮลที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 cm เพื่อใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างขั้วของสายแรงสูงและปลายของบุชซึ่งเข้าหากัน และใช้สำหรับการต่อกราวด์ของขดลวดไปยังกราวด์ของตัวถัง และการดูแลรักษาในอนาคต

3.5.2 ส่วนของฝาถัง

ในการออกแบบผู้ออกแบบได้ทำการเลือกเหล็กหนา 5 mm และจะมีการออกแบบการยื่นของบุชซึ่งนั้นทางผู้ออกแบบต้องการที่จะลดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงทดสอบ จึงทำการออกแบบให้มีการเอียงของบุชซึ่งทำมุม 45 องศาจากแนวระดับดังรูปที่ 3.22 เพื่อให้เกิดการตัดลู่ของวงจร และยังง่ายต่อการใช้งานของหม้อแปลงทดสอบ และได้มีการนำแผ่นเบกาไลต์มาติดตั้งบริเวณข้อต่อระหว่างฝาถังกับส่วนของบุชซึ่ง ดังรูปที่ 3.23 ซึ่งเป็นอีกส่วนที่ช่วยในการลดการเกิดการเบรกดาวนบางส่วนได้ และภาพรวมเมื่อนำฝาถังมาประกอบเข้ากับตัวถังได้ดังรูปที่ 3.24



(ก)

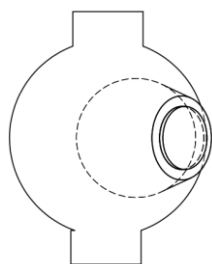


(ข)

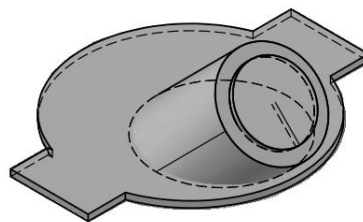
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



(ค)



(ง)

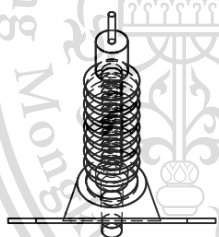
รูปที่ 3.22 การออกแบบส่วนของฝาลัง

(ก) ภาพมุมมองด้านหน้าของฝาลัง

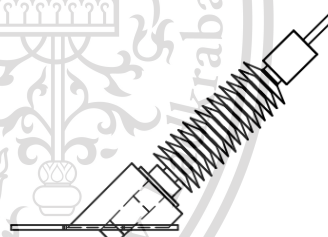
(ข) ภาพมุมมองด้านข้างของฝาลัง

(ค) ภาพมุมมองด้านมุมสูงของฝาลัง

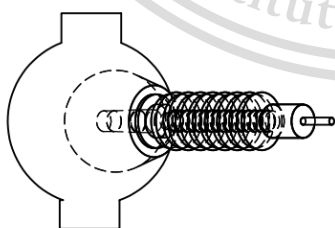
(ง) ภาพมุมมองโดยรวมของฝาลัง



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

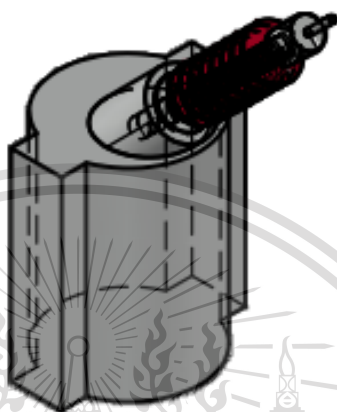
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- (ก) ภาพมุมมองด้านหน้าของฝาถังเมื่อต่อกับบูชชิง
- (ข) ภาพมุมมองด้านข้างของฝาถังเมื่อต่อกับบูชชิง
- (ค) ภาพมุมมองด้านบนสูงของฝาถังเมื่อต่อกับบูชชิง
- (ง) ภาพมุมมองโดยรวมของฝาถังเมื่อต่อกับบูชชิง



รูปที่ 3.24 ภาพรวมของการออกแบบตัวถังและฝาถัง

3.6 การคำนวณปริมาตรน้ำมันหม้อแปลง

จากรูปที่ 3.21 แสดงถึงภาพจำลองตัวถังที่ออกแบบมุมสูง สามารถคำนวณหาขนาดพื้นที่ที่ของถังได้โดยใช้สมการที่ 3.19

$$\text{ปริมาตรถัง} = (\pi r^2 + wl)h \quad (3.19)$$

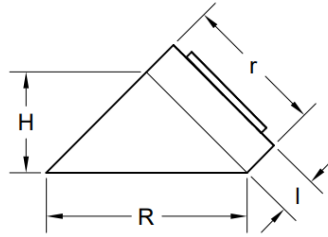
- โดยที่ r คือ ขนาดของรัศมีของถัง ($r= 700$ mm)
- W คือ ความกว้างของส่วนปีก ($w= 40$ mm)
- l คือ ความยาวของส่วนปีก ($l= 250$ mm)
- h คือ ขนาดของความสูงของตัวถัง ($h= 1,000$ mm)

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ 3.19 สามารถหาปริมาตรถังมีปริมาตร} &= (\pi \times 700^2 + 40 \times 250) \times 1000 \\ &= 1,548,600,002.11 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำมาใช้เพื่อการค้า
จากรูปที่ 3.22 ได้นำมาคำนวณหาประมาณของว่างที่เหลือสำหรับเติมน้ำมันหม้อแปลง
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม กรุณาติดต่อผู้จัดทำ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.25 แสดงค่าตัวแปรใช้ในการคำนวณหาปริมาตรน้ำมันของฝาลัง

$$\text{ปริมาตรฝาลัง} = (\pi r^2 l) + \left(\frac{1}{3} \pi R^2 H\right) \quad (3.20)$$

โดยที่ อ้างอิงค่าตัวแปรต่าง ๆ จากรูปที่ 3.25

r คือ ขนาดของรัศมีทรงกระบอก ($r = 300 \text{ mm}$)

l คือ ความยาวทรงกระบอก ($l = 80 \text{ mm}$)

R คือ รัศมีวงกลมที่ฐาน ($R = 424 \text{ mm}$)

H คือ ขนาดของความสูงจากฝาลัง ($H = 213 \text{ mm}$)

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ 3.20 สามารถหาปริมาตรฝาลังมีปริมาตร} &= (\pi r^2 l) + \left(\frac{1}{3} \pi R^2 H\right) \\ &= 62,687,261.52 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น จะได้ปริมาตรรวมทั้งหมด} &= 1,548,600,002.11 + 62,687,261.52 \\ &= 1,611,287,263.63 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

3.7 การถ่ายเทความร้อน

กลไกการถ่ายเทความร้อนเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อการคำนวณค่าอุณหภูมิ ความร้อนที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงนั้น จะเกิดจากความต้านทานของขดลวด เส้นแรงแม่เหล็กที่ไหลในสารเฟอร์โรแมกเนติก เส้นแรงแม่เหล็กที่ไหลในตัวถังและฝาปิดหม้อแปลง โดยการถ่ายเทความร้อนให้แก่สภาวะแวดล้อมใกล้เคียงโดยอาศัยระดับอุณหภูมิที่ต่างกัน ซึ่งการถ่ายเทความร้อนนั้นมีอยู่ด้วยกัน 3 วิธี ได้แก่ การนำความร้อน การพาความร้อน การแผ่รังสีความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.7.1 การนำความร้อน

การนำความร้อนเป็นการถ่ายโอนความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำภายในตัวกลางเดียวกันหรือระหว่างตัวกลางต่างชนิดที่อยู่ติดกัน ซึ่งเป็นการถ่ายเทความร้อนขั้นแรกของหม้อแปลง โดยที่ความร้อนจะระบายออกมาเป็นไปตามสมการที่ 3.22

$$Q_{\text{cond}} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\rho l}{A}} = \frac{\Delta T_1}{\frac{\rho l}{A}} \quad (3.22)$$

โดยที่ Q_{cond} คือ กำลังความร้อนที่ถ่ายเทผ่านสารตัวกลาง (W)

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

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

l คือ ความหนาของสารตัวกลาง (m) (โดยที่ $L_1=0.002\text{mm}$ $L_2=0.016\text{mm}$)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของสารตัวกลาง (m^2)

พื้นที่ผิวของฉนวนที่ล้อมรอบขดลวดแรงสูง

$$\begin{aligned} A &= 2\pi(202.5^2 - 200.5^2) + 2\pi(202.5)(78) + 2\pi(200.5)(78) \\ &= 0.203 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

กำหนดให้หม้อแปลงทำงานที่อุณหภูมิแวดล้อม 40°C การนำความร้อนของฉนวน โดยคิดค่าสภาพนำความร้อนของกระดาษฉนวนน้ำมันมีค่าอยู่ระหว่าง $0.25-0.45 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ ในการคำนวณเลือกใช้ $0.4 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ เมื่อคำนวณอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงสูงเทียบกับน้ำมันได้ คือ

$$\begin{aligned} \Delta T_1 &= \frac{338.96 \times 0.002}{0.4 \times 0.2} \\ &= 8.47^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

พื้นที่ผิวของฉนวนที่ล้อมรอบขดลวดแรงต่ำ

$$\begin{aligned} A &= 2\pi(117.5^2 - 87.56^2) + 2\pi(117.5)(490) + 2\pi(87.56)(490) \\ &= 0.7 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

เมื่อคำนวณอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงต่ำเทียบกับขดลวดแรงสูงได้ คือ

$$\begin{aligned} \Delta T_2 &= \frac{475.2 \times 0.016}{0.4 \times 0.7} \\ &= 27.15^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การออกแบบอุณหภูมิสูงสุดของขดลวดจะกำหนดไว้ประมาณ 105°C และสามารถคำนวณอุณหภูมิเพิ่มระหว่างอุณหภูมิกับน้ำมันกับอุณหภูมิแวดล้อมได้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$\Delta T_2 = 105 - 40 - 8.47 - 27.15 = 29.38 \text{ } ^\circ\text{C}$$

3.7.2 การพาความร้อน

การพาความร้อนเป็นการถ่ายโอนความร้อนระหว่างผิวของแข็งกับของไหลที่มีการเคลื่อนที่หรือกล่าวได้ว่าเป็นปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ของพลังงานจากแหล่งอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ โดยที่โมเลกุลตัวกลางมีการเคลื่อนที่ไปด้วย ซึ่งการพาความร้อนมี 2 แบบคือ การพาความร้อนอย่างไม่อิสระ (forced convection) และการพาความร้อนอย่างอิสระ (free convection) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวเฉพาะการพาความร้อนอย่างอิสระ

การพาความร้อนอย่างอิสระ ในกรณีของหม้อแปลงคือเมื่อหม้อแปลงได้รับความร้อน น้ำมันจะหมุนเวียนไปด้วย ผลต่างระหว่างความหนาแน่นของน้ำมันที่เย็นและน้ำมันที่ร้อนโดยน้ำมันที่ร้อนบริเวณผิวของขดลวดจะลอยตัวขึ้นสู่ข้างบนพร้อมกับพาความร้อนขึ้นไปด้วย ขณะเดียวกันน้ำมันที่เย็นจะตกลงมา ซึ่งหากหม้อแปลงมีท่อระบายความร้อน น้ำมันที่ร้อนจะไหลขึ้นสู่ส่วนบนของท่อที่ติดอยู่กับถังนั้น และไหลตามท่อลงสู่ส่วนล่างของท่อไปยังขดลวดแทนที่ส่วนที่ร้อนต่อไป ซึ่งการพาความร้อนอย่างอิสระนี้มีความซับซ้อนมากขึ้นกับหลายตัวแปรด้วยกันได้แก่

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

การคำนวณการพาความร้อนจะขึ้นกับผลต่างของอุณหภูมิวัตถุที่สนใจกับอุณหภูมิตัวกลางที่แวดล้อมอาจทำได้โดยประมาณตามสมการที่ 3.23

$$Q_{\text{conv}} = K_c (T_1 - T_2)^n \quad (3.23)$$

โดยที่ K_c คือ ค่าคงที่ขึ้นกับขนาดและสภาพพื้นผิวของวัตถุร้อน

N คือ ค่าคงที่ขึ้นกับขนาดและสภาพพื้นผิวของวัตถุร้อนมีค่าระหว่าง 1-1.25

Q_{conv} คือ ค่าการพาความร้อนของตัวกลางต่อ 1 หน่วยพื้นที่ผิวของวัตถุที่ (W/m^2)

3.7.3 การแผ่รังสีความร้อน

เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการระบายความร้อนจากหม้อแปลงโดยที่ความร้อนจะถ่ายเทออกจากผนังภายนอกของหม้อแปลง ออกสู่อากาศภายนอกซึ่งหม้อแปลงที่มีผิวเรียบและทาสีจะสามารถแผ่รังสีออกจากถังได้ถึง 55 เปอร์เซ็นต์ ของความร้อนทั้งหมดที่ระบายออก ซึ่งการแผ่รังสีความร้อนมีการซับซ้อนในการคำนวณมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.8 การคำนวณแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ (%Z)

สามารถพิจารณาแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ได้จากสมการที่ 3.24 3.25 และ 3.26 ตามลำดับ

$$e_z = \sqrt{e_r^2 + e_x^2} \quad (3.24)$$

$$e_z = \frac{P_T}{S_N} \times 100 \quad (3.25)$$

$$e_z = \frac{0.42 \times \pi \times S_N \times \left(\frac{d_m + D_m}{2} \right) \times \left(\text{HVLV} + \frac{\text{RB}_{LV} + \text{RB}_{HV}}{3} \right) \times \frac{f}{50} \times K_S}{K_9 \times \left(\frac{U_{ph}}{N} \right) \times \text{AL}_{app} \times 10} \quad (3.26)$$

- โดยที่ e_z = impedance (%)
- e_r = Resistance (%)
- e_x = Reactance (%)
- P_T = Total Load Losses ; (PT = 1.055 kW)
- S_N = Rating ; (SN = 10 kVA)
- d_m = Equivalent mean diameter of low voltage winding ;
($d_m = 184.46$ mm)
- D_m = Equivalent mean diameter of high voltage winding ;
($D_m = 340$ mm)
- HVLV = Distance between high and low voltage winding ;
(HVLV = 20 mm)
- RB_{LV} = Radial build of low voltage winding ; ($\text{RB}_{LV} = 6.53$ mm)
- RB_{HV} = Radial build of low voltage winding ; ($\text{RB}_{HV} = 17.66$ mm)
- f = Frequency ; ($f = 50$ Hz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งให้ U_{ph} ให้ตัดแปลงเนื้อหา และอ้างอิงไปยังเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

N = Number of turn per phase ; ($N = 82$ รอบ)

K_a = Regowski factor

$$= 1 - \frac{RB_{LV} + RB_{HV} + HV_{LV}}{\pi g \times AL_{app}} \quad ; (K_a = 0.97)$$

K_g = Number of wound legs ; ($K_g = 1$)

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

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

$$= \frac{AL_{LV}}{1 - \frac{(RB_{LV} + RB_{HV} + HV_{LV})}{(\pi g \times AL_{LV})}} \quad ; (AL_{app} = 461.523 \text{ mm})$$

AL_{LV} = Axial length of low voltage winding ; ($AL_{LV} = 447$ mm)

ดังนั้น เมื่อทำการแทนค่าตัวแปรลงบนสมการข้างต้นจะมีค่า $\%Z = 8.506\%$

3.9 การคำนวณกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{SC})

จากสมการที่ 3.27 เป็นการคำนวณหากระแสลัดวงจร

$$I_{SC} = \frac{I_{HV}}{\%Z} \times 100 \quad (3.27)$$

โดย I_{SC} = กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (A)

I_{HV} = กระแสไฟฟ้าทางด้านแรงสูง (A)

$\%Z$ = แรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์

$$I_{SC} = \frac{0.3}{8.506} \times 100$$

$$I_{SC} = 3.527 \text{ A}$$

ดังนั้น กระแสลัดวงจรของหม้อแปลงทดสอบจะมีค่า $I_{SC} = 3.527 \text{ A}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.10 การคำนวณกำลังไฟฟ้าลัดวงจร (S_{SC})

$$S_{SC} = \frac{S_{HV}}{\%Z} \times 100 \quad (3.28)$$

โดย S_{SC} = กำลังไฟฟ้าลัดวงจร (VA)
 S_{HV} = กำลังไฟฟ้าทางด้านแรงสูง (VA)
 $\%Z$ = แรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์

$$S_{SC} = \frac{30000}{8.506} \times 100$$

$$S_{SC} = 325.692 \text{ kVA}$$

ดังนั้น กำลังไฟฟ้าลัดวงจรของหม้อแปลงทดสอบจะมีค่า $S_{SC} = 325.692 \text{ kVA}$

3.11 การคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าและการกระจายตัวของเส้นแรงแม่เหล็กด้วยการโปรแกรมจำลองในคอมพิวเตอร์

เมื่อมีการคำนวณพารามิเตอร์และส่วนประกอบต่าง ๆ ของหม้อแปลงเรียบร้อยแล้ว จำเป็นต้องมีการคำนวณเพื่อหาเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux) การกระจายของสนามไฟฟ้า (Electric potential) และความเครียดไฟฟ้า (Electric field) โดยใช้การจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อนำมาวิเคราะห์ว่าจะไม่เกิดดิสชาร์จบางส่วนตามที่ได้ตั้งวัตถุประสงค์ไว้ โดยผลการวิเคราะห์ดังภาคผนวก ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

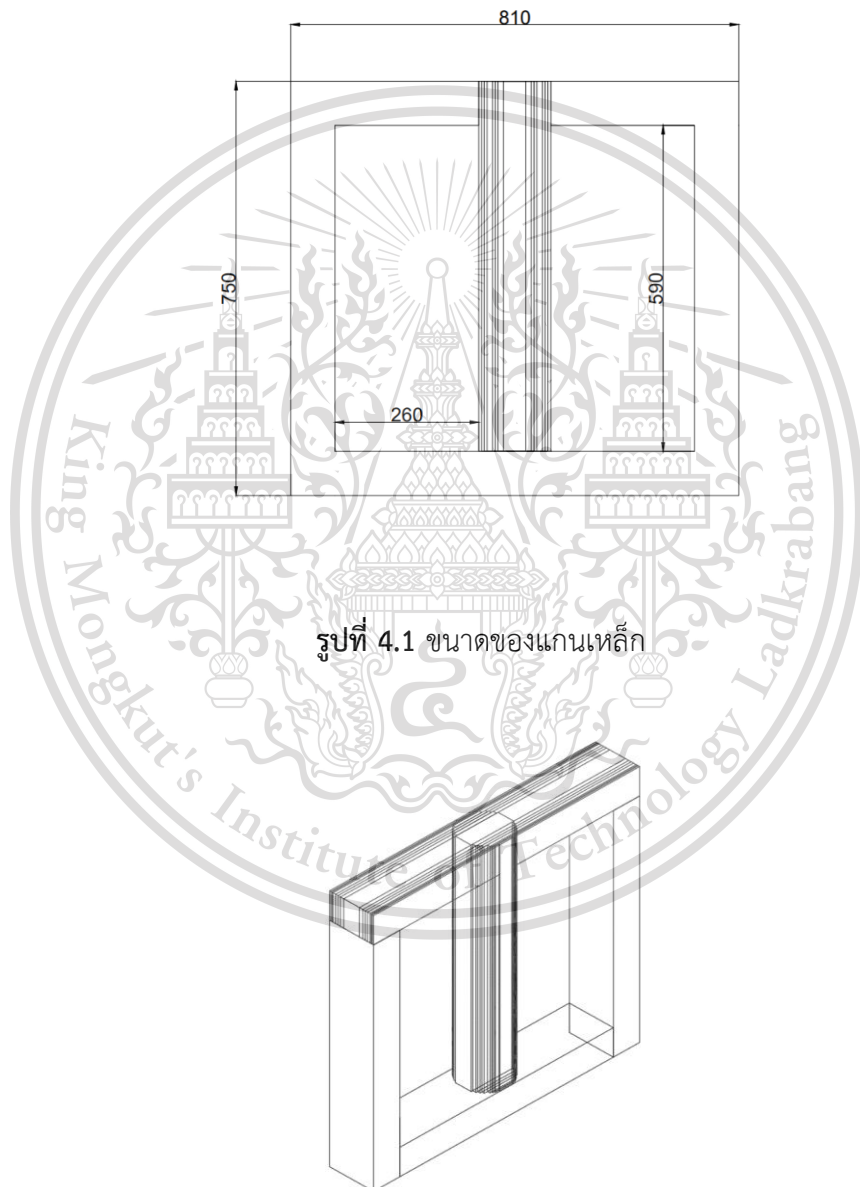
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 4

การประกอบสร้าง

4.1 แกนเหล็ก

จากการออกแบบแกนเหล็กในบทที่ 3 จะได้ภาพตัดขวางพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กดังรูปที่ 3.2 ขนาดและลักษณะของแกนเหล็กจะดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 ขนาดของแกนเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.2 ลักษณะของแกนเหล็ก
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การออกแบบแผ่นเหล็กนั้นจะแบ่งแผ่นเหล็กออกเป็น 4 แบบ A B C และ D จากการออกแบบและคำนวณจะได้จำนวนและความหนาของแผ่นเหล็กแบบ A B C และ D แสดงในตารางที่ 3.1 3.2 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ โดยมี้วนแผ่นเหล็กและแผ่นเหล็กแต่ละขนาดดังรูปที่ 4.3



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.3 แผ่นเหล็กที่ใช้ทำแกนเหล็ก

(ก) ม้วนแผ่นเหล็ก

(ข) แผ่นเหล็กแต่ละขนาด

การเรียงแผ่นเหล็กจะเรียงแผ่นเหล็ก จะเรียงแบบ 2 ทับ 2 เนื่องจากการเรียงแผ่นเหล็กที่หลายแผ่นสลับกันจะทำให้เกิดช่องว่างอากาศส่งผลให้เกิดกำลังสูญเสียเพิ่มมากขึ้น แต่การจัดเรียงแผ่นเหล็กแบบที่ละแผ่นสลับกันมีความยากลำบากและใช้เวลานานในการเรียง ทางผู้ออกแบบจึงได้เลือกการเรียงแผ่นเหล็กแบบ 2 ทับ 2 โดยขั้นตอนการปฏิบัติงานจริงจะทำได้ดังรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



(ก)



(ข)



(ค)

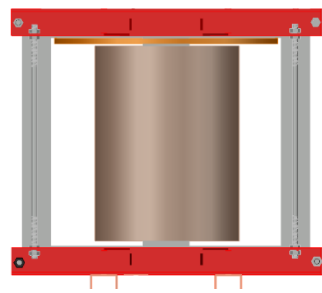
รูปที่ 4.4 การปฏิบัติงานจริง เมื่อ (ก) แยกขนาดแผ่นเหล็ก
(ข) เรียงแผ่นเหล็กแบบ 2 ทับ 2 และ (ค) นำ Yoke มาแทรกใส่ Leg

แคลมป์ยึดแกนเหล็กจำเป็นต้องจัดเตรียมให้เรียบร้อยก่อนที่จะทำการเรียงแกนเหล็ก เนื่องจากแคลมป์ยึดแกนเหล็กทำหน้าที่ในการบีบอัดแผ่นเหล็กยึดติดกันอยู่และช่วยเพิ่มความแข็งแรงของแกนเหล็ก เนื่องจากแกนเหล็กเป็นส่วนที่รับน้ำหนักของขดลวด ลิม และฉนวน แคลมป์ยึดแกนเหล็กจะต่อลงดินเช่นเดียวกันแกนเหล็กจึงต้องคำนวณระยะปลอดภัยระหว่างขดลวดแรงสูงกับแคลมป์แกนเหล็ก จึงได้ออกแบบแคลมป์แกนเหล็กมีลักษณะดังรูปที่ 4.5

