



การผลิตไฟฟ้าแรงสูง

HIGH VOLTAGE GENERATION

ดอนราฮมาน เหมตระกลวงค์
DONRAHMAN HAMETRACHOOLWONG

ทาวู้ต คันศิริ
TAWOOT TANSIRI

อาจารย์ที่ปรึกษา
ADVISOR

นิธิศน์ ภฤษฉินดา
NITHAD KRISANAJINDA

สมเจดน์ เข็มเมือง
SOMJAD TEAMMIUM
วศ.ม. ไฟฟ้ากำลัง
M. Eng

วศ.บ. (ศจ.ล.), วศ.ม. (Ohio State), ไฟฟ้าแรงสูง
B. Eng (KMIT), Advanced Professional
Degree (Ohio State), High Voltage.

วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2532

สารบัญ

		หน้า
บทที่ 1	บทนำทั่วไป	1-1
	1.1 ที่มาของปัญหา	1-1
	1.2 วัตถุประสงค์ และขอบข่ายงานวิจัย	1-2
บทที่ 2	การผลิตไฟฟ้าแรงดันสูง และการใช้ประโยชน์	2-1
	2.1 ประวัติการวิวัฒนาการไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ	2-1
	2.2 การใช้ประโยชน์แรงดันสูงกระแสสลับ	2-2
	2.3 การใช้ประโยชน์แรงดันสูงกระแสตรง	2-9
	2.4 หลักการทำงานของหม้อแปลงทดสอบ	2-11
	2.5 วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลง	2-13
	2.6 โครงสร้าง และการฉนวนของหม้อแปลงทดสอบ	2-15
	2.6.1 หม้อแปลงน้ำมัน	2-18
	2.7 ค่ากำหนดของหม้อแปลงทดสอบทั่วไป	2-18
	2.7.1 ขนาดแรงดันของหม้อแปลงทดสอบ	2-18
	2.7.2 กระแสที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ	2-19
	2.7.3 ขนาดกำลังของหม้อแปลงทดสอบ	2-20
บทที่ 3.	การออกแบบหม้อแปลง	3-1
	3.1 การออกแบบแกนเหล็ก และการคำนวณขนาดลวด	3-1
	3.2 รายละเอียดการออกแบบขนาดลวดและแกนเหล็ก	3-8
	3.3 แกนเหล็ก	3-16
	3.4 การออกแบบตัวถัง	3-17
บทที่ 4.	การทดสอบและผลการทดสอบ	4-1
	4.1 การวัดค่าความต้านทานขดลวด	4-1
	4.2 การวัดอัตราส่วนแรงดัน	4-2
	4.3 การวัดค่าสูญเสียกำลังไฟฟ้ามีโหลด และแรงดันอิมพีแดนซ์	4-2
	4.4 การวัดการสูญเสียกำลังไฟฟ้า และกระแสเมื่อไม่มีโหลด	4-4
	4.5 การใช้งาน	4-7
	4.5.1 การทดลองหาความคงทนของฉนวนอากาศต่อแรงดันไฟฟ้า	4-7

	4.5.2 การเกิดการเบรคความถี่ในลนนวนน้ำมัน	4-10
บทที่ 5.	สรุปและวิจารณ์	5-1
	5.1 สรุปผลงาน	5-1
	- การสร้างหม้อแปลงทดสอบ	5-1
	- การสร้างทรงกลม SPHERE	5-3
	- การสร้างชุดควบคุมแรงดันทดสอบ	5-4
	- สรุปการทดลอง	5-5

กิตติกรรมประกาศ

5-6

หนังสืออ้างอิง

5-7

ภาคผนวก

- มาตรฐานการติดตั้งทรงกลม
- โครงสร้าง และขนาดก้านยึดทรงกลม
- ความสูงของทรงกลมเหนือพื้นกราวด์
- ช่องว่างรอบๆ ทรงกลม
- แฟคเตอร์เนื่องจากทรงกลม
- การออกแบบวงจรชุดควบคุมแรงดัน



คำนำ

อุปกรณ์และฉนวนไฟฟ้ามีความจำเป็นอย่างมากในการนำมาใช้ให้
เหมาะสมกับระบบไฟ จึงจำเป็นต้องมีการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติและความคงทน
ต่อแรงดันซึ่งในการทดสอบนี้ส่วนใหญ่จะใช้แรงดันสูงทดสอบ ในที่นี้ใช้หม้อแปลง 1
เฟส ขนาด 5 เค.วี.เอ. 220/50000 โวลท์ 50 เฮิร์ต ฉนวนน้ำมันเป็นแหล่ง
ผลิตแรงดันสูง หม้อแปลงที่ออกแบบและสร้างขึ้นนี้มีคุณลักษณะ ได้ตามมาตรฐานสากล
ที่กำหนดทุกประการ

การทดสอบความคงทนต่อแรงดันของอุปกรณ์ - ฉนวนไฟฟ้าจำเป็น
ต้องมีชุดควบคุมเพื่อหาขนาดพิสัยความคงทนและความปลอดภัยของอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ
ชุดทดสอบและผู้ทำการทดสอบ ความสำเร็จในการวิจัยนี้นับเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง
ต่อการศึกษา เพื่อนำไปพัฒนาในการใช้และการผลิตอุปกรณ์ - ฉนวนไฟฟ้าให้เหมาะ
สมกับระบบแรงดันที่ใช้และ เกิดความปลอดภัยสูงสุด

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนอย่างดียิ่งจากอาจารย์ นิตส์น กฤษณจินดา
และอาจารย์ สมเจตน์ เทียมเมือง ซึ่งเป็นผู้ให้คำปรึกษาแนะนำ

HIGH VOLTAGE GENERATION

DONRAHMAN	HAMETRACHOOLWONG	
TAWOOT	TANSIRI	
NITHAD	KRISANAJINDA	ADVISOR
SOMJAD	THEAMMIUM	ADVISOR
1989		

Abstract

An a.c. high voltage generation is designed by using transformer method. Voltages can be varied from low to high for testing the same devices and insulators using in the electrical systems as well as for research work and in electrical device designs. This testing device can investigate the dielectric strength in three test categories :

1. Endurance test
2. Withstand voltage test
3. Disruptive test

With this testing device, it is easy to see the breakdown voltages where the flashovers, sparks, and punctures occur. Also equipped in the control unit is the electronic over current protection device.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันนี้อุปกรณ์- ฉนวนไฟฟ้าได้มีการผลิตขึ้นใช้กันอย่างกว้างขวางจากผู้ผลิตหลาย ๆ ยี่ห้อ บางที่ยี่ห้อคุณสมบัติของอุปกรณ์ ฉนวนไฟฟ้าเอง ไม่ได้ตรงตามสเปกที่กำหนดซึ่งอาจเป็นผลเสียแก่ผู้บริโภค เป็นเหตุให้อาจเกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ฉนวนไฟฟ้าและทรัพย์สินได้ จึงมีการคิดค้นเครื่องตรวจสอบอุปกรณ์ - ฉนวนไฟฟ้าขึ้น การตรวจสอบอุปกรณ์ - ฉนวนไฟฟ้าบางอย่างอาจมีปัญหายุ่งยากที่จะทดสอบคุณภาพของอุปกรณ์ - ฉนวนไฟฟ้า จึงต้องเลือกวิธีทดสอบที่เหมาะสม ซึ่งเมื่อทดสอบจะไม่ทำลายสภาพการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้านั้นและวินิจฉัยว่าอุปกรณ์ - ฉนวนไฟฟ้านั้นมีคุณภาพเหมาะแก่การใช้งานตามที่ต้องการ การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแบ่งออกได้ 3 วิธี

1. การทดสอบแบบแตกสลาย เป็นการหาความคงทนสูงสุดของฉนวน
2. การทดสอบความคงทน ซึ่งทดสอบด้วยแรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำ เป็นเวลา 1 นาที
3. การทดสอบความคงทน ซึ่งทดสอบด้วยแรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำขนาดแรงดันทดสอบเท่ากับแรงดันสูงสุดของระบบใช้งาน เป็นการทดสอบคุณภาพและอายุการใช้งานของอุปกรณ์ - ฉนวนด้วย การทดสอบแบบนี้จัดเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย

ซึ่งการทดสอบเหล่านี้อาจหาข้อมูลยาก ๆ ในช่วงที่ต้องการได้ โดยการควบคุมของอุณหภูมิ ซึ่งจะช่วยให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้า มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการเลือกใช้อุปกรณ์-ฉนวนไฟฟ้าพร้อมทั้งการออกแบบได้อย่างเหมาะสม

1.2 วัตถุประสงค์และขอบข่ายของงานวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อออกแบบสร้างต้นแบบหม้อแปลงแรงสูงที่ใช้สำหรับการทดสอบอุปกรณ์-ฉนวนไฟฟ้า ขนาดของหม้อแปลงที่สร้างขึ้นได้พิจารณาจากสเปกของอุปกรณ์-ฉนวนไฟฟ้าที่มีอยู่ในท้องตลาดทั่วไป

เพื่อใช้ในการศึกษาค้นคว้าสภาพฉนวนของวัสดุที่จะนำมาสร้างฉนวนไฟฟ้าต่อไป



บทที่ 2

การผลิตไฟฟ้าแรงดันสูงและการใช้ประโยชน์

2.1 ประวัติการวิวัฒนาการไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ

ปี 1831 นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษชื่อ MICHAEL FARADAY เป็นผู้ค้นพบ การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (ELECTROMAGNETIC INDUCTION)

ปี 1833 PIXII สร้างเครื่องจักรกลกระแสสลับ โดยใช้หลักการของ แม่เหล็กไฟฟ้า โดยให้ขั้วแม่เหล็กเคลื่อนที่ไปรอบ ๆ ส่วนขดลวดอยู่กับที่

ปี 1866 WERNER SIEMENS ค้นพบหลักการไดนาโม จึงทำให้สามารถ สร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง ๆ ได้

ปี 1885 วิศวกรชาวฮังการี BLATHY DERI และ ZIPERNOWSKI คิด ค้นหม้อแปลงได้สำเร็จ จึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันกระแสสลับให้สูงขึ้นได้ง่ายๆ

ปี 1897 F.A.HASELWANDER สร้างระบบสายส่งกระแสสลับ 3 เฟส 1000 โวลต์ ครั้งแรกเป็นระยะทาง 1 กิโลเมตร

ปี 1891 มีการแสดงส่งพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบ 3 เฟส 15 KV (เควี) 210 KVA เป็นครั้งแรกระหว่างเมือง LAUFFEN กับ FRANKFURT ในประเทศ เยอรมันเป็นระยะทางถึง 175 กิโลเมตร ในการแสดงครั้งนั้นใช้หลอดไฟ 1000 หลอด และมอเตอร์ 3 เฟส 100 แรงม้า เป็นตัวใช้ไฟสายส่งเป็นสายซึ่งในอากาศ ซึ่งออกแบบโดย CHARLES BROWN จึงนับเป็นวันเกิดของการส่งพลังงานไฟฟ้ากระแส สลับ 3 เฟส ซึ่งประสิทธิภาพของระบบส่งจ่ายประมาณ 75% จากการส่งพลังงาน 70 กิโลวัตต์ โดยมีประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 93.5% และของหม้อแปลง 96% อาจพูดได้ว่าระบบแรงดันสูง (แรงดันที่สูงกว่า 1000 โวลต์) ที่ใช้สำหรับส่งพลังงาน ไฟฟ้าได้เริ่มมีใช้ตั้งแต่ปี 1891 นั้นเป็นต้นมา และได้มีการพัฒนาระบบแรงดันสูงขึ้นมา เรื่อย ๆ จนถึงปัจจุบัน ระบบแรงดันกระแสสลับ 1000 KV การค้นวิจัยเพื่อที่จะนำ เอาาระบบแรงดันสูงขึ้นไปอีกมาใช้ยังคงดำเนินต่อไปไม่หยุดยั้ง

ประเทศไทยเราได้นำเอาาระบบแรงดันสูง 230 เควี (KV) มาใช้ตั้ง แต่ปี พ.ศ. 2507 เพื่อส่งพลังงานไฟฟ้าจากโรงจักรพลังน้ำเขื่อนภูมิพลฯ ซึ่งมีกำลัง ผลิตถึง 560 MW มายังกรุงเทพฯ

2.2 การใช้ประโยชน์แรงดันสูงกระแสสลับ

แรงดันสูงกระแสสลับที่ใช้ประโยชน์คือ

- เพื่อส่งจ่ายและจำหน่ายพลังงานไฟฟ้า
- นำไปสร้างแรงดันสูงกระแสตรง เพื่อส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าใช้ในการทดสอบอุปกรณ์และวัสดุที่ใช้กับไฟฟ้าแรงสูง ใช้ในทางฟิสิกส์และการแพทย์
- ทดสอบอุปกรณ์และวัสดุฉนวนที่จะนำไปใช้กับระบบส่งจ่ายแรงดันสูงหรือ เพื่อการวิจัยในการออกแบบอุปกรณ์

ในการส่งพลังงานไฟฟ้าปริมาณมาก ๆ และเป็นระยะทางไกลๆ มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องส่งพลังงานด้วยระบบแรงดันสูง เพื่อลดพลังงานสูญเสียเปล่า เนื่องจากความต้านทานในสายส่งดังกล่าวแล้ว ผลดีของการส่งพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบแรงดันสูง จะทำให้แรงดันตกในสายส่งลดน้อยลง เพิ่มประสิทธิภาพเสถียรภาพความเชื่อถือได้ต่อระบบสายส่งให้สูงขึ้น

ระดับแรงดันสูงที่ใช้ส่งพลังงานไฟฟ้าอยู่ในปัจจุบันนี้อาจแบ่งออกได้ 3 ช่วงด้วยกัน คือ

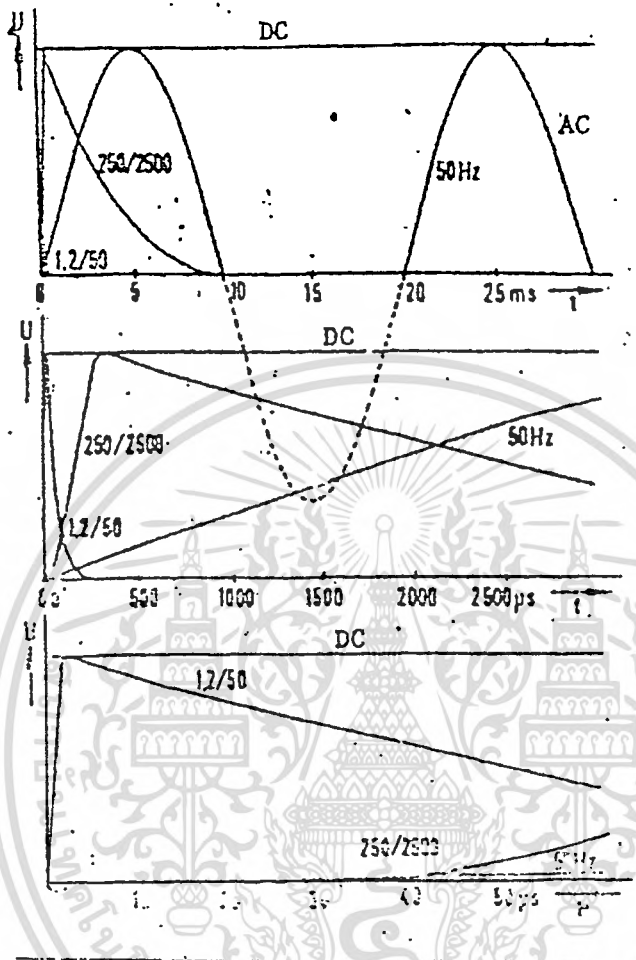
1. แรงดันสูง (HIGH VOLTAGE = HV) หมายถึงแรงดันตั้งแต่ 1 KV ขึ้นไปจนถึง ๒๓๐ KV
2. แรงดันสูงพิเศษ (EXTRA HIGH VOLTAGE = EHV) หมายถึงแรงดันสูงกว่า 230 จนถึง 765 KV
3. แรงดันสูงอลตรา (ULTRA HIGH VOLTAGE = UHV) หมายถึงแรงดันสูงกว่า 765 KV ขึ้นไป

สำหรับการนำแรงดันสูงกระแสสลับไปใช้ประโยชน์ในการทดสอบฉนวนและอุปกรณ์ไฟฟ้าที่จะนำไปใช้งานในระบบไฟเพื่อให้แน่ใจว่าวัสดุและอุปกรณ์เหล่านั้นมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ โดยทำการทดสอบตามสภาพที่อุปกรณ์นั้นจะมีโอกาสได้รับความเครียดทางไฟฟ้า (ELECTRICAL STRESS) ในขณะที่ใช้งานและเป็นการทดสอบหาอายุการใช้งานด้วย โดยทั่วไปอาจแบ่งแยกการทดสอบออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

2.2.1 การทดสอบความคงทน (ENDURANCE TEST) เป็นการทดสอบอายุการใช้งานของฉนวนอุปกรณ์ ที่จะต้องรับความเครียดสนามไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลา ทดสอบด้วยแรงดันกระแสสลับความถี่ที่ขนาดแรงดันทดสอบเท่ากับแรงดันสูงสุดของระบบใช้งานวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหลังงานสลับเปลา และระดับแรงดันที่โคโรน่าเริ่มเกิดหรือเกิดฉัรจางบางส่วน

2.2.2 การทดสอบความคงทนอยู่ได้อ่อนแรงดัน (WITHSTAND VOLTAGE TEST) เป็นการทดสอบว่าวัสดุฉนวนหรือการฉนวนของอุปกรณ์จะสามารถคงทนต่อแรงดันทดสอบได้หรือไม่ ซึ่งแยกออกเป็น 2 ชนิด คือ การทดสอบความคงทนอยู่ได้ระยะสั้นความถี่ต่ำโดยอ่อนแรงดันกระแสสลับตามที่กำหนดในมาตรฐานเป็นเวลา 1 นาที ซึ่งจะสูงกว่าแรงดันใช้งาน เป็นการเลียนแบบแรงดันเกินที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันในระบบฉนวนหนึ่ง เป็นการทดสอบความคงทนอยู่ได้ด้วยแรงดันอิมพัลส์ เพื่อความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์อันเกิดจากฟ้าผ่า (LIGHTNING IMPULSE) หรือเกิดจากการทำพานของสวิตช์ เรียกว่า แรงดันเสริจสวิตช์ (SWITCHING SURGE)

2.2.3 การทดสอบแตกสลาย (DISRUPTIVE TEST) เป็นการทดสอบความแตกสลายหรือเสียหายของฉนวนจากความเครียดสนามไฟฟ้า (ELECTRIC FIELD STRESS) ซึ่งรวมทั้งการหัดวของแรงดันซึ่งเกิดขึ้นกับฉนวนที่เป็นของแข็งของเหลว และก๊าซ ในลักษณะวบไฟคามฟ้า สปาร์ค เจาะผ่านทะลุ ซึ่งจะททำให้ทราบได้ว่าวัสดุหรืออุปกรณ์นั้นสามารถทนได้สูงสุดเท่าใด



รูปคลื่นแรงดันทดสอบแบบต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในรูป 2.1

รูป 2.1 รูปคลื่นแรงดันทดสอบแบบต่าง ๆ

DC = แรงดันกระแสตรง

AC = แรงดันกระแสสลับ 50 HZ

1.2/50 = แรงดันอิมพัลส์ รูปคลื่นฟ้าผ่า

250/2500 = แรงดันอิมพัลส์ รูปคลื่นเสิร์จสวิตชิ่ง

ขนาดแรงดันทดสอบ

การเลือกขนาดแรงดันทดสอบขึ้นอยู่กับระดับการฉนวน (INSULATION LEVEL) นั่นคือ ขึ้นอยู่กับระบบแรงดันที่จะนำเอาอุปกรณ์หรือวัสดุนั้น ๆ ไปใช้งาน แต่ละประเทศจะกำหนดมาตรฐานสากล (IEC RECOMMENDATION) ซึ่งเป็นที่ยอมรับของนานาประเทศ เป็นค่าอ้างอิงตกลงกันระหว่างประเทศ IEC PUB 1.71-1976: INSULATION CO-ORDINATION PART 1 ได้กำหนดระดับแรงดันทดสอบตามช่วงระบบแรงดันสูงสุดออกเป็น 3 ช่วง คือ

ช่วง เอ. คือแรงดันที่สูงกว่า 1000 โวลต์ขึ้นไปและน้อยกว่า 52 KV

ช่วง บี. คือแรงดันในช่วง 52 KV ขึ้นไป แต่ไม่น้อยกว่า 300 KV

ช่วง ซี. คือช่วงแรงดันที่สูงกว่า 300 KV ขึ้นไป

แรงดันทดสอบการฉนวนระดับแรงดันของอุปกรณ์ทั้ง 3 ช่วงได้ แสดงไว้ในตารางที่ 2-1 (เอ.), 2-1 (บี.), 2-1 (ซี.) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการใช้แรงดันทดสอบยังขึ้นอยู่กับข้อตกลงของผู้ซื้อขายว่าจะใช้ตามมาตรฐาน IEC นี้ หรือตามมาตรฐานอื่น ๆ เช่น VDE0111 ของเยอรมัน หรือ ANSIC 57.13 ของอเมริกา และแคนาดา หรือ BSS 3941 ของอังกฤษ เป็นต้น และยิ่งกว่านั้นควรดูจากมาตรฐานของผลิตภัณฑ์หรืออุปกรณ์นั้น ๆ ด้วย

ตารางที่ 1.2 (a) มาตรฐานการฉนวนระดับ $1 \text{ kV} < U_m < 52 \text{ kV}$

Highest voltage for equipment U kV _{rms}	Power frequency short duration withstand voltage kV _{rms}	Lightning impulse withstand voltage kV _{peak}	
		List 1	List 2
3.6	10	20	40
7.2	20	40	60
12	28	60	75
17.5	38	75	95
24	50	95	125
36	70	145	170

หมายเหตุ การเลือกระดับการฉนวน List 1 หรือ List 2 ขึ้นอยู่กับว่ามีโอกาสจะได้รับเซอร์จลิตซิงหรือแรงดันฟ้าผ่าผ่านอย่างน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับระบบต่อลงดินที่สายเป็นกลาง และระบอบ้องกันแรงดันเกิน

ตารางที่ 1.2 (b) มาตรฐานการฉนวนระดับ $1 \text{ kV} < U_m < 52 \text{ kV}$

Highest voltage for equipment U kV _{rms}	Power frequency short duration withstand voltage kV _{rms}	Lightning impulse withstand voltage kV _{peak}
52	95	250
72.5	140	325
123	185	450
145	230	550
170	275	650
245	325	750
	360	850
	395	950
	460	1050