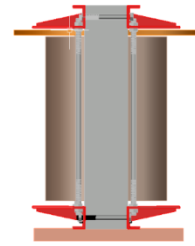
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



(ก)



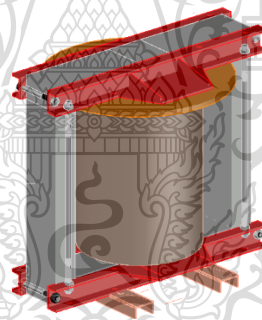
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 4.5 แคลมป์ยึดแกนเหล็ก

(ก) รูปด้านหน้าของแคลมป์

(ข) รูปด้านข้างของแคลมป์

(ค) รูปด้านบนของแคลมป์

(ง) รูปด้านล่างของแคลมป์

(จ) รูปแคลมป์แกนเหล็กที่ประกอบเสร็จสิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

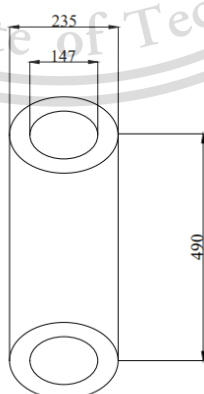
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ก่อนประกอบแคลมป์เข้ากับแกนเหล็กต้องนำกระดาษฉนวนมาแทรกเพื่อเป็นฉนวนกั้นระหว่างแคลมป์กับแกนเหล็กไม่ให้สัมผัสกันโดยตรง หลังจากนั้นจะเริ่มทำการเรียงแผ่นเหล็กทีละ 2 แผ่น ตามที่ได้ออกแบบไว้ เมื่อเรียงแผ่นเหล็กครบตามที่ได้ออกแบบจึงนำกระดาษฉนวนหามารองรับก่อนจะปิดแคลมป์อีกฝั่ง

4.2 ขดลวดแรงต่ำ

จากการคำนวณในบทที่ 3 เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของขดลวดแรงต่ำที่คำนวณออกมาได้คือ 147 mm โดยการพันขดลวดแรงต่ำที่ออกแบบนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ชุดพันชุดละ 2 ชั้น ชั้นละ 41 รอบ ซึ่งรวมทั้ง 2 ชุดจะมีจำนวนรอบ 164 รอบ เพื่อให้ขดลวดสามารถต่อได้ทั้งแบบอนุกรมและขนาน โดยจะได้ขนาดของขดลวดแรงต่ำทั้ง 2 ชุด ดังรูปที่ 4.6 โดยประกอบด้วยกระดาษฉนวนแรงต่ำหนา 1 mm ลวดขนาด 2.6x10 mm กระดาษฉนวนหนา 0.13 mm ร่องน้ำมันหนา 3.2 mm และกระดาษฉนวนหนา 0.5 mm กระดาษคั่นระหว่างแรงสูง และแรงต่ำ 0.5 mm และซีลด์ทองแดงหนา 0.5 mm ซึ่งขดลวดแรงต่ำที่ใช้ดังรูปที่ 4.7

การพันขดลวดแรงต่ำ 1 ชุด จะมีทั้งหมด 2 ชั้น ได้มีการออกแบบให้มีร่องน้ำมันมาแทรกจำนวน 2 ร่อง ร่องละ 3.2 mm แทรกไว้ที่หลังชั้นที่ 2 ของขดลวดแรงต่ำ และระหว่างกระดาษคั่นระหว่างแรงสูง และแรงต่ำ การเริ่มพันขดลวดแรงต่ำรอบแกนเหล็กได้นำกระดาษฉนวนแรงต่ำซึ่งเป็นกระดาษฉนวนหนา 1 mm มาล่องไว้จำนวน 2 รอบ หลังจากนั้นจะพันขดลวดแรงต่ำชุดที่ 1 ซึ่งเมื่อพันครบแต่ละชั้นจะนำกระดาษฉนวนหนา 0.5 mm มาแทรก เมื่อพันชุดที่ 2 เสร็จจะแทรกช่องน้ำมันก่อนที่จะแทรกกระดาษคั่นระหว่างแรงสูง และแรงต่ำหนา 0.5 mm จำนวน 2 รอบ ทำการแทรกซีลด์ทองแดงหนา 0.5 mm เพื่อป้องกันการลัดวงจร ต่อจากนั้นจะแทรกกระดาษคั่นระหว่างแรงสูง และแรงต่ำหนา 0.5 mm จำนวน 15 รอบ ตามด้วยร่องน้ำมัน จะปิดท้ายด้วยกระดาษคั่นระหว่างแรงสูง และแรงต่ำหนา 0.5 mm จำนวน 15 รอบ โดยภาพจำลองการพันขดลวดแรงต่ำดังรูปที่ 4.8 และการปฏิบัติงานจริงดังรูปที่ 4.9



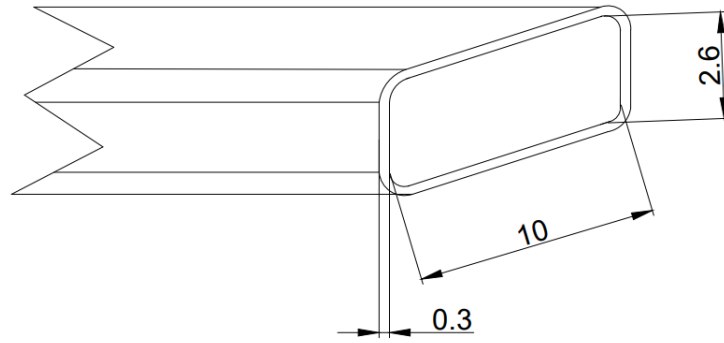
รูปที่ 4.6 ขนาดของขดลวดแรงต่ำทั้ง 2 ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

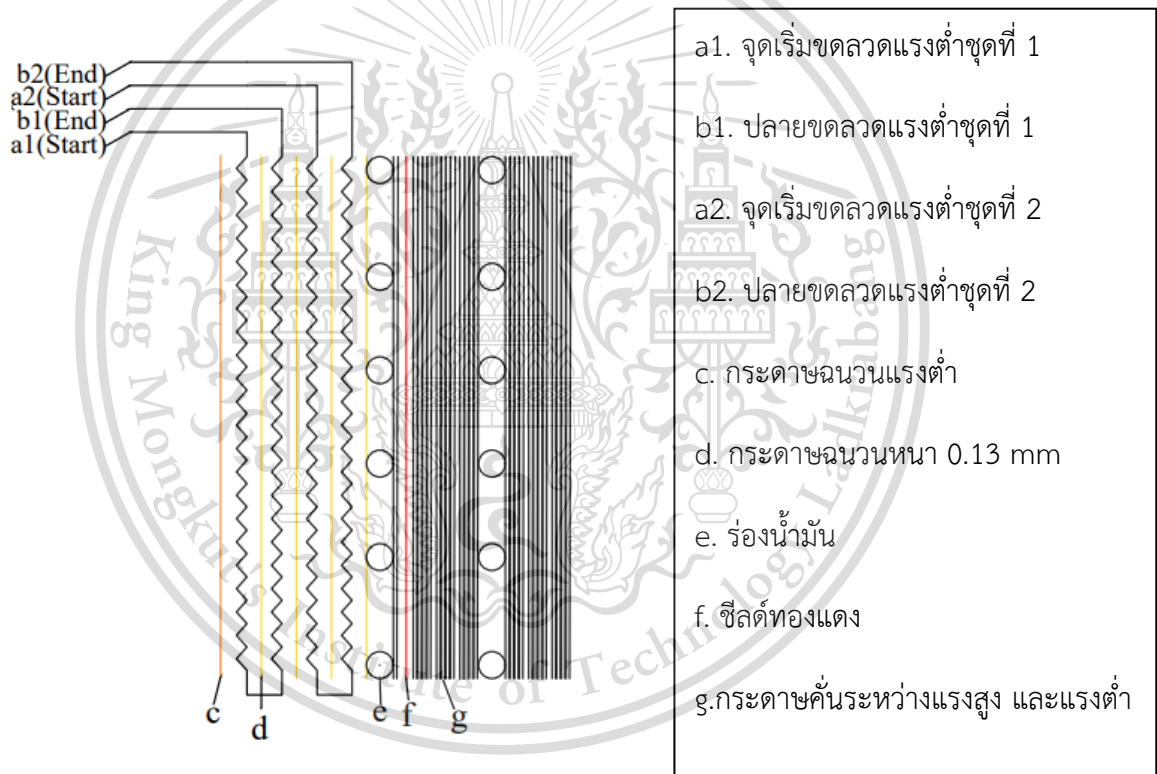
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปดแก้ไขเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.7 ขนาดของขดลวดแรงต่ำ



รูปที่ 4.8 การพันขดลวดแรงต่ำทั้ง 2 ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(ช)



(ซ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



(ญ)



(ฎ)

รูปที่ 4.9 การปฏิบัติงานจริง

- (ก) ลวดแรงต่ำ
- (ข) จุดเริ่มต้นขดลวดแรงต่ำ
- (ค) ขดลวดแรงต่ำชุดที่ 1
- (ง) กระดาษฉนวนระหว่างขดลวดแรงต่ำแต่ละชุด
- (ช) ขดลวดแรงต่ำชุดที่ 2
- (ซ) จำนวนรอบขดลวด
- (ญ) ร่องน้ำมัน
- (ฎ) ซีลด์ทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

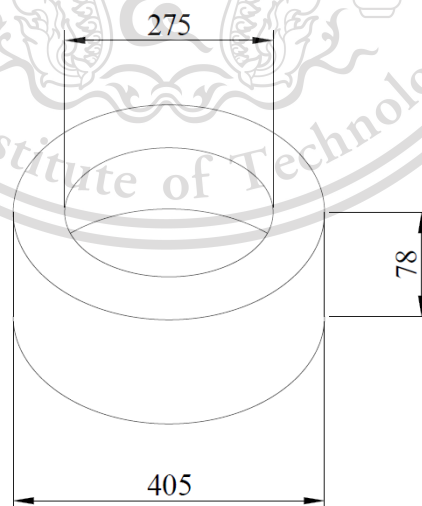
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.3 ขดลวดแรงสูง

การที่จะพันขดลวดแรงสูงเพื่อมาต่อกับขดลวดแรงต่ำนั้น จะต้องให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขดลวดแรงต่ำเป็นระยะ 40 mm เพื่อให้สามารถแทรกฉนวนต่าง ๆ ได้ โดยเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของขดลวดแรงสูงที่คำนวณออกมาได้คือ 275 mm โดยการพันขดลวดแรงสูงที่ออกแบบนั้นจะแบ่งออกเป็น 4 ชุดลวดย่อย แต่ละชุดลวดย่อยจะมีจำนวนชั้น 71 ชั้น เมื่อรวมทั้ง 71 ชั้นจะมีจำนวนรอบ 8,200 รอบ ซึ่งจะเป็นไปตามที่คำนวณไว้ดังรูปที่ 4.10 โดยประกอบด้วยกระดาษฉนวน(ใน)หนา 1 mm ลวดแรงสูงเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.495 mm กระดาษฉนวนหนา 0.13 mm ร่องน้ำมันหนา 3.2 mm และ กระดาษฉนวน(นอก)หนา 0.5 mm ซึ่งขดลวดแรงสูงที่ใช้ดังรูปที่ 4.11

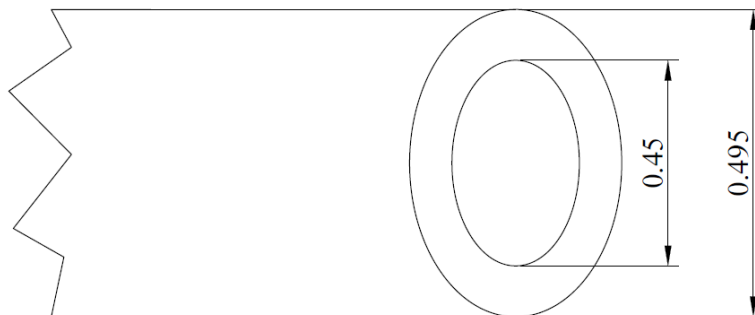
การพันขดลวดแรงสูง 1 ชุดลวดย่อย จะมีทั้งหมด 71 ชั้น โดยแบ่งออกเป็น 17 17 17 และ 20 ชั้น เนื่องจากออกแบบให้มีร่องน้ำมันมาแทรกจำนวน 3 ร่อง ร่องละ 3.2 mm แทรกไว้หลังชั้นที่ 17 34 และ 51 ซึ่งใน 71 ชั้นนี้มีกระดาษฉนวนหนา 0.13 mm มาแทรกระหว่างชั้นทั้งหมด ซึ่งจะเริ่มต้นด้วยการพันกระดาษฉนวน(ใน)หนา 1 mm จำนวน 2 รอบก่อนจากนั้นเริ่มลวดแรงสูง 17 ชั้น โดยชั้นที่ 1 จะพันจำนวน 70 รอบ เนื่องจากมีการเว้นระยะหัวท้ายชั้นที่ 1 เป็นฝั่งละ 20 mm จากเดิมที่ออกแบบไว้ให้ทุกชั้นเว้นระยะหัวท้ายฝั่งละ 10 mm เพื่อป้องกันการลัดวงจร จำนวนรอบที่หายไปชั้นที่ 1 จะแบ่งไปเฉลี่ยในชั้นถัด ๆ ไป จากนั้นเมื่อพันสลับกันระหว่างลวดแรงสูงกับกระดาษฉนวนหนา 0.13 mm จนครบ 17 ชั้น จะแทรกด้วยร่องน้ำมันหนา 3.2 mm แล้วเริ่มพันขดลวดแรงสูงสลับกับกระดาษฉนวนหนา 0.13 mm ชั้นที่ 18-34 ต่อเลย แล้วแทรกด้วยร่องน้ำมันเช่นเดิม ทำแบบนี้เรื่อย ๆ ตามที่ออกแบบไว้จนครบ 71 ชั้น จะปิดท้ายด้วยกระดาษฉนวน(นอก) หนา 0.5 mm จำนวน 4 รอบ โดยภาพจำลองการพันขดลวดแรงสูงดังรูปที่ 4.12 และการปฏิบัติงานจริงดังรูปที่ 4.13



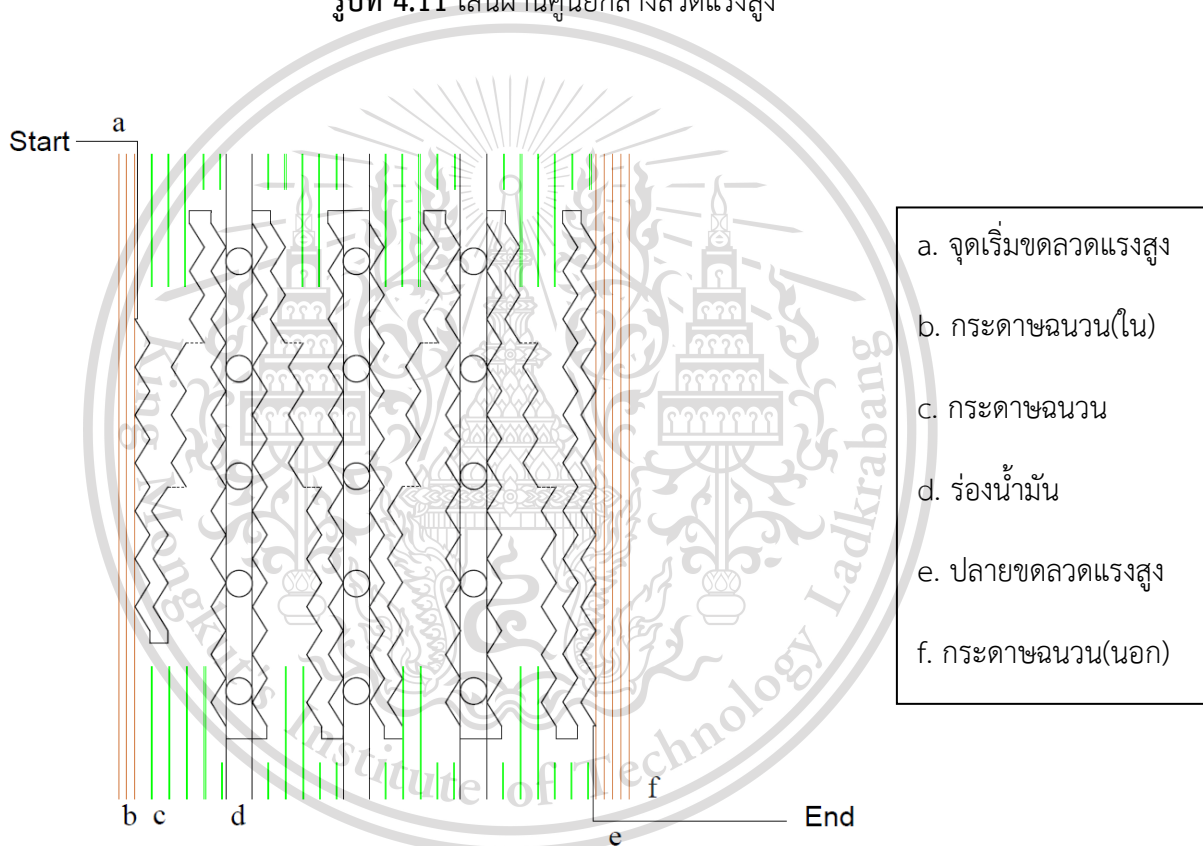
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.10 ขนาดของชุดลวดย่อย
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.11 เส้นผ่านศูนย์กลางลวดแรงสูง



รูปที่ 4.12 การพันลวดแรงสูงต่อ 1 ชุดลวดย่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.13 การปฏิบัติงานจริง

(ก) ลวดแรงสูง

(ข) จุดเริ่มขดลวดแรงสูง

(ค) ฉนวนระหว่างชั้น

(ง) ชุดลวดย่อย 1 ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

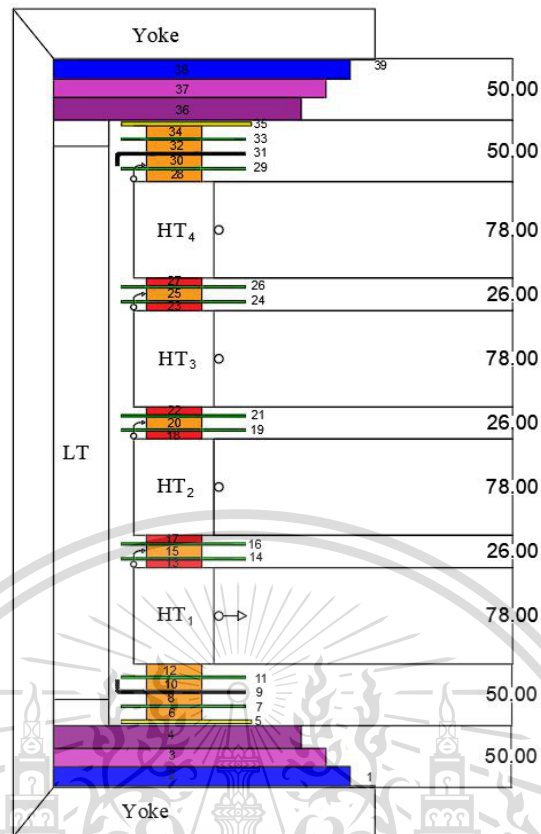
4.4 การประกอบขดลวดเข้ากับแกนเหล็ก

การประกอบทั้งขดลวดแรงสูงและขดลวดแรงต่ำเข้ากับแกนเหล็กจะทำตามการคำนวณดังรูปที่ 4.14 โดยจะต้องทำการเปิดแกนเหล็กส่วนด้านบนหรือที่เรียกว่า ยอร์ค ออกก่อน จากนั้นทำการใส่กระดาษฉนวนที่เรียกว่า Leg insulation หนา 1.6 mm สวมแกนเหล็กตรงกลาง แล้วต่อด้วย เบกาไลท์ เส้นผ่านศูนย์กลาง 630 mm หนา 15 mm และจัดเรียงลิมที่ยาว 240 mm หนา 13 mm จำนวน 8 ชั้น ให้มีความสม่ำเสมอรอบ ๆ แกนเหล็กตรงกลางและให้น้ำมันไหลผ่านไปได้ จากนั้นจะมีลิมที่ยาว 230 mm หนา 20 mm อีก 8 ชั้นเรียงทับ แล้วจึงเริ่มวางขดลวดแรงต่ำซึ่งจะอยู่ในสุดใกล้กับแกนเหล็กตรงกลางมากที่สุด ซึ่งถัดออกมาจากขดลวดแรงต่ำจะเป็นขั้นตอนการวางขดลวดแรงสูง โดยจะเริ่มด้วยการใส่กระดาษฉนวนวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 570 mm หนา 3.2 mm 1 แผ่น และทำการเรียงลิมยาว 105 mm หนา 10 mm อีก 8 ชั้นจัดเรียงให้ตรงแนวเดิม แล้วใส่กระดาษฉนวนวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 440 mm หนา 1.6 mm อีก 1 แผ่น ตามด้วยลิมยาว 105 mm หนา 10 mm อีก 8 ชั้นวางให้ตรงแนวเดิม จากนั้นใส่กระดาษฉนวน Angular ring หนา 2 mm จากนั้นเป็นลิมยาว 105 mm หนา 10 mm อีก 8 ชั้น แล้วใส่กระดาษฉนวนวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 440 mm หนา 1.6 mm อีก 1 แผ่น ตามด้วยลิมยาว 105 mm หนา 10 mm อีก 8 ชั้น เริ่มวางขดลวดแรงสูงชุดแรก เมื่อวางชุดแรกเสร็จ จะมีการใช้ลิมขนาดเท่าเดิมวางสลับกับกระดาษฉนวนวงกลมทั้งหมด 5 ชั้นโดยเป็นลิม 3 ชั้น และกระดาษฉนวนวงกลม 2 ชั้น แล้วจึงวางขดลวดแรงสูงชุดที่ 2 ได้ ทำแบบนี้เรื่อย ๆ จนครบขดลวดแรงสูงทั้ง 4 ชุด แล้วจึงนำเอาลิมที่ยาว 105 mm หนา 10 mm 8 ชั้นเรียงให้ตรงแนวเดิมต่อด้วยกระดาษฉนวนวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 440 mm หนา 1.6 mm 1 แผ่น ถัดมาเป็นลิมขนาดเท่าเดิมอีก 8 ชั้น แล้วเอา Angular ring มาใส่เช่นเดิม ถัดมาเป็นลิมจำนวน 8 ชั้นเท่าเดิมแล้วต่อด้วยกระดาษฉนวนวงกลมขนาดเท่าเดิม จัดเรียงลิม 8 ชั้นอีกที แล้วสุดท้ายกระดาษฉนวนวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 570 mm หนา 3.2 mm ระยะความสูงทั้งหมดของฝั่งขดลวดแรงสูงนี้จะได้เท่ากับระยะความสูงของขดลวดแรงต่ำที่จัดวางตอนแรกพอดี จากนั้นจัดวางลิมที่ยาว 230 mm หนา 20 จำนวน 8 ชั้นเหมือนเดิม แล้วต่อด้วยลิมที่ยาว 240 mm หนา 13 mm จำนวน 8 ชั้น ปิดท้ายด้วยการสวม เบกาไลท์ เส้นผ่านศูนย์กลาง 630 mm หนา 15 mm แล้วใส่กระดาษฉนวน Leg insulation หนา 1.6 mm ซึ่ง Leg insulation ตัวบนจะมีการเจาะรูเพื่อนำสายขดลวดแรงต่ำออกมาได้ แล้วเรียงเหล็กด้านบนหรือ ยอร์ค ใส่กลับคืน โดยเมื่อประกอบเสร็จสิ้นจะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.15 และขั้นตอนการปฏิบัติงานจริงเป็นดังรูปที่ 4.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