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 (C) มาตรฐานการฉนวนระดับ $U_m > 300$ KV คือระดับ EHV

1	2	3	4	5	6
Highest voltage for equipment U_m (r.m.s.)	Base for p.u. values $U_m \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ (peak)	Rated switching impulse withstand voltage (peak)		Ratio between rated lightning and switching impulse withstand voltages	Rated lightning impulse withstand voltage (peak)
kV	kV	p.u.	kV		kV
300	245	3.06	750	1.13	850
		3.47	850	1.27	950
362	296	2.86	850	1.12	950
		3.21	950	1.24	1050
420	343	2.76	950	1.11	1050
		3.06	1050	1.24	1175
525	429	2.45	1050	1.12	1175
		2.74	1175	1.24	1300
765	625	2.08	1300	1.11	1300
		2.28	1425	1.36	1425
		2.48	1550	1.21	1425
				1.10	1550
				1.32	1800
				1.19	1550
				1.09	1800
				1.38	1950
				1.26	2100
				1.16	1950
				1.26	2400
				1.47	2100
				1.55	2400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การใช้ประโยชน์แรงดันสูงกระแสตรง

แรงดันสูงกระแสตรง เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ก็คือยามฝนฟ้าคะนองและเกิดฟ้าผ่าจากก้อนเมฆลงสู่พื้นโลก ที่ใช้ประโยชน์ของแรงดันสูงกระแสตรง ได้แก่

- 1) ใช้ทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าและฉนวนและการวิจัยในห้องทดลอง
- 2) ใช้สำหรับเครื่องมือพิเศษทางฟิสิกส์ทางการแพทย์และทางเทคนิค
- 3) ใช้ส่งพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบแรงสูงกระแสตรง

อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้กับระบบแรงดันกระแสตรงก็มีความจำเป็นต้องทดสอบการฉนวนด้วยแรงดันกระแสตรง เช่นเดียวกับการทดสอบด้วยแรงดันกระแสสลับ แม้แต่อุปกรณ์บางอย่างที่มีใช้กับแรงดันกระแสสลับ ยังต้องทดสอบด้วยแรงดันกระแสตรงก็มี โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุปกรณ์ที่มีค่าความจุไฟฟ้า (CAPACITANCE) สูง ๆ เช่น เคเบิลแรงสูง หรือเคเบิลที่ใช้ในระบบส่งจ่าย ในกรณีของเคเบิลแรงสูงจะต้องทดสอบด้วยแรงดันกระแสตรง เพราะว่าเคเบิลนั้นได้วางเสร็จเรียบร้อยแล้ว และมีความจุสูง ซึ่งไม่สามารถจะจัดหาตัวจ่ายกระแสสลับที่มีกำลังเพียงพอแก่การทดสอบได้หากทดสอบด้วยแรงดันกระแสตรงสามารถทำได้ เพราะเป็นการทดสอบด้วยแรงดันกระแสตรงใช้กำลังไฟฟ้าน้อย เนื่องจากความต้านทานกระแสตรงของเคเบิลมีค่าสูงมาก การอัดประจุจึงเป็นไปอย่างช้า ๆ จึงสามารถจัดหาตัวจ่ายกระแสตรงได้ง่ายกว่า

ในห้องทดลองวิจัยโดยทั่วไปมักจะทำการทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนด้วยแรงดันกระแสตรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทดลองกับฉนวนที่เป็นก๊าซฉนวนทางกายภาพ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับค่าที่พลังงานอาจวิเคราะห์ด้วยแรงดันกระแสตรงได้เช่นเดียวกับ สามารถหาผลการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากข้อของแรงดันได้อีกด้วย

ใช้ประโยชน์สำหรับเครื่องมือพิเศษทางฟิสิกส์ เช่น ปฏิกิริยาเร่งอนุภาค เครื่องผลิตรังสีเอกซ์ ซึ่งได้จากการยิงอิเล็กตรอนที่ผ่านเครื่องเร่งอัตราเร็วลงบนแผ่นโลหะ เครื่องอิเล็กโตรไมโครโคปเปอร์ดังกล่าวในปัจจุบันใช้แรงดันสูงอาจถึง 1000 KV ใช้ประโยชน์ในทางพลาสมาฟิสิกส์ (PLASMAPHYSICS) คือสร้างพลาสมาด้วยอุณหภูมิต่ำ เพื่อทำการฟิวชั่นนิวเคลียร์ ซึ่งมีความจำเป็นต้องใช้

กระแสสูง

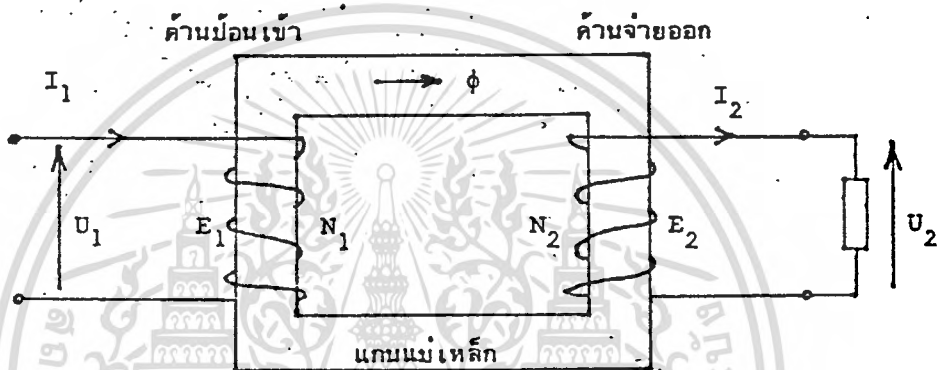
ความหนาแน่นพลังชี่ขึ้นอยู่กับเกรเดียนท์ ฉะนั้นฉนวนจะ เบรคควีนเมื่อเกรเดียนท์มีค่ามากเกินไป ความแข็งแรงของฉนวนอาจบอกมาในเทอมของเกรเดียนท์แทนที่จะบอกเป็นความหนาแน่นพลังชี่ไดอิเล็กตริก

ความเค้น (STRESS) ที่เกิดบนฉนวนไม่ได้ขึ้นอยู่กับศักดาไฟฟ้าอย่างเดียวแต่ขึ้นอยู่กับอีเลคโตรคดด้วย เช่น รูปร่างอีเลคโตรคดแหลมเหมือนเข็ม เกรเดียนท์ที่ปลายมีค่าสูงมากแม้ว่าศักดาไฟฟ้ามีค่าน้อย พอสรุปได้ว่าจุดใดมีค่าความหนาแน่นพลังชี่มากในวงจรแม้เหล็กทำให้เกิดความสูญเสียมาก แต่ในวงจรไดอิเล็กตริกความหนาแน่นพลังชี่ทำให้ฉนวนเสียหายได้



2.4 หลักการทำงานของหม้อแปลงทดสอบ

หม้อแปลงทดสอบโดยปกติจะเป็นหม้อแปลงเฟสเดียว ซึ่งมีหลักการเช่นเดียวกับหม้อแปลงทั่วไป คือ ประกอบด้วยขดลวดอย่างน้อย 2 ชุด พันอยู่บนแกนแม่เหล็ก โดยด้านหนึ่งเป็นด้านที่ป้อนกำลังไฟฟ้าเข้า อีกด้านหนึ่งเป็นด้านที่จ่ายกำลังไฟฟ้าออก ดังรูปที่ 2.2



ϕ = เส้นสนามแม่เหล็ก

U_1 = แรงดันที่ป้อนเข้า

U_2 = แรงดันที่จ่ายออก

I_1 = กระแสด้านป้อนเข้า

I_2 = กระแสด้านจ่ายออก

N_1 = จำนวนรอบขดลวดด้านป้อนเข้า

N_2 = จำนวนรอบขดลวดด้านจ่ายออก

E_1 = แรงดันเหนี่ยวนำด้านป้อนเข้า

E_2 = แรงดันเหนี่ยวนำด้านจ่ายออก

รูปที่ 2.2 หลักการทำงานของหม้อแปลง

เมื่อป้อนแรงดันกระแสสลับให้กับขดลวดด้านป้อนกำลังเข้าโดยขดลวดด้านจ่ายกำลังออกยังไม่ต่อโหลด จะทำให้เกิดกระแสไหลในขดลวดนั้น และสร้างเส้นสนามแม่เหล็กในแกนแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรูปคลื่นไซน์ช้ากว่าแรงดันที่ป้อน 90 องศา และทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดนี้ช้ากว่าเส้นสนามแม่เหล็กอีกเป็นมุม 90 องศา

แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดจะมีขนาดเท่ากันทิศทางตรงข้ามกับแรงดันที่ป้อน ดัง
เฟสเซอร์โคจรแอมแปร์ในรูปที่ 2.4 ถ้าเส้นสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการป้อนแรงดัน
รูปคลื่นไซน์เขียนได้ว่า

$$\theta = \theta_m \cos \omega t$$

จะได้แรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดซึ่งเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับจำนวนรอบของขดลวด

$$e_1 = -N_1 \frac{d\theta}{dt} = N_1 \omega \theta_m \sin \omega t$$

$$E_1 = 4.44 f N_1 \theta_m$$

เมื่อ E เป็นค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันเหนี่ยวนำ

f เป็นความถี่

θ_m เป็นค่ายอดของเส้นสนามแม่เหล็ก

ขณะเดียวกันแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดจ่ายกำลังออกจะได้

$$E_2 = 4.44 f N_2 \theta_m$$

แรงดันเหนี่ยวนำในเทอมของความหนาแน่นเส้นสนามแม่เหล็ก B_m จะได้ว่า

$$E_1 = 4.44 f N_1 B_m A$$

$$E_2 = 4.44 f N_2 B_m A$$

เมื่อ A เป็นพื้นที่ภาคตัดขวางแกนแม่เหล็ก

B_m เป็นค่ายอดของความหนาแน่นเส้นสนามแม่เหล็ก

จะเห็นอัตราส่วนของแรงดันเหนี่ยวนำในเทอมของจำนวนรอบของขดลวดจะได้

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

2.5 วงจรสมมูลของหม้อแปลง

เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยขดลวดที่หุ้มกระแสไหลผ่านจะมีคุณสมบัติของความต้านทานและความเหนี่ยวนำอยู่ในตัว ส่วนแกนแม่เหล็ก เป็นทางเดินผ่านของเส้นสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นในแกนแม่เหล็กเช่นกัน จึงเป็นผลให้เกิดกระแสไหลวน (Eddy Current) ขึ้นในแกนแม่เหล็ก ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในแกนแม่เหล็ก เนื่องจากกระแสไหลวนนี้ สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสสลับจะมีช่วงกลับไปกลับมาตามการเปลี่ยนแปลงของกระแส เป็นผลให้เกิดกำลังสูญเสียในแกนแม่เหล็ก เนื่องจากความเสียดทานเรียกว่าฮีสเตอร์ซิส ฉะนั้นหม้อแปลงไฟฟ้าจึงอาจเขียนแทนด้วยวงจรสมมูล ที่ประกอบด้วยความต้านทาน R_1 , R_2 และรีแอคแตนซ์ X_1 , X_2 ของขดลวดด้านป้อนกำลังเข้า และด้านจ่ายกำลังออกตามลำดับส่วนค่ากำลังสูญเสียในแกนแม่เหล็ก เนื่องจากกระแสไหลวนและฮีสเตอร์ซิสแทนด้วยความต้านทาน R ดังวงจรสมมูลในรูปที่ 2.3

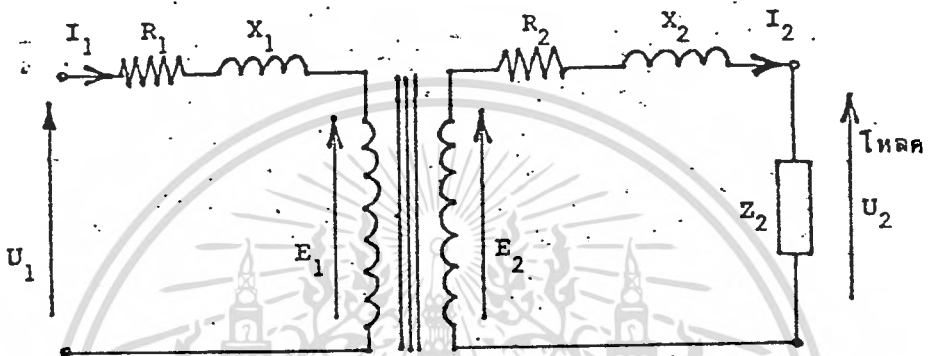
การวิเคราะห์ทางวงจรสมมูล จริง ๆ ของหม้อแปลง จะเกิดปัญหาในเรื่องความไม่เป็นเชิงเส้นของแกนแม่เหล็ก ทำให้กระแสเมื่อไม่มีโหลดหรือกระแสกระตุ้น I ไม่ใช่คลื่นรูปไซน์อย่างแท้จริง จึงไม่สามารถเขียนแทนวงจรสมมูล ด้วยองค์ประกอบที่มีค่าแน่นอน แต่ในทางปฏิบัติเนื่องจากขนาดของ I มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับกระแสที่กำหนดของหม้อแปลง ฉะนั้นจึงถือเสมือนว่า I เป็นคลื่นรูปไซน์ ทำให้สามารถเขียนแทนวงจรสมมูล ของแกนแม่เหล็กเป็น R และ X ได้ดังในรูปที่ 2.3

เมื่อต่อโหลดด้านจ่ายกำลังออก กระแสไหล I จะไหลในขดลวดด้านจ่ายกำลังออกและสร้างเส้นสนามแม่เหล็กในแกนแม่เหล็กจำนวนหนึ่งขึ้นมา แต่ขดลวดด้านป้อนกำลังเข้าต้องรักษาเส้นสนามแม่เหล็กให้คงที่เหมือนขณะที่ยังไม่จ่ายโหลด เนื่องจากแรงดันป้อนเข้า U คงที่ ดังนั้นขดลวดป้อนกำลังเข้าจะดึงกระแส I จากแหล่งจ่ายไฟอีกจำนวนหนึ่ง

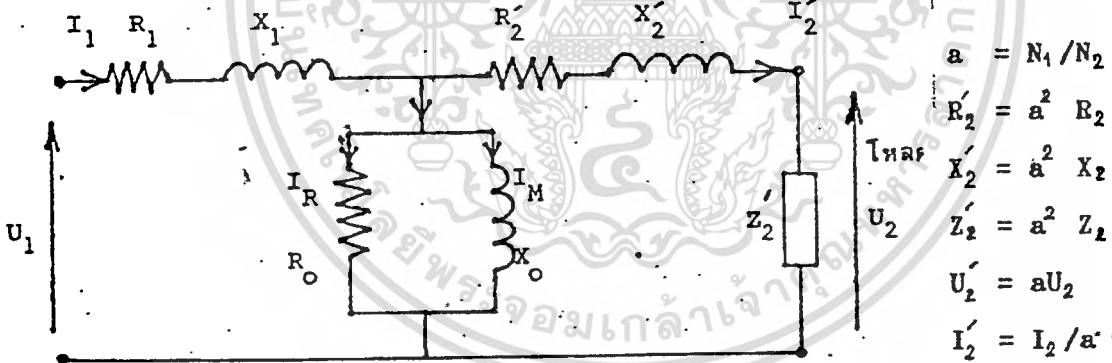
เพื่อสร้างเส้นสนามไฟฟ้าที่มีทิศทางตรงกันข้ามขึ้นมาหักล้างกับเส้นสนามไฟฟ้าที่สร้างจากขดลวดด้านจ่ายกำลังออกพอดี ดังนั้น แอมแปร์-เทิร์นระหว่าง $N_2 I_2$ จะมีขนาดเท่ากันแต่มีทิศทางตรงกันข้าม ดังในรูปที่ 2.4

โดยปกติกระแสกระตุ้น I_0 น้อยกว่ากระแส I_2 มาก ดังนั้นสามารถประมาณได้ว่า

$$N_1 I_1 = N_2 I_2$$



ก) แสดงของแต่ละด้าน



$$a = N_1 / N_2$$

$$R_2' = a^2 R_2$$

$$X_2' = a^2 X_2$$

$$Z_2' = a^2 Z_2$$

$$U_2' = a U_2$$

$$I_2' = I_2 / a$$

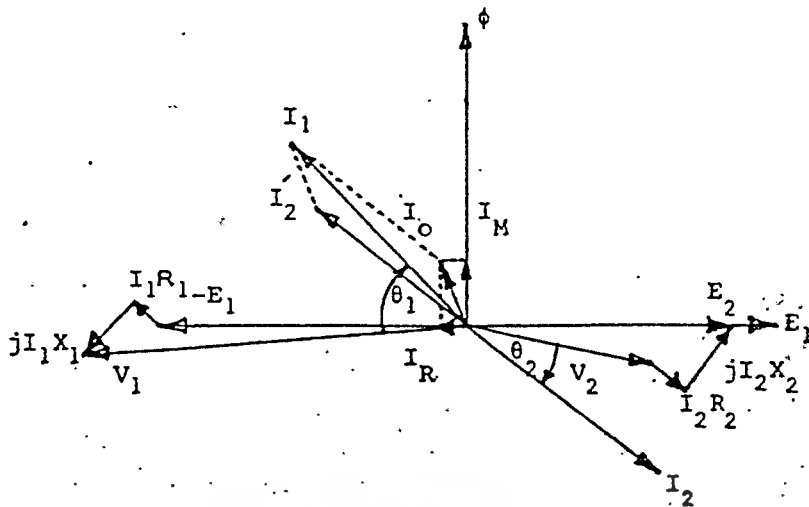
I_0 คือ กระแสกระตุ้น

I_M คือ กระแสสร้างเส้นสนามแม่เหล็ก

I_R คือ กระแสการสูญเสียกำลังไฟฟ้ารวมในแกนแม่เหล็ก

ข) คิดเทียบทางด้านป้อนเข้า

รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของหม้อแปลง



$\cos \theta_1 =$ เฟาเวอร์แพคเตอร์ของ โหลดค้ำบ้นน้าล้ง ไฟฟ้าเข้า
 $\cos \theta_2 =$ เฟาเวอร์แพคเตอร์ของ โหลดค้ำบ้นน้าล้ง ไฟฟ้าออก

รูปที่ 2.4 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลง

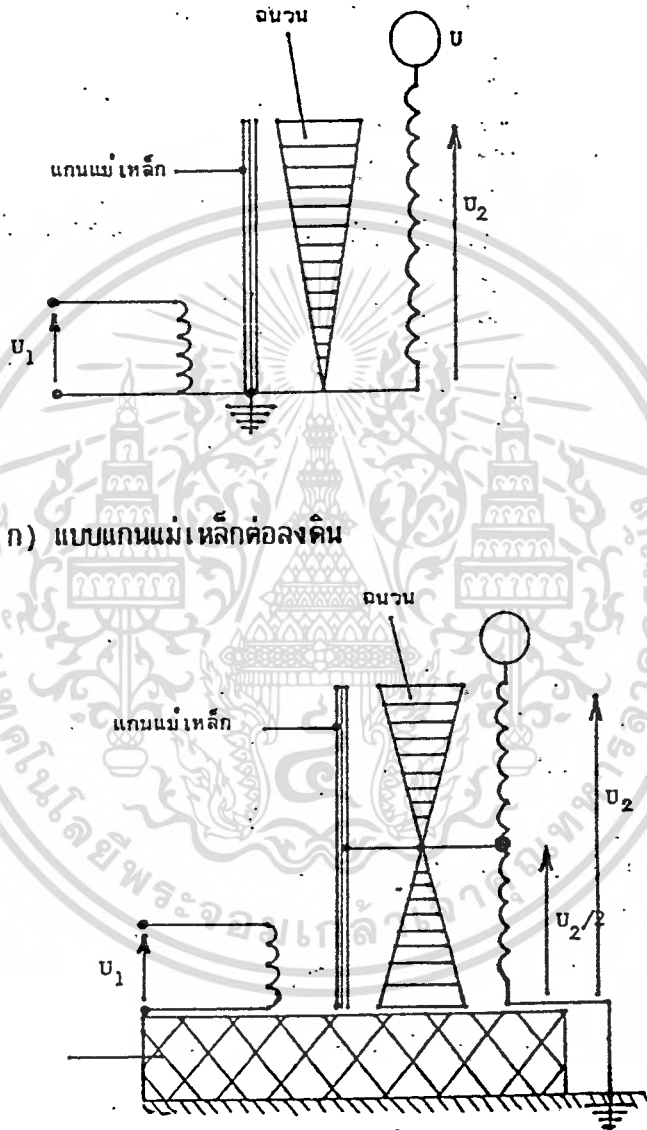
2.6 โครงสร้างและการฉนวนของหม้อแปลงทดสอบ

ปัญหาของหม้อแปลงทดสอบที่นอกเหนือไปจากหม้อแปลงธรรมดา คือ การฉนวนสำหรับแรงดันไม่เกิน 100 kV การฉนวนอาจเป็นแบบแห้ง หรือ เทหุ้มขดลวดและแกนแม่เหล็กด้วยสารสังเคราะห์ ถ้าหม้อแปลงที่มีแรงดันสูงกว่านี้ การฉนวนจะเป็นกระดาษชุบน้ำมัน แกนแม่เหล็กและขดลวดจะจุ่มอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงที่บรรจุอยู่ในถังโลหะหรือถังฉนวนถ้าใช้ถังแม่เหล็กจะมีข้อดีในแง่การระบายความร้อน แต่ต้องใช้ปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้าแรงสูง นั่นคือ เหมาะสมสำหรับหม้อแปลงที่ต้องใช้กระแสทดสอบและกำลังไฟฟ้าสูง ๆ ถ้าตัวถังเป็นฉนวน เช่น เบกกาไลต์ อีพอกซี หรืออีพอกซี เสรี่ยมแก้วไฟเบอร์ไม่ต้องใช้ปลอกฉนวนนำสายไฟ แต่จะระบายความร้อนได้น้อยกว่าแบบถังโลหะ

หม้อแปลงทดสอบโดยทั่วไปซึ่งแรงดันไม่สูงมากนักแกนแม่เหล็กจะต่อลงดิน และขดลวดแรงต่ำจะพันติดกับแกนแม่เหล็ก แรงดันของขดลวดแรงต่ำอยู่ระหว่าง 100 V ถึง 2000 V ขดลวดแรงสูงจะพันทับขดลวดแรงต่ำอีกต่อหนึ่ง นั่นคือ ขดลวดแรงสูงจะอยู่ห่างจากแกนแม่เหล็กขดลวดรอบที่มีแรงดันสูงขึ้นก็จะอยู่ห่างจากแกนแม่เหล็กหรือส่วนที่ต่อลงดินมากขึ้น การฉนวนจะเพิ่มตามแรงดัน ดังในรูปที่ 2.5 ก) สำหรับโครงสร้างหม้อแปลงทดสอบ

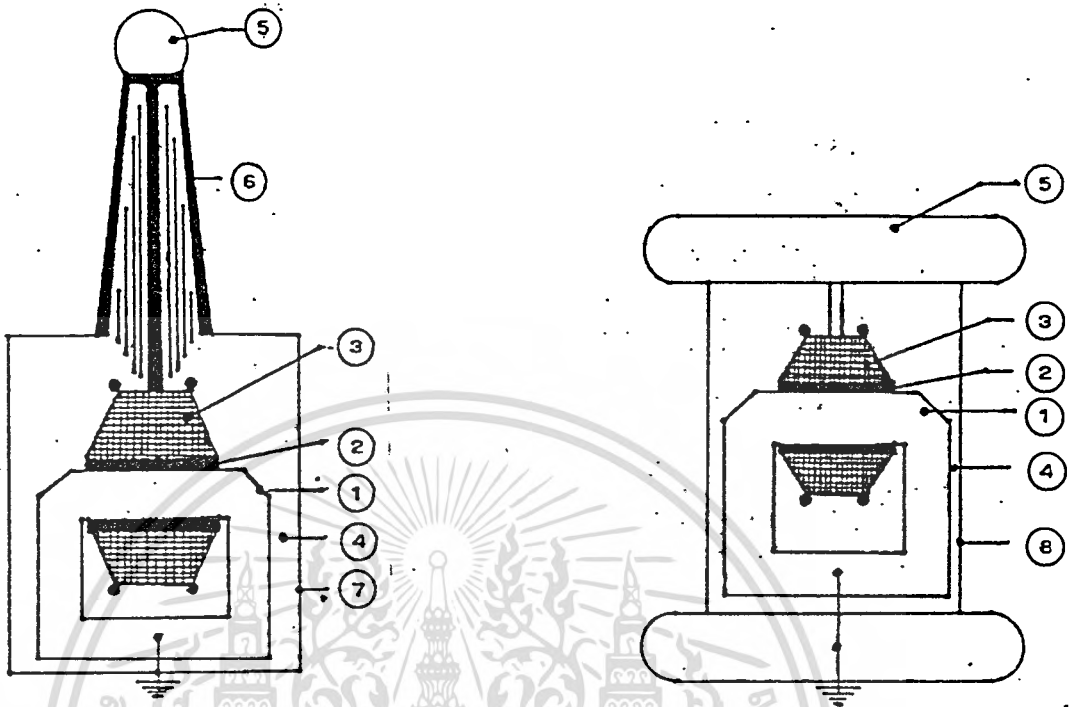
แกนแม่เหล็กต่อลงดินแบบจุ่มน้ำมันแสดงไว้ในรูปที่ 2.6

ในกรณีที่แรงดันสูง ๆ การฉนวนระหว่างขดลวดกับแกนแม่เหล็กสามารถลดลงได้โดยต่อแกนแม่เหล็กให้มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับครึ่งหนึ่งของแรงดันสูง โดยตัวถังจะตั้งอยู่บนฉนวนรองรับ ดังในรูปที่ 2.5 ข)



รูปที่ 2.5 การฉนวนในหม้อแปลงทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) ถังเหล็ก

ข) ถังฉนวน

- 1 แกนแม่เหล็ก
- 2 ขดลวดแรงต่ำ
- 3 ขดลวดแรงสูง
- 4 น้ำมันเป็นฉนวน
- 5 ปลายขั้วแรงสูง
- 6 ปลายขั้วแรงต่ำ
- 7 ถังโลหะ
- 8 ถังฉนวน

รูปที่ 2.6 โครงสร้างของหม้อแปลงทดสอบแกนเหล็กค้ำลงดินแบบจุ่มน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1 หม้อแปลงแบบน้ำมัน

การฉนวนของหม้อแปลงแบบน้ำมันนี้จะใช้กระดาษพันหุ้มรัศขดลวดแรงสูงไว้เพื่อเป็นฉนวนแข็ง แล้วจุ่มในน้ำมันหม้อแปลง เพื่อเป็นฉนวนบริเวณช่องว่าง และเป็นตัวระบายความร้อน ซึ่งมีโครงสร้างที่ได้กล่าวแล้ว ดังในรูปที่ 2.5

หม้อแปลงทดสอบแบบนี้จะมีข้อเสีย คือ ต้องการการบำรุงรักษา เช่น เปลี่ยนน้ำมันใหม่ระ เบิดและคิดไฟได้ง่ายหากเกิดระ เบิดขึ้น แต่มีข้อดี คือ ระบายความร้อนได้ดีกว่าอากาศ และ ขนาดของขดลวดจะเล็กกว่า เนื่องจากน้ำมันมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าอากาศ และสามารถใช้งานภายนอกอาคารได้

2.7 ค่ากำหนดของหม้อแปลงทดสอบโดยทั่วไป

หม้อแปลง ทดสอบจะกำหนดด้วย

- แรงดันที่ป้อนเข้าและแรงดันที่จ่ายออก
- กระแสที่ป้อนเข้าและกระแสที่จ่ายออก
- กำลังที่กำหนดของหม้อแปลง
- แรงดันลัดวงจร (Short circuit voltage or Impedance voltage)
- ระดับแรงดันที่เริ่มเกิดโคโรนา
- ความถี่และรูปคลื่นแรงดัน
- ลักษณะการฉนวนและ โครงสร้าง

** แรงดันลัดวงจร หมายถึง อัตราส่วนระหว่างแรงดันป้อนเข้าที่ค่ากระแสกำหนดขณะที่ด้านจ่ายออกลัดวงจร กับแรงดันที่กำหนดด้านป้อนเข้า

2.7.1 ขนาดแรงดันของหม้อแปลงทดสอบ

การกำหนดขนาดแรงดันของหม้อแปลงทดสอบขึ้นอยู่กับขนาดแรงดัน

ทดสอบสูงสุดที่มีโอกาสจะใช้ อย่างน้อยที่สุดจะต้องสูงกว่าค่าแรงดันคงอยู่ได้ (Withstand Voltage) ของวัสดุทดสอบที่ใช้กับระบบแรงดันที่กำหนดให้ และยิ่งในกรณีที่ต้องการทดสอบให้เกิดวาบไฟตามผิว เกิดเบรกควาร์น หรือเจาะผ่านทะลุ แรงดันที่ใช้ทดสอบจะต้องสูงมากขึ้นให้เพียงพอที่จะทำให้เกิดปรากฏการณ์นั้น และเมื่อคำนึงถึงประสิทธิภาพและอายุการใช้งาน แรงดันที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบควรจะสูงกว่าแรงดันทดสอบประมาณ 10 ถึง 20 x

ทางด้านแรงดันป้อนเข้าของหม้อแปลงทดสอบ (แรงดันค่า) ควรเลือกภา
 หนดตามระบบแรงดันที่มีใช้กันอยู่ทั่วไป เช่น 220, 380, หรือ 500 V

รูปคลื่นแรงดันทดสอบกระแสสลับที่เปลี่ยนไปตามเวลา $u(t)$ อาจจะแตกต่างไปจากรูปคลื่นไซน์ได้ ฉะนั้นลักษณะของแรงดันทดสอบอาจอธิบายได้ด้วยค่ายอด (Peak Value) และค่าอาร์ เอ็ม เอส (rms value) ซึ่งหาได้จาก

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

เมื่อ T คือ เวลาช่วงคาบของแรงดัน

อย่างไรก็ตามรูปคลื่นแรงดันนี้อาจแตกต่างไปจากรูปคลื่นไซน์ได้ไม่เกิน 5 x ของค่ายอดรูปคลื่นพื้นฐาน

2.7.2 กระแสที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ

กระแสที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบขึ้นอยู่กับวัสดุทดสอบ กล่าวคือ วัสดุทดสอบบางอย่างใช้กระแสน้อย บางอย่างใช้กระแสมาก ฉะนั้นหม้อแปลงทดสอบจะต้องสามารถจ่ายกระแสให้กับวัสดุทดสอบได้ ตัวอย่างกระแสสูงสุดที่ใช้ทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 2(d)

ตารางที่ 2 (d) กระแสสูงสุดที่ใช้ทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่กำลัง

วัสดุทดสอบ	กระแสที่ต้องการใช้ทดสอบ
ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า (Insulators) ปลอกฉนวนนำสายไฟ (Bushings) หม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับมิเตอร์ (CT ,PT) เครื่องตัดต่อวงจร (CB)	0.1 ถึง 0.5 A
หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง คะแพซิเตอร์	0.5 ถึง 1 A
เคเบิล	1 A หรือมากกว่า

2.7.3 ขนาดกำลังของหม้อแปลงทดสอบ

การฉนวนทั้งหลายในด้านไฟฟ้าแรงสูงอาจถือได้ว่าเป็นลักษณะของค่าความจุไฟฟ้า คือ คะแพซิแตนซ์ ฉะนั้น โหลดของหม้อแปลงทดสอบจึงเป็นแบบคะแพซิเตอร์ หากการฉนวนไม่ดีพอทนต่อแรงดันไม่ได้ก็จะเกิดเบรกควาน์ สปาร์ก เจาะทะลุ ลัดวงจร กระแสลัดวงจรจะต้องสูงมากพอ เพื่อให้สามารถสังเกตเห็นความบกพร่องของการฉนวนได้ชัดเจน แต่กำลังไฟฟ้าลัดวงจรก็ไม่สมควรสูงเกินไป เพราะจะทำให้เกิดการระเบิดขึ้นได้ ฉะนั้น กำลังของหม้อแปลงและกำลังไฟฟ้าลัดวงจรต้องให้สอดคล้องกัน กำลังไฟฟ้าที่จะใช้ในการทดสอบอาจคำนวณได้จากสมการ

$$S_t = w C U_t^2$$

$$= 2 \pi f C U_t^2 * 10^{-9} \text{ kVA}$$

เมื่อ C คือ ค่าคะแพซิแตนซ์รวม เป็น pF

U_t คือ แรงดันทดสอบ เป็น kV_{rms}

f คือ ความถี่ของแรงดันเป็น Hz

แต่กำลังไฟฟ้าที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบจะต้องมีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าที่จะต้องป้อนให้กับโหลด นั่นคือ ควรจะต้องคำนึงถึงแฟกเตอร์ปลอดภัย (Safety Factor) ด้วย เพื่อให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงทดสอบยาวนานขึ้น

ค่าคะแพซิแตนซ์ของวัสดุทดสอบอาจประมาณได้ดังต่อไปนี้ [3]

- ลูกถ้วยฉนวนธรรมดา	10... 100	pF
- ปลอกฉนวนสายไฟ	150... 400	pF
- หม้อแปลงกระแส	200... 600	pF
- เคเบิลแรงสูง (ต่อความยาว 1 เมตร)	150... 300	pF
- หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	1 MVA ประมาณ 1,000	pF
	100 MVA ประมาณ 10,000	pF
- อุปกรณ์วัดแรงดันโวลเตจดีไวเดอร์แบบคะแพซิเตอร์	50 ... 500	pF
- สายค้ำวงจรแรงสูง (ต่อเมตร)	5 ... 15	pF

2.7.4 กำลังและแรงดันไฟฟ้าลัดวงจร

กำลังไฟฟ้าลัดวงจรของหม้อแปลงทดสอบจะขึ้นอยู่กับแรงดันลัดวงจร (E_{sc}) ของหม้อแปลงทดสอบ ซึ่งมักจะแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์มีค่าประมาณเท่ากับรีแอกแตนซ์และไม่ควรเกิน 30% ฉะนั้นในการค่อขึ้นบันได หม้อแปลงแต่ละตัวควรจะต้องออกแบบให้

มีค่าค่าพอเพื่อว่าเมื่อต่อขึ้นบันไดแล้ว จะไม่เกิน 30 % เช่น ใช้หม้อแปลง 3 ตัว แต่ละตัวจะมี E_{sc} ประมาณ 5 % การที่จำกัด E_{sc} ไม่ให้สูงมากเกินไปเพื่อป้องกันอันตรายจากแรงดันเกิน และการเกิดรีโซแนนซ์ เนื่องจากโหลดของหม้อแปลงทดสอบส่วนมากมักจะเป็นคะแพซิแตนซ์ แต่อย่างไรก็ตาม E_{sc} ก็ไม่ควรค่าเกินไป ทั้งนี้เพื่อมิให้กระแสลัดวงจรและกำลังไฟฟ้าลัดวงจรสูงมากเกินไป ซึ่งจะ เป็นอันตรายต่อหม้อแปลงทดสอบได้

เมื่อกำหนดกระแสที่กำหนด I_D และค่าแรงดันลัดวงจร E_{sc} ให้ จะสามารถคำนวณกระแสลัดวงจร I_{sc} ที่ค่าแรงดันกำหนด U_n ได้

$$I_{sc} = I_n * 100$$

หม้อแปลงทดสอบส่วนมากจะจำกัด I_{sc} ประมาณไม่เกิน 20 เท่าของ I_n กระแสเสิร์จไดนามิก (Dynamic Surge Current) I_{dy} อาจคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} I_{dy} &= \sqrt{2} * 1.8 * I_{sc} \\ &= 2.5 I_{sc} \end{aligned}$$

ซึ่งจะ เป็นตัวชี้บอกให้รู้ถึงขนาดแรงระเบิดออกที่เกิดขึ้นแก่ขดลวด ค่ากำลังไฟฟ้าลัดวงจรจะประมาณได้จาก

$$S_{sc} = \frac{S_n * 100}{E_{sc}}$$

บทที่ 3

การออกแบบหม้อแปลง

หม้อแปลงไฟฟ้าที่จะทำการออกแบบนี้เป็นหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส ขนาด 5 เค.วี. เอ. 50 ไซเคิล/วินาที แรงดัน 220/50,000 โวลต์ ใช้ฉนวนระบายความร้อน ดังมีรายละเอียดการออกแบบดังต่อไปนี้

3.1 การออกแบบแกนเหล็กและคำนวณขดลวด

ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้านั้นสามารถที่จะออกแบบได้หลายวิธี กล่าวคือ ออกแบบให้ต้นทุนน้อยที่สุดโดยไม่ว่าจนถึงกำลังไฟฟ้าสูญเสีย หรือในทางกลับกันอาจจะออกแบบให้มีกำลังสูญเสียไฟฟ้าน้อยที่สุด การออกแบบหม้อแปลงโดยให้ประหยัดที่สุด สามารถจะทำได้ถึงค่าหนึ่งเท่านั้น เพราะจะถูกจำกัดด้วยความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากกำลังไฟฟ้าสูญเสียในหม้อแปลง และถูกจำกัดด้วยความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กอ้อมตัวในแกนเหล็กหม้อแปลงที่ผลิตทั่ว ๆ ไปจะมีราคาของแกนเหล็กเท่า ๆ กับราคาของขดลวดทองแดง ในด้านประสิทธิภาพของหม้อแปลงนั้นสามารถออกแบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ที่โหลดที่กำหนดได้โดยการออกแบบให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดง

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กหาได้จากกราฟของผู้อผลิตเหล็กซิลิคอน ดังรูปกราฟที่ 3.1 การเลือกความหนาแน่นฟลักซ์ในแกนเหล็กจะให้ค่าน้อยกว่าจุดอ้อมตัวของแกนเหล็ก ถ้าสูงกว่านี้จะใกล้จุดอ้อมตัวของแกนเหล็กทำให้พลังงานสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้น และความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก (B) จะต้องอยู่ในเชิงเส้น จากกราฟรูป 3.2 ค่าที่เข้าใกล้จุดอ้อมตัวประมาณ 1.6 เวเบอร์/ตารางเมตร เราเลือกใช้ค่า $B = 1$ เวเบอร์/ตารางเมตร

ค่าพื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็กสามารถคำนวณได้

$$A = \frac{\sqrt{VA}}{5.58} = \frac{\sqrt{5 \times 10^3}}{5.58}$$

$$A = 12.67 = 13 \quad \text{ตารางนิ้ว}$$

$$\text{หรือ } A = 0.0083 \quad \text{ตารางเมตร}$$

ใช้ภาคตัดขวางแกนเหล็กเป็นแบบคอร์ (CORE) มีภาคตัดขวางเป็นสี่เหลี่ยมอัดในวงกลม
3 ชั้น ดังรูป 3.3

ใช้ค่าแฟคเตอร์ที่แกนเหล็กในวงกลม

$$K = 85 \%$$

ใช้ค่าแฟคเตอร์ที่เนื้อแผ่นเหล็กซิลิคอนที่ใช้

$$K_1 = 0.97$$

หาเส้นผ่าศูนย์กลางวงกลมรอบแกนเหล็กได้จาก

$$d = \sqrt{\frac{A * 4}{\pi * K * K_1}} \quad \text{เมตร}$$

$$d = \sqrt{\frac{0.0083 * 4}{\pi * 0.85 * 0.97}} \quad \text{เมตร}$$

$$d = 0.1138 \quad \text{เมตร}$$

ใช้ $d = 11$ เซนติเมตร

และจากการเลือกความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก $B = 1$ เวเบอร์/ตร.ม.

เส้นแรงแม่เหล็ก $0 = BA$

$$0 = 1 * 0.0083$$

$$0 = 0.0083 \text{ เวเบอร์}$$

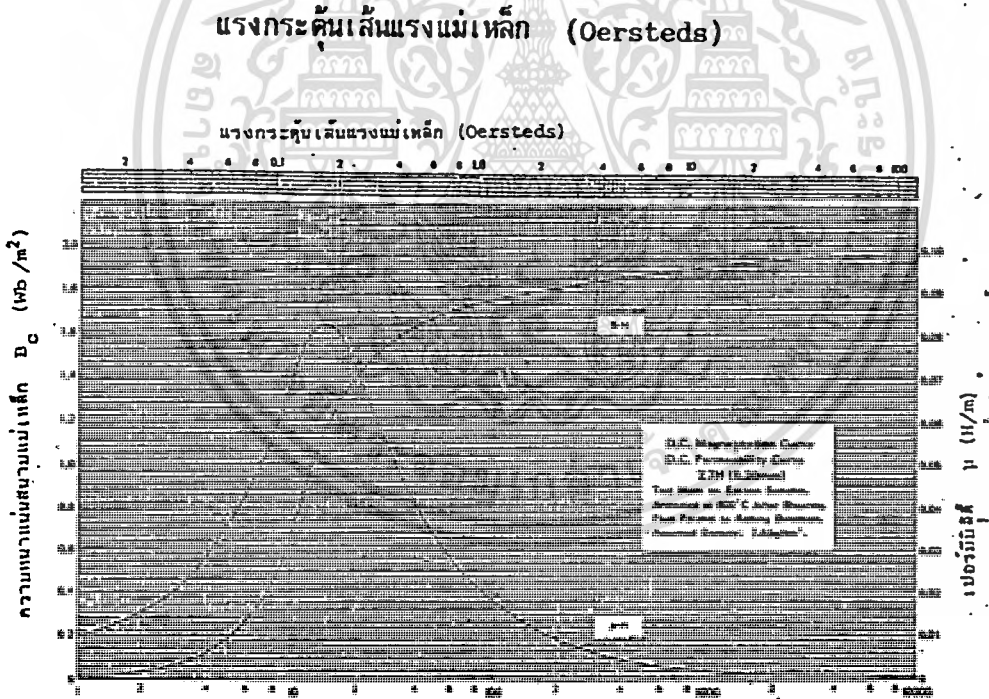
$$0 = 0.0083 \text{ เวเบอร์}$$

คำนวณหาการสูญเสียในแกนเหล็ก

จากกราฟรูป 3.1.1 การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในแกนเหล็กชนิด Z7H (ซึ่งแต่ละแผ่นมีความหนา 0.3 \pm -0.03 มม.) จะได้อัตราการสูญเสียกำลังไฟฟ้าต่อกิโลกรัมที่ $B =$ เวเบอร์/ตร.ม.

$$P_c = 0.66 \text{ วัตต์/กิโลกรัม}$$

เมื่อประกอบหม้อแปลงเสร็จเรียบร้อยแล้ว ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียนี้จะเกิดขึ้นเพิ่มอีกประมาณ 12 % เนื่องจากการบิด การค้ำ การเรียง การเคลมพ์ แกนเหล็กซิลิคอน และการฉนวนที่ไม่สมบูรณ์ระหว่างแผ่นซิลิคอน เป็นต้น



แรงแม่เหล็ก H (A/m)

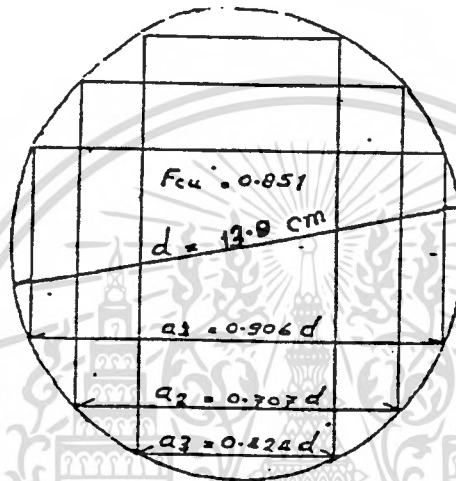
รูปที่ 3.2 กราฟแสดงค่าแรงแม่เหล็กค้ำ และ เฟอร์มิลิตีซีของเหล็กซิลิคอนชนิด Z 7H

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กต่อกิโลกรัมโดยประมาณ

$$P_e = 1.12 * 0.66$$

$$P_e = 0.739 \quad \text{วัตต์/กิโลกรัม}$$

เมื่อเรารู้เส้นผ่าศูนย์กลางรอบแกนเหล็ก d แล้วเราจึงหาขนาดคัตขวาง $a_1, a_2,$ และ a_3 ดังรูป 3.3



$$a_1 = 0.906 \quad d$$

$$a_2 = 0.707 \quad d$$

$$a_3 = 0.424 \quad d$$

$$a_1 = 9.966 \quad \text{ซม.}$$

$$a_2 = 7.77 \quad \text{ซม.}$$

$$a_3 = 4.66 \quad \text{ซม.}$$

รูปที่ 3.3 รูปร่างและขนาดภาคตัดขวางแกนเหล็ก

การคำนวณด้านแต่ละด้านของรูปเหลี่ยมชนิดในวงกลม เมื่อทราบเส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลมที่ต้องการแล้ว สามารถคำนวณได้ดังนี้