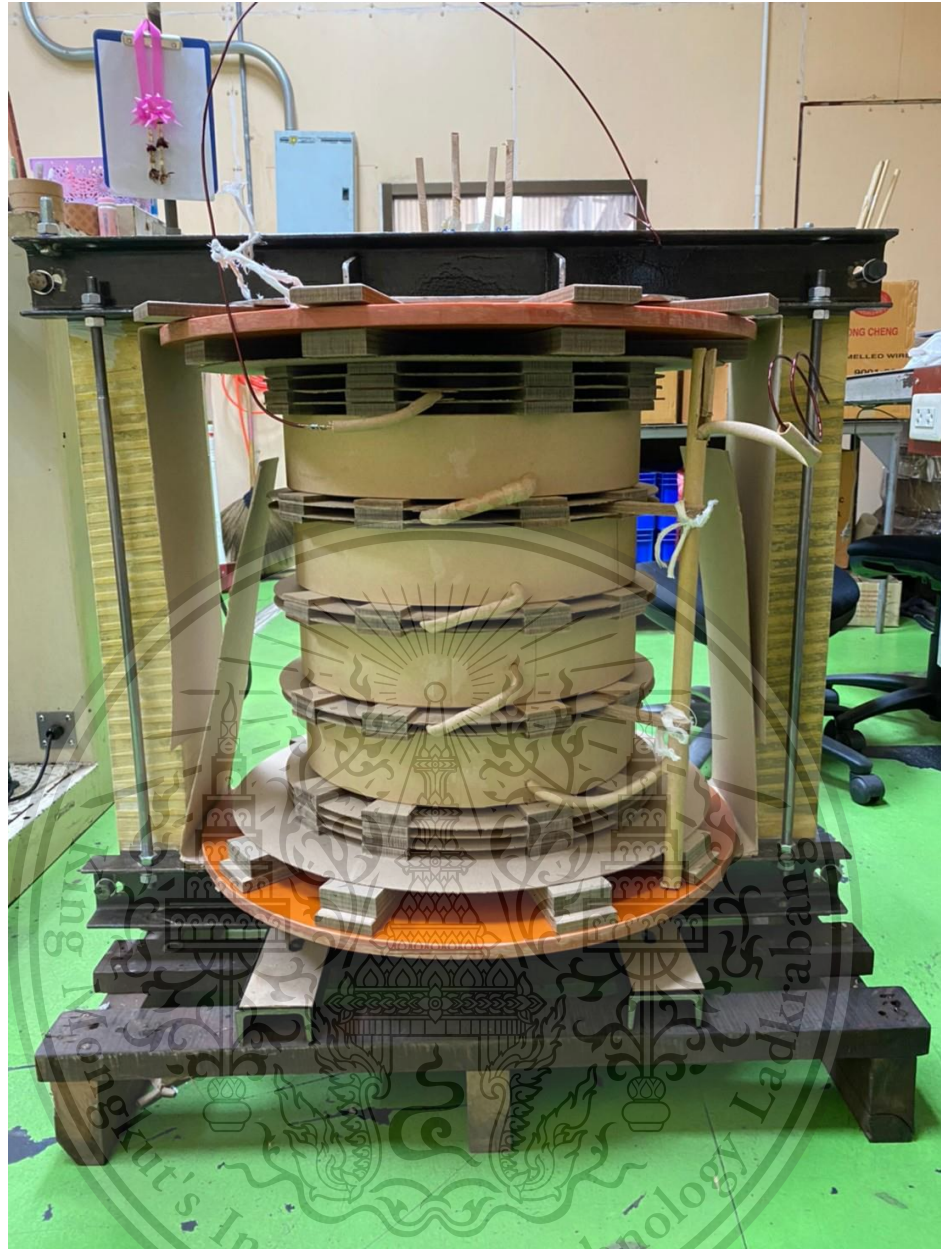
รูปที่ 4.14 แบบจำลองการคำนวณ

- | | |
|----------------------|--|
| 1,39 | คือ Leg insulation |
| 2,38 | คือ เบกาไลท์ |
| 3,37 | คือ ลิมยาว 240 mm |
| 4,36 | คือ ลิมยาว 230 mm |
| 5,35 | คือ กระจาฉนวนวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 570 mm |
| 6,8,10,12,13,15,17, | |
| 18,20,22,23,25,27, | |
| 28,30,32,34 | คือ ลิมยาว 105 mm |
| 7,11,14,16,19,21,24, | |
| 26,29,33 | คือ กระจาฉนวนวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 440 mm |
| 9,31 | คือ กระจาฉนวน Angular ring |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาระหว่างชั้นเรียน ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม หากมีให้ข้อมูลเปลี่ยนแปลง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

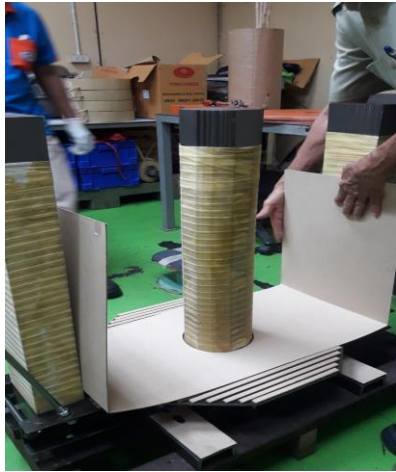


รูปที่ 4.15 ชิ้นงานเมื่อประกอบขดลวดเข้ากับแกนเหล็กเรียบร้อยแล้ว

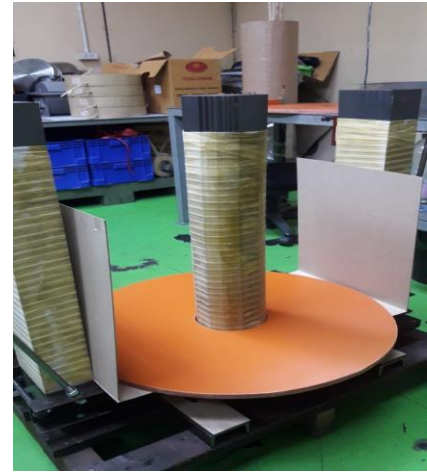
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

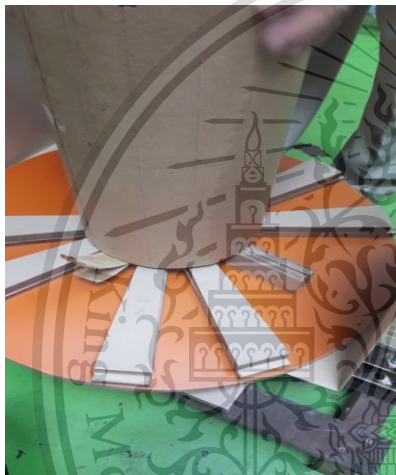
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

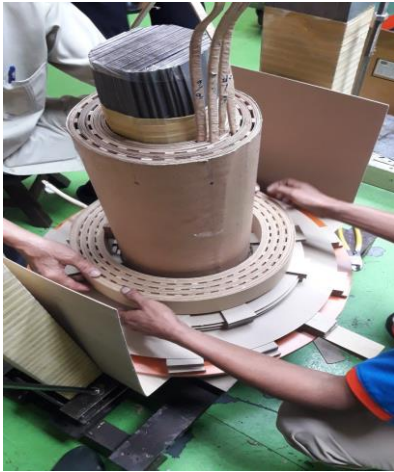


(ฉ)

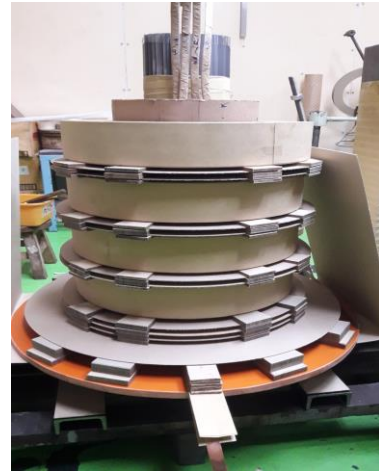
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



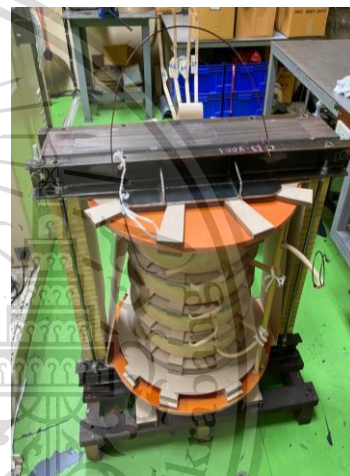
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 4.16 การปฏิบัติงานจริง

(ก) ใส่กระดาษฉนวน Leg insulation

(ข) ใส่ฉนวน เบกาไลท์

(ค) จัดวางลึ่มยาว 240 mm และ 230 mm

(ง) ใส่ชุดลวดแรงต่ำและวางกระดาษฉนวนวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 570 mm

(จ) จัดกระดาษฉนวนวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 570 mm

(ฉ) จัดวางลึ่มยาว 105 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ช) ใส่ชุดลวดแรงสูงครบทั้ง 4 ชุด

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

(ฉ) จัดเรียงแกนเหล็กด้านบนใหม่

(ญ) ประกอบขดลวดเข้ากับแกนเหล็กเรียบร้อยแล้ว

4.5 ตัวถังและส่วนประกอบภายนอก

จากการออกแบบตัวถังที่ได้ออกแบบมาไว้ในบทที่ 3 คือเป็นหม้อแปลงทดสอบที่จะใช้โครงถังเป็นเหล็กกรรมทั้งฝาถังของหม้อแปลงทดสอบ โดยที่รูปทรงของถังหม้อแปลงทดสอบจะเป็นดังรูปที่ 4.17 ซึ่งนั้นสามารถแยกส่วนประกอบภายนอกของหม้อแปลงได้ทั้งหมด 2 ส่วน ประกอบด้วยส่วนของตัวถังหม้อแปลง และฝาถังหม้อแปลงที่เชื่อมต่อกับทั้งหมด

ส่วนตัวถังหม้อแปลง นั้นจะสามารถแยกส่วนประกอบออกไปได้ดังนี้ ส่วนที่ใช้สำหรับยึดใส่หม้อแปลงไม่ให้เคลื่อนที่ ส่วนของแอสตัโฮลล์เพื่อใช้สำหรับการเข้ามาเชื่อมต่อระหว่างบุชชิงแรงดันสูงและใส่หม้อแปลงแรงดันสูง ส่วนของช่องว่างในการต่อระหว่างบุชชิงแรงดันต่ำและขดลวดแรงดันต่ำฐานที่ใช้สำหรับตั้งถัง และส่วนของจุดต่อกราวด์เพื่อใช้สำหรับต่อสายกราวด์ของระบบ

ส่วนฝาถังหม้อแปลง นั้นจะสามารถแยกส่วนประกอบออกไปได้ดังนี้ ส่วนสำหรับช่องว่างสำหรับต่อระหว่างบุชชิงแรงดันสูงและขดลวดแรงดันสูง ส่วนสำหรับตรวจปริมาตรน้ำมันในถัง และหูสำหรับยกเคลื่อนย้ายถังเพื่อสะดวกในการใช้งานภายในพื้นที่ต่าง ๆ

จากส่วนที่กล่าวมาข้างต้นนั้นสามารถอธิบายขั้นตอนการปฏิบัติงานจริงได้ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.17 ภาพจำลองของตัวถังและภาพมุมมองสูงของตัวถัง

(ก) คือภาพมุมมองโดยรวมของถัง

(ข) คือภาพมุมมองสูงของถัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



(ก)



(ข)



(ค)



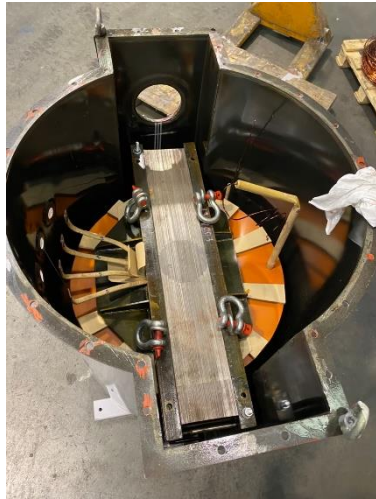
(ง)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ(จ)รใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้(ฉ)ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



(ข)



(ข)

รูปที่ 4.18 ส่วนประกอบภายนอกของหม้อแปลงทดสอบ

- (ก) ด้านหน้าตัวถัง
- (ข) ด้านข้างตัวถัง
- (ค) ฝาถังด้านนอก
- (ง) ฝาถังด้านใน
- (จ) ยกไส้หม้อแปลงเตรียมนำลงในตัวถัง
- (ฉ) นำไส้หม้อแปลงลงเข้าไปในตัวถังและจัดความเรียบร้อย
- (ช) จัดตำแหน่งเพื่อเตรียมตัวสำหรับการต่อขลุขซึ่งด้านแรงดันต่ำ
- (ซ) ทดสอบต่อขลุขซึ่งด้านแรงดันต่ำและจัดเตรียมสำหรับต่อสายลิตไปยังขลุขซึ่งด้านแรงดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.6 การต่อสายและการเติมน้ำมัน

ในการต่อปลายของขดลวดด้านแรงดันต่ำ และปลายขดลวดด้านแรงดันสูงเข้ากับส่วนต่าง ๆ ของถังหม้อแปลง และฝาหม้อแปลงนั้น สามารถจำแนกรูปแบบการเชื่อมต่อสายในส่วนต่าง ๆ ได้เป็น 4 ส่วนดังต่อไปนี้

1. เชื่อมต่อสายกราวด์ของขดลวดทางด้านแรงดันสูง เข้าสู่กราวด์ของถังหม้อแปลง
2. เชื่อมต่อสายจากชิลป้องกันระหว่างขดลวดแรงดันต่ำ และขดลวดแรงดันสูงเข้ากับกับตัวถังเพื่อต้องการให้เกิดการป้องกันการเกิดเบรกดาวนระหว่างขดลวดแรงดันสูงและขดลวดแรงดันต่ำ
3. เชื่อมต่อปลายของขดลวดด้านแรงดันต่ำเข้ากับบุชชิงแรงดันต่ำ โดยจะมีรูปแบบการต่อ 2 แบบด้วยกัน เพื่อมีความหลากหลาย และสะดวกในการใช้งาน
4. เชื่อมต่อปลายด้านแรงดันสูงเชื่อมต่อกับปลายบุชชิงด้านแรงดันสูง

ซึ่งเมื่อทำการต่อสายตัวนำเป็นที่เรียบร้อยแล้วจึงทำการเติมน้ำมันเข้าไปยังถังหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีไส้หม้อแปลงบรรจุอยู่แล้วจึงปิดฝาแล้วเชื่อมต่อเข้าไปยังบุชชิงแรงสูงต่อไป

จากรูปแบบการเชื่อมต่อสายทั้ง 4 รูปแบบ ที่กล่าวมานั้นสามารถอธิบายขั้นตอนการปฏิบัติงานจริง ได้ดังรูปที่ 4.19



(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



(ค)



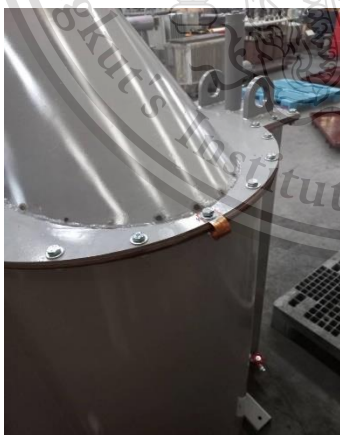
(ง)



(จ)



(ฉ)



(ช)



(ซ)

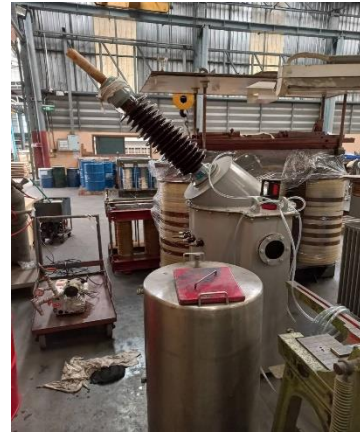
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



(ฉ)



(ญ)



(ฎ)

รูปที่ 4.19 ขั้นตอนการปฏิบัติงานจริงในการต่อสายตัวนำและการเติมน้ำมัน

(ก) ทำการเดินสายของขั้วแรงต่ำและแรงสูงขึ้นด้านบนของตัวไส้ และส่วนซิลด์ทำการเชื่อมต่อตัวกับกราวด์ของตัวถังผ่านด้านล่างของตัวไส้หม้อแปลง

(ข) ทำการต่อสายจากขั้วขดลวดแรงต่ำเข้ากับตัวบุชชิ่งแรงต่ำของส่วนถังโดยเรียงเป็น a1 b1 a2 b2 ตามลำดับ

(ค) เดินสายส่วนขั้วของขดลวดแรงสูงขึ้นด้านบนผ่านช่องใส่บุชชิ่งแรงสูงเพื่อเตรียมการประกอบส่วนบุชชิ่งแรงสูง

(ง) ทำการต่อส่วนขั้วของขดลวดสูงเข้ากับตัวบุชชิ่งแรงสูง

(จ) ทำการเชื่อมต่อฐานของบุชชิ่งแรงสูงให้เชื่อมกับฝาถังและตัวถัง โดยการเชื่อมแผ่นทองแดงบริเวณฐานของบุชชิ่งแรงสูง เพื่อให้ฐานของบุชชิ่งแรงสูงเป็นกราวด์เช่นเดียวกัน เมื่อทำการต่อสายดินไปยังตัวถัง

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

(ฉ) ทำการเชื่อมต่อฝาถังให้เชื่อมฝาถังกับตัวถัง โดยการเชื่อมแผ่นทองแดงบริเวณด้านหน้าของตัวถัง เพื่อให้ฝาถังและฐานของบุชซึ่งแรงสูงเป็นกราวด์เช่นเดียวกันทั้งถัง เมื่อทำการต่อสายดินไปยังตัวถัง

(ช) ทำการเชื่อมต่อฝาถังให้เชื่อมฝาถังกับตัวถัง โดยการเชื่อมแผ่นทองแดงบริเวณด้านหลังของตัวถัง เพื่อให้ฝาถังและฐานของบุชซึ่งแรงสูงเป็นกราวด์เช่นเดียวกันทั้งถัง เมื่อทำการต่อสายดินไปยังตัวถัง

(ซ) สภาพของหม้อแปลงเมื่อทำการต่อสายและเชื่อมตัวถังเข้าด้วยกัน

(ฅ) สภาพตัวหม้อแปลงทดสอบก่อนนำไป อบแห้งสุญญากาศและเติมน้ำมันหม้อแปลง

(ญ) เติมน้ำมันหม้อแปลงในสภาพสุญญากาศเพื่อบรรจุให้ได้ตามปริมาตรที่กำหนด

(ฎ) หม้อแปลงทดสอบหลังทำการเติมน้ำมันเสร็จ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.7 ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.1 Test results

Test Data									
Measurement of Ratio test									
Parallel connection (V)			201.74		Series connection (V)			402.50	
Measurement of No-Load Loss & Exciting									
Voltage at 100%				Temperature				35.6	
Voltage ($V_{m/\sqrt{2}}$)		500.19		Frequency		50 Hz		Harmonic	
Voltage (Vrms)		498.37		PF		0.94 %		Relative Permittivity	
Current (Amp)		2.1705		No-Load Loss (Watt)			222.6		
Measurement of Load Loss									
System 100 kV 1.5789 A				Frequency		50 Hz		Harmonic	
Voltage Urms		1004.2		PF		0.94 %		Relative Permittivity	
Current (Amp)		-0.01647		Temperature				Avg	
Load Loss (Watt)		3.03						35.6	
Measurement of Insulation Resistance									
			Voltage Test (DC)		Duration (Sec.)		Ambient Temp.		35.6 °C
Primary-Secondary		207000 Mohm	5000		60		Relative Permittivity		27 %
Primary-Earth		245000 Mohm	5000		60				
Secondary -Earth		22900 Mohm	1000		60				



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอู่ฝึกงานที่โรงเรียนอาชีวศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.20 ขั้นตอนการทดลอง Ratio test
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

หม้อแปลงทดสอบไฟฟ้าแรงสูงขนาดพิกัด 100 kV 30 kVA ที่ออกแบบและสร้างขึ้นมานี้ เป็นหม้อแปลงทดสอบแบบถังเหล็ก กระจาย Diamond dotted เป็นฉนวนระหว่างชั้นขดลวด และใช้น้ำมันหม้อแปลง Shell diala zx-1 เป็นฉนวนเหลวให้ซึมผ่านส่วนต่าง ๆ ภายในหม้อแปลงเพื่อระบายความร้อน โดยเมื่อทดสอบลักษณะและสมบัติการใช้งานตามที่มาตรฐาน IEC กำหนด ผลที่ออกมาคือผ่านมาตรฐานในทุก ๆ ด้าน ดังตารางที่ 5.5

เนื่องจากสถานการณ์โควิดทำให้ไม่สามารถใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีพิกัด 100 kV ได้ ทำให้ต้องอิงผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในขั้นตอนออกแบบแทน และผลคือไม่เกิดดิสชาร์จบางส่วน ทั้งนี้การทดสอบจริงอาจได้ผลลัพธ์ไม่เหมือนกับการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จึงไม่สามารถสรุปได้อย่างแน่ชัด

สำหรับหม้อแปลงทดสอบไฟฟ้าแรงสูงขนาดพิกัด 100 kV 30 kVA ตัวนี้จะเป็นต้นแบบและสื่อการเรียนรู้สำหรับผู้ที่สนใจศึกษาหรือสร้างหม้อแปลงทดสอบ โดยได้แสดงข้อมูลทั่วไปของหม้อแปลงทดสอบไว้ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลทั่วไปของหม้อแปลงทดสอบ 100 kV 30 kVA

พิกัดกำลังไฟฟ้า	30 kVA
พิกัดแรงดันของขดลวดแรงต่ำ	250 V / 500 V
พิกัดแรงดันของขดลวดแรงสูง	100 kV
พิกัดกระแสของขดลวดแรงต่ำ	120 A / 60 A
พิกัดกระแสของขดลวดแรงสูง	0.3 A
ความถี่	50 Hz
เปอร์เซ็นต์แรงดันลัดวงจร	8.506%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 5.2 รายละเอียดของขดลวดและฉนวนหม้อแปลงทดสอบ 100 kV 30 kVA

รายละเอียด	ขดลวดแรงต่ำ	ขดลวดแรงสูง
ชนิดการพัน	ชั้นทรงกระบอก	ชั้นทรงกระบอก
จำนวนขดลวด	2 ชุด	1 ชุด
พื้นที่ภาคตัดขวางของขดลวดตัวนำ	2.6*10 mm ²	0.45 mm ²
ความหนาแน่นของกระแสของขดลวด	2.35 A/mm ²	1.875 A/mm ²
จำนวนรอบของขดลวด	82 รอบ / 164 รอบ	32,800 รอบ
แรงดันสูงสุดต่อรอบ	3.0488 V	3.0351 V
แรงดันสูงสุดระหว่างชั้น	125 V	352.1 V
ฉนวนระหว่างชั้น	Diamond dotted	Diamond dotted

ตารางที่ 5.3 รายละเอียดของแกนเหล็กหม้อแปลงทดสอบ 100 kV 30 kVA

แผ่นเหล็กซิลิคอน M-4	0.27 mm
พื้นที่ภาคตัดขวาง	13,715.8 mm ²
ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก	1 T
กระแสป้อนเข้าขณะ No-Load	0.5305 A
กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด	91.0848 W

ตารางที่ 5.4 ตัวถังหม้อแปลงทดสอบ 100 kV 30 kVA

ถังเหล็กเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน	700 mm
ความหนา	5 mm
ความสูง	1140 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบหม้อแปลงทดสอบ 100 kV 30 kVA

Test Data									
Measurement of Ratio test									
Parallel connection (V)			201.74		Series connection (V)			402.50	
Measurement of No-Load Loss & Exciting									
Voltage at 100%				Temperature				35.6	
Voltage ($V_m/\sqrt{2}$)		500.19		Frequency		50 Hz		Harmonic	
Voltage (Vrms)		498.37		PF		0.94 %		Relative Permittivity	
Current (Amp)		2.1705		No-Load Loss (Wat)			222.6		
Measurement of Load Loss									
System 100 kV 1.5789 A				Frequency		50 Hz		Harmonic	
Voltage Urms		1004.2		PF		0.94 %		Relative Permittivity	
Current (Amp)		0.01647		Temperature				Avg	
Load Loss (Watt)		3.03						35.6	
Measurement of Insulation Resistance									
		Voltage Test (DC)		Duration (Sec.)		Ambient Temp.		35.6 °C	
Primary-Secondary		207000 Mohm		5000		60		Relative Permittivity	
Primary-Earth		245000 Mohm		5000		60		27 %	
Secondary -Earth		22900 Mohm		1000		60			

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการประกอบสร้างหม้อแปลงเป็นงานที่ต้องอาศัยเครื่องมือและอาศัยบุคลากร โดยทางผู้จัดทำได้รับการสนับสนุนจากบริษัท ซีซี หม้อแปลงไฟฟ้า จำกัด ซึ่งส่งผลให้เกิดปัญหาในการเดินทางเข้าบริษัทเนื่องจากสถานการณ์การแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 (Covid-19) จึงทำให้เกิดการติดขัดในการดำเนินงาน จากการทางผู้จัดทำไม่สามารถเดินทางเข้าบริษัทได้ ส่งผลให้เกิดการสื่อสารที่ผิดพลาดขึ้น และเนื่องจากบุชซึ่งได้ทำการออกแบบมีมุมเอียงถึง 45 องศา ทำให้ฝาถังหม้อแปลงต้องออกแบบเป็นพิเศษ ซึ่งเป็นเรื่องท้าทายสำหรับบริษัทที่ประกอบสร้างฝาถังหม้อแปลงอย่างมาก ส่งผลให้หม้อแปลงที่ประกอบสร้างเกิดความผิดพลาดขึ้นคือ ฝาถังหม้อแปลงไม่สามารถประกอบเข้ากับตัวถังหม้อแปลงได้ ทางบริษัท ซีซี หม้อแปลงไฟฟ้า จำกัด จึงนำไปแก้ไขซึ่งต้องใช้เวลาพอสมควร จึงทำให้แผนการดำเนินงานคลาดเคลื่อนและล่าช้าออกไปจากที่กำหนดไว้แต่แรกมากส่งผลให้การทดสอบดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge) ไม่สามารถที่จะทดสอบได้ตามแผนการดำเนินการ ทางผู้จัดทำจึงได้อิงผลการทดสอบจากการใช้โปรแกรมจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ Comsol แทนการทดสอบจริง โดยผลการจำลองสามารถดูได้ที่ภาคผนวก ง ผลการจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ห้ามทำซ้ำหรือดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงแหล่งที่มาในการนำไปใช้
หม้อแปลงที่ประกอบสร้างนี้เปรียบเสมือนหม้อแปลงต้นแบบในการที่จะนำไปพัฒนาสร้างหม้อแปลงที่ปราศจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge) ซึ่งได้ทำการออกแบบจนวนไว้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

อย่างละเอียดถี่ถ้วนเพื่อป้องกันให้ได้มากที่สุด แต่เนื่องจากไม่สามารถที่จะทดสอบได้จริงจึงไม่สามารถยืนยันได้ว่าหม้อแปลงนี้ปราศจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge) ซึ่งสำหรับผู้ที่ประสงค์นำหม้อแปลงนี้ไปพัฒนาให้ดีขึ้นบริเวณที่ผู้จัดทำคาดว่าเสี่ยงต่อการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge) คือ บริเวณปลายของขดลวดแรงสูง ซึ่งสามารถป้องกันได้โดยการเพิ่มระยะห่างระหว่างขดลวดแรงสูงและขดลวดแรงต่ำหรือ เพิ่มความหนาของฉนวนให้มากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เอกสารอ้างอิง

- [1] N. U. A. Wardani, A. P. Purnomoadi, H. I. Septiani, I. Arifianto and B. Cahyono, "Condition assessment of 500/150 kV power transformer based on condition based maintenance," 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics, 2011, pp. 1-4.
- [2] H. Ye et al., "Insulation characteristics of deformed transformer winding under transient impulse," 2017 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon (CEIDP), 2017, pp. 552-555.
- [3] พีรฤตม์ ยุทธโกวิท, "การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบขนาด 300 kV 300 kVA," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [4] จักรกฤษณ์ อธิธิยาภรณ์, จิระศักดิ์ ธรรมศิลา, วรวิษ ยืนยง และ วิชชุดา ใจชัยภูมิ, "การออกแบบสร้างหม้อแปลงทดสอบ 100 kv 10 kVA," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548.
- [5] สำรวัย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, พิมพ์ครั้งที่ 4, กรุงเทพมหานคร, 2527.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบไฟฟ้าแรงสูงพิกัด 100 kV 30 kVA

Design and Construction of a High-voltage Testing Transformer with Rating of 100 kV and 30 kVA

พงศธร เต็มเขตพิงศ์ วงศธร พิมพ์ภรณ์ วิทวัส ฐานวัฒนกิจ และ ศรุต สรรพวัชร

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-Mail: prasopchok_ho@hotmail.com

บทคัดย่อ

Keywords: High-voltage testing transformer, partial discharge

หม้อแปลงทดสอบเป็นอุปกรณ์หนึ่งในวงจรทดสอบที่แพงและสำคัญที่สุด ดังนั้นการออกแบบและการสร้างหม้อแปลงทดสอบไฟฟ้าแรงสูงสามารถช่วยประหยัดงบประมาณแทนที่จะซื้อแบบหม้อแปลงสำเร็จรูป ถึงอย่างนั้นหม้อแปลงทดสอบต้องมีความน่าเชื่อถือเพื่อให้แน่ใจว่าสามารถใช้ในการทดสอบได้จริง โดยเฉพาะอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้าแรงสูง การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจะต้องเป็นไปตามมาตรฐานซึ่งได้แก่ การทดสอบประจำ และการทดสอบพิเศษบางอย่างตามที่ต้องการ การทดสอบการคายประจุบางส่วนเป็นหนึ่งใน การทดสอบพิเศษที่ระบุจำนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเสื่อมสภาพ ขนาดไหน ดังนั้นหม้อแปลงทดสอบไฟฟ้าแรงสูงต้องมีการคายประจุ บางส่วนน้อยกว่า 5 pC ที่ 100 kV จึงจะสามารถทดสอบการคายประจุ บางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้าแรงสูงได้

คำสำคัญ: หม้อแปลงทดสอบไฟฟ้าแรงสูง การคายประจุบางส่วน

Abstract

A testing transformer is one of the most expensive and important High-voltage testing circuits. Therefore, the design and construction of a High-voltage testing transformer can save money instead of buying a finished model. Even so, this testing transformer must have reliable. To ensure that it can be used in the actual test, especially electrical equipment that is installed in a high voltage system. However, High-voltage equipment testing must be according to the standards including routine tests and some special tests. A Partial discharge testing is one of the special tests that indicated how insulation of High-voltage equipment degradation. Thus, a High-voltage testing transformer must have partial discharge less than 5 pC at 100 kV. As a result, partial discharge detection in the electrical equipment that is installed in a high voltage system can be possible.

1. บทนำ

ในปัจจุบันอุปกรณ์แรงสูงในประเทศไทยมีการผลิตอยู่เป็นจำนวนมากและจะต้องมีการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าเพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดหรือมาตรฐาน กล่าวคือ อุปกรณ์ไฟฟ้าจะต้องใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย เมื่อนำไปใช้งานต้องสามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ ซึ่งในการทดสอบจำเป็นต้องใช้หม้อแปลงทดสอบ และในการทดสอบทั่วไป หม้อแปลงจะทำงานได้ถึงประมาณ 60 kV จากนั้นจะเริ่มเกิดคิสซาร์จบางส่วน ซึ่งในการทดสอบสายเคเบิลได้คินของระบบ 33 kV จะต้องทำการทดสอบที่ 70 kV ซึ่งได้เกิดคิสซาร์จบางส่วนแล้วอาจส่งผลให้มีการเบรคความถี่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นส่วนใหญ่จะเป็นการสั่งซื้อจากต่างประเทศเนื่องจากมีประสิทธิภาพดี แต่มีราคาที่แพง ซึ่งในความเป็นจริงนั้นบริษัทผลิตหม้อแปลงภายในประเทศสามารถผลิตหม้อแปลงทดสอบที่มีประสิทธิภาพขึ้นเองได้

ด้วยเหตุนี้จึงเป็นแนวคิดให้ออกแบบหม้อแปลงทดสอบไฟฟ้าแรงสูงขนาดพิกัด 100 kV 30 kVA เพื่อใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงตามมาตรฐานกำหนด ซึ่งการที่จะทำงานที่ 100 kV โดยไม่เกิดคิสซาร์จบางส่วนขึ้นนั้นจำเป็นต้องมีการคำนวณอย่างละเอียดถี่ถ้วน พร้อมทั้งจำลองด้วยโปรแกรมที่สามารถหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าก่อนที่จะนำไปทดสอบในลำดับถัดไปเพื่อใช้งานจริง

โดยผลลัพธ์ที่คาดว่าจะได้รับคือสามารถนำงานวิจัยนี้ไปศึกษาและประยุกต์ใช้ในการออกแบบและประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบได้อีกทั้งยังเป็นแนวทางการออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบในประเทศไทย ซึ่งหากสามารถออกแบบและผลิตหม้อแปลงทดสอบในประเทศไทยได้จะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายจากภายนอกและค่าขนส่ง และสามารถใช้งานหม้อแปลงทดสอบที่แรงดันไฟฟ้า 100 kV โดยที่ยังไม่เริ่มเกิดคิสซาร์จบางส่วน

และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2. การออกแบบและการสร้าง

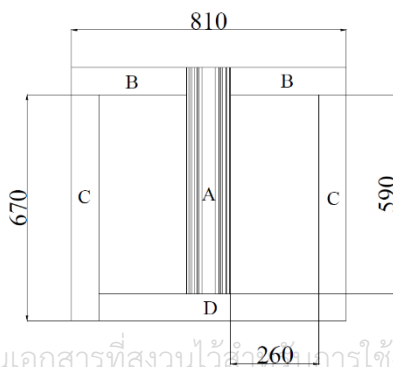
ในการออกแบบเพื่อสร้างหม้อแปลงทดสอบไฟฟ้าแรงสูงขนาดพิกัด 100 kV 30 kVA ต้องมีการคำนวณส่วนประกอบต่าง ๆ เพื่อเลือกให้เหมาะสม ปลอดภัย และเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ โดยจะแบ่งการคำนวณออกเป็นดังนี้

2.1 การออกแบบแกนเหล็ก

แกนเหล็กทำหน้าที่เป็นทางผ่านของเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งแผ่นเหล็กที่ใช้จะเป็นชนิด M-4 มีส่วนผสมของซิลิกอนเพื่อรักษาความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งความหนาของแผ่นเหล็กคือ 0.27 mm ทำให้ใช้ค่า Stacking factor เท่ากับ 0.97 ใช้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กเท่ากับ 1 Wb/m^2 เนื่องจากค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กจะอิ่มตัวประมาณ 1.4 Wb/m^2

การออกแบบหน้าตัดแกนเหล็กทำเป็นทั้งหมด 8 ชั้น คือ รูปสี่เหลี่ยมภายในวงกลมเนื่องจากจะสามารถใช้ประสิทธิภาพได้สูงกว่าพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม โดยนำมาคำนวณพื้นที่หน้าตัดจริงของแกนเหล็กจะได้ $13,715.8 \text{ mm}^2$

ความสูงของช่องหน้าต่างจะขึ้นอยู่กับความสูงของคอยล์แรงสูงรวมกับความสูงของลิมจะได้ความสูงมีค่าเท่ากับ 390 mm ความต่างศักย์สูงสุดของขดลวดเมื่อเทียบกับแกนเหล็กมีค่า 100 kVrms ซึ่งความลึงทนต่อสนามไฟฟ้าสูงสุดภายในน้ำมันหม้อแปลงมีค่า 30 kVrms/mm ซึ่งจะต้องมีการเผื่อค่า safety factor 150% แต่ได้มีการออกแบบเพื่อไว้ที่ 1 kVrms/mm ดังนั้นจึงได้ออกแบบความสูงของช่องหน้าต่างมีค่าเท่ากับ 590 mm ส่วนความกว้างของช่องหน้าต่างจะขึ้นอยู่กับความหนาของคอยล์แรงสูงหักด้วยรัศมีแกนเหล็กซึ่งมีค่าเท่ากับ 137.5 mm แต่ในแนวกว้างของช่องหน้าต่างจะมีการฉนวนที่น้อยกว่าแนวสูงจึงออกแบบความกว้างของช่องหน้าต่างมีค่าเท่ากับ 260 mm ดังรูปที่ 1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้งชื่อลิงก์ไปยังเอกสารหรือข้อมูลใดๆที่อาจนำไปใช้
รูปที่ 1 ขนาดหน้าต่างของแกนเหล็กและการกำหนดชั้นเหล็กที่จะตัด

2.2 การออกแบบขดลวดแรงต่ำ

ในหม้อแปลงที่มีขนาดพิกัดไม่เกิน 50 kVA จะกำหนดความหนาแน่นกระแสในขดลวดอยู่ในช่วง $2.0 - 2.8 \text{ A/mm}^2$ โดยเลือกใช้ $2.6 \times 10 \text{ mm}$ นำมาคำนวณจำนวนรอบของขดลวดแรงต่ำดังสมการที่ 1

$$\text{จำนวนขดลวดแรงต่ำ} = \frac{250}{4.44 \times 50 \times 13715.8 \times 10^{-6} \times 1} = 82 \text{ รอบ} \quad (1)$$

คำนวณความหนาแน่นกระแสในขดลวดแรงต่ำ โดยจะเริ่มจากพื้นที่หน้าตัดของขดลวดแรงต่ำ $2.6 \times 10 = 26 \text{ mm}^2$ และนำมาลบออกด้วยส่วนมุมที่หายไปจะได้ $26 - 0.52 = 25.48 \text{ mm}^2$ นำมาคำนวณความหนาแน่นกระแสดังสมการที่ 2

$$\text{ความหนาแน่นกระแส} = \frac{60}{25.48} = 2.35 \text{ A/mm}^2 \quad (2)$$

โดยการพันขดลวดแรงต่ำจะมีขดลวด 2 ชุดพันชุดละ 2 ชั้น เพื่อให้ขดลวดแรงต่ำสามารถต่อได้ทั้งอนุกรมและขนาน

ชุดที่ 1 :	ชั้นที่ 1	41	รอบ
	ชั้นที่ 2	41	รอบ
	รวม	82	รอบ
ชุดที่ 2 :	ชั้นที่ 1	41	รอบ
	ชั้นที่ 2	41 <td>รอบ</td>	รอบ
	รวม	82	รอบ

2.3 การออกแบบขดลวดแรงสูง

ขดลวดแรงสูงจะใช้ลวดทองแดงอบน้ำยา PVF ซึ่งในการพันขดลวดแรงสูงจะต้องมีร่องน้ำมันเพื่อระบายความร้อนที่เกิดขึ้น โดยจะมีร่องน้ำมันทุก ๆ 17 ชั้น จำนวนรอบของขดลวดแรงสูงดังสมการที่ 3 และ 4

$$\text{กรณีต่ออนุกรมที่ด้านแรงต่ำ} \frac{164 \times 100,000}{500} = 32,800 \text{ รอบ} \quad (3)$$

$$\text{กรณีต่อขนานที่ด้านแรงต่ำ} \frac{82 \times 100,000}{250} = 32,800 \text{ รอบ} \quad (4)$$

ความกว้าง 78 mm แต่ได้มีการเผื่อระยะหัวท้ายไว้ฝั่งละ 10 mm จะเหลือระยะที่ให้พื้นขดลวดคือ 58 mm จะได้ 117.65 รอบ คำนวณจำนวนชั้นจะได้ 71 ชั้น จากนั้นนำมาหาความหนาแน่นกระแสโดยเริ่มจากการคำนวณพื้นที่หน้าตัดของขดลวดอบน้ำยาก่อน ดังสมการที่ 5 และจะได้ความหนาแน่นกระแสดังมาสมการที่ 6

$$\frac{0.45 \times 0.45}{4} \times \frac{22}{7} = 0.16 \text{ mm}^2 \quad (5)$$

$$\frac{0.3}{0.16} = 1.875 \text{ A/mm}^2 \quad (6)$$

จากนั้นคำนวณแรงดันตกคร่อมระหว่างชั้นดังสมการ 7 8 และ 9

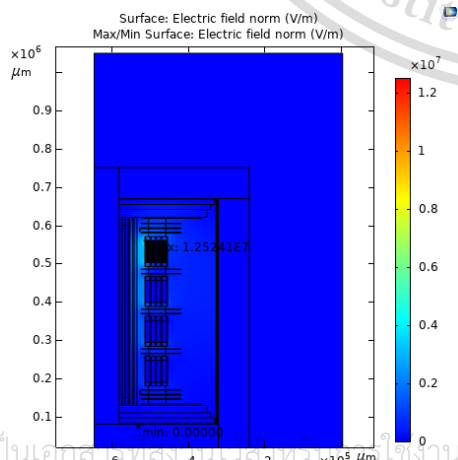
$$\text{แรงดันต่อ 1 ขดลวดย่อย} \frac{100,000}{4} = 25,000 \text{ v} \quad (7)$$

$$\text{แรงดันต่อชั้น} \frac{25,000}{71} = 352.1 \text{ v} \quad (8)$$

$$\text{แรงดันระหว่างรอบเฉลี่ย} \frac{352.1}{116} = 3.0351 \text{ v} \quad (9)$$

2.4 การคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าและการกระจายตัวของเส้นแรงแม่เหล็กด้วยการโปรแกรมจำลองในคอมพิวเตอร์

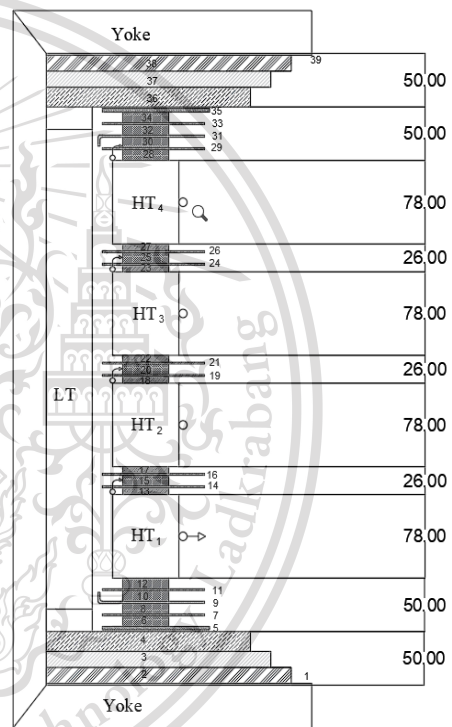
เมื่อมีการคำนวณพารามิเตอร์เรียบร้อยแล้ว จำเป็นต้องมีการคำนวณเพื่อหา การกระจายของสนามไฟฟ้า และความเครียดไฟฟ้า โดยใช้การจำลองใน โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อนำมาวิเคราะห์ว่าจะไม่เกิดดิสราร์จบางส่วนตามที่ได้ตั้งวัตถุประสงค์ไว้ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การจำลองใน โปรแกรมคอมพิวเตอร์

2.5 การตัดกระดาษฉนวน ลิ่ม และวงกลม

ส่วนของลิ่มได้มีการออกแบบมาเพื่อใช้ในการรับแรงกดทับ และยังใช้สำหรับเป็นช่องว่างในการระบายความร้อนโดยให้น้ำมันไหลผ่านสำหรับส่วนของขดลวดแรงดันสูง และในส่วนของลิ่มนี้ยังมีลวดที่มีคุณสมบัติสำหรับการป้องกันความเครียดที่เกิดขึ้นกับตัวขดลวดแรงสูงได้ ซึ่งในลิ่มแต่ละส่วนจะทนแรงดันได้เท่ากันซึ่งในทุก ๆ ระยะ 1 mm ของลวดนั้นจะทนแรงดันได้เท่ากับ 1,000 V ดังนั้นจะพบว่าระยะห่างของลิ่มซึ่งจะแบ่งระยะของลิ่มได้ทั้งหมด 2 ระยะด้วยกัน จะแบ่งได้คือ ระยะ 26 mm สามารถทนได้ 26,000 V และระยะ 100 mm สามารถทนแรงดันได้ 100,000 V ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ภาพแสดงภาพจำลองระยะห่างของลิ่มในแต่ละส่วน

3. การทดสอบหม้อแปลงทดสอบ

การทดสอบหม้อแปลงทดสอบ ไฟฟ้าแรงสูงพิกัด 100 kV 30 kVA นั้นทำหลังจากประกอบสร้างเรียบร้อยแล้ว เพื่อดูว่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานหรือไม่ โดยผลการทดสอบจะแสดงดังตารางที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารลับ ห้ามเผยแพร่ให้ผู้อื่นรู้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบของหม้อแปลงทดสอบ

Test Data				
Measurement of Ratio test				
Parallel connection (V)	201.74	Parallel connection (V)	402.50	
Measurement of No-Load Loss & Exciting				
Voltage at 100%				
Voltage (Vm)	500.19	Frequency	50	Hz
Voltage (Vm)	498.37	PF	0.94	%
Current (Amp)	2.1705	No-Load Loss (Wat)	222.6	
Measurement of Load Loss				
System 100 kV 1.5789 A				
Voltage (Voltage)	1004.2	Frequency	50	Hz
Current (Amp)	0.01647	PF	0.94	%
Load Loss (Wat)	3.03			
Measurement of Insulation Resistance				
			Voltage Test (DC)	Duration (Sec.)
Primary-Secondary	207000	Mohm	5000	60
Primary-Earth	245000	Mohm	5000	60
secondary-Earth	22900	Mohm	1000	60

4. สรุป

หม้อแปลงทดสอบไฟฟ้าแรงสูงขนาดพิกัด 100 kV 30 kVA ที่ออกแบบและสร้างขึ้นมานี้เป็นหม้อแปลงทดสอบแบบถังเหล็ก กระดาษ Diamond dotted เป็นฉนวนระหว่างชั้นขดลวด และใช้น้ำมันหม้อแปลง Shell diala zx-1 เป็นฉนวนเหลวให้ซึมผ่านส่วนต่าง ๆ ภายในหม้อแปลงเพื่อระบายความร้อน โดยเมื่อทดสอบลักษณะและสมบัติการใช้งานตามมาตรฐาน IEC กำหนด ผลที่ออกมาคือผ่านมาตรฐานในทุก ๆ ด้าน

เนื่องจากสถานการณ์โควิดทำให้ไม่สามารถใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีพิกัด 100 kV ได้ ทำให้ต้องอิงผลการทดสอบดิซชาร์จบางส่วนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในขั้นตอนออกแบบแทน และผลคือไม่เกิดดิซชาร์จบางส่วน ทั้งนี้การทดสอบจริงอาจได้ผลลัพธ์ไม่เหมือนกับการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จึงไม่สามารถสรุปได้อย่างแน่ชัด

สำหรับหม้อแปลงทดสอบไฟฟ้าแรงสูงขนาดพิกัด 100 kV 30 kVA ตัวนี้จะเป็นต้นแบบและสื่อการเรียนรู้สำหรับผู้ที่สนใจศึกษาหรือสร้างหม้อแปลงทดสอบ

transformer based on condition based maintenance," 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics, 2011, pp. 1-4.