A คือ พื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเนื้อเหล็กซึ่งได้จากค่ากำหนดของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

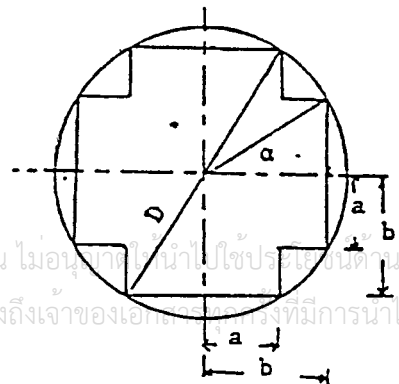
K คือ ค่าแฟคเตอร์เนื้อเหล็กแผ่น

d คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลม

จากรูปจะได้

$$\frac{A}{K} = 2a_2b + (2b-2a) 2a = 4(2ab-a^2)$$

$$a = \frac{D}{2} \sin \alpha, \quad b = \frac{D}{2} \cos \alpha$$



$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad \frac{A}{K} &= 4\left(\frac{2D}{2} \sin \alpha \frac{D}{2} \cos \alpha - \frac{D^2}{4} \sin^2 \alpha\right) \\ &= D(2 \sin \alpha \cos \alpha - \sin^2 \alpha) \end{aligned}$$

ค่าของมุม α ที่ทำให้พื้นที่ภาคตัดขวางมีค่ามากที่สุดสามารถหาได้โดยการดิฟเฟอเรนเชียล สมการข้างบนเทียบกับ α แล้วให้เท่ากับศูนย์

$$\frac{dA}{d\alpha} = D(2 \cos 2\alpha - 2 \sin \alpha \cos \alpha) = 0$$

$$\tan 2\alpha = 1, \quad \alpha = 31.75^\circ$$

$$a = 0.263D, \quad b = 0.425D$$

$$= 2a^2b + (2b-2a)^2a = 0.618D^2$$

ในทางปฏิบัติเหล็กแผ่นซิลิคอนที่มีจำหน่ายในเชิงการค้าจะมีขนาดต่าง ๆ ของความกว้างที่จำกัดแน่นอนคือ 60, 70, 90, 100, 110, 125, 150 มม. ฉะนั้นเพื่อเป็นการประหยัดและรักษาคุณภาพของแกนเหล็กที่จะนำมาประกอบเป็นแกนเหล็กจึงจำเป็นต้องเลือกขนาดความกว้างของแผ่นเหล็กที่หาได้โดยให้ได้พื้นที่ภาคตัดขวางใกล้เคียงที่ความต้องการมากที่สุด ขนาดต่าง ๆ ที่เลือกมีดังนี้

$$a_1 = 50 \text{ มม. หรือ } 5 \text{ ซม.}$$

$$a_2 = 80 \text{ มม. หรือ } 8 \text{ ซม. } a - a = 30 \text{ มม. หรือ } 3 \text{ ซม.}$$

$$a_3 = 100 \text{ มม. หรือ } 10 \text{ ซม. } a - a = 20 \text{ มม. หรือ } 2 \text{ ซม.}$$

(ค่าแฟคเตอร์ของเนื้อแผ่นเหล็ก $k = 0.97$)

พื้นที่ภาคตัดขวางของเหล็กใหม่จะได้

$$A = \{(10 \times 5) + (8 \times 3) + (5 \times 2)\} \times 0.97 = 81.48 = \text{ซม.}^2$$

$$A = 81.48 \times 10^{-4} \text{ ตารางเมตร}$$

$$\sigma = B A$$

$$\sigma = 1 \times 8.148 \times 10^{-3} = 8.148 \times 10^{-3} \text{ เวเบอร์}$$

จำนวนรอบของขดลวดแรงต่ำ

$$N_1 = \frac{U}{4.44 f \phi}$$

$$= \frac{220}{4.44 \times 50 \times 8.148 \times 10^{-3}}$$

$$N_1 = 121.62 \quad \text{รอบ}$$

ใช้ $N_1 = 122 \quad \text{รอบ}$

จำนวนรอบขดลวดแรงดันสูง

$$N_2 = \frac{U_2}{4.44 f \phi}$$

$$= \frac{50 \times 10^3}{4.44 \times 50 \times 8.148 \times 10^{-3}}$$

$$N_2 = 27641.78 \quad \text{รอบ}$$

$$N_2 = 27642 \quad \text{รอบ}$$

คำนวณหากำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดง

ใช้ความหนาแน่นกระแสในขดลวดแรงต่ำ J และแรงสูง J

ให้ $J_1 = 200 \text{ A/cm}^2$

$$J_2 = 100 \text{ A/cm}^2$$

กระแสทางขดลวดแรงต่ำ = KVA

U_1 :

$$I_1 = \frac{5 \times 10^3}{220} = 22.7 \text{ แอมป์}$$

$$\text{กระแสทางขดลวดแรงสูง} = \frac{KVA}{U_2}$$

$$I_2 = \frac{5 \times 10^3}{50,000}$$

$$I_2 = 0.1 \text{ แอมป์}$$

พื้นที่ภาคตัดขวางของขดลวดแรงต่ำ

$$A_1 = \frac{I_1}{J_1}$$

$$= \frac{22.72}{200}$$

$$A = 0.1136 \text{ ตร. ซม.}$$

$$A = 11.36 \text{ ตร. มม.}$$

พื้นที่ภาคตัดขวางของขดลวดแรงสูง

$$A = \frac{I}{J}$$

$$A = \frac{0.1}{100} = 1 \times 10^{-3} \text{ ตร. ซม.}$$

$$A = 0.1 \text{ ตร. มม.}$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดหาได้จากสูตร

$$P = 2.37 J^2 K \times 10^{-4}$$

$$P = \text{กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวด}$$

$$J = \text{ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า}$$

$$K = \text{ค่าแฟคเตอร์สำหรับเพิ่มการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในขดลวด}$$

เนื่องจากการสูญเสียสเตรย์ในแคลล์มพ์เหล็กและในขดลวดเอง

ซึ่ง K มีค่า = 1.1

การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในขดลวดแรงต่ำต่อกิโลกรัม

$$P_1 = 2.37 * 200^2 * 1.1 * 10^{-4}$$

$$= 10.428 \text{ วัตต์/กิโลกรัม}$$

การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในขดลวดแรงสูงต่อกิโลกรัม

$$P_2 = 2.37 * 100^2 * 1.1 * 10^{-4}$$

$$= 2.607 \text{ วัตต์/กิโลกรัม}$$

3.2 รายละเอียดการออกแบบขดลวดและแกนเหล็ก

3.2.1 ขดลวดแรงต่ำ

ขดลวดแรงต่ำจะใช้ลวดแบบขดแกนเหนียว (PEW) ซึ่งมีขนาดดังต่อไปนี้

ลวดเปลือย	2*6 มม. ²
ลวดแกนเหนียว	2.5*6.5 มม. ²
พื้นที่ภาคตัดขวางลวด	16.25 มม. ²

พื้นที่ภาคตัดขวางลวดหาจากพื้นที่ภาคตัดขวางจริงของสี่เหลี่ยม ซึ่งมีขอบเมเจอร์รอบของขดลวดแรงต่ำแต่ละขด

$$\text{จาก } N_1 = 122 \text{ รอบ}$$

ขดลวดพันแบบขดลวดชั้นทรงกระบอก 4 ชั้น ๆ ละ 30 รอบ สำหรับขดลวดแบบชั้นจะต้องเพื่อไว้ 1 รอบ สำหรับการเริ่มดำเนินการพันถึงความกว้างของลวดแรงต่ำแต่ละขด

$$(30+1)*0.65 = 20.15 \text{ ซม.}$$

ขดลวดทั้งสองห่างกัน 1 ซม. โดยใช้เมล็เนกซ์กัน

$$\text{แรงดันค่อรอบ} = \frac{220}{122} = 1.8 \text{ โวลท์}$$

$$\text{แรงดันสูงสุดระหว่างชั้น} = 1.8*2*30 = 108 \text{ โวลท์}$$

ใช้เมลิเน็กซ์หนา 0.075 มม. 2 ชั้น เป็นฉนวนระหว่างชั้นของขดลวดแรงดันต่ำ ซึ่ง
ค่าแรงดันเบรคความของเมลิเน็กซ์หนา 0.075 มม. = 10 กิโลโวลต์

ความหนาของขดลวดแรงดันต่ำแต่ละชุด (ความหนาของ เส้นลวดซ้อนรวมกับความ
หนาของฉนวน)

$$\begin{aligned} t_1 &= (4 \times 2.5) + (2 \times 0.075) \times 4 \\ &= 10.6 \text{ มม.} \\ &= 1.06 \text{ ซม.} \end{aligned}$$

เลือกใช้ $t_1 = 1.2$ ซม.

เพื่อให้สำหรับในการมีต้นขดลวดและฉนวนไม่แน่น

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } J_1 &= \frac{I_1}{A} = \frac{22.72}{0.1136} \\ &= 200 \end{aligned}$$

ซึ่งค่า J_1 มีค่าใกล้เคียงกับที่คำนวณไว้แล้ว คือ 200
ความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวดแรงต่ำ

$$\begin{aligned} l_1 &= 2 \pi R \\ &= 2 \pi \frac{D}{2} = 2 \pi (13 + 2.4) \\ &= 48.38 \text{ ซม.} \quad 2 \end{aligned}$$

$$l_1 = 48.38 \text{ ซม.}$$

น้ำหนักทองแดงของขดลวดแรงต่ำ

$$\begin{aligned} W_1 &= N_1 \cdot A_1 \cdot l_1 \cdot 8.87 \cdot 10^{-3} \\ &= 122 \cdot (2 \times 0.1625) \cdot 48.38 \cdot 8.87 \cdot 10^{-3} \\ W_1 &= 17.01 \text{ กิโลกรัม} \end{aligned}$$

การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในขดลวดแรงต่ำ

$$\begin{aligned}
 P_1 &= 2.37 J_1^2 \mu^4 \cdot 1.1 \cdot 10^{-4} \\
 &= 2.37 \cdot 200 \cdot 17 \cdot 1.1 \cdot 10^{-4} \\
 P_1 &= 177.43 \text{ วัตต์}
 \end{aligned}$$

ความต้านทานของขดลวดแรงต่ำที่ 75 °C

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \frac{P_1}{I_1^2} \\
 &= \frac{177.43}{22.72^2} \\
 R_1 &= 0.343 \text{ โอห์ม}
 \end{aligned}$$

3.2.2 ขดลวดแรงสูง

ขดลวดแรงสูงจะใช้ลวดกลมอาบยา (PEW) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและพื้นที่หน้าตัด ดังต่อไปนี้

เส้นผ่าศูนย์กลางลวดเปลือย	0.80	มม.
เส้นผ่าศูนย์กลางลวดอาบยา	0.842	มม.
พื้นที่ภาคตัดขวางลวดเปลือย	0.5027	มม. ²
จำนวนรอบทั้งหมดของขดลวดแรงสูง N_2	27,642	รอบ

ขดลวดพันแบบชั้นทรงกระบอก โดยจะแบ่งเป็น 3 ชั้น เพื่อเพิ่มการฉนวนเมื่อจำนวนรอบหรือแรงดัน

สูงขึ้น

ชั้นที่ 1	มี 30 ชั้น ๆ ละ 500 รอบ	15,000	รอบ
ชั้นที่ 2	มี 20 ชั้น ๆ ละ 400 รอบ	8,000	รอบ
ชั้นที่ 3	มี 13 ชั้น ๆ ละ 357 รอบ	4,642	รอบ
	รวม $N_2 =$	27,642	รอบ

$$\text{แรงดันต่อรอบ} = 50,000 = 1.8 \text{ โวลต์}$$

$$\text{แรงดันสูงสุดระหว่างชั้น} = 1.8 \cdot 2 \cdot 500 = 1,800 \text{ โวลต์}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้เมล็เนกซ์หนา 0.075 มม. 4 ชั้น หนาขอบ 0.3 มม.
ใช้ฉนวนระหว่างชั้นของขอลวดแรงสูง
ชั้นที่ 1

$$\text{ความกว้างของขดลวด } b_{21} = (500+1) \cdot 0.842 = 421.84 \text{ มม.}$$

$$\text{ใช้ } b_{21} = 42.18 \text{ ซม.}$$

$$\begin{aligned} \text{ความหนาของขดลวด } t_{21} &= (30 \cdot 0.842) + (30 \cdot 0.3) \\ &= 34.26 \text{ มม.} \end{aligned}$$

$$\text{ใช้ } t_{21} = 3.42 \text{ มม.}$$

ชั้นที่ 2

$$\text{ความกว้างของขดลวด } b_{22} = (400+1) \cdot 0.842 = 337.64 \text{ มม.}$$

$$\text{ใช้ } b_{22} = 33.76 \text{ ซม.}$$

$$\begin{aligned} \text{ความหนาของขดลวด} &= (20 \cdot 0.842) + (20 \cdot 0.3) \\ &= 22.84 \text{ มม.} \end{aligned}$$

$$\text{ใช้ } t_{22} = 2.28 \text{ ซม.}$$

ชั้นที่ 3

$$\begin{aligned} \text{ความกว้างของขดลวด } b_{23} &= (357+1) \cdot 0.842 \\ &= 301.43 \text{ มม.} \end{aligned}$$

$$\text{ใช้ } b_{23} = 301.43 \text{ ซม.}$$

$$\begin{aligned} \text{ความหนาของขดลวด } t_{23} &= (13 \cdot 0.842) + (13 \cdot 0.3) \\ &= 14.84 \text{ มม.} \end{aligned}$$

$$\text{ใช้ } t_{23} = 1.48 \text{ ซม.}$$

$$\text{ดังนั้น } J_2 = \frac{I_2}{A_2} = \frac{0.1}{0.1} = 1 \text{ แอมป์/มม.}$$

$$\text{ตรงกับที่กำหนด } J_2 = 100 \text{ แอมป์/ซม.}$$

ความยาวเฉลี่ยของขดลวดแรงดันสูง

ชั้นที่ 1

$$\begin{aligned}
 l_{21} &= 2\pi \frac{D}{2} \\
 &= 2\pi(6.84+15.4) \\
 l_{21} &= 69.86 \text{ ซม.} \\
 &= 70 \text{ ซม.}
 \end{aligned}$$

ชั้นที่ 2

$$\begin{aligned}
 l_{22} &= 2\pi \frac{D}{2} \\
 &= 2\pi \frac{26.8}{2} \\
 l_{22} &= 84.19 \text{ ซม.}
 \end{aligned}$$

ชั้นที่ 3

$$\begin{aligned}
 l_{23} &= 2\pi \frac{D}{2} \\
 &= 2\pi \frac{29.76}{2} \\
 l_{23} &= 93.49 \text{ ซม.}
 \end{aligned}$$

น้ำหนักทองแดงของขดลวดแรงสูง

ชั้นที่ 1

$$\begin{aligned}
 W_{21} &= N_{21} * A_{21} * L_{21} * 8.87 * 10^{-3} \\
 &= 15000 * 0.00113 * 70 * 8.87 * 10^{-3} \\
 W_{21} &= 10.5 \text{ กิโลกรัม}
 \end{aligned}$$

ชั้นที่ 2

$$\begin{aligned}
 W_{22} &= N_{22} * A_{22} * L_{22} * 8.87 * 10^{-3} \\
 &= 8000 * 0.00113 * 84.19 * 8.87 * 10^{-3} \\
 W_{22} &= 6.78 \text{ กิโลกรัม}
 \end{aligned}$$

ชั้นที่ 3

$$\begin{aligned}
 W_{23} &= N_{23} * A_{23} * L_{23} * 8.87 * 10^{-3} \\
 &= 4642 * 0.001136 * 93.49 * 8.87 * 10^{-3} \\
 W_{23} &= 4.37 \text{ กิโลกรัม}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักรวม } W_2 &= W_{21} + W_{22} + W_{23} \\ &= 10.5 + 6.78 + 4.37 \\ &= 21.65 \text{ กิโลกรัม} \end{aligned}$$

การสูญเสียในขดลวดทองแดงแรงสูงต่อกิโลกรัม

$$\text{จาก } P_2 = 2.607 \text{ วัตต์/กิโลกรัม}$$

ขดลวดแรงสูงมีน้ำหนักทั้งหมด = 20.63 กิโลกรัม

$$P_2 = 21.65 * 2.607$$

$$P_2 = 56.44 \text{ วัตต์}$$

ความต้านทานของขดลวดแรงสูง ที่ 75 °C

$$R_2 = \frac{P_2}{I_2^2} = \frac{56.44}{0.1^2}$$

$$= 5644 \text{ โอห์ม}$$

$$R_t = \frac{P_1 + P_2}{I_2^2} = \frac{177.43 + 56.44}{0.1^2}$$

$$= 23387 \text{ โอห์ม}$$

ความต้านทานรวมในเทอมของค่าแรงสูง

$$R_t = \frac{P_1 + P_2}{I_2^2} = \frac{177.43 + 56.44}{0.1^2}$$

$$= 23387 \text{ โอห์ม}$$

การสูญเสียกำลัง ไฟฟ้ารวมในขดลวดแรงต่ำและขดลวดแรงสูง

$$P_1 + P_2 = 177.43 + 56.44$$

$$= 233.87 \text{ วัตต์}$$

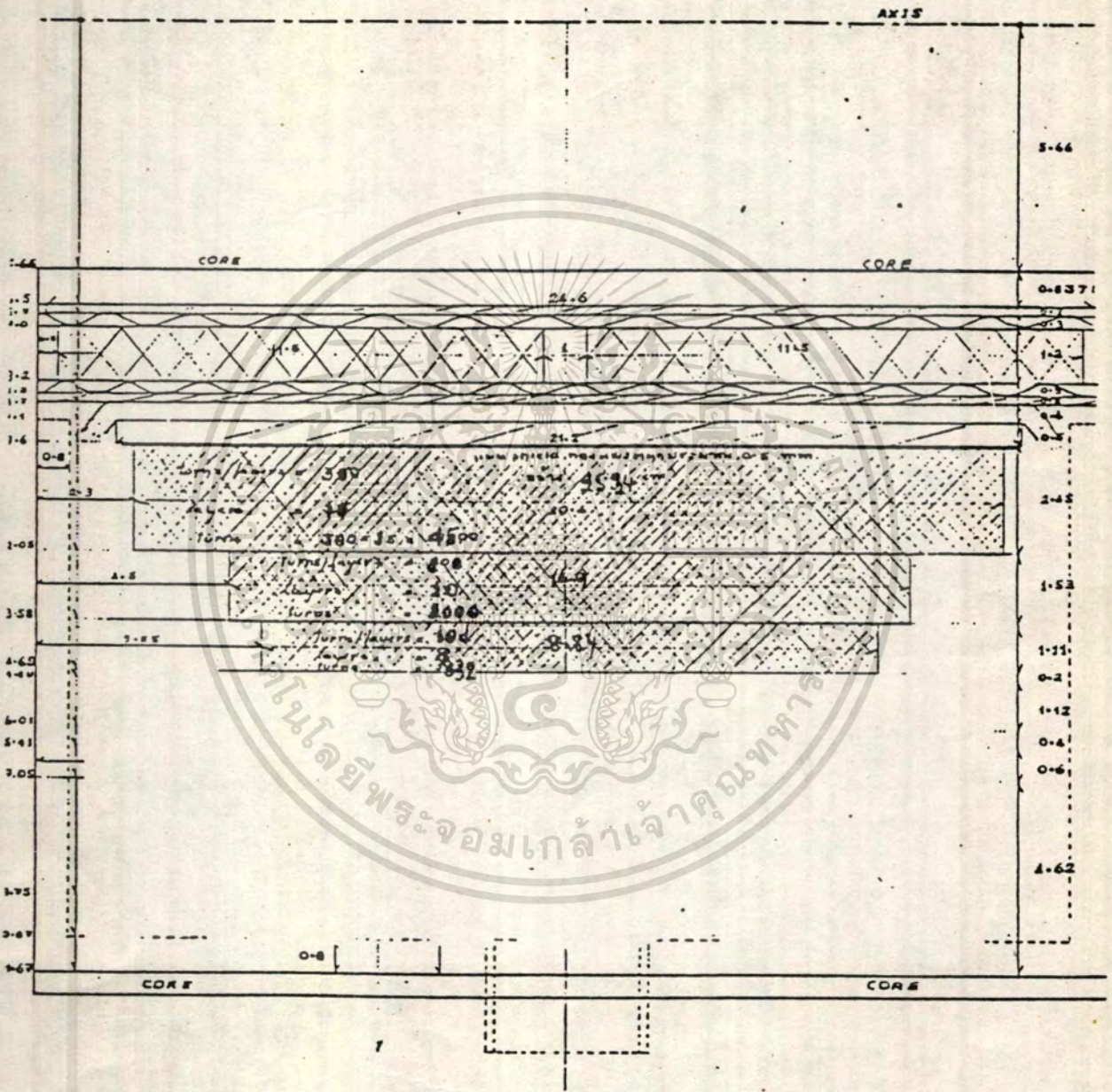
เปอร์เซ็นต์แรงดันตกคล่อมความต้านทาน

$$E_r = \frac{I_2 R_t}{U_2} * 100$$

$$U_2$$

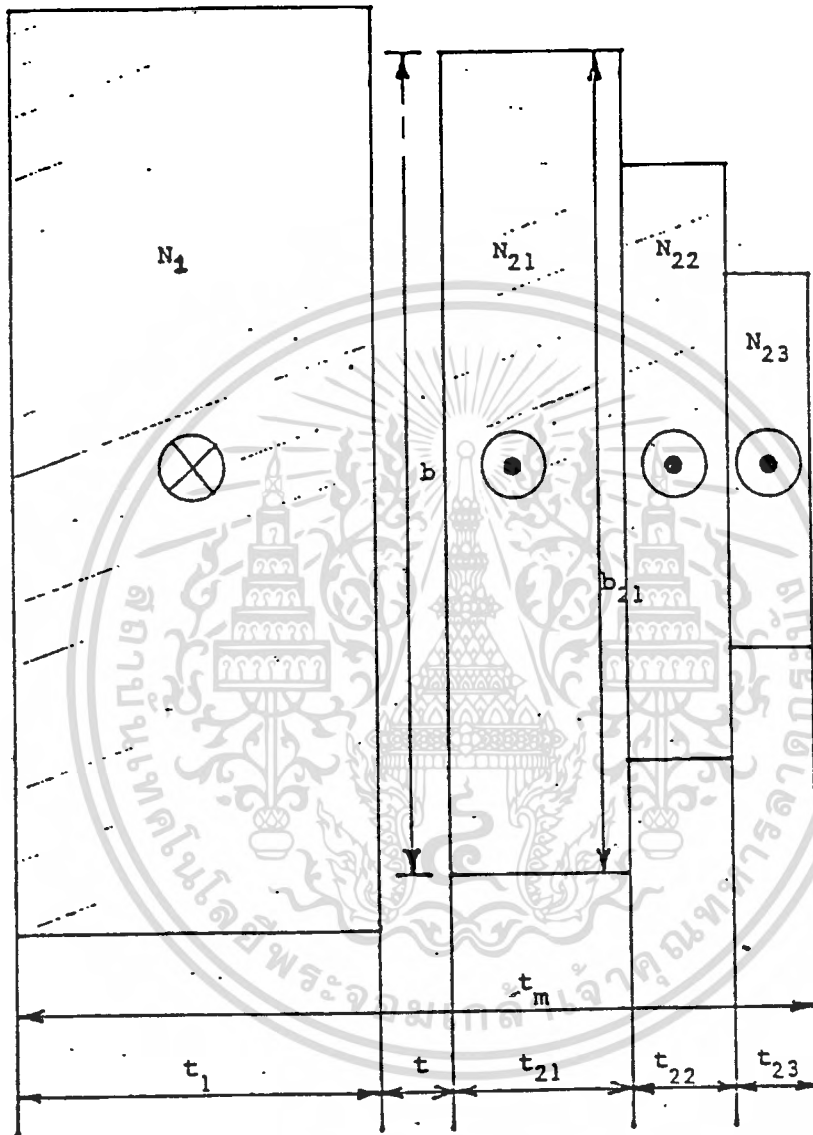
$$E_r = \frac{0.1 * 23387 * 100}{50000} = 4.67 \%$$

$$50000$$



รูปที่ 3.4 ภาพตัดขวางของซลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



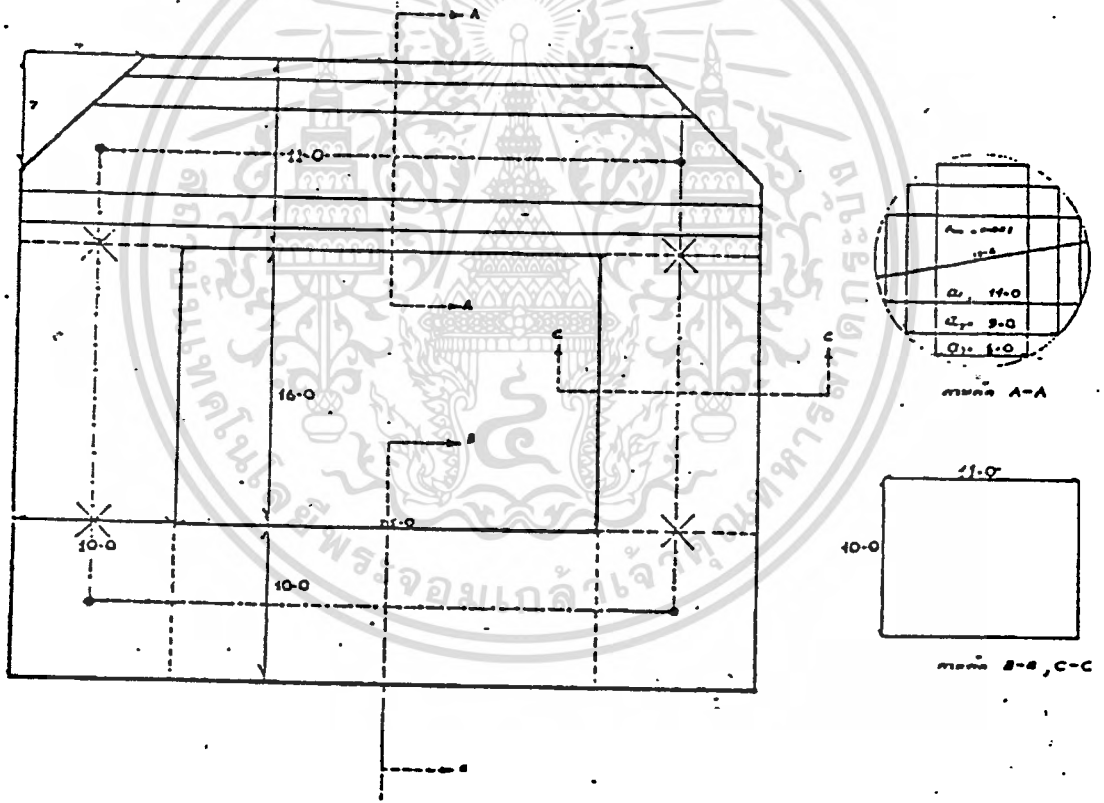
รูปที่ 3.5 การจัดวางขดลวดในเทอมแรงดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 แกนแม่เหล็ก

ในการออกแบบต้องคำนึงถึงขนาดความกว้างของแผ่นเหล็กชิลิคอนที่มีขายในเชิงการค้า ซึ่งปกติแล้วแต่ละแผ่นจะมีความหนา 0.3 มม. แล้วนำมาวางซ้อนเรียงกันจนได้รูปร่างและขนาดตามที่ต้องการ

เมื่อออกแบบชดลวดเรียบร้อยแล้วจึงภาคตัดขวางของชดลวดในรูป 3.4 และรูปร่างแกนเหล็กจะเป็นดังรูป 3.6 โดยพื้นที่ภาคตัดขวางบริเวณโยกบนที่ใส่ชดลวดจะเป็นสี่เหลี่ยมอัดในวงกลม 3 ชั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างของเหล็กชิลิคอน a_1, a_2, a_3 จากการค้าในรูป 3.1 บ้าง แต่จะรักษานาขนาดพื้นที่ภาคตัดขวางของแกนแม่เหล็กบริเวณอื่นจะเป็นแบบสี่เหลี่ยม โดยมีขนาดพื้นที่ภาคตัดขวางเท่ากับพื้นที่ภาคตัดขวางของแกนแม่เหล็กบริเวณโยกบน



หน่วยเป็นเซนติเมตร

รูปที่ 3.6 รูปร่างและขนาดของแกนแม่เหล็ก

ความยาวเฉลี่ยของแกนแม่เหล็ก (ตามเส้นประในรูปที่ 3.6)

$$\begin{aligned} L \text{ เหล็ก} &= 2*(25+10)+2*(16+5.5)+5 \\ &= 123 \text{ ซม.} \\ L &= 1.23 \text{ ม.} \end{aligned}$$

จากกราฟแรงกระตุ้นเส้นแรงแม่เหล็กคี่ของเหล็กซิลิคอน ในรูป 3.2

เนื่องจากพื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็กตลอดวงจรใกล้เคียงกัน

ฉะนั้นจะใช้ $B = 1$ เวเบอร์/ตร.ม. โดยตลอดความยาวของวงจรแม่เหล็กจะได้
แอมแปร์ = เทิร์นต่อเมตร ที่ $B = 1$ เวเบอร์/ตร.ม.

$$\frac{NI}{L} = 14 \text{ แอมแปร์ - เทิร์น/เมตร}$$

L

ดังนั้นแอมแปร์ - เทิร์น สำหรับครบรอบวงจรแกนแม่เหล็ก

$$\begin{aligned} NI &= (NI)*1 \text{ เหล็ก} \\ &= 14*1.23 = 17.22 \text{ แอมแปร์-เทิร์น} \end{aligned}$$

แอมแปร์-เทิร์น ตกคร่อม 4 รอบต่อตรงมูรอยต่อทั้ง 4 ของแกนเหล็กที่

$B = 1$ เวเบอร์/ตร.ม. มีค่าประมาณ 11.5 เท่าของแอมแปร์-เทิร์น/ซม.

ในแกนเหล็ก ดังนั้น แอมแปร์-เทิร์น สำหรับ 4 รอยต่อ = $0.14*11.5$

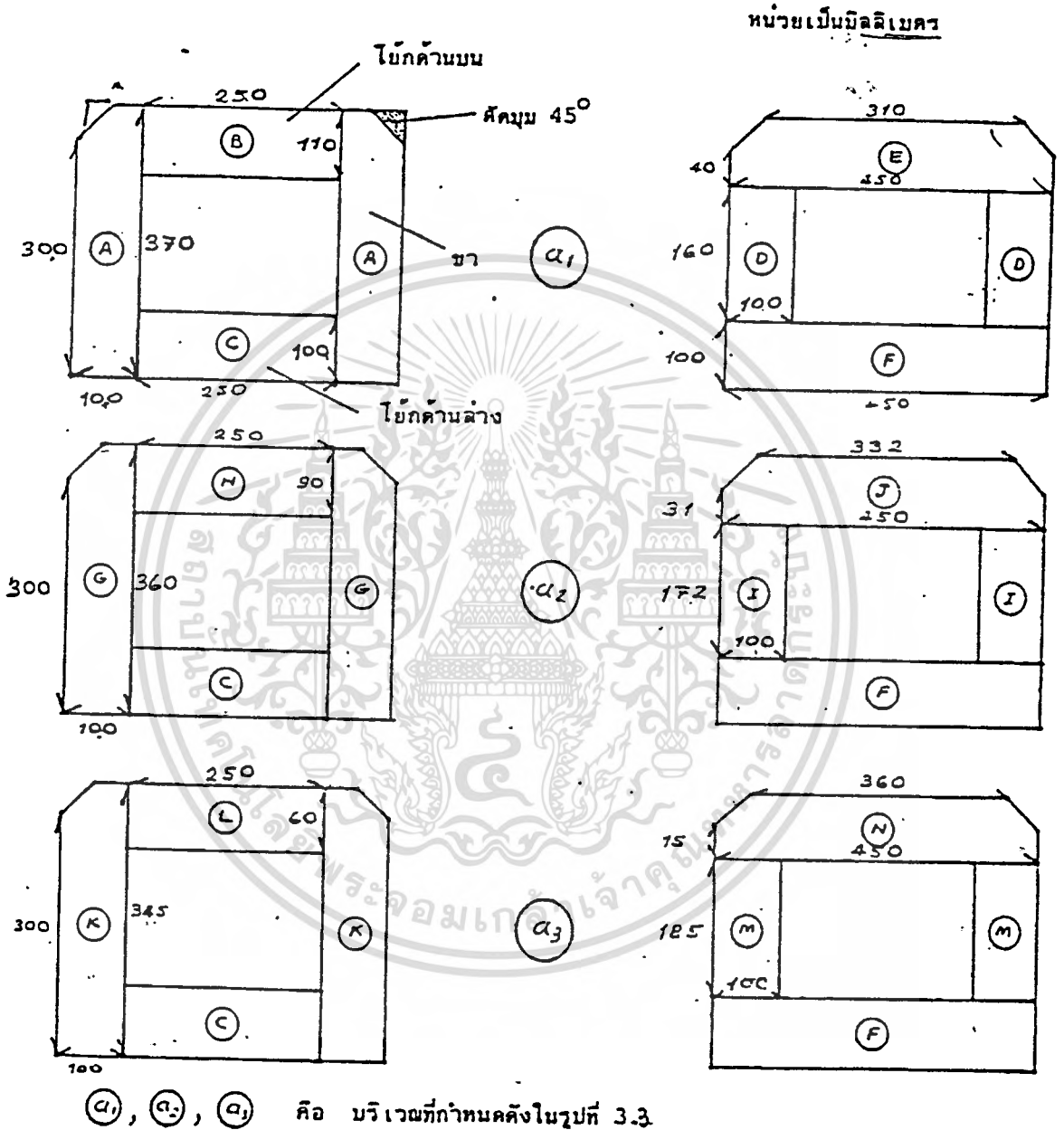
$$= 16.1 \text{ แอมแปร์ - เทิร์น}$$

แอมแปร์-เทิร์น ทั้งหมด $NI = 17.22*16.1$

$$= 33.32 \text{ แอมแปร์-เทิร์น}$$

จากรูปร่างและขนาดของแกนแม่เหล็กในรูป 3.6 ซึ่งประกอบสร้างจากแผ่นเหล็ก
ซิลิคอนชนิด มาเรียงซ้อนกันโดยแต่ละแผ่นจะวางต่อกันแบบค้ำฉากและแต่ละชั้นจะวางสลับ
กันดังรูป 3.7 เพื่อความแข็งแรงและลดรีลักแตนซ์ของช่องอากาศบริเวณรอยต่อ วิธีหาขนาดและ
รูปร่างของแผ่นเหล็กซิลิคอนแต่ละแผ่นใช้วิธีวัดจากภาพเขียนของแกนแม่เหล็กในรูป 3.6 โดยตรง

แล้วคำนวณหาจำนวนแผ่นของแต่ละขนาดจากขนาดแกนแม่เหล็กและความหนาของแผ่นเหล็กซิลิคอน



รูปร่าง 3.7 รูปร่างและขนาดของแผ่นเหล็กซิลิคอนที่ใช้ประกอบสร้างเป็นแกนแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

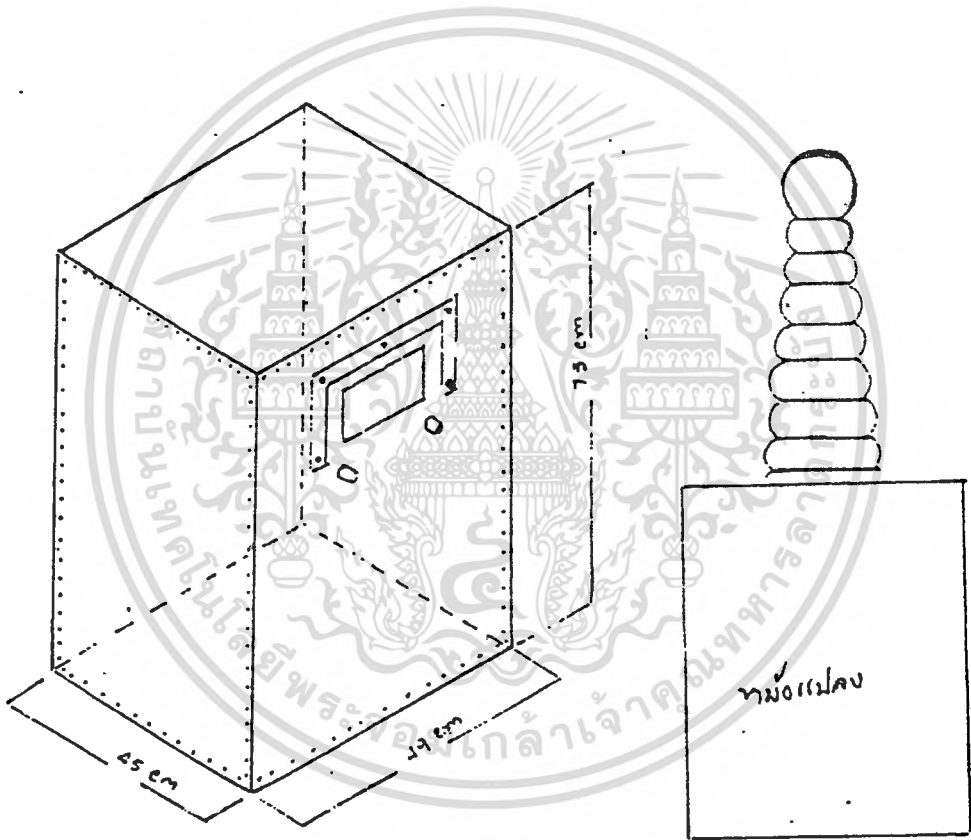
จำนวนของแผ่นเหล็กซิลิโคนขนาดและรูปร่างต่าง ๆ ตามรูป 3.7 แสดงไว้ในตารางต่อไปนี้

แบบ	จำนวนแผ่นเหล็กแต่ละข้าง	รวมแผ่นเหล็ก	หมายเหตุ
A	100	200	ซาแกนแม่เหล็ก
D	100	200	ซาแกนแม่เหล็ก
G	46	92	ซาแกนแม่เหล็ก
I	46	92	ซาแกนแม่เหล็ก
K	36	72	ซาแกนแม่เหล็ก
M	36	72	ซาแกนแม่เหล็ก
B	50	100	โย๊กแกนแม่เหล็ก
E	50	100	โย๊กแกนแม่เหล็ก
H	23	46	โย๊กแกนแม่เหล็ก
J	23	46	โย๊กแกนแม่เหล็ก
L	18	36	โย๊กแกนแม่เหล็ก
N	18	36	โย๊กแกนแม่เหล็ก
C	-	182	โย๊กแกนแม่เหล็ก
F	-	182	โย๊กแกนแม่เหล็ก

แกนแม่เหล็กเมื่อประกอบเสร็จแล้วจะยึดแน่นด้วยแคลมป์ ที่ฐานแคลมป์มีที่ยึดเข้ากับฐานตัวถังหม้อแปลง อุปกรณ์แคลมป์จะต้องลบขอบมุมแหลมต่าง ๆ ให้นมนเพื่อป้องกันการเกิดโคโรน่า และจะเคลือบผิวเหล็กแคลมป์ด้วยวานิช เพื่อเป็นฉนวนและกันสนิมก่อนที่จะประกอบหม้อแปลงและก่อนจะทำการแคลมป์รัดแกนแม่เหล็ก จะมีแผ่นเบกกาไลท์หนา 3 มม. เป็นฉนวนกันระหว่างแกนแม่เหล็กกับเหล็กแคลมป์

3.4 การออกแบบตัวถัง

ขนาดตัวถังกำหนดด้วยขนาดของโครงสร้างภายในหม้อแปลง คือ ขดลวดและแกนแม่เหล็ก รวมทั้งพื้นที่ที่ระบายความร้อนของตัวถังต้องเพียงพอ ในการออกแบบครั้งนี้ได้ออกแบบตัวถังแบบสี่เหลี่ยมเนื่องจากทำได้ง่ายกว่าถังกลมทรงกระบอก โดยใช้เหล็กหนา 4.5 มม. ทำตัวถังด้านข้างและด้านล่างเสริมความแข็งแรง ด้านข้างโดยการตามเหล็กโดยรอบ ฝาปิด ด้านบนใช้แผ่นเหล็กหนา 6 มม.



บทที่ 4

การทดสอบและผลการทดลอง

หม้อแปลงทดสอบที่ประกอบสร้างขึ้นนี้จะ ต้องมีการทดสอบ เพื่อตรวจลักษณะสมบัติของหม้อแปลงก่อนว่าเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้หรือไม่ การทดสอบจะทดสอบตามมาตรฐานกำหนด เนื่องจากหม้อแปลงทดสอบเป็นหม้อแปลงที่ใช้งานแตกต่างไปจากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง รายการทดสอบหม้อแปลงทดสอบที่ประกอบสร้างขึ้น มีดังต่อไปนี้

- การวัดค่าความต้านทานของขดลวด
- การวัดอัตราส่วนแรงดัน
- การวัดค่าความสูญเสียกำลัง ไฟฟ้ามีโหลดและ แรงดันอิมพีแดนซ์
- การวัดค่าความสูญเสียกำลัง ไฟฟ้าและกระแส เมื่อ ไม่มีโหลด
- การใช้งาน
 - ใช้ทดสอบน้ำมันหม้อแปลง
 - ใช้ทดสอบการเบรคความของอากาศ

4.1 การวัดค่าความต้านทานของขดลวด

วัดโดยใช้คิจิตอล มิลลิเมตร และวิธี D.C Volt-Amp Methode ได้ค่าดังนี้

ตาราง 4.1

	คิจิตอลมิลลิเมตร	D.C V.A Methode
ขดลวดแรงต่ำ	0.28 Ω	0.3 Ω
ขดลวดแรงสูง	5.4 k Ω	5.2 k Ω

4.2 การวัดอัตราส่วนแรงดัน

การวัดอัตราส่วนแรงดัน เพื่อหา Transformation Ratio ค่าอัตราส่วนแรงดันที่วัดได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าอัตราส่วนแรงดันของชดลวด

อัตราส่วนแรงดัน	อัตราส่วนแรงดัน		ความคลาดเคลื่อน (%)
ของชดลวด	การวัด	การคำนวณ	
แรงสูง : แรงต่ำ	231.3 : 1	227.27 : 1	1.77

ความคลาดเคลื่อนที่กำหนดในมาตรฐาน = +0.5 %

4.3 การวัดค่าการสูญเสียกำลัง ไฟฟ้ามีโหลดและแรงดันอิมพีแดนซ์

ตัวอย่างจากรูปที่ 4.1 ข. โดยค่อย ๆ เพิ่มแรงดัน U จนกระแส I มีค่าเท่ากับ 0.1 A ค่าความต้านทานและอิมพีแดนซ์สมมูลของชดลวดเมื่อคิดจากทางด้านแรงสูงสามารถหาค่าได้จากค่า W , U , I จากมิเตอร์ดังต่อไปนี้

$$Re_2 = \frac{W_2}{I_2^2}$$

โดย Re_2 จะ เป็นความต้านทานเนื่องจากความต้านทานกระแสตรงและความต้านทานเนื่องจากการสูญเสียกำลัง ไฟฟ้าสเตรย์ เมื่อมี โหลดของ ชดลวดทั้งสอง

อิมพีแดนซ์สมมูลเมื่อคิดทางด้านแรงสูง

$$Z'e_2 = \frac{U_2}{I_2}$$

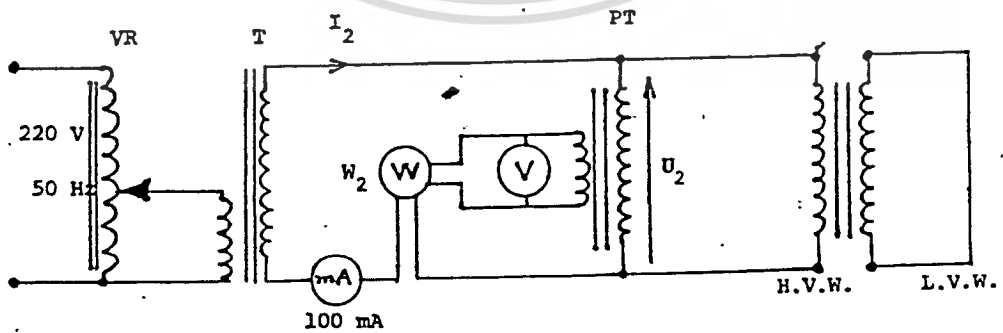
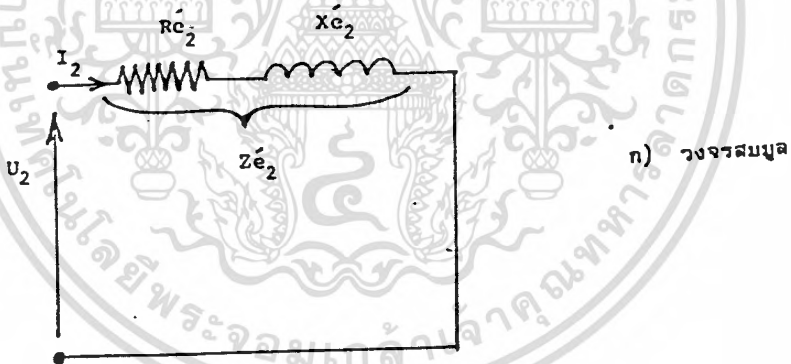
ดังนั้น รีแอกแตนซ์สมมูลเมื่อคิดทางด้านแรงสูง

$$X'e_2 = \sqrt{(Z'e_2)^2 - (R'e_2)^2}$$

หรือ

$$X'e_2 = \sqrt{\left(\frac{U_2}{I_2}\right)^2 - \left(\frac{W_2}{I_2^2}\right)^2}$$

สมการที่กล่าวมาข้างต้นนี้จะ ไม่คิดค่าการสูญเสียกำลัง ไฟฟ้าและกระแสกระตุ้นของแกนแม่เหล็ก คำนวณรวมของหม้อแปลง ในรูปที่ 4.1 ก.