- [2] H. Ye et al., "Insulation characteristics of deformed transformer winding under transient impulse," 2017 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon (CEIDP), 2017, pp. 552-555.
- [3] พิรุติ ยุทธโกวิท, "การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบขนาด 300 kV 300 kVA," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [4] จักรกฤษณ์ อธิธิยาภรณ์, จิระศักดิ์ ธรรมศิลา, วรวิษ ยืนยง และวิชุดา ไชย์ภูมิ, "การออกแบบสร้างหม้อแปลงทดสอบ 100 kv 10 kVA," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548.
- [5] ส้ารวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, พิมพ์ครั้งที่ 4, กรุงเทพมหานคร, 2527.



นายพงศธร เดิมเดชาดิพงศ์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยขอนแก่น (ศึกษาศาสตร์) และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาตรีที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งานวิจัยที่สนใจการวินิจฉัยการคายประจุบางส่วน



นายวงศธร พิมพ์กรณ์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา จากโรงเรียนสุวิทย์วิทยาการและเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาตรีที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งานวิจัยที่สนใจสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



นายวิทวัส สุานวัฒนกิจ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนชุมพลโพธิสัย และเข้าศึกษาต่อที่ระดับปริญญาตรีที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งานวิจัยที่สนใจสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



นายสรุต สรรพาวัตร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา จากโรงเรียนดินทรเดชา(สิงห์ สิงหเสนี) และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาตรีที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งานวิจัยที่สนใจบริภัณฑ์ไฟฟ้าแรงสูง

เอกสารอ้างอิง

- [1] N. U. A. Wardani, A. P. Purnomoadi, H. I. Septiani, I. Arifianto and B. Cahyono, "Condition assessment of 500 / 150 kV power

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Certificate of Analysis

Material 550040071 Date Manufactured 23 Sep 2020
 Material Description Diala S4 ZX-1 209L Date Tested 24 Sep 2020
 Batch Number 11570367


Test Description	Result	Unit	Method
Viscosity Kinematic 40°C	9,88	mm ² /s	ASTM D445
Viscosity Kinematic -30°C	430	mm ² /s	ASTM D445
Appearance	Clear and Bright	-	Visual
Colour (ASTM) (Qualitative)	0,5	*****	ASTM D1500
Density 15°C (by Densitometer)	807,2	kg/m ³	ASTM D4052
Density 20°C (by Densitometer)	804,1	kg/m ³	ASTM D4052
Pour Point	-45	CEL	ISO 3016
Flash Point, PMCC	194	CEL	ISO 2719
Breakdown Voltage	97	kV	IEC 60156
Dielectric Dissip Factor 90°C	0,0001	*****	IEC 60247
Water Content PPM	6	ppm	IEC 60814
Neutralisation Number	0,01	mgKOH/g	IEC 62021-1
Sulphur Content MG/KG	0	mg/kg	ASTM D4927

รูปที่ ข.1 คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง


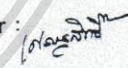
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

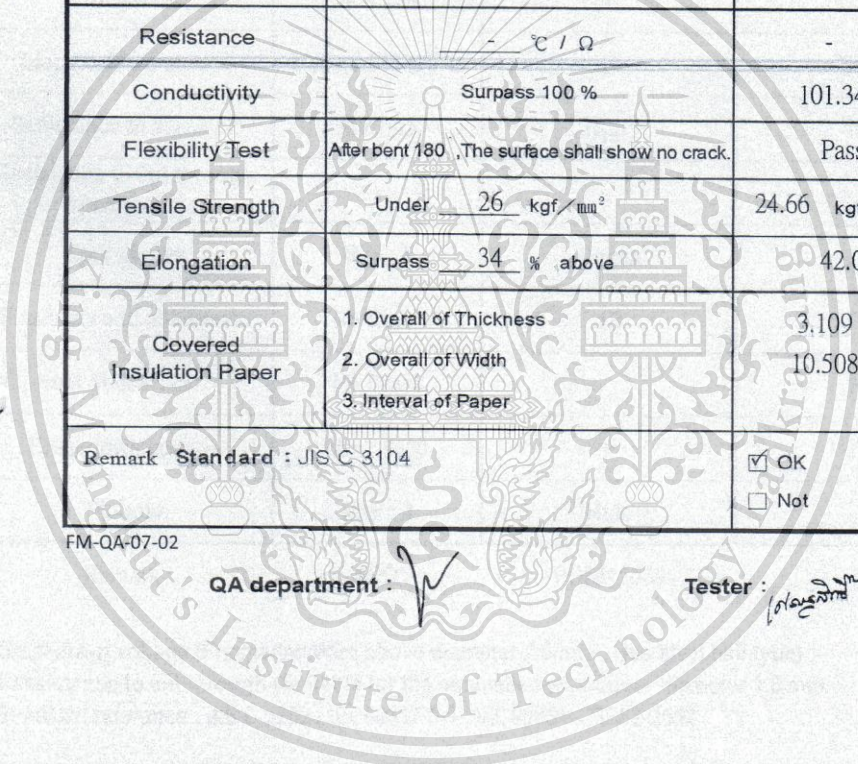
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.


Tong Cheng Electric Cable & Wire Co., LTD.
 Rectangular Copper Wire Test Report

Customer	CCT	P.O. #	PO6311055
Size	<u>2.6</u> × <u>10.0</u> mm	Test Date	18/11/2020
Test Item	Test Standard	Test Result	
Appearance	Surface shall be smoothly and show no crack · scratch or burr.	Pass	
Thickness of conductor	<u>2.53</u> ~ <u>2.67</u> mm	2.599 mm	
Width of conductor	<u>9.85</u> ~ <u>10.15</u> mm	9.998 mm	
Weight of copper wire	1M Copper Wire / g	- g	
Resistance	- °C / Ω	- Ω	
Conductivity	Surpass 100 %	101.34%	
Flexibility Test	After bent 180°, The surface shall show no crack.	Pass	
Tensile Strength	Under <u>26</u> kgf/mm ²	24.66 kgf/mm ²	
Elongation	Surpass <u>34</u> % above	42.0 %	
Covered Insulation Paper	1. Overall of Thickness 2. Overall of Width 3. Interval of Paper	3.109 mm 10.508 mm mm	
Remark	Standard : JIS C 3104	<input checked="" type="checkbox"/> OK <input type="checkbox"/> Not	

FM-QA-07-02
 QA department :  Tester : 


 Srinakharinwirot University's Institute of Technology

รูปที่ ข.2 คุณสมบัติของเส้นลวดที่ใช้ในด้านแรงต่ำ
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.




Tong Cheng Electric Cable & Wire Co. Ltd.

Test report for enamelled round copper wire IPVF EIW

Customer	CCT	SIZE : 0.45 mm.	Date	21/05/2021
Test Items	Standard	Unit	Result	
Appearance	No Defect		Pass	
Conductor Dimension	0.440 - 0.460	mm.	0.449	
Coating Thickness	Min : 0.016	mm.	0.028	
Overall Dimension	Max : 0.508	mm.	0.506	
Elongation	Min : 20	%	35.9	
Electrical Resistance	Max : 114.2 (20°C)	Ω	111.30	
Resistance to abrasion	Min : 6.1	N(gf)	7.16	
Resistance to cut through or softening	9 N / 170°	N/°	268	
Springiness	Max : 5	Degee	-	
Flexibility and adherence	No Crack	1D	Pass	
Heat Shock 125°	No Crack		Pass	
Breakdown voltage	Min : 2800	V	9899	
Pinhole	Max : 3	Hole	0	
Remark : > Breakdown voltage (Enamelled copper wire above diameter 2.5 mm . Use steel ball type) > Resistance to cut through (Suitable for the enamelled copper wire under diameter 1.6 mm.) > Standard reference : JIS C 3202 , IEC60317-0-1 , IEC60851 , TIS82-2552				

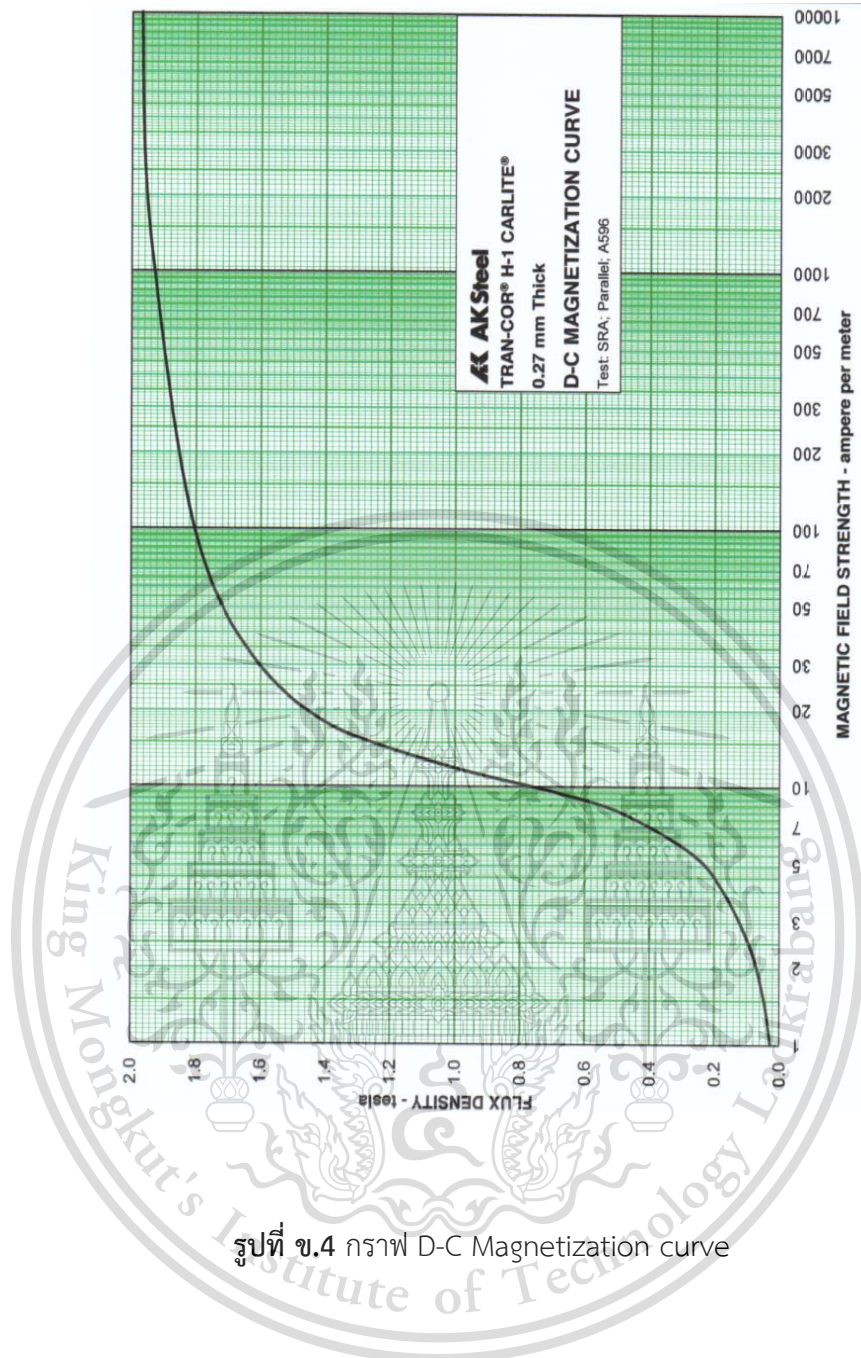
FM-QA-08-02

Tester by : Approve by : 

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3 คุณสมบัติของเส้นลวดที่ใช้ในด้านแรงสูงให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

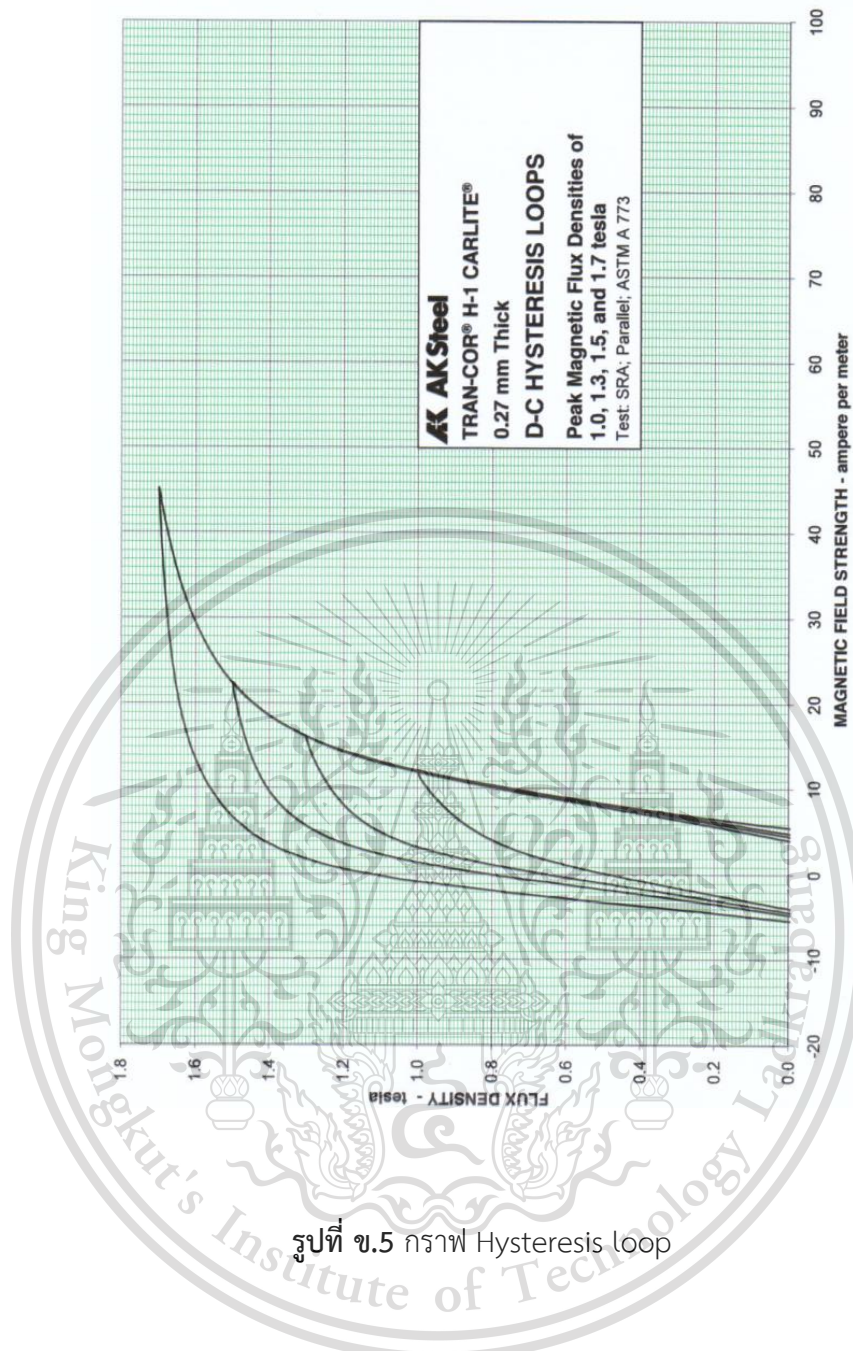


รูปที่ ข.4 กราฟ D-C Magnetization curve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

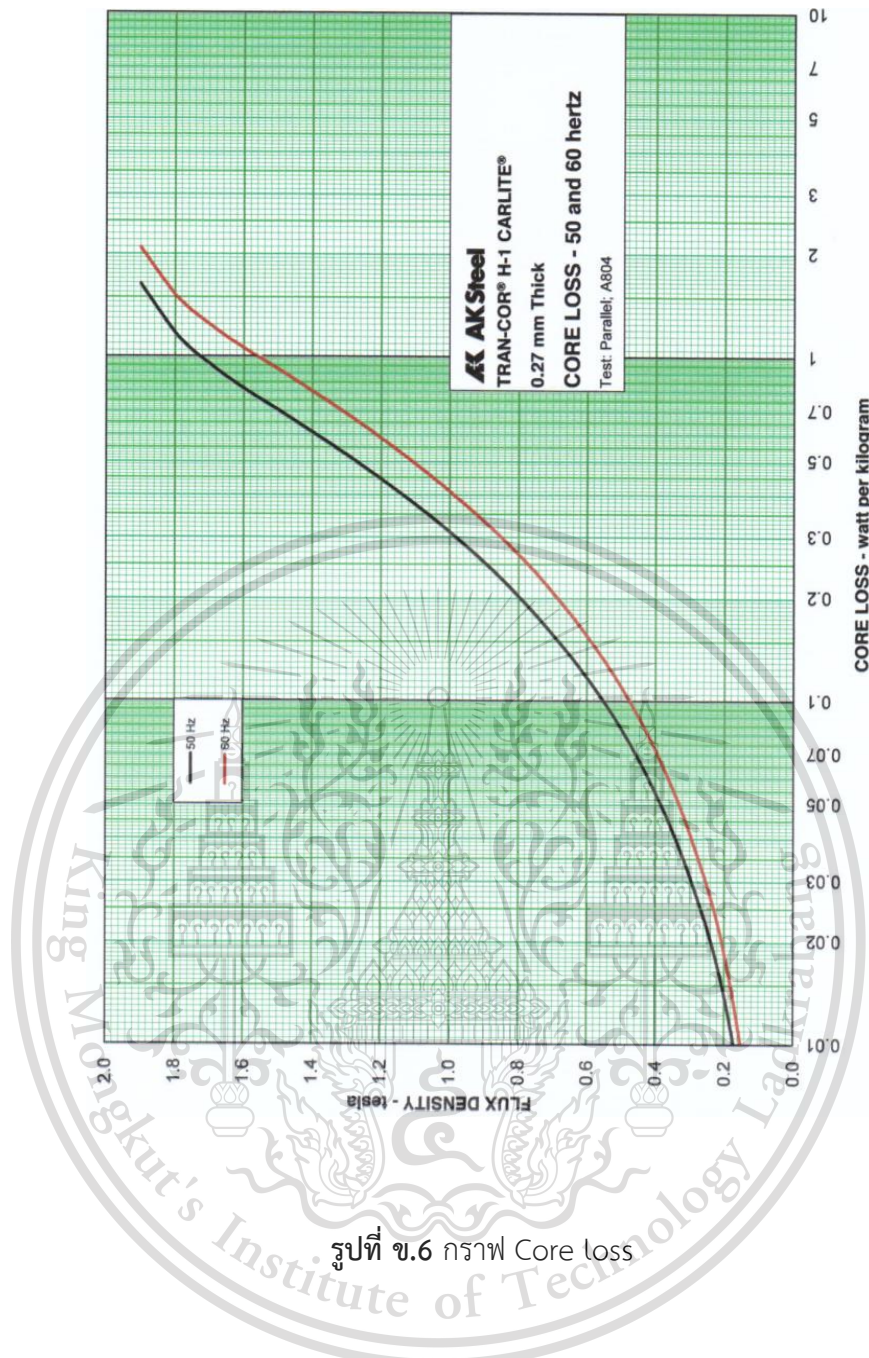


รูปที่ ข.5 กราฟ Hysteresis loop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

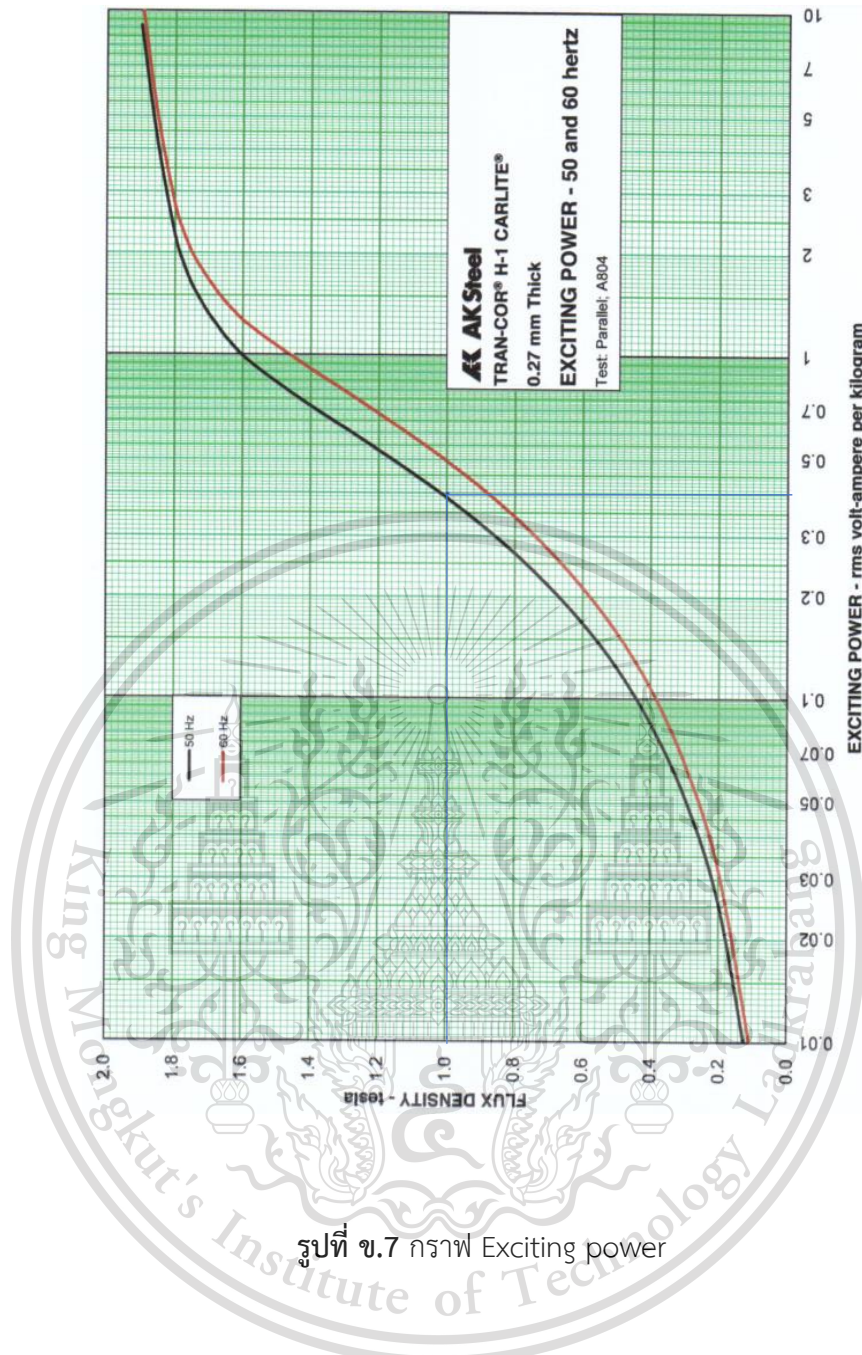


รูปที่ ข.6 กราฟ Core loss

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ข.7 กราฟ Exciting power

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

AK STEEL TRAN-COR® H
GRAIN ORIENTED ELECTRICAL STEELS

PRODUCT DESCRIPTION

SPECIFICATIONS

In terms of maximum core loss, TRAN-COR H specifications are determined at 1.7T at either 50Hz or 60Hz. Core loss grading is conducted using as-sheared single sheet test samples which are tested in accordance with ASTM test method A 804. Induction is specified at 800 A/m. Induction grading is conducted using stress relief annealed Epstein samples tested in accordance with ASTM test method A 343. Samples are secured from each end of the coil and the higher core loss value is used for certification of conformance to product grade guarantees.