ข) วงจรวัด

4.4 การวัดค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าและกระแสเมื่อไม่มีโหลด

เมื่อหม้อแปลงไม่ได้จ่ายโหลดที่แรงดันและความถี่ปกติ (เบิควงจรค่านโหลด) กำลังที่ป้อนเข้าจะเป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากฮีสเตอร์ซิสและกระแสไหลวนในแกนแม่เหล็กและในขดลวด แต่กระแสเมื่อไม่มีโหลดน้อยมาก ดังนั้น จึงคิดเสมือนว่าเป็นกำลังสูญเสียในแกนแม่เหล็กทั้งหมดได้เลย และกำลังไฟฟ้าสูญเสียนี้คงที่ทุกค่าของโวลตจวงจรทดสอบ

ตามรูปที่ 4.2

อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบเหมือนกับบททดสอบลัดวงจร เพราะป้อนกำลังเข้าทางด้านแรงค่าน ส่วนด้านแรงสูง เบิควงจรกำลังที่ป้อนให้กับหม้อแปลงทดสอบได้รับจากตัวปรับแรงดันโดยตรง ดังวงจรรูปที่ 4.2 เพิ่มแรงดัน U ที่ละชั้น ๆ ละ 20 โวลต์ จนถึง 220 โวลต์ แต่ละชั้น U อ่านค่า I_1 , P_1 จากแอมมิเตอร์และวัตต์มิเตอร์ ตามลำดับ

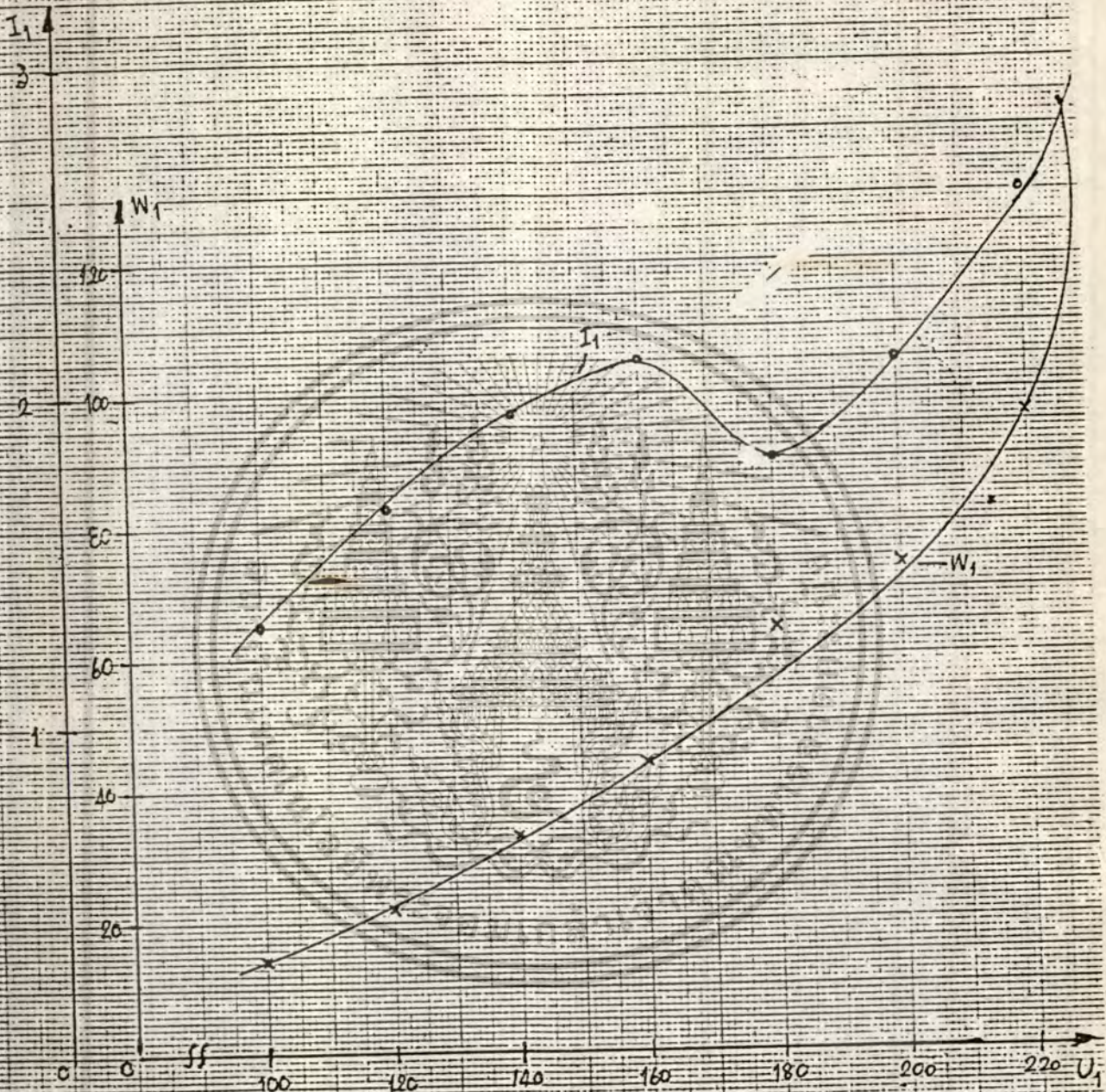
ผลการทดสอบ

ค่ากระแสเมื่อไม่มีโหลด I_0 และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าแสดงไว้ในตารางที่

4.3 ซ้างล่าง และรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 กระแสและกำลังไฟฟ้าอินพุตเมื่อไม่มีโหลดเมื่อเปลี่ยนแรงดันอินพุต

V_1 (V)	กระแสเมื่อไม่มีโหลด I_1 (A)	กำลังไฟฟ้าอินพุต P_1 (W)
20	0.21	0.73
40	0.44	2.5
60	0.65	5.5
80	0.92	9.6
100	1.31	14.3
120	1.63	21.2
140	1.92	32.3
160	2.1	43.5
180	1.8	63.4
200	2.1	73.9
220	2.6	96.7



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่ากระแสและกำลังไฟฟ้าสูญเสีย เมื่อไม่มีโหลดกับแรงดันป้อนเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การใช้งาน

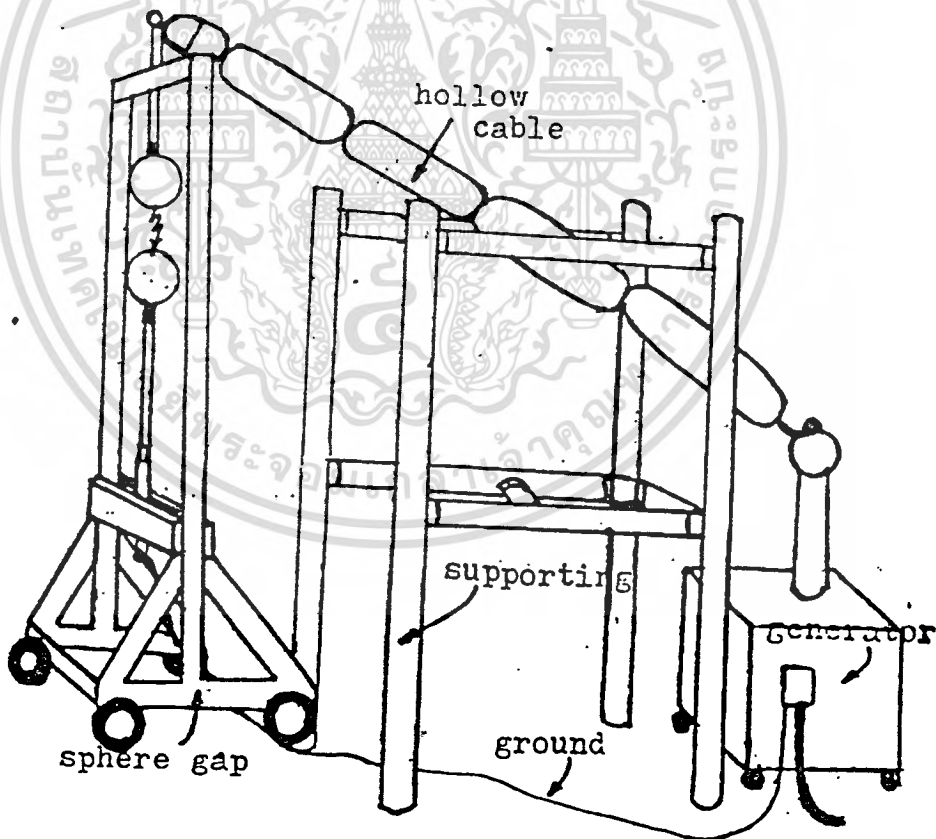
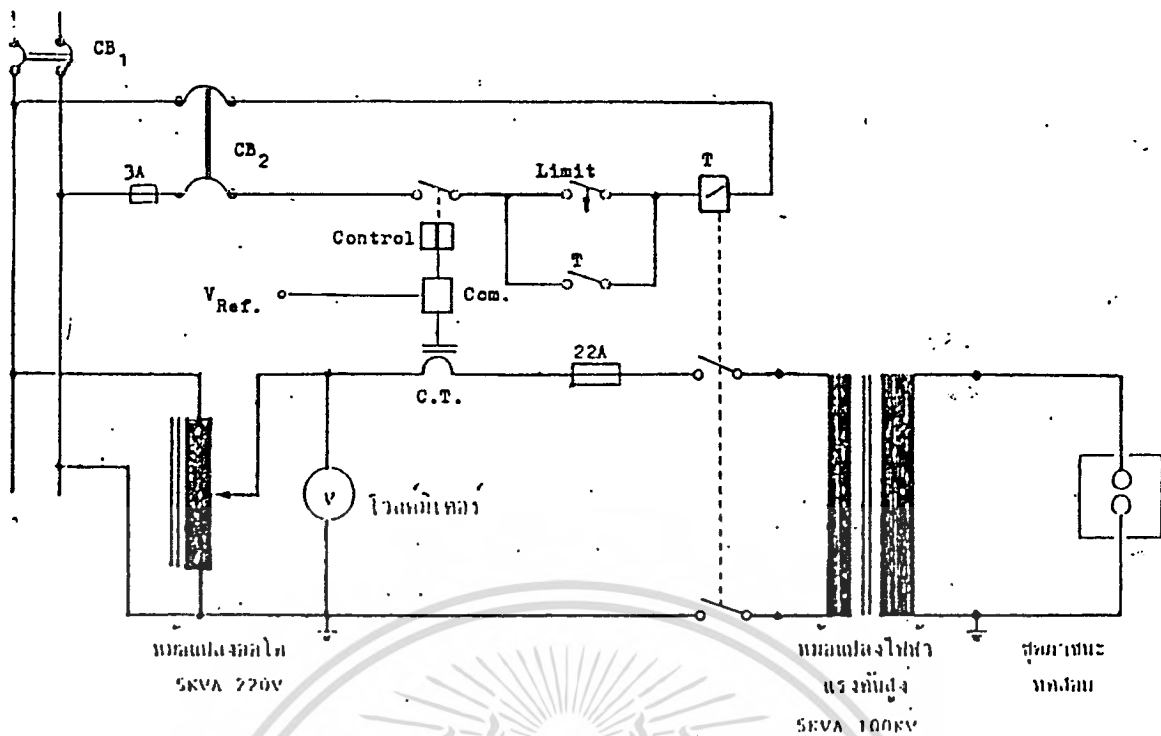
เนื่องจากรายการทดสอบที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นการทดสอบลักษณะสมบัติบางประการของหม้อแปลงทดสอบ ซึ่งยังขาดการทดลองการใช้งานจริงว่าเวลาใช้งานจริงหม้อแปลงทดสอบมีโอกาสที่จะได้รับแรงดันเบรคความถี่ที่มีอัตราการขยับตัวสูง อันเกิดจากการวาบไฟตามผิว เกิดเบรคความถี่หรือเจาะผ่าทะลุวัสดุทดสอบ รวมทั้งจากแรงดันอิมพัลส์หรือแรงดันเกินที่มีความชันช่วงหน้าคลื่นสูง ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ในกรณีทดสอบแรงดันผสมระหว่างแรงดันกระแสสลับซ้อนด้วยแรงดันอิมพัลส์ จึงจำเป็นต้องทดลองใช้งานจริง ซึ่งประกอบด้วย

- การทดลองหาความคงทนของฉนวนอากาศต่อแรงดันไฟฟ้า
(Dielectric Strength.)
- การเกิดเบรคความถี่ในฉนวนน้ำมัน
(Breakdown In Insulating Oil)

4.5.1 การทดลองหาความคงทนของฉนวนอากาศต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength)

การทดลอง การเบรคความถี่ของก๊าซหรืออากาศจะเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าถึงค่าหนึ่ง ซึ่งแรงดันระดับนี้จะขึ้นอยู่กับหลายอย่าง คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกลม ระยะห่างระหว่างทรงกลม ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศซึ่งขึ้นกับความดันและอุณหภูมิและความชื้นของอากาศ ฯลฯ

220V/50Hz



รูปที่ 4 (2) การทดลองอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการทดลอง

การเตรียมตัวก่อนการทดลอง

1. ก่อนการทดลองต้องทบทวนการใช้เครื่องผลิตสัญญาณ เครื่องมือวัดพร้อมกับหลักการความปลอดภัยก่อน

2. ทดสอบสภาพแวดล้อมโดยการชั๊กเอาท์ไซด์ ความสกปรกที่ความสะอาดให้แห้ง อย่าให้ความชื้นชรัชระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจุดสปาร์ค

3. จัดช่องว่างทรงกลมตามมาตรฐาน เช่น ระยะห่างและเงื่อนไขต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.4

การทดลอง

1. ตัวอย่างจรรดรูป 4.4 ให้แหล่งผลิตสัญญาณไฟฟ้าสลับ

2. ปรับระยะแกปที่ 1 ซม. แล้วค่อย ๆ ปรับแรงดันจนเกิดเบรคความถี่ปล่อยให้สปาร์คทั้งประมาณ 2 - 3 ครั้ง เพื่อจัดค่าและองที่ขังเหล็ออกยู่อกให้หมดแล้วจัดค่าแรงดันเบรคความถี่ 3 ครั้ง

3. ปรับระยะแกปที่ 1.2, 1.4 และ 1.5 ซม. แล้วทำการทดลองเหมือนข้อ 2

4. ทำการเปรียบเทียบแรงดันเบรคความถี่โดยการเทียบจากตารางมาตรฐานที่ทำไว้ ดังกราฟรูป 4.6

ผลการทดลอง

การทดลอง เรื่อง การวัดแรงดันด้วยช่องว่างทรงกลม
 วิธีการทดลอง ปรับแรงดันจาก 0 จนเบรคความถี่
 อุณหภูมิห้อง 32 องศา เซ็นติเกรด
 ความยาวของเส้นผ่าศูนย์กลาง (อีเล็คโตรด) 15 ซม.

ตารางที่ 4.5

ระยะห่าง	ระดับแรงดันเบรคควาน์ (กิโลโวลท์) 3 การทดลอง			ค่าเฉลี่ย
ชม.	1	2	3	
1	28.5	28.9	29.5	28.96
1.2	35.1	35.8	35.6	35.5
1.4	40.2	40.4	39.9	40.16
1.5	41.5	42.2	42.5	42.06

4.5.2 การเกิดเบรคควาน์ในฉนวนน้ำมัน (Breakdown In Insulating Oil)

กลไกการเกิดเบรคควาน์ของฉนวนน้ำมัน

ลักษณะการเกิดเบรคควาน์ของน้ำมันหม้อแปลงในภาชนะทดสอบโดยใช้โอเลคโตรดทรงกลม จะเกิดกระแสรั่วระหว่างโอเลคโตรด เพื่อเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นจะทำให้เกิดการสปาร์กระหว่างโอเลคโตรดน้ำมัน ทำให้เกิดกระแสไหลผ่านอย่างมากมาย โดยจะจำกัดกระแสเหล่านี้โดยความต้านทานภายนอก มีกระแสรั่วระหว่างโอเลคโตรดเกิดฟองก๊าซจำนวนมาก มีเขม่าสีน้ำตาลขึ้นส่วนน้ำมันและส่วนประกอบอื่น ๆ เนื่องจากมีปฏิกิริยาทางเคมี ความดันของน้ำมันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ค่าแรงดันเบรคควาน์ที่วัดได้นี้จะถูกกำหนดในการหาความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันต่อไป

เนื่องจากยังไม่มีทฤษฎีที่จะอธิบายการเกิดเบรคควาน์ของฉนวนน้ำมันได้ดีเพราะว่าความคงทนต่อแรงดันนั้นขึ้นอยู่กับหลาย ๆ อย่าง เช่น ลักษณะคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของฉนวนดังกล่าวแล้ว ชนิดและปริมาณสิ่งเจือปน ตลอดจนลักษณะของโอเลคโตรด จึงได้มีทฤษฎีการอธิบายการเกิดเบรคควาน์ในฉนวนเหล่านี้เป็นน้ำมันออกได้ 2 แบบ คือ

ทฤษฎีที่ 1 โดย Lewis, Sharbaugh, Watson, Swan
 สมมติว่าฉนวนของเหลวเป็นเนื้อเดียวกันตลอดโดยไม่มีสิ่งเจือปน ซึ่งอธิบายการเกิด
 เบรคดาวน์เช่นเดียวกับก๊าซ โดยอาศัยการเกิดอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอนจากขบวนการ
 ไอออไนซ์เชนในสนามไฟฟ้า

ทฤษฎีที่ 2 คำนึงถึงสิ่งเจือปน แผลกปลอม โดยไม่คำนึงถึงการเกิดเบรคดาวน์นั้น
 อาจเกิดจากฉนวนได้เช่นกัน ซึ่งทฤษฎีนี้อาจแบ่งออกเป็นการเกิดเบรคดาวน์ เนื่องจาก
 โพรงหรือห้องก๊าซ ซึ่งความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าฉนวนเหลวจึงทำให้เกิดเบรคดาวน์
 เสนอโดย Kao และการเกิดเบรคดาวน์เนื่องจากสิ่งเจือปนของแข็ง ซึ่งเป็นคั้งเหนุให้เกิด
 ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้นเป็นบางแห่ง ทวีให้น้ำไปสู่การเกิดเบรคดาวน์ ของของเหลว
 ทั้งหมด เสนอโดย J.K. Kok, Corbey

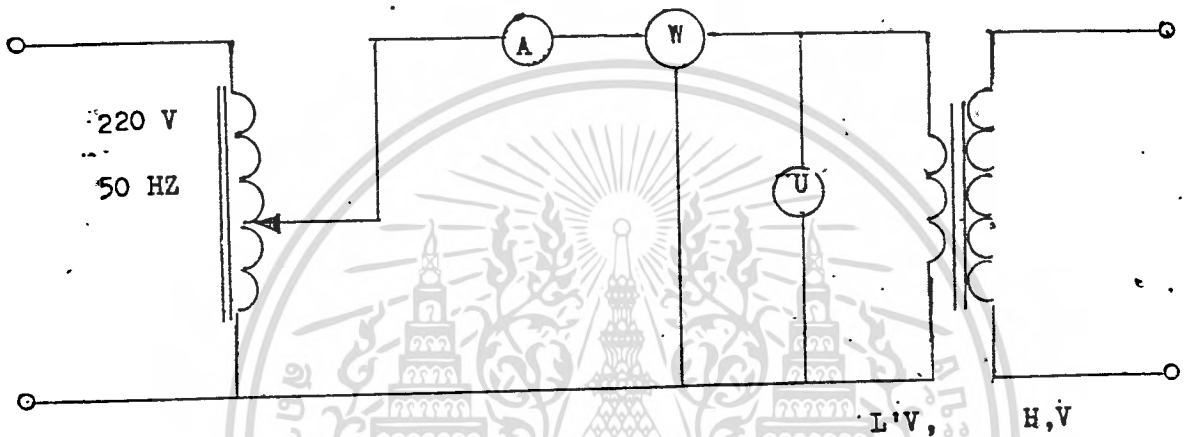
วิธีทดลอง

1. ท้าการบรรจุน้ำมันหม้อแปลงลงในภาชนะทดสอบโดย ไม่มีสิ่งเจือปน (ภาชนะทดสอบ
 สอเม็ขนาดบรรจุ 500 มล. และอีเลคโตรดรูปทรงกลมผิวเรียบทำจากทองเหลือง มีขนาด
 เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 ซม.)
2. ค้วางจรของภาชนะทดสอบกับชุดผลิตสัญญาแรงดันไฟฟ้าสลับดังรูป 4.5
3. ท้าการวัดแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงที่ระยะแกบ 0.5, 1, 1.5 มม.
 โดยแต่ละแกบจะท้าการวัดแรงดัน 3 ครั้ง ลงในตาราง 4.6

ผลการทดลอง
ตารางที่ 4.6

ระยะแกบ มม.	แรงดันเบรคตาวน์ กิโลโวลท์ 3 การทดลอง			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
0.5	12.1	13.05	12.5	12.55
1	22.2	23.7	24.3	23.4
1.5	40.2	42.6	42.7	41.83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงวงจรการทดสอบเบิกวางจร

บทที่ 5
สรุปและวิจารณ์

5.1 สรุปผลงาน

1. การสร้างแหล่งผลิตพลังงานแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อใช้ในการทดสอบความคงทนของฉนวน โดยการสร้างหม้อแปลงขึ้นขนาด 5 Kva 220 v/50 Kv 50 Hz ระบายความร้อนด้วยน้ำมัน 1 เฟส ซึ่งผลการออกแบบสร้างและการทดสอบของหม้อแปลงทดสอบนี้มีข้อมูลทางเทคนิค ดังนี้

- แรงดัน

แรงดันต่ำ U1 220 v

แรงดันสูง U2 50 Kv

- กระแส

กระแสแรงต่ำ (I1) 22.7 A

แรงสูง (I2) 0.1 A

- กำลังไฟฟ้า (Sn) 5 Kva

- ความถี่ (f) 50 Hz

- จำนวนเฟส 1 เฟส

- แกนเหล็ก

- แผ่นเหล็กซิลิกอน 0.3 มม.

- พื้นที่ภาคตัดขวาง (A) 0.0083 m²

- ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (B) 1 Tb/m²

- กระแสเมื่อ No load (Io) 2.15 A

- กำลังไฟฟ้าสูญเสียเมื่อ No load (Wc) 96.7 W.

- น้ำหนัก 90 Kg

- ชดลวด

- ชดลวดแรงต่ำ
- ลวดแบนอาบน้ำยา (PEW) 2.5 * 6.5 มม.
- จำนวนรอบ 122 รอบ

5-2

- แรงดันค้ำต่อรอบ 1.8 โวลท์
- แรงดันค้ำต่อชั้น 108 โวลท์
- ความต้านทาน 0.345 Ω
- น้ำหนัก 17.01 Kg

- ชดลวดแรงสูง

- ลวดกลม SWG # 29 clase F
- จำนวนรอบ (N2) 27,642 รอบ
- แรงดันค้ำต่อรอบ 1.8 โวลท์
- แรงดันสูงสุกระหว่างชั้น 1,800 โวลท์
- ฉนวนระหว่างชั้นใช้ เมลิลเน็กซ์ ทน 0.075 มม. 4 ชั้น ทน 0.33 มม.
- ความต้านทาน R2 5644 Ω
- น้ำหนัก 21.65 KG
- การสูญเสีย 56.44 W.

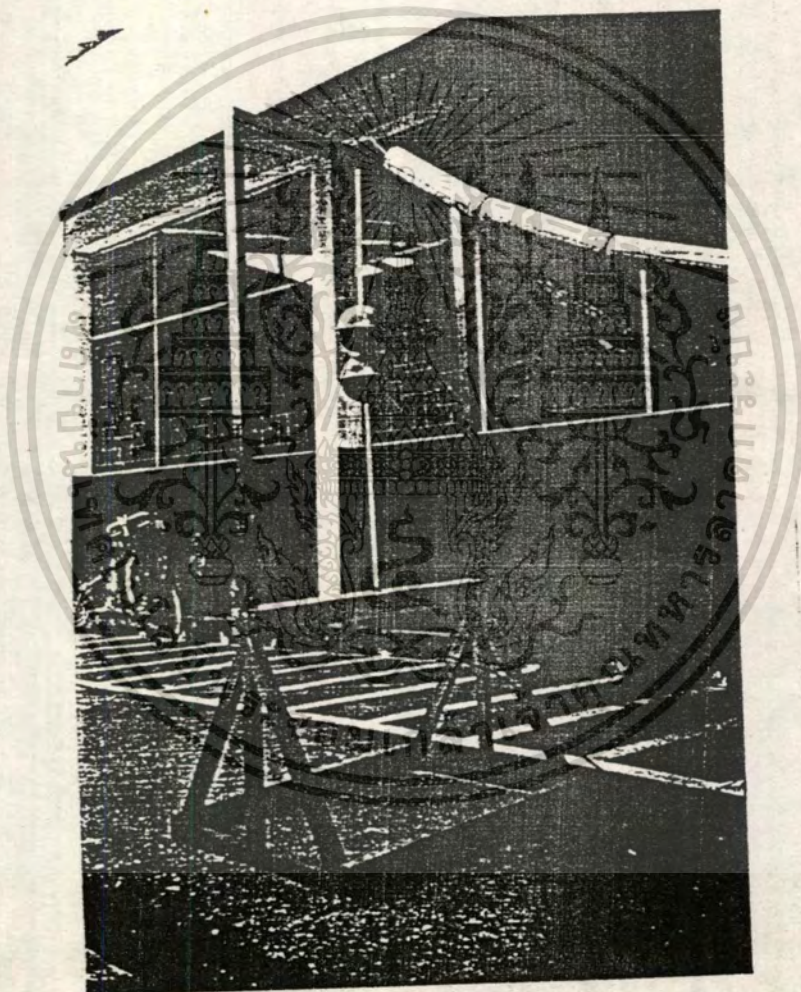
- ตัวถัง

- ตัวถัง เหล็กสี่เหลี่ยมไม่มีครีบนวด กว้าง * ยาว * สูง
45 * 39 * 75 cm³
- ใช้เหล็กหนา 4 มม.
- ใช้เบรคาล็อกที่หนา 5 มม. ทนไฟปิด
- น้ำหนักตัวถัง 120 Kg
- น้ำหนักหม้อแปลงทั้งหมด 325 Kg

- ราคาของหม้อแปลงทดสอบขนาด 5 Kva 220v/50 Kv แบบน้ำมัน 26,750 บาท

2. การสร้างทรงกลม (Sphere)

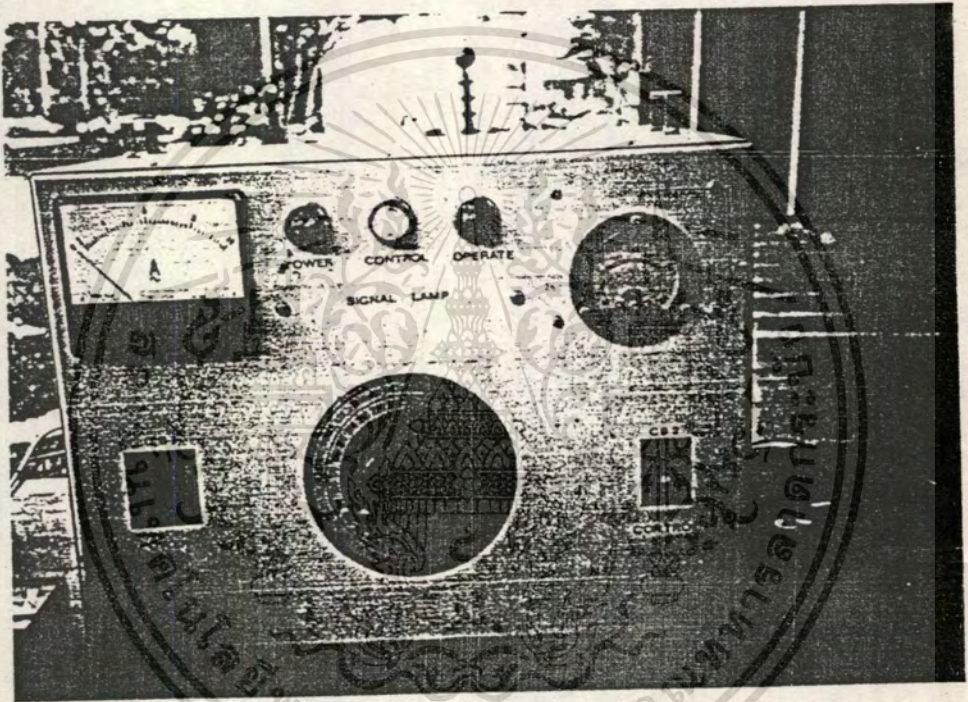
โดยได้ทำการสร้างทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. ตามมาตรฐาน IEC Publ 52 โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางของก้านยึด 2.5 ซม. หลักในการออกแบบโครงสร้างและการติดตั้งในภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การสร้างชุดควบคุมแรงดันทดสอบ (Voltage Control Unit)

ได้สร้างชุดควบคุมแรงดันทดสอบโดยแยกจากหม้อแปลงแรงสูง เพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการทดลอง ซึ่งการออกแบบและหลักการทำงานของชุดควบคุมได้จากภาคผนวก



4. สรุปการทดลอง

จากการทดลอง พบว่าแรงดันเบรคควานี้ขึ้นอยู่กับระยะห่างของอิเล็กโตรด ความชื้นในบรรยากาศ แรงกดคัน และอุณหภูมิ หรือตัวกลางที่กั้นอยู่ระหว่างอิเล็กโตรดว่ามีความคงทนต่อแรงดันได้มากน้อยเท่าไร ฉะนั้นถ้าหากระยะห่างของอิเล็กโตรดยิ่งมากขึ้น แรงดันเบรคควานี้ที่ได้ก็จะมีค่าสูงขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตัวกลางที่กั้นอยู่ระหว่างอิเล็กโตรด และสภาพแวดล้อม



กิติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลง ได้ด้วยความร่วมมือจากหลายฝ่าย ดังนั้นทางกลุ่มผู้จัดทำ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ นิตศน์ กฤษณจินดา และอาจารย์ สมเจตน์ เทียมเมือง ที่ให้คำแนะนำและเอกสารในการจัดทำวิทยานิพนธ์ จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ซึ่งให้ความอนุเคราะห์บางประการ แก่ผู้จัดทำ



เอกสารอ้างอิง

1. E.Khffel and M.Abdullah High Voltage Enginerring Oxford, Progamon Press, 1977
2. L.L.Aiston, High Voltage Technology Oxford University Press, London, 1368
3. ดร.สัทวาท สังข์สะอาด วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
4. สมเกียรติ คุณเนื่อง การศึกษาความคงทนของการฉนวนค่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมัน พืชด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ปีการศึกษา 2528
5. สมคิด เจริญธรรม, สุพิชัย แซ่จิว การทดลองทางไฟฟ้าแรงสูง วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ปีการศึกษา 2528



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. มาตรฐานการติดตั้งทรงกลม

พื้นผิวของทรงกลมจะต้องมีความเรียบ และลักษณะของทรงกลมจะต้องสม่ำเสมอ ซึ่งอาจจะพิจารณาได้ดังนี้

1) รูปร่างโดยทั่วไปนั้น ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของแต่ละทรงกลมต้องไม่ต่างกันเกินกว่า $\pm 2\%$ จากค่ามาตรฐาน

2) พื้นผิวบริเวณจุดสปาร์ค หรือบริเวณใกล้จุดสปาร์คจำเป็นต้องสม่ำเสมอหรือภายในบริเวณที่คิดจากจุดสปาร์คขึ้นมา 0.3 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางทรงกลม

3) การวัดสม่ำเสมออาจใช้เครื่องมือที่เรียกว่า สเฟียร์โรมิเตอร์ (Spherometer)

4) ลักษณะของผิวทรงกลมที่บริเวณใกล้ ๆ และที่จะสปาร์คต้องไม่มีรอยขีดข่วน น้ำมันชักเงา สารเคลือบป้องกันต่าง ๆ ต้องมีความสะอาดปราศจากฝุ่นละออง และต้องมีความแห้ง

2. โครงสร้างและขนาดก้านยึดทรงกลม (Sphere shank) ทรงกลมในแนวตั้ง ก้านยึดทรงกลมของทางด้านแรงดันสูงควรจะไม่มีขอบแหลมหรือมีมุม เส้นผ่าศูนย์กลางของก้านยึดไม่ควรเกิน 0.2 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางทรงกลม เพื่อลดผลของก้านยึดทรงกลมต่อการเบรกดาวน์ของช่องว่าง ถ้าจะติดตั้งตัวกระจายความเครียด (stress distributor) ที่ปลายก้านยึดทรงกลม เส้นผ่าศูนย์กลางไม่ควรเกิน 0.5 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางทรงกลมและต้องอยู่ห่างจากจุดสปาร์คอย่างน้อย 2 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางทรงกลม ส่วนก้านยึดทรงกลมที่ค่อนาราวนั้นจะมีผลต่อการวัดเบรกดาวน์น้อยมากดังรูปที่ 1

ทรงกลมในแนวราบ ขนาดของก้านยึดทรงกลมสามารถพิจารณาได้ตามรูปที่ 2

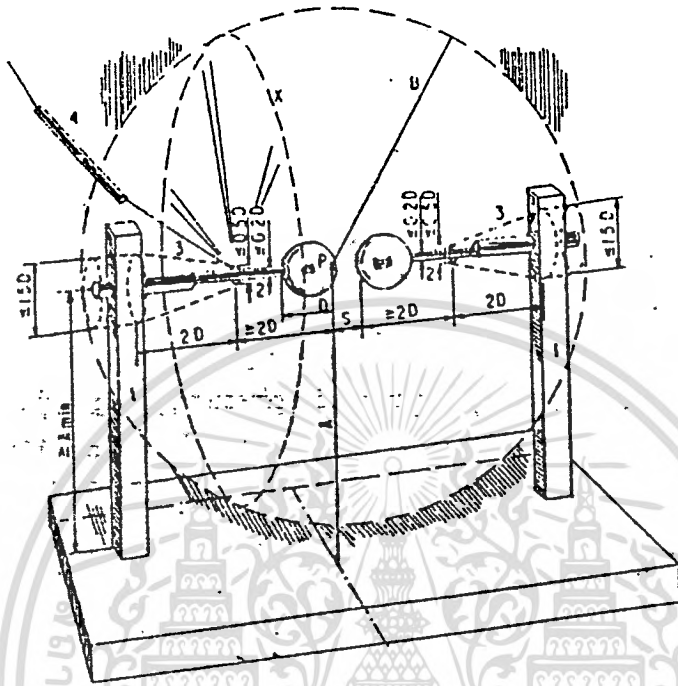
3. ความสูงของทรงกลมเหนือพื้นกราวิน (ground plan - A) ทรงกลมควรอยู่เหนือพื้นกราวินหรือพื้นห้องทดลองด้วยความสูงจากจุดสปาร์คของทรงกลมแรงสูง ซึ่งมีค่าตามตาราง 2.1 ทั้งทรงกลมแนวนอนและแนวราบและถ้าติดตั้งทรงกลมอยู่ใกล้กับเพดาน ฝ้า ผนัง ฯลฯ ต้องอยู่ห่างมากพอ ซึ่งอัตราส่วน A/P ก็มีผลต่ออัตราการลดลงของแรงดันเบรกควานที่เกิดขึ้นด้วย

เส้นผ่าศูนย์กลาง (ซม.)	ระยะต่ำสุด A	ระยะสูงสุด A	ระยะต่ำสุด B
6.25	7	9	14
12.5	6	8	12
25.0	5	7	10
50.0	4	6	8
75.0	4	6	8
100	3.5	5	7
150	3	4	6
200	3	4	6

ตารางที่ 1 แสดงระยะในภาวความคิดทรงกลม.

4. ช่องว่างรอบ ๆ ทรงกลม (clearance around spherr -B)

ถ้าวัสดุที่เป็นตัวนำเช่นหม้อแปลง สายแรงสูง ต้องอยู่ห่างจากจุดสปาร์คอย่างน้อยเป็นระยะทาง B ตามตารางที่ 1 ในบางกรณีอาจยอมให้ได้แต่ไม่ควรน้อยกว่า 2 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางทรงกลมและฉนวนรองรับ (supporting framework) ซึ่งทำจากสารที่ทนแรงดันสูงต้องมีความสะอาดและแห้ง และต้องอยู่ห่างจากจุดสปาร์คอย่างน้อย 1.6 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางทรงกลม หรืออยู่นอกระยะ B



1. โครงงานเหล็กทรงกลม
2. ก้านเหล็กทรงกลม
3. เกียร์ปรับระยะ
4. ตัวนำไฟแรงสูงต่ออนุกรมกับความต้านทาน
5. ตัวกระจายความเครียด

P จุดสปาร์ค

A ความสูงเหนือพื้นกราวาน์

B ระยะรอบ ๆ ทรงกลมหุ้มมีตัวนำอยู่

X ตัวนำไฟแรงสูงต้อง ไม่นานในระยะต่ำกว่านี้

รูปที่ 2 ทรงกลมในแนวราบ

5. แคลคูล์เนื่องมาจากทรงกลม

รูปร่างของทรงกลมจะมีลักษณะของสนามไฟฟ้าเกือบสม่ำเสมอ ดังนั้นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดกับค่าเฉลี่ยจะแตกต่างกันมาก ค่าแรงดันเริ่มต้น (threshold voltage) กับแรงดันเบรคดาวน์จะเป็นค่าเดียวกัน คือ เมื่ออะวาลานซ์วิกฤติได้ตามเงื่อนไขก็เกิดเบรคดาวน์ทันที โดยไม่มีโคโรนาเกิดขึ้นก่อนเบรคดาวน์ จึงเรียกว่าเป็นเบรคดาวน์โดยตรง

แต่ในกรณีที่อัตราส่วน S/D เพิ่มขึ้นจะทำให้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากขึ้น ทำให้ผลของสิ่งแวดล้อมของทรงกลมมีอิทธิพลมากขึ้น รวมทั้งแรงดันที่เกิดเบรคดาวน์จะมีการกระจายมากขึ้น ดังนั้นอัตราส่วน S/D จึงไม่ควรมากเกินไปดังตารางที่ 3 ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดมาตรฐานเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของแรงดันที่จะวัดพอที่จะประมาณได้ดังนี้

$$D \text{ in m.} > U \text{ in KV}$$

และค่ามาตรฐาน IEC publ. 52 กำหนดระยะห่างระหว่างทรงกลมไม่ควรเกินครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลาง และการกำหนดขนาดเริ่มแรกของช่องว่างทรงกลมขนาดของทรงกลมจะมีความสัมพันธ์กับแรงดันสูงสุดที่จะใช้ตามตารางที่ 2 การเกิดเบรคดาวน์หรือสปาร์กระหว่างทรงกลม จะเกิดขึ้นที่จุดใกล้กันมากที่สุดของทรงกลมทั้งสอง เราเรียกว่าจุดสปาร์ค (sparking point) แต่มันอาจจะเกิดขึ้น

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ตามมาตรฐาน (ซ.ม.)	ระยะห่างของช่องว่าง ห่างไม่เกิน(ซ.ม.)	วัตต์แรงดันไม้สูงสุด (กิโลวัตต์)
2	1	30.7
5	1.4	65.5
6.25	3.0	79.5
10	5	123
12.5	6	146
15	7.5	177
25	12	275
50	25	515
75	36	750
100	50	1010
150	75	1440
200	100	1840

ตารางที่ 2 แสดงค่าแรงดันที่ใช้วัตต์สูงสุดของช่องว่างทรงกลม

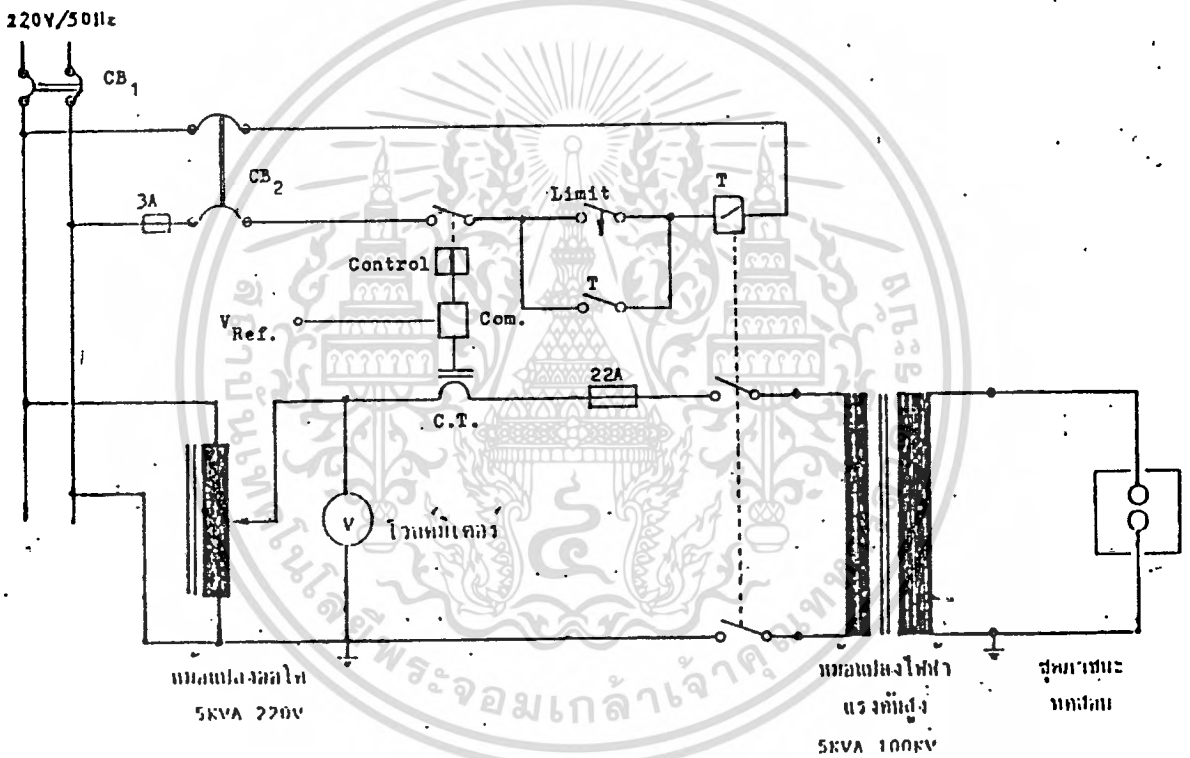
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วน S/D	ความถูกต้องของ การวัดแรงดัน	อัตราส่วน A/D		อัตราส่วน B/D ค่าสุด
		ต่ำสุด	มากที่สุด	
S/D < 0.32	1	2.3	8	2.1
	2	1.5	0	1.7
	3	1.1	0	1.5
0.32 < S/D < 0.5	1	3.3	5	3.8
	2	2.6	6	3.0
	3	2.0	8.5	2.4
0.5 < S/D < 0.75	1	3.5	4.6	4.8
	2	3.2	5.1	4.3
	3	3.0	5.9	4.0