Guaranteed Core Loss and Lamination Factor

AK Steel Product Name	Approximate Equivalent International Grade	Thickness, mm (in.)	Assumed Density, g/cm ³	Resistivity, Ω-m, x10 ⁻⁸	Maximum Core Loss, Watts per kilogram				Maximum Core Loss, Watts per pound				Minimum Induction at 800 A/m, T	Minimum Lamination Factor, %
					50 Hz		60 Hz		50 Hz		60 Hz			
					15kG	17kG	15kG	17kG	15kG	17kG	15kG	17kG		
H-0 CARLITE DR	M080-23P5	0.23 (0.009)	7.65	50	---	0.80	---	1.06	---	0.363	---	0.480	1.880	94.5%
H-1 CARLITE DR	M090-27P5	0.27 (0.011)			---	0.90	---	1.20	---	0.408	---	0.543	1.880	95.0%
H-2 CARLITE DR	M100-30P5	0.30 (0.012)			---	1.00	---	1.33	---	0.454	---	0.603	1.880	95.5%
H-0 CARLITE	M080-23P5	0.23 (0.009)			---	0.90	---	1.19	---	0.408	---	0.540	1.880	94.5%
H-1 CARLITE	M100-27P5	0.27 (0.011)			---	1.00	---	1.33	---	0.454	---	0.603	1.880	95.0%
H-2 CARLITE	M105-30P5	0.30 (0.012)			---	1.05	---	1.40	---	0.476	---	0.633	1.900	95.5%

Typical Core Loss and Lamination Factor

AK Steel Product Name	Approximate Equivalent International Grade	Thickness, mm (in.)	Assumed Density, g/cm ³	Resistivity, Ω-m, x10 ⁻⁸	Typical Core Loss, Watts per kilogram				Typical Core Loss, Watts per pound				Typical Induction at 800 A/m, T	Typical Lamination Factor, %
					50 Hz		60 Hz		50 Hz		60 Hz			
					15kG	17kG	15kG	17kG	15kG	17kG	15kG	17kG		
H-0 CARLITE DR	M080-23P5	0.23 (0.009)	7.65	50	0.57	0.77	0.75	1.01	0.250	0.350	0.339	0.460	1.916	96.6%
H-1 CARLITE DR	M090-27P5	0.27 (0.011)			0.66	0.87	0.86	1.16	0.295	0.395	0.391	0.525	1.918	97.0%
H-2 CARLITE DR	M100-30P5	0.30 (0.012)			0.70	0.95	0.93	1.26	0.320	0.431	0.423	0.570	1.917	97.3%
H-0 CARLITE	M080-23P5	0.23 (0.009)			0.62	0.85	0.83	1.12	0.282	0.384	0.376	0.508	1.917	96.6%
H-1 CARLITE	M100-27P5	0.27 (0.011)			0.70	0.95	0.92	1.25	0.316	0.431	0.419	0.567	1.918	97.0%
H-2 CARLITE	M105-30P5	0.30 (0.012)			0.74	0.99	0.96	1.31	0.335	0.450	0.447	0.596	1.920	97.3%

Typical single sheet core loss values versus test induction for TRAN-COR H CARLITE and CARLITE DR are provided on page 10. Typical SRA Epstein core loss values versus test induction for TRAN-COR H CARLITE are provided on page 12. SRA Epstein testing is not applicable to TRAN-COR CARLITE DR products since the domain refinement treatment is eradicated upon annealing at temperatures greater than 600°C.

The core loss and exciting power of the AK Steel TRAN-COR H grades are determined by magnetic tests performed in accordance with general procedures approved by the American Society for Testing and Materials. The following conditions apply:

1. Results for as-sheared single sheet specimens from fully processed material cut parallel to the rolling direction of the coil and tested per ASTM A 804
2. Density of all grades (7.65 gm/cm³) per ASTM A 34

ASTM A 664 is a grade identification system for electrical steels. While this system has not been widely adopted by manufacturers and consumers of electrical steels, it is used in ASTM A 876 to designate various grades of grain oriented electrical steel. The following is a listing of AK Steel and equivalent ASTM grades:
 AK Steel grades H-0 CARLITE and H-0 CARLITE DR are approximately equivalent to ASTM Core Loss Types 23P060 and 23Q054, respectively.
 AK Steel grades H-1 CARLITE and H-1 CARLITE DR are approximately equivalent to ASTM Core Loss Types 27P066 and 27Q057, respectively.
 AK Steel grades H-2 CARLITE and H-2 CARLITE DR have no equivalent ASTM Core Loss Type designations.

รูปที่ ข.8 ปริมาตรของแกนเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



UMANG BOARDS LIMITED

Regd. & Corp. Office : "UMANG HOUSE" 7-B, Bharat Mata Path, Jamna Lal Bejaj Marg, C-Scheme, Jaipur-302001, Raj, INDIA Tel.: 91-141- 2379414, 2362093 Fax: 91-141- 2366626 Email: info@umangboards.com
 Factory : A-27, RIICO Industrial Area, Kaladera -303801 JAIPUR (Ra) INDIA
 E-mail : qc@umangboards.com, website: www.umangboards.com CIN NO - U20212RJ1999PLC015397
 GSTIN : 08AAACU3931H1ZE



NABL
 Certificate No.
 TC-6778
 Sheet 01 OF 01

DIAMOND PATTERN PAPER DATA SHEET

Invoice No.: 2020CF29

Date: May, 19, 2020

P/I NO.: 2020IMTUA-29

ITEM	TYPICAL VALUES	MATTER OF FACT
Caliper: (inch)	0.005	
(millimeter)	0.13	
Base paper Thickness mm	0.13±10%	0.13
Resin thickness single side mm	0.006-0.012mm	0.012
DDP thickness (just for reference)	Base paper + resin	0.142 (0.142, 0.141, 0.142)
Width: mm	1000±5	1001-1003
Apparent density: g/cm ³	≥0.90	0.95
Moisture content, %	4.0 to 8.0 %	5.5
PH water extract:	6.0 to 8.5	7.9
Ash content, % maximum	≤0.5	0.44
Conductivity of aqueous extract Ms/m	≤8.0	7.6
Elongation - MD %	≥2.0	2.0
CMD %	≥5.4	7.2
Edge Internal tearing resistance N		
Machine direction		42.4
Cross machine direction		46.7
Tear strength, mN		
Machine direction:	≥900	1640
Cross machine direction:	≥1000	2100
Tensile strength, N/mm ²		
Machine direction:	≥70	94.6
Cross machine direction:	≥35	47.7
Dielectric breakdown: (volts/layer, dry test)	≥1100	1300 (1300, 1300, 1300)
Bond strength: Kpa	≥450	788

รูปที่ ข.9 คุณสมบัติของกระดาษ Diamond dotted

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

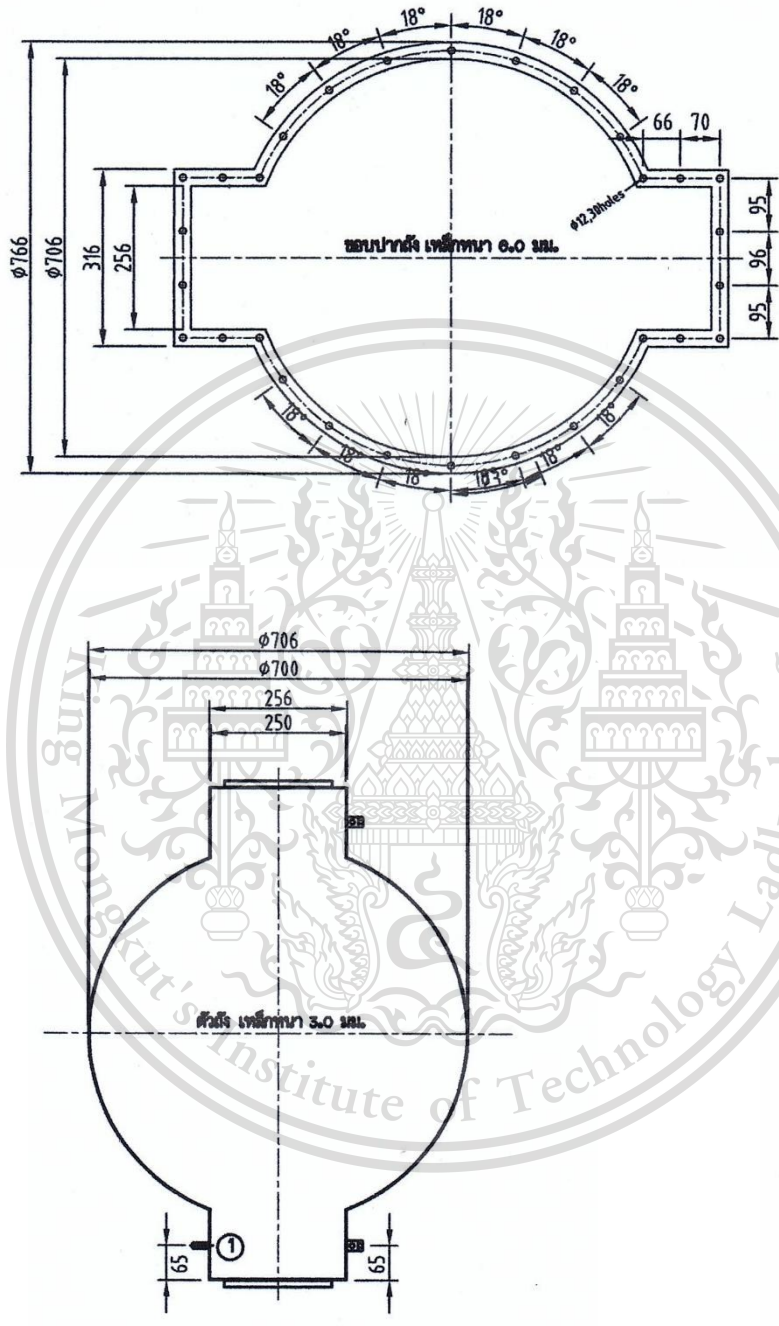
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



บริษัท ซี ซี ทรานส์ฟอร์มเมอร์ จำกัด
CC TRANSFORMER CO., LTD.

DWG No. XXXX-20-00 A4

QF-EN-04(REV.00)

DESIGN No.
W/O No.

SCALE NONE
SHEET 1 OF 1

GENERAL TOLERANCES (UNLESS OTHERWISE SPECIFIED)
SEE TABLE

UP TO 50mm	± 0.1mm
OVER 50mm UP TO 500mm	± 0.15mm
OVER 500mm	± 0.2mm
TOLERANCE ON ANY DIMENSION TO HOLE CENTRES	± 0.2mm

COPYRIGHT © 1999 THIS DRAWING IS ISSUED ON THE CONDITION THAT IT IS NOT COPIED, REPRINTED OR DISCLOSED TO A THIRD PARTY IN WHOLE OR IN PART, WITHOUT THE PRIOR WRITTEN CONSENT OF CC TRANSFORMER CO., LTD.

TITLE
TANK COVER ASSEMBLY

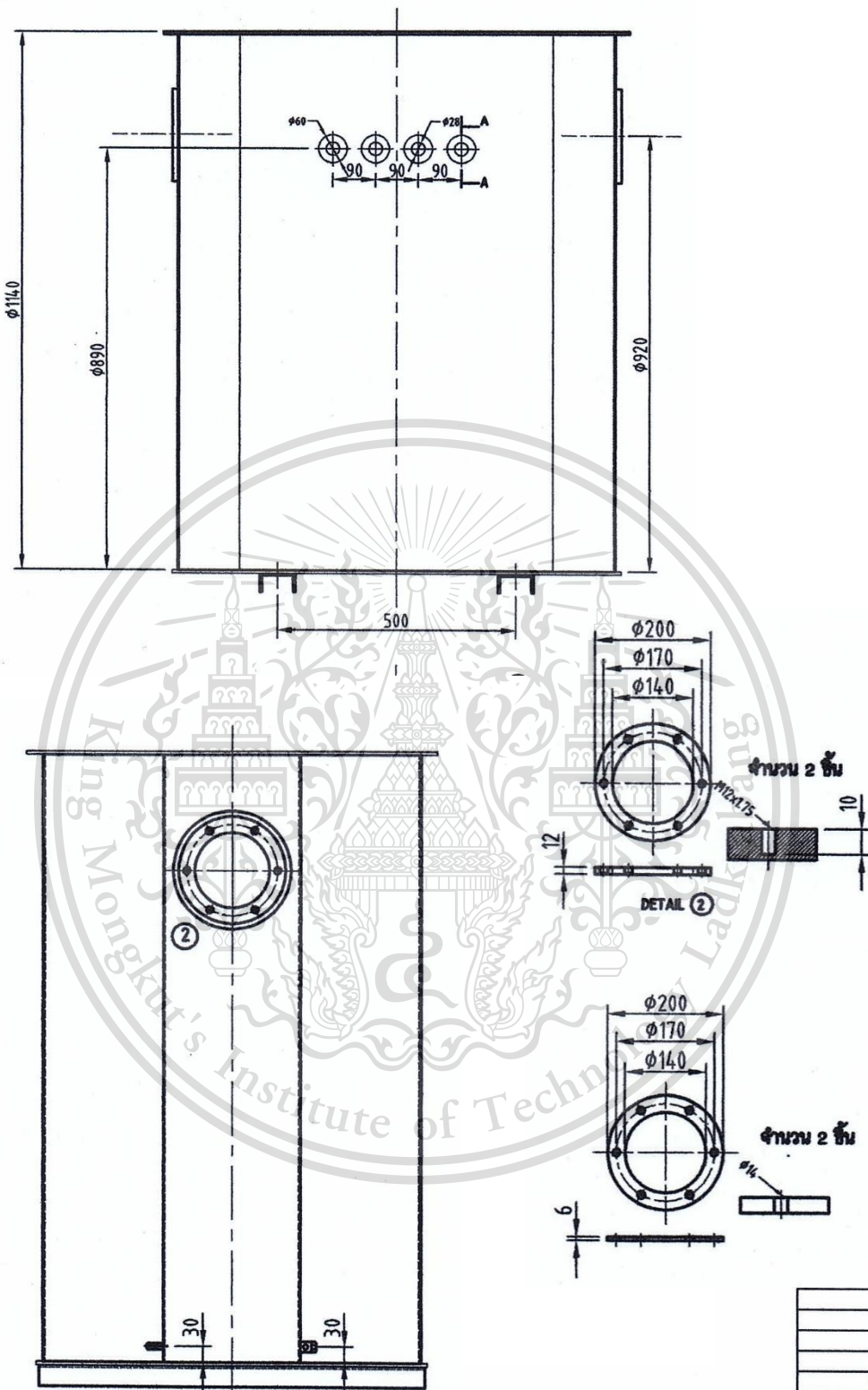
REVISION	1st REV
MODIFY REF:	-
DESIGN	
DRAWN	
CHECKED	
APPROVED	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้รูปที่ ค.1 แบบแปลนตัวถังหม้อแปลง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

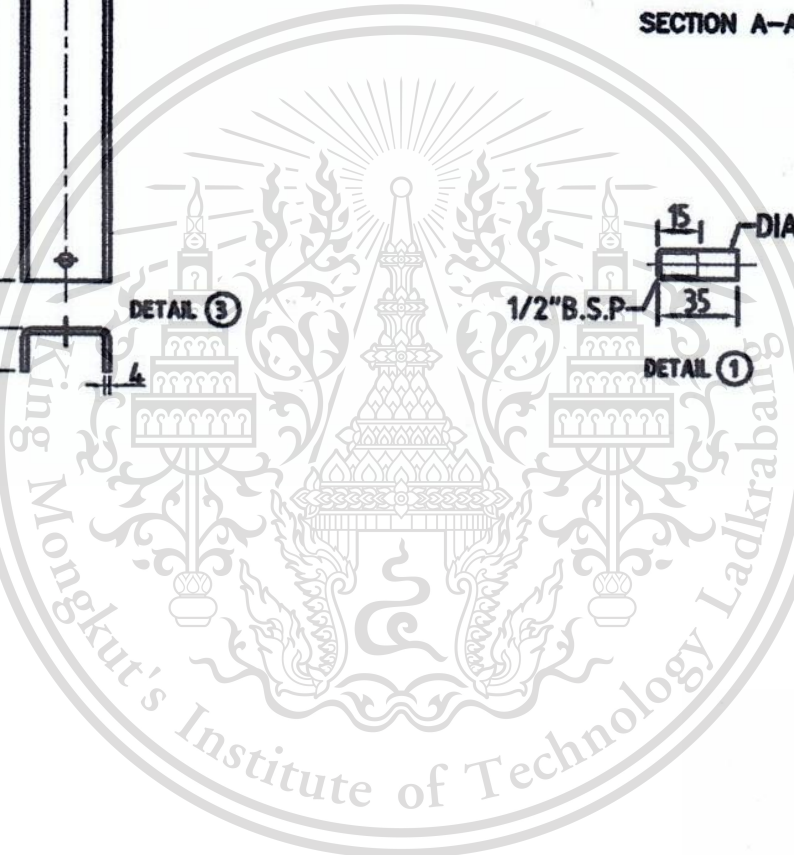
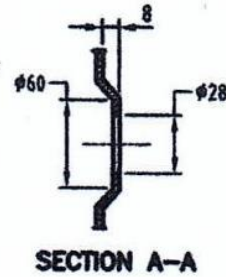
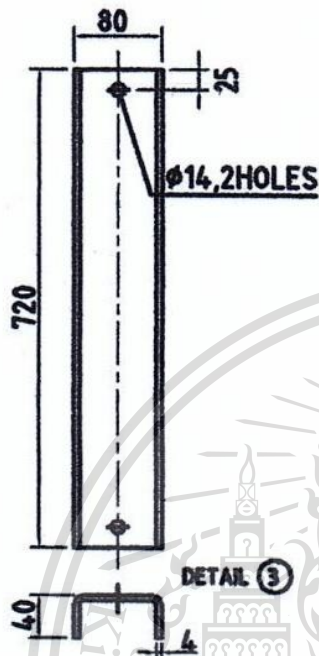


REVISION	1st REV	
MODIFY REF:		
DESIGN		
DRAWN		
CHECKED		
APPROVED		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปภายนอกให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ ค.2 แบบแปลนตัวถังหม้อแปลง(ต่อ)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



บริษัท ซี ซี แอสเซมบลี จำกัด
CC TRANSFORMER CO.,LTD.

DESIGN NO.	
W/O No.	
SCALE	NONE
SHEET	1 OF 1

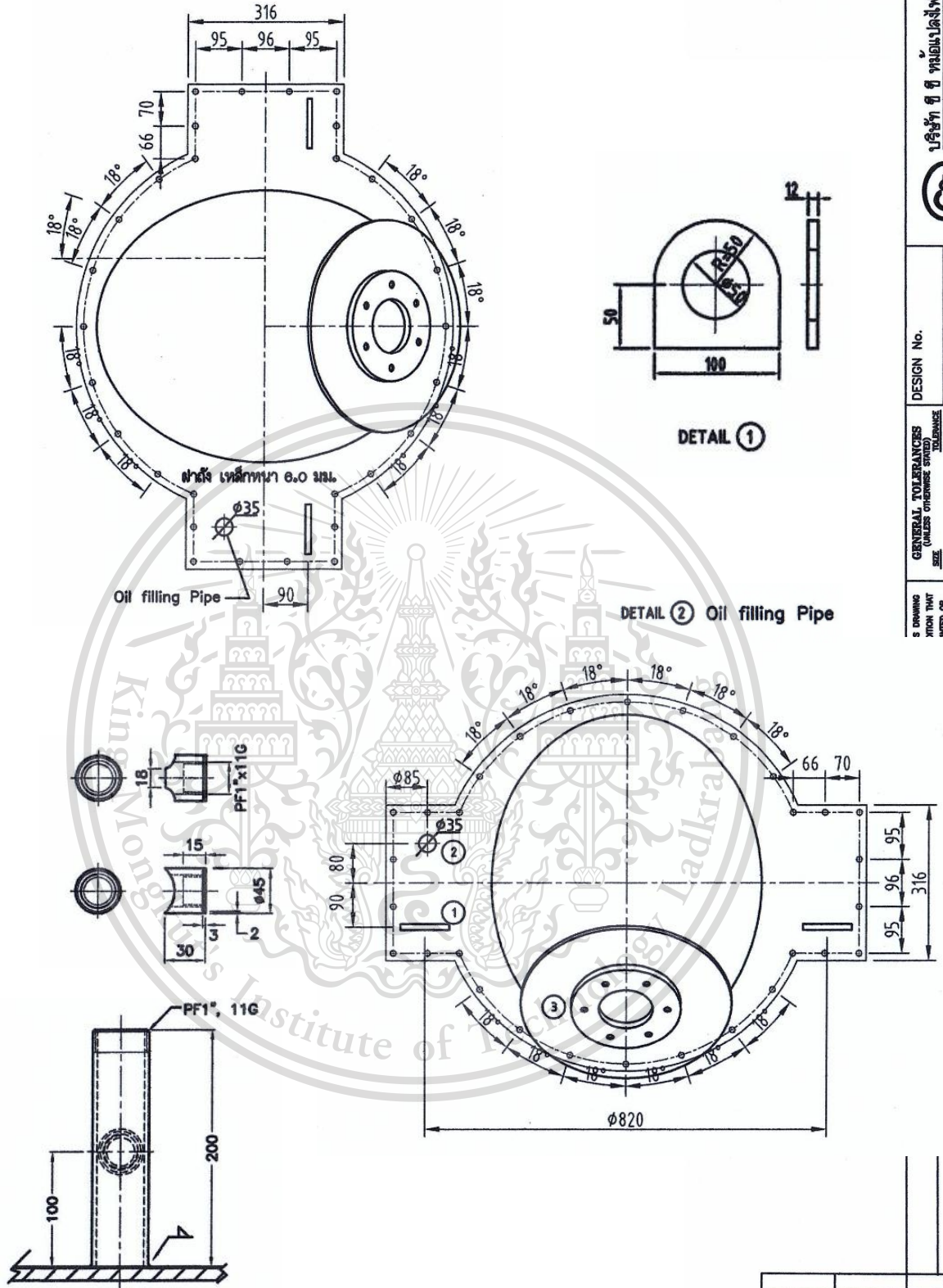
TITLE	TANK COVER ASSEMBLY
-------	---------------------

REVISION	1st REV
MODIFY REF:	-
DESIGN	
DRAWN	
CHECKED	
APPROVED	

DWG No. XXXX-20-00 I44
QF-EN-04(REV.00)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รูปที่ ค.3 แบบแปลนตัวถังหม้อแปลง(ต่อ)



บริษัท ซี ซี ทรานส์ฟอร์เมอร์ จำกัด
CC TRANSFORMER CO., LTD.

DESIGN No.	
W/O No.	
SCALE	NONE
SHEET	1 OF 1

GENERAL TOLERANCES (UNLESS OTHERWISE STATED)

SIZE	TOLERANCE
UP TO 50mm	± 0.5mm
OVER 50mm UP TO 500mm	± 1.0mm
OVER 500mm	± 3.0mm
TOLERANCE ON ANY DIMENSION TO HOLE CENTRES	

TANK COVER ASSEMBLY

REVISION	1st REV
MODIFY REF:	
DESIGN	
DRAWN	
CHECKED	
APPROVED	

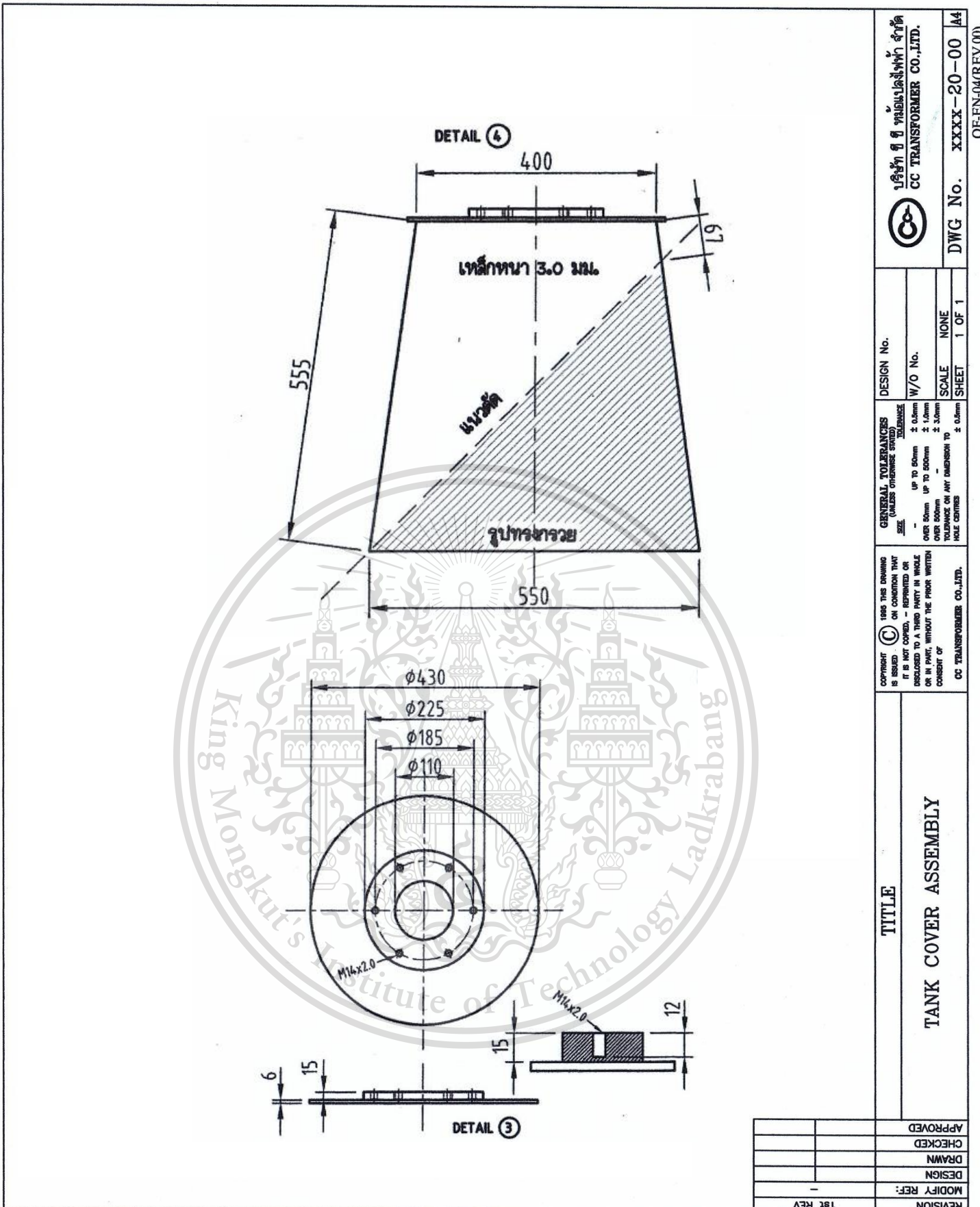
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังบุคคลอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ค.4 แบบแปลนฝาถังหม้อแปลง

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

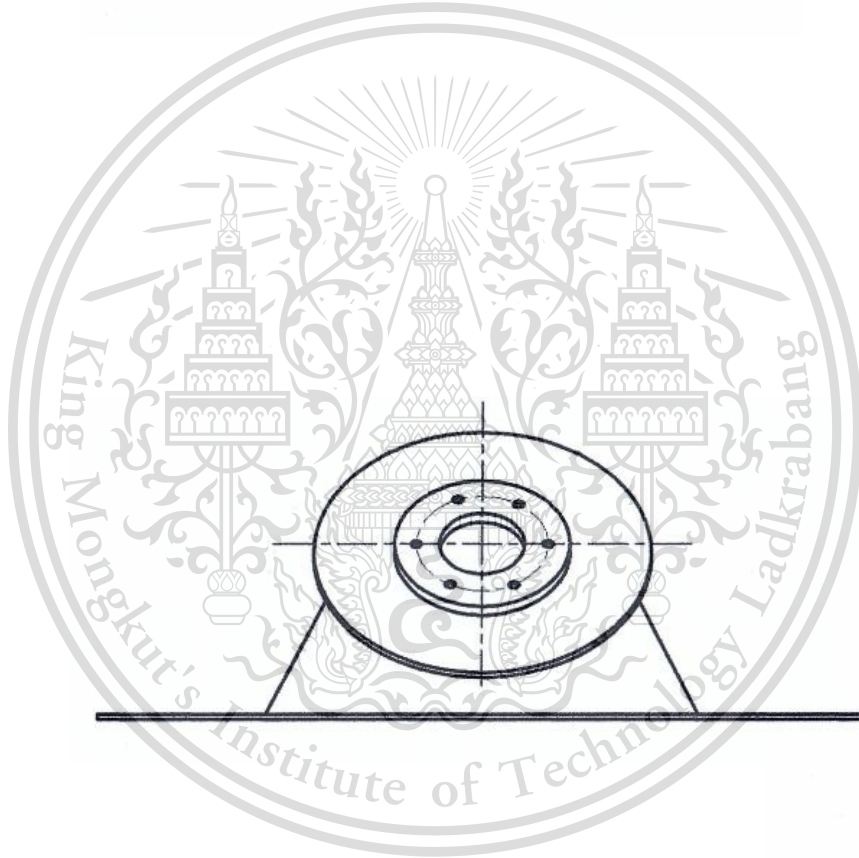
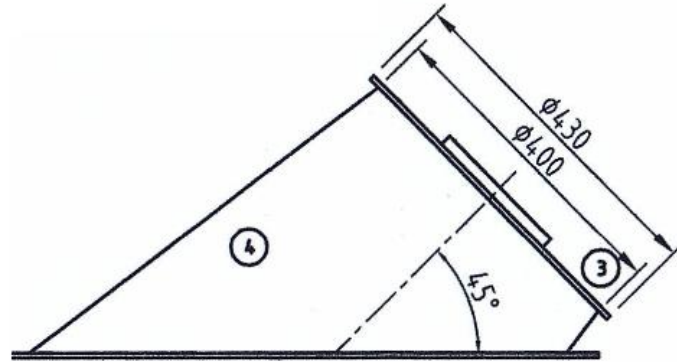


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกา รูปที่ ค.5 แบบแปลนฝาถังหม้อแปลง(ต่อ) ตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



บริษัท ซี ซี ทรานส์ฟอร์เมอร์ จำกัด
CC TRANSFORMER CO.,LTD.

DWG No. xxx-20-00 /A4

DESIGN No.
W/O No.
SCALE NONE
SHEET 1 OF 1

GENERAL TOLERANCES (UNLESS OTHERWISE STATED)

SIZE	TOLERANCE
UP TO 50mm	$\pm 0.5mm$
OVER 50mm UP TO 500mm	$\pm 1.0mm$
OVER 500mm	$\pm 3.0mm$
TOLERANCE ON ANY DIMENSION TO HOLE CENTRES	$\pm 0.5mm$

COPYRIGHT © 1998 THIS DRAWING IS ISSUED ON THE CONDITION THAT IT IS NOT COPIED, REPRINTED OR DISCLOSED TO A THIRD PARTY IN WHOLE OR IN PART, WITHOUT THE PRIOR WRITTEN CONSENT OF CC TRANSFORMER CO.,LTD.

TITLE
TANK COVER ASSEMBLY

APPROVED	
CHECKED	
DRAWN	
DESIGN	
MODIFY REF:	
REVISION	1st REV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ค.6 แบบแปลนฝาถังหม้อแปลง(ต่อ)

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field) จำเป็นที่จะต้องทราบค่า Relative permittivity (Dielectric constant) ของวัสดุที่ใช้ในการจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งแสดงดังตารางด้านล่าง

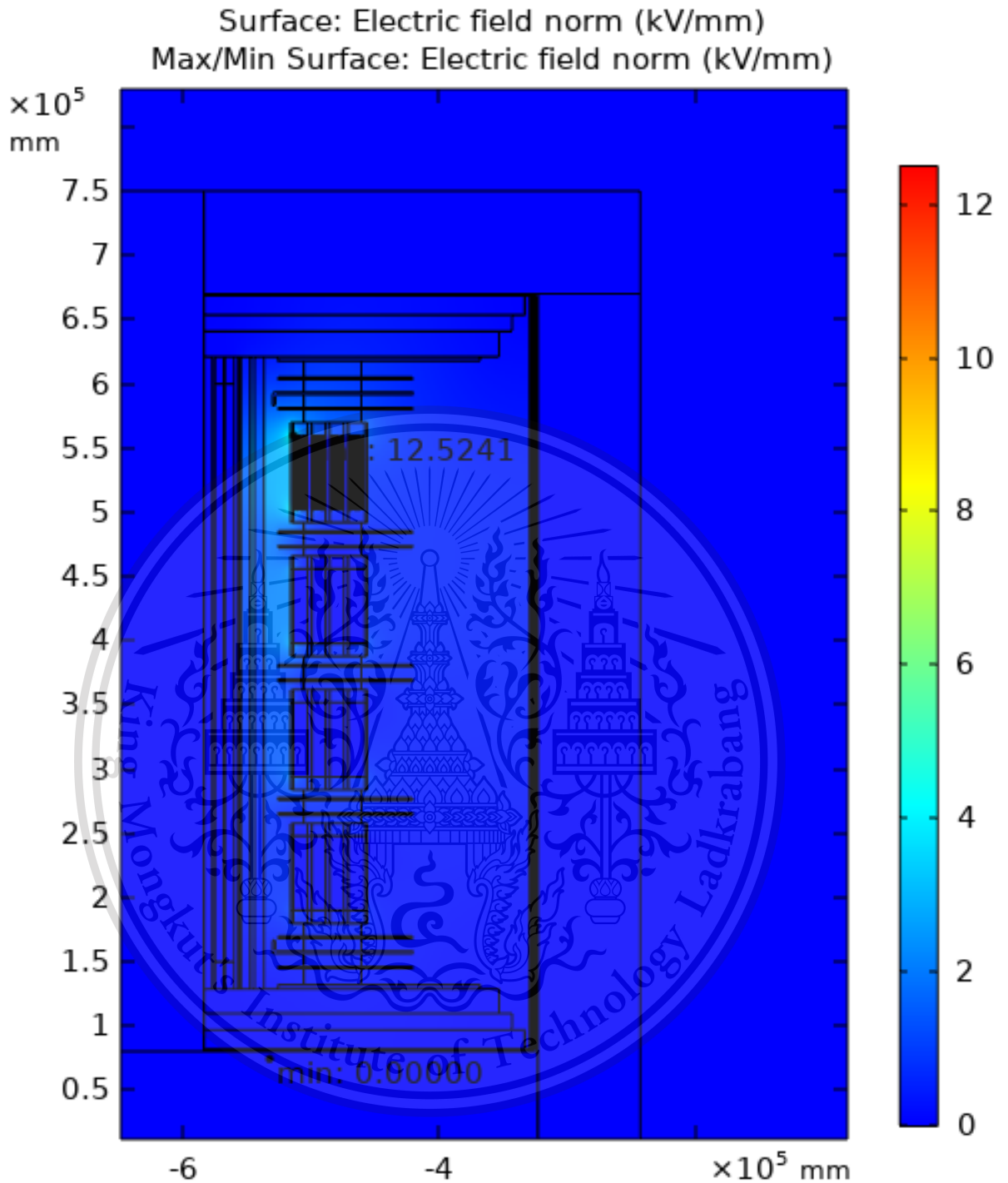
ตารางที่ ง.1 Relative permittivity (Dielectric constant) ของวัสดุ

ประเภทของวัสดุ	Relative permittivity (Dielectric constant)
แกนเหล็กชนิด M-4 (M-4 Steel)	7000
ลวดทองแดง (Copper wire)	1×10^{-6}
น้ำมันหม้อแปลง (Transformer oil)	2.2
กระดาษฉนวน (Cellulose board)	3.5
เบกาไลต์ (Bakelite)	6.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

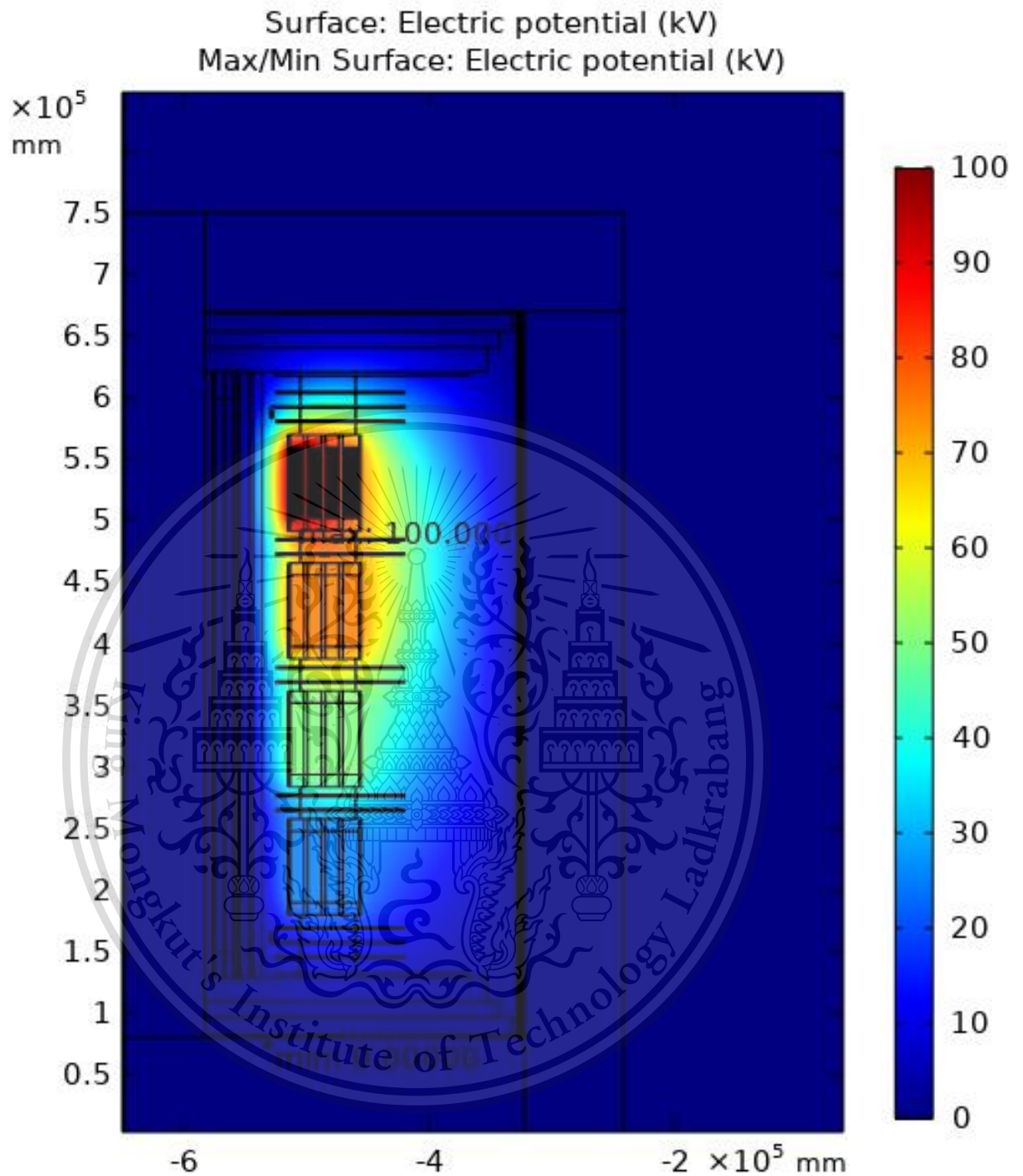


รูปที่ ง.1 ความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field) บริเวณภายในหม้อแปลงที่แรงดันสูงสุด 100 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



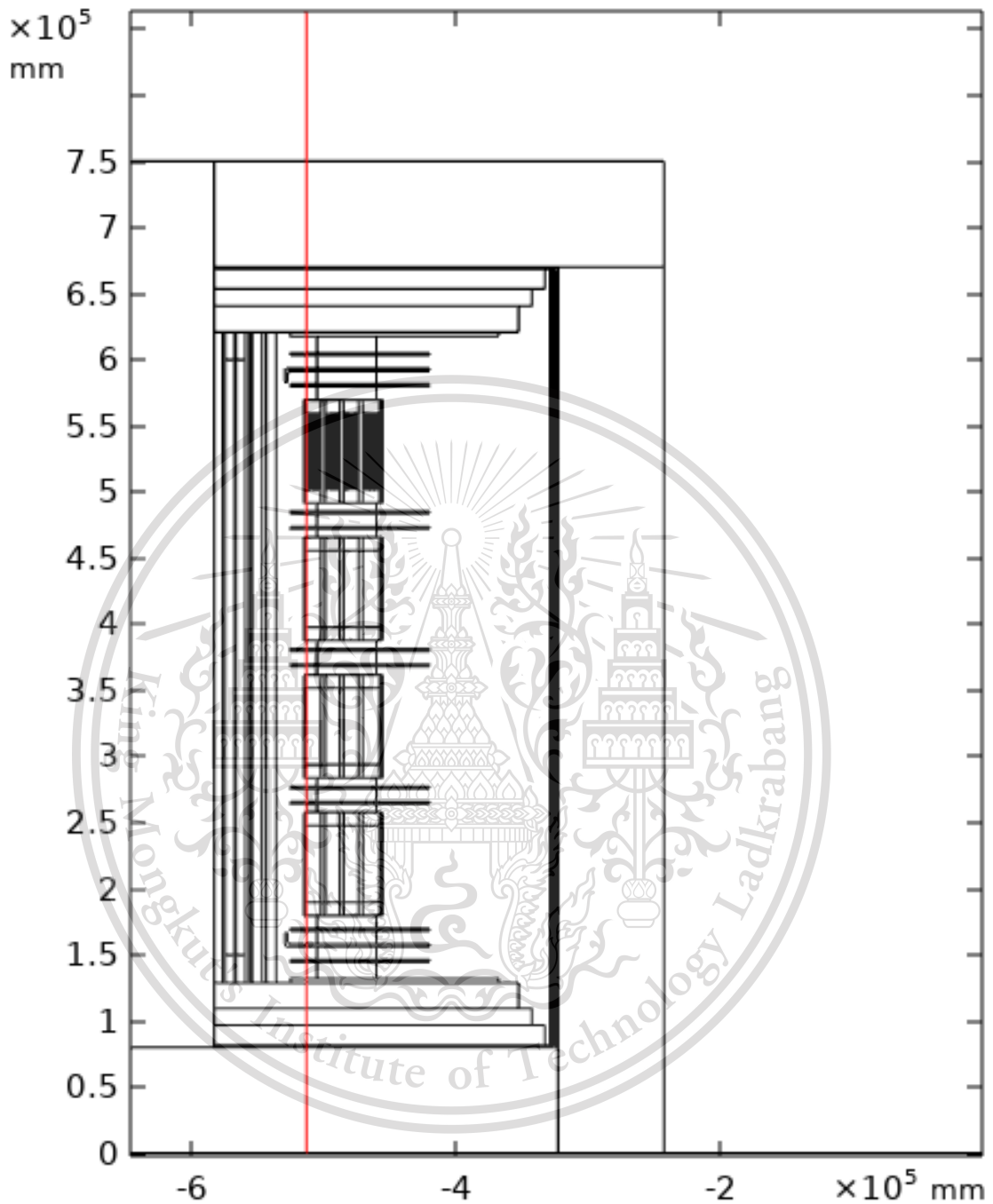
รูปที่ ง.2 การกระจายแรงดันไฟฟ้า (Electric potential)

บริเวณภายในหม้อแปลงที่แรงดันสูงสุด 100 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

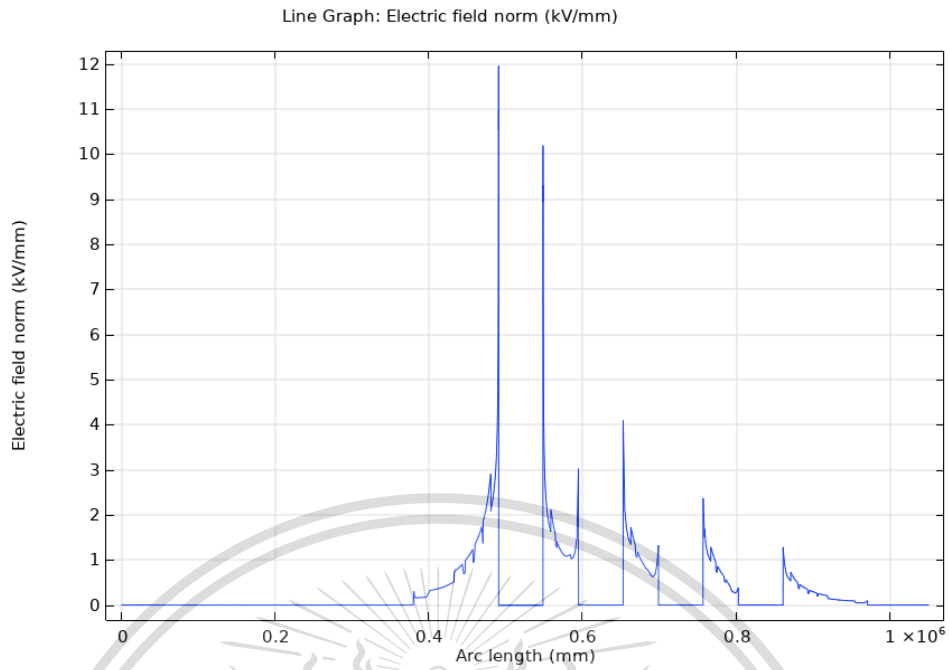
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



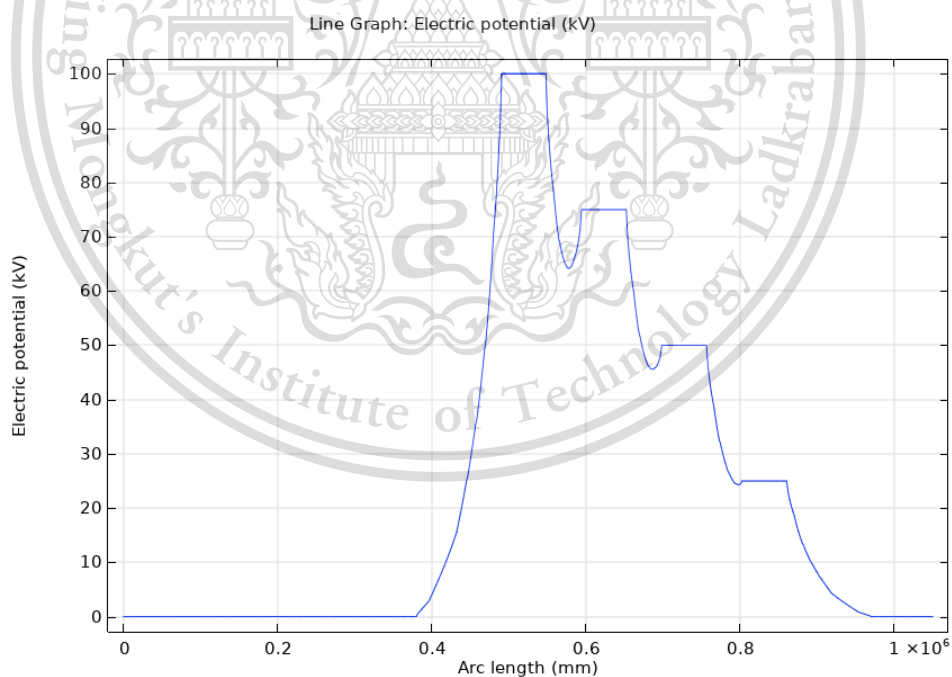
รูปที่ ง.3 เส้นตรงที่พิจารณาความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field) และการกระจายแรงดันไฟฟ้า (Electric potential) ของขดลวดแรงสูงด้านใน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ๔.๔ ความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field) ของขดลวดแรงสูงด้านใน

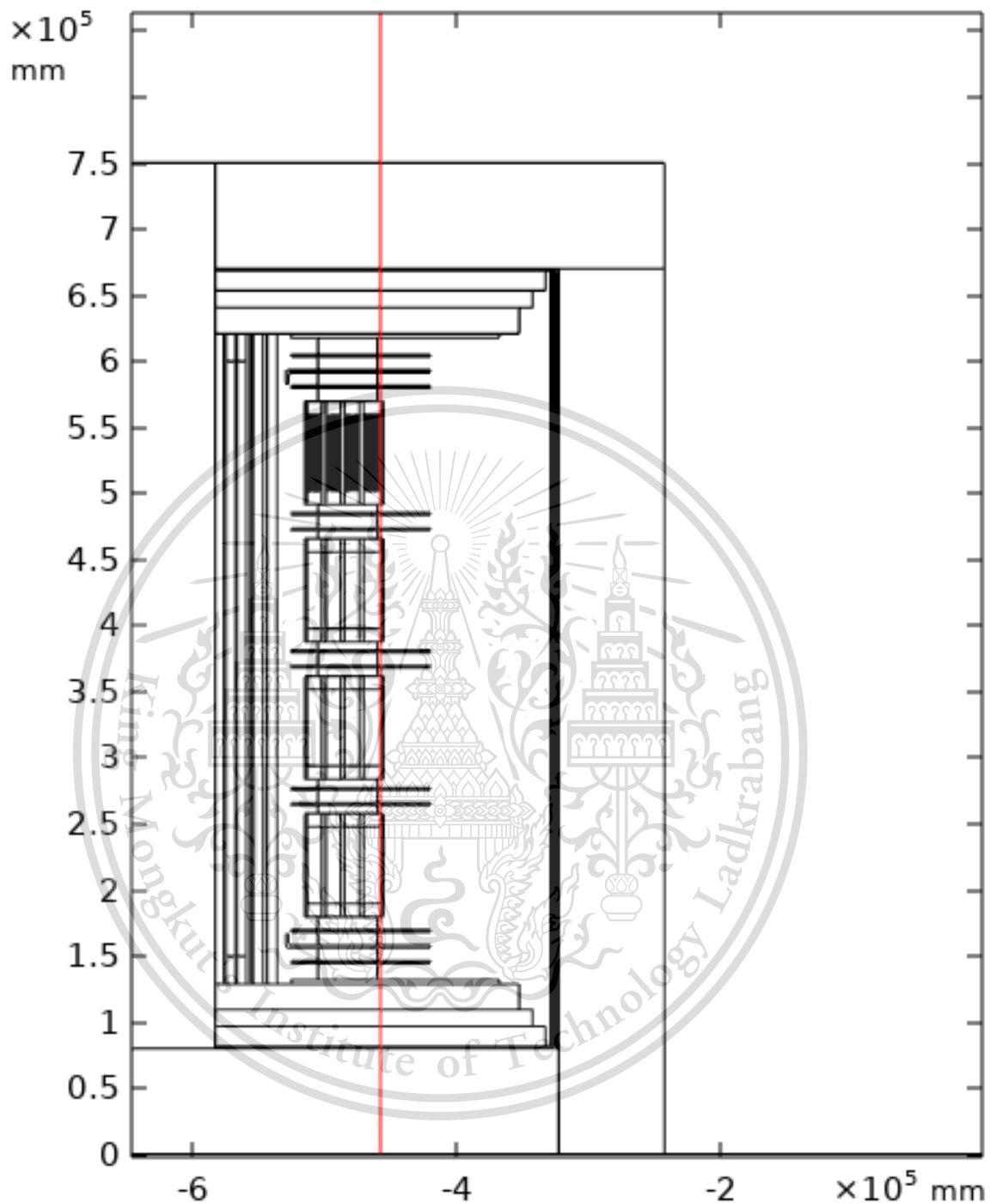


รูปที่ ๔.๕ การกระจายแรงดันไฟฟ้า (Electric potential) ของขดลวดแรงสูงด้านใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

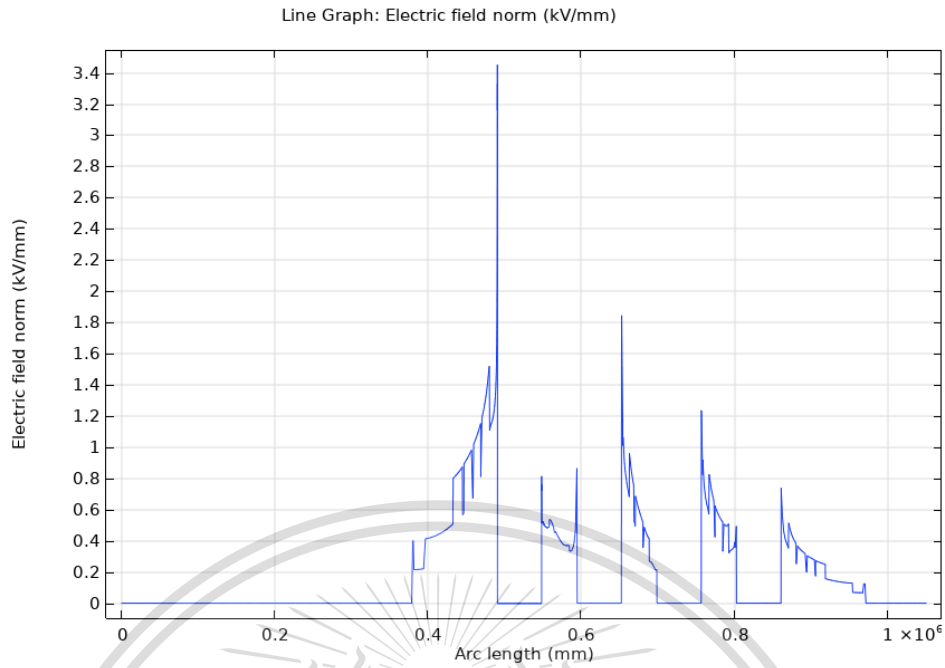


รูปที่ ๖.๖ เส้นตรงที่พิจารณาความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field) และการกระจายแรงดันไฟฟ้า (Electric potential) ของขดลวดแรงสูงด้านนอก

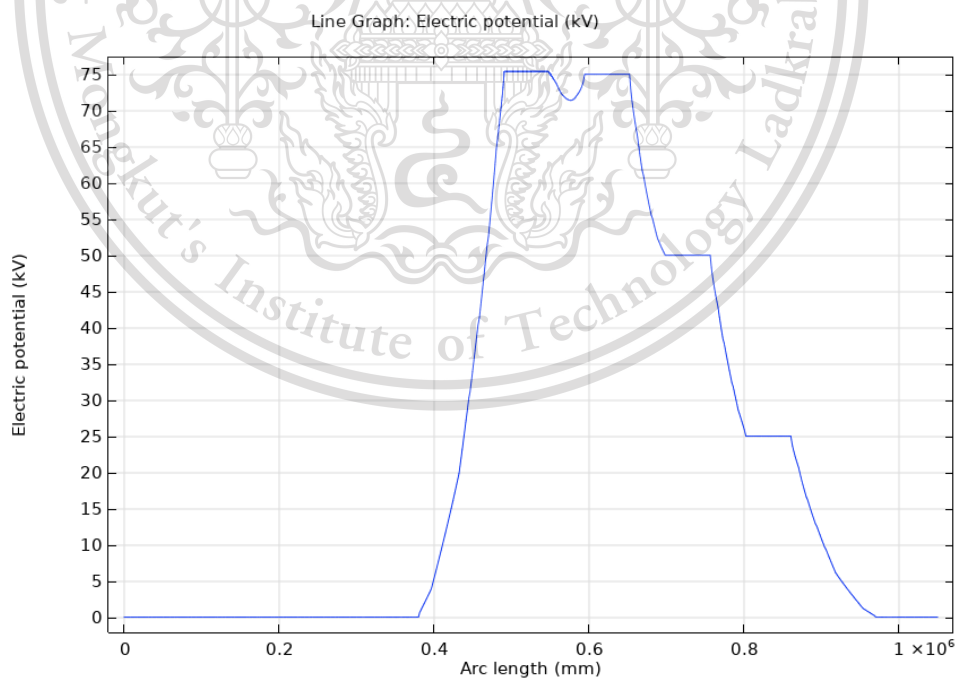
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ๗.๗ ความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field) ของขดลวดแรงสูงด้านนอก

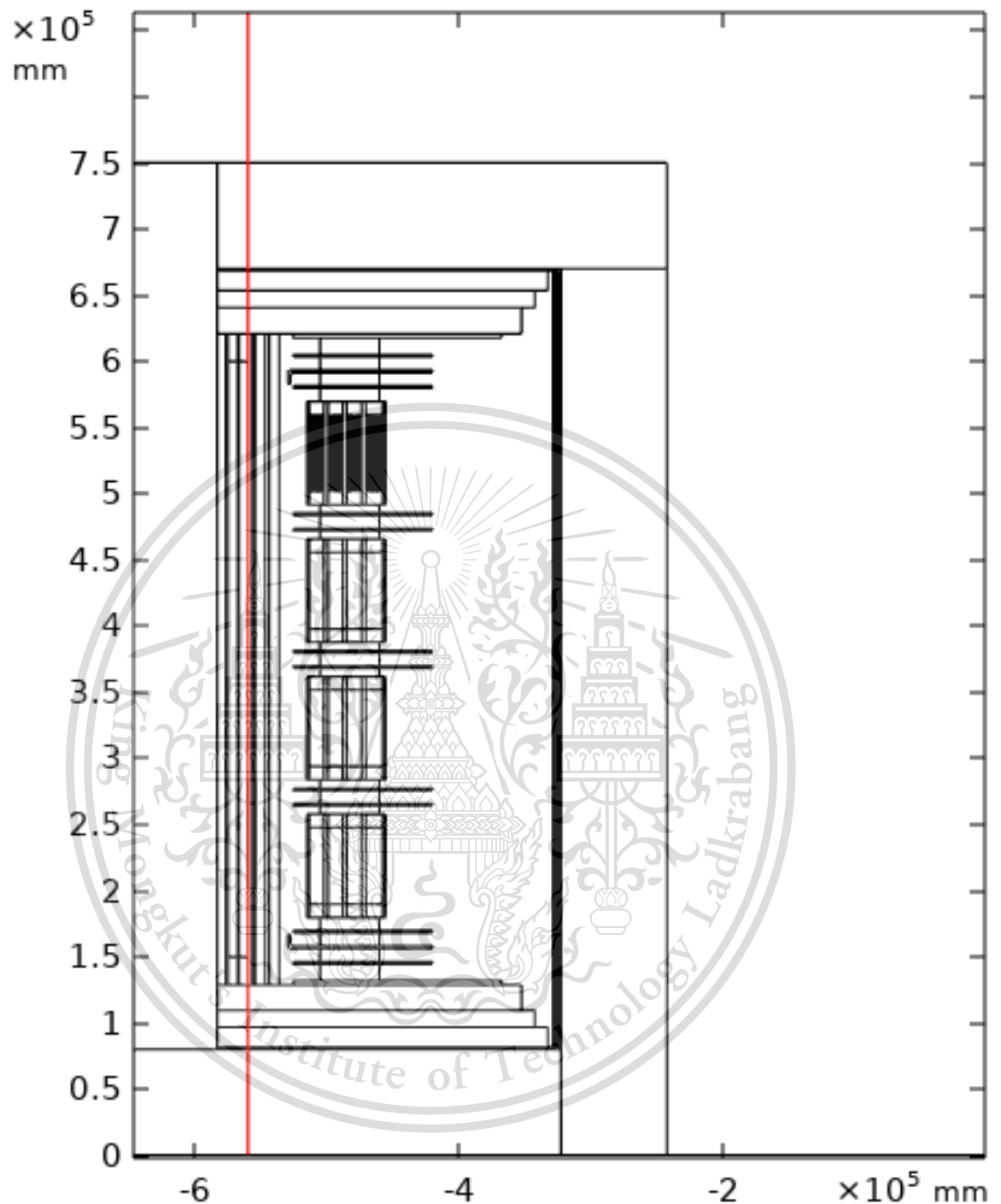


รูปที่ ๗.๘ การกระจายแรงดันไฟฟ้า (Electric potential) ของขดลวดแรงสูงด้านนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

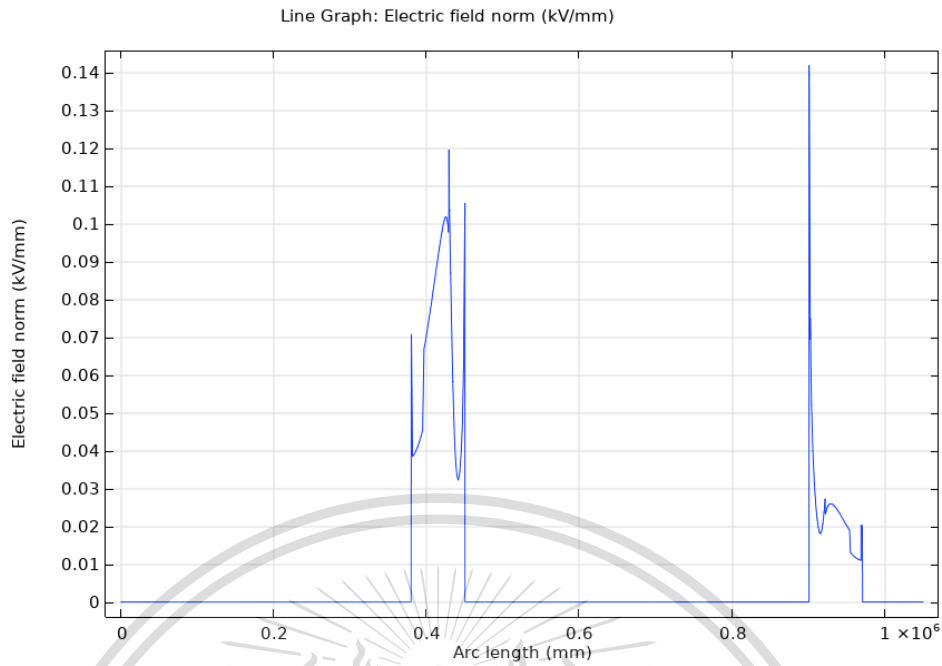


รูปที่ ๙.๙ เส้นตรงที่พิจารณาความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field) และการกระจายแรงดันไฟฟ้า (Electric potential) ของขดลวดแรงต่ำ

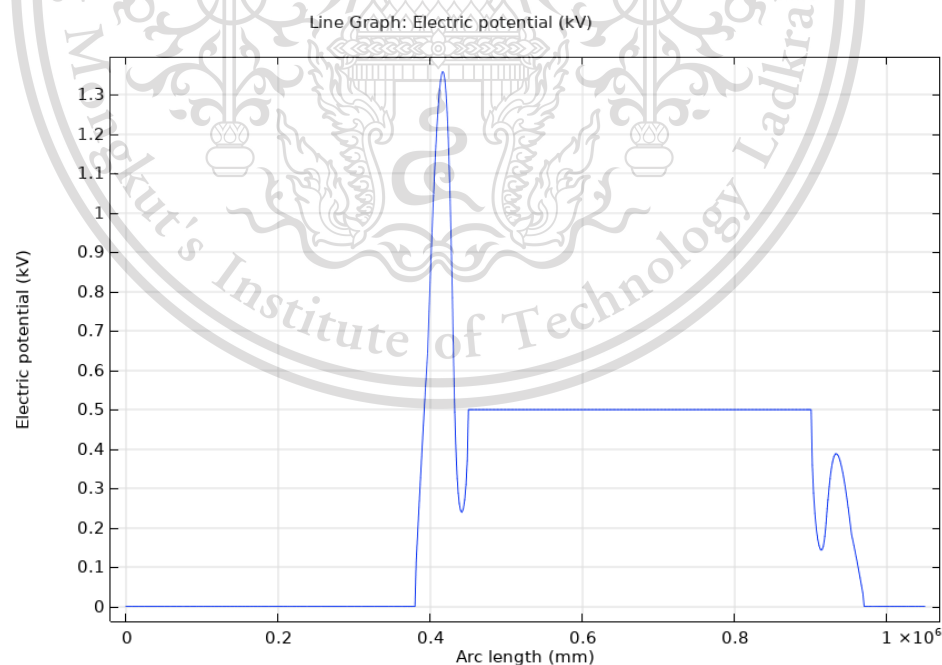
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ๑.10 ความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field) ของขดลวดต่ำ

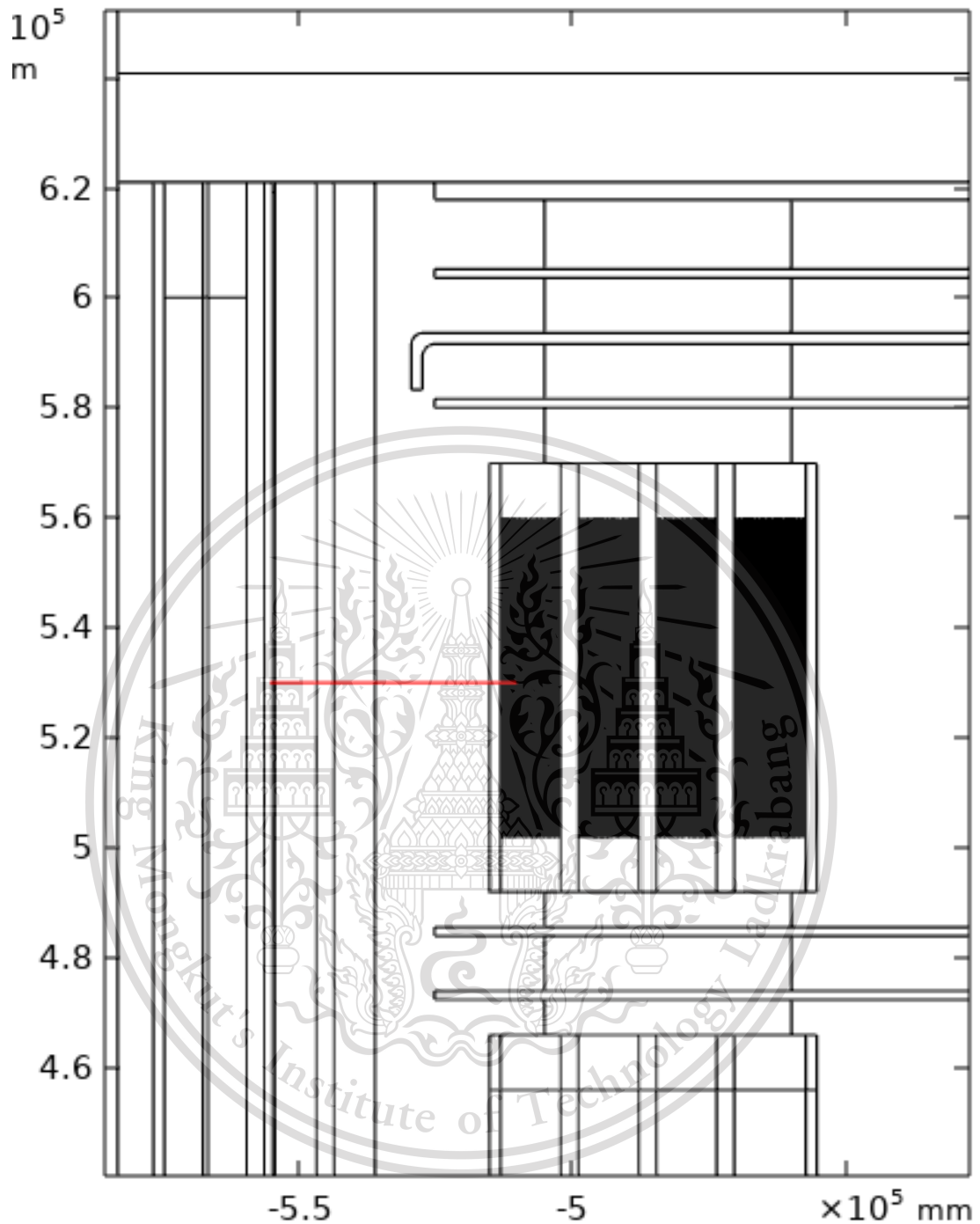


รูปที่ ๑.11 การกระจายแรงดันไฟฟ้า (Electric potential) ของขดลวดแรงต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ง.12 เส้นตรงที่พิจารณาความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field) และ การกระจาย
แรงดันไฟฟ้า (Electric potential) ระหว่างขดลวดแรงต่ำและขดลวดแรงสูงที่แรงดัน 100 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ประวัติผู้เขียน



นายพงศธร เต็มเตชาติพงศ์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียน
สาธิตมหาวิทยาลัยขอนแก่น(ศึกษาศาสตร์) และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาตรีที่
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งานวิจัยที่สนใจการ
วินิจฉัยการคายประจุบางส่วน



นายวงศธร พิมพ์ภรณ์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา จากโรงเรียน
สุรวิทยาคารและเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาตรีที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งานวิจัยที่สนใจสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



นายวิทวัส ฐานวัฒนกิจ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนชุมพล
โพธิสัย และเข้าศึกษาต่อที่ระดับปริญญาตรี ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งานวิจัยที่สนใจสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



นายศรุต สรรพาวัตร์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา จากโรงเรียนบดินทร
เดชา(สิงห์ สิงหเสนี) และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาตรีที่สถาบันเทคโนโลยีพระ
จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งานวิจัยที่สนใจบริภัณฑ์ ไฟฟ้าแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.