ตารางที่ 3 แสดงค่ามาตรฐานการคิดคั้งของว่างทรงกลม

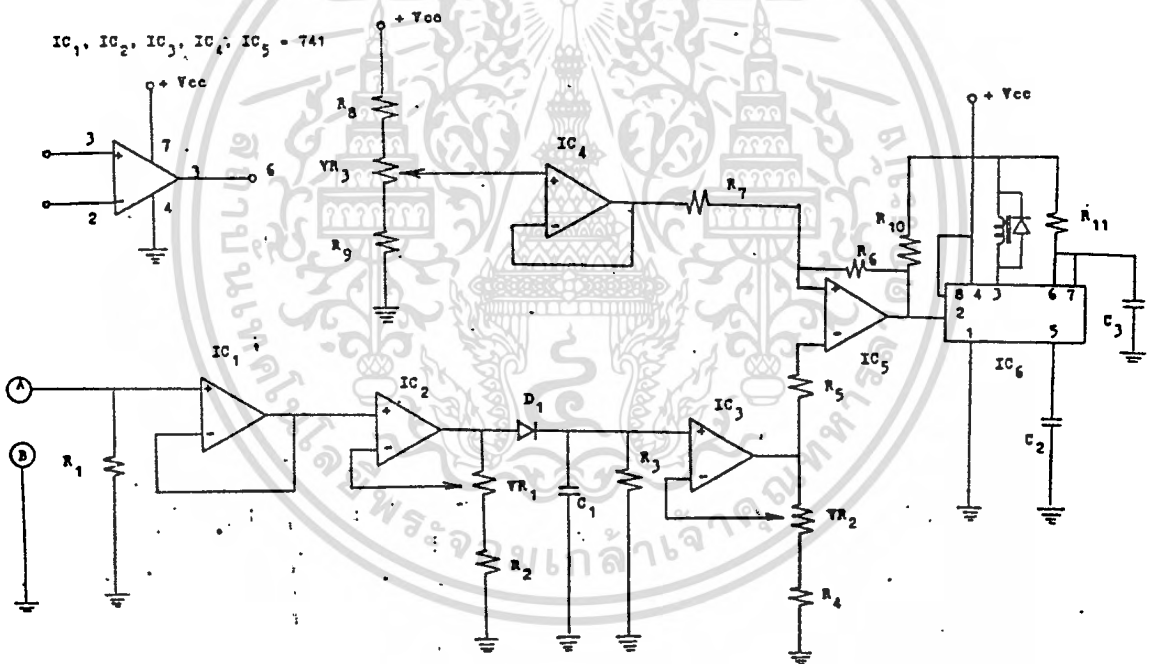
6 การออกแบบ O/C

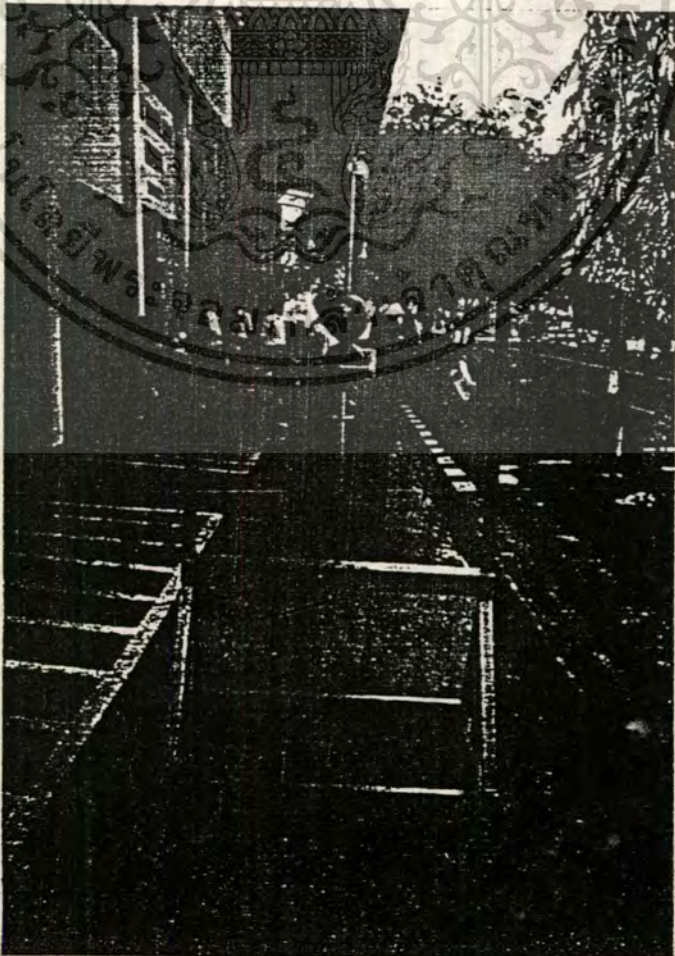
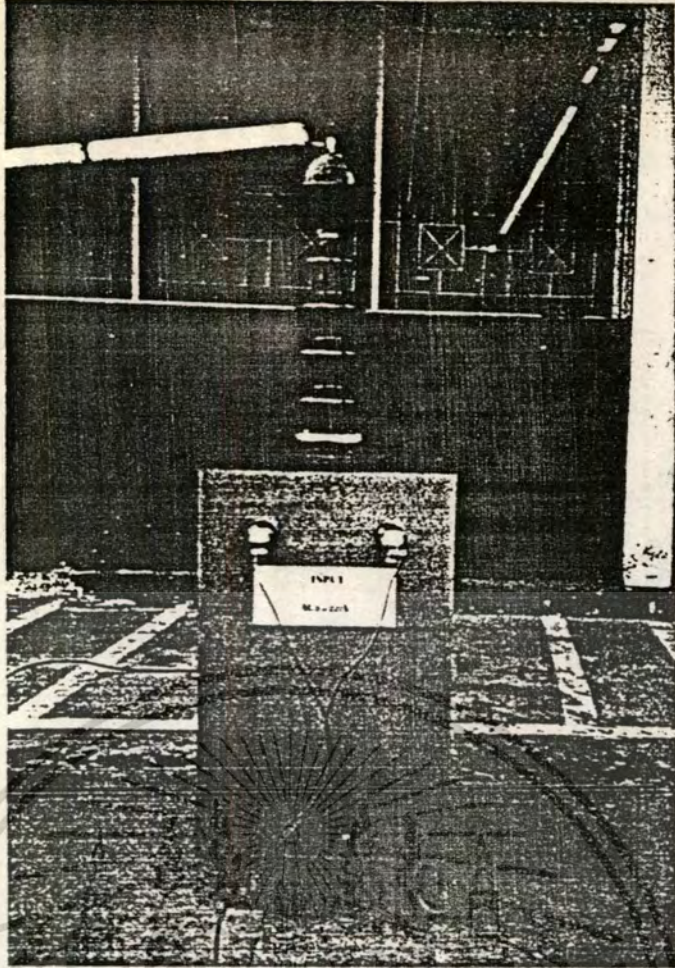
อุปกรณ์ Overcurrent protection เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตัดวงจรออกเมื่อมีการ Breakdown ใน insulation ของอุปกรณ์ที่ทดสอบ หลักการของ overcurrent protection นี้คือการนำ voltage 2 ค่ามาเปรียบเทียบกัน อธิบายได้ดังรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

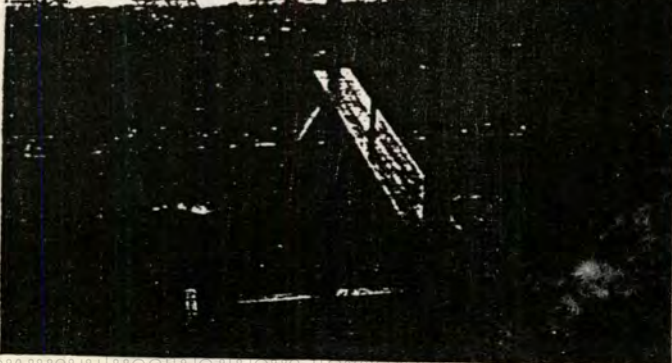
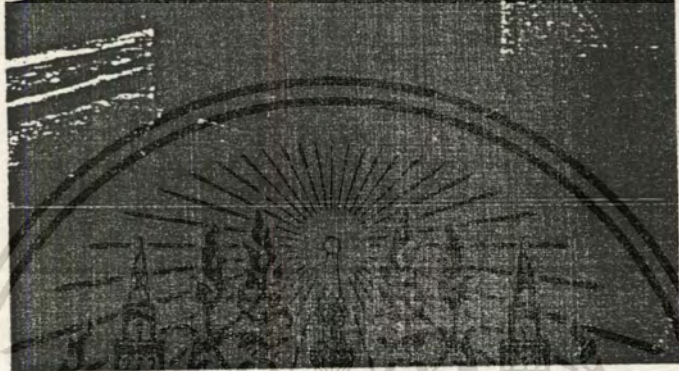
ไอซี 1, 2, 3 จะเป็นตัวรับ แรงดันที่มาจากหม้อแปลงกระแส จะทำการขยายสัญญาณแรงดันไปออกที่เอาต์พุตไอซี 3 แล้วนำไปเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงจากเอาต์พุตไอซี 4 ซึ่งไอซี 4 จะเป็นตัวกำหนดให้ว่า แรงดันอ้างอิงขนาดขนาดเท่าไร ก็เท่ากับเป็นการกำหนดกระแส เบรคความถี่ให้ไหลนั่นเอง ไอซี 5 เป็นตัวเปรียบเทียบแรงดันระหว่างเอาต์พุตไอซี 3 กับเอาต์พุตไอซี 4 ในสภาพปกติเอาต์พุตไอซี 5 จะเป็น "1" แต่ถ้ามีการเบรคความถี่ โวลต์เตจเอาต์พุตไอซี 3 จะสูงกว่าเอาต์พุตไอซี 4 ทำให้เอาต์พุตไอซี 5 เปลี่ยนจาก "1" เป็น "0" เป็นเหตุให้อาห์พุทขา 3 ของไอซี 6 ซึ่งปกติเป็น "0" จะกลายเป็น "1" ทันทีทำให้รีเลย์ เบ็ดวงจรแล้วจะไปตัดไฟชุดทดสอบออกจากวงจรทดสอบ



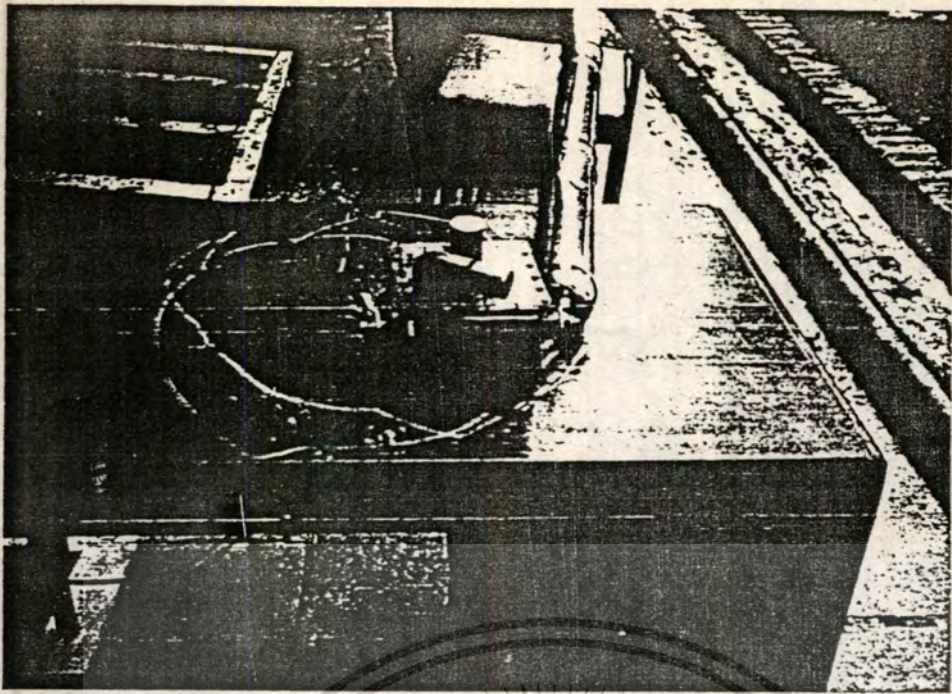


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง

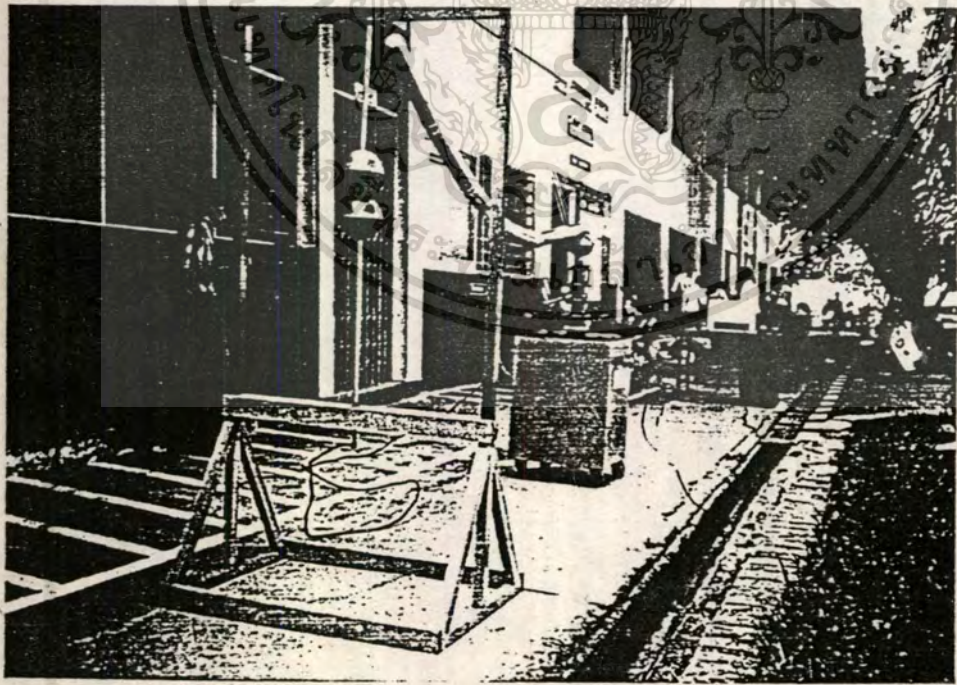
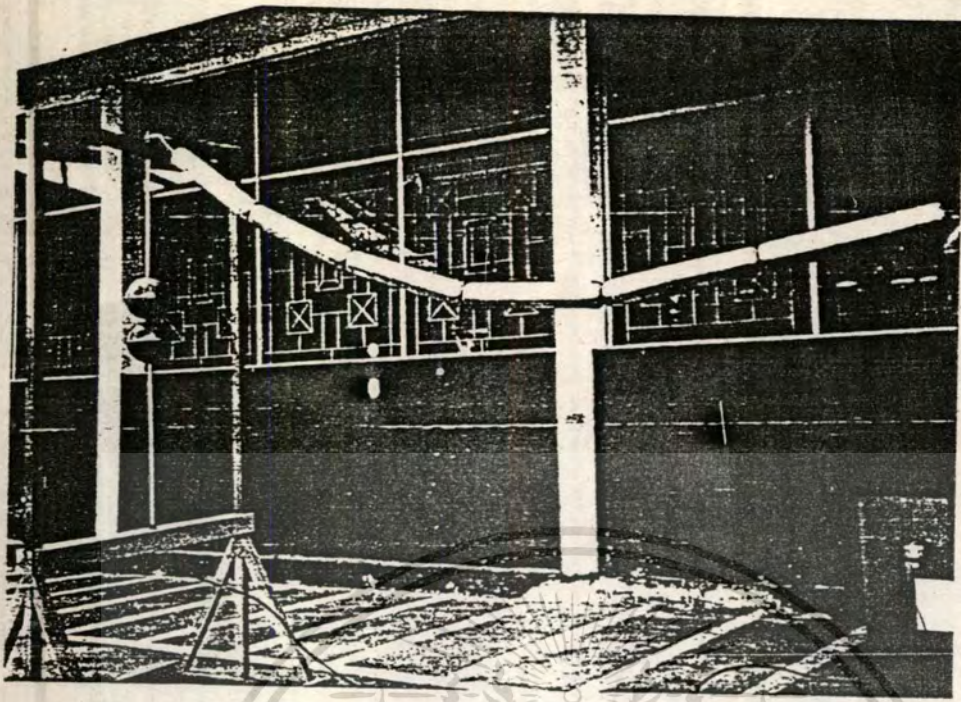
ประโยชน์ด้านการค้า
จริงที่มีการนำไปใช้



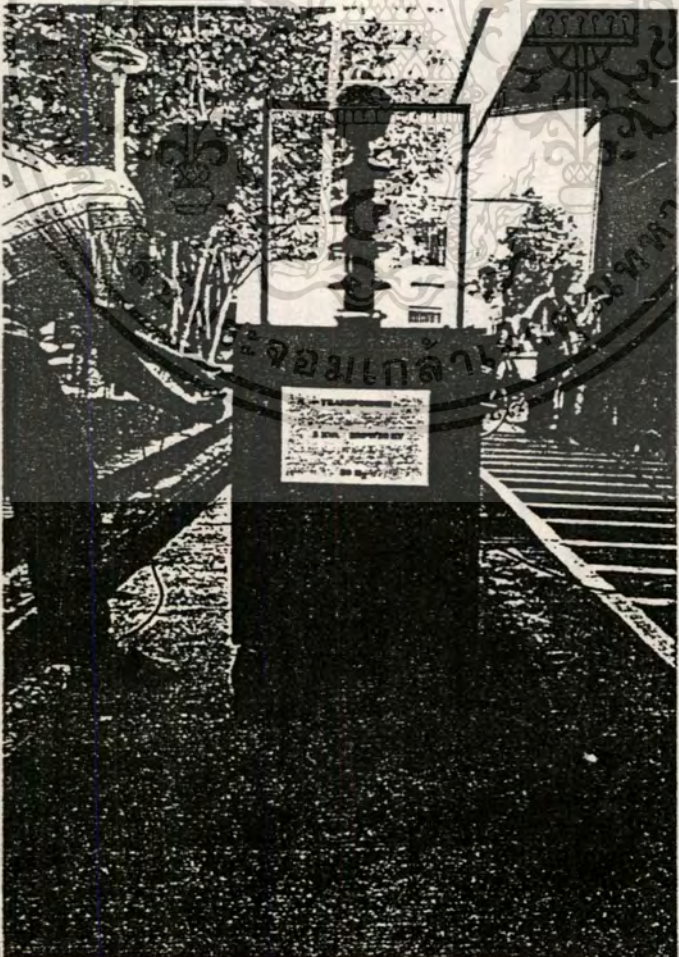
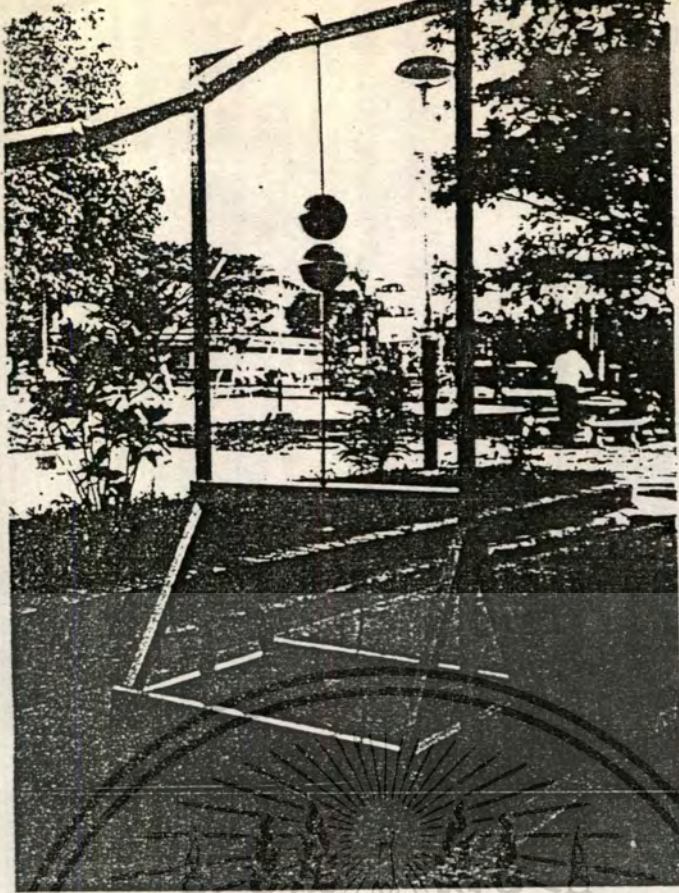
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อประโยชน์ด้านการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงเนื้อหา และดองข้อมูลของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



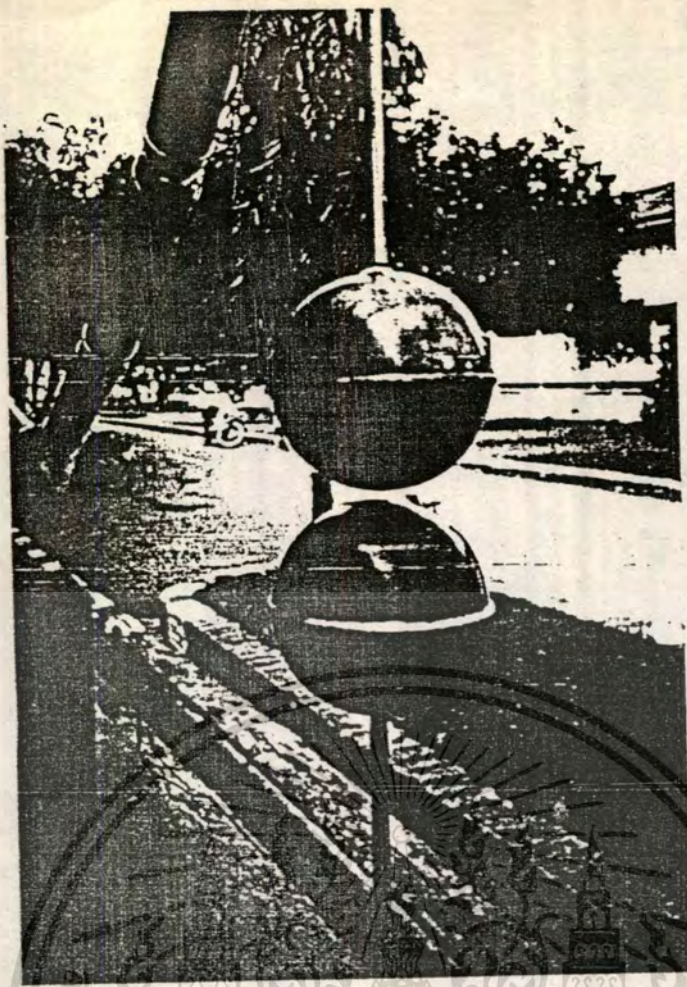
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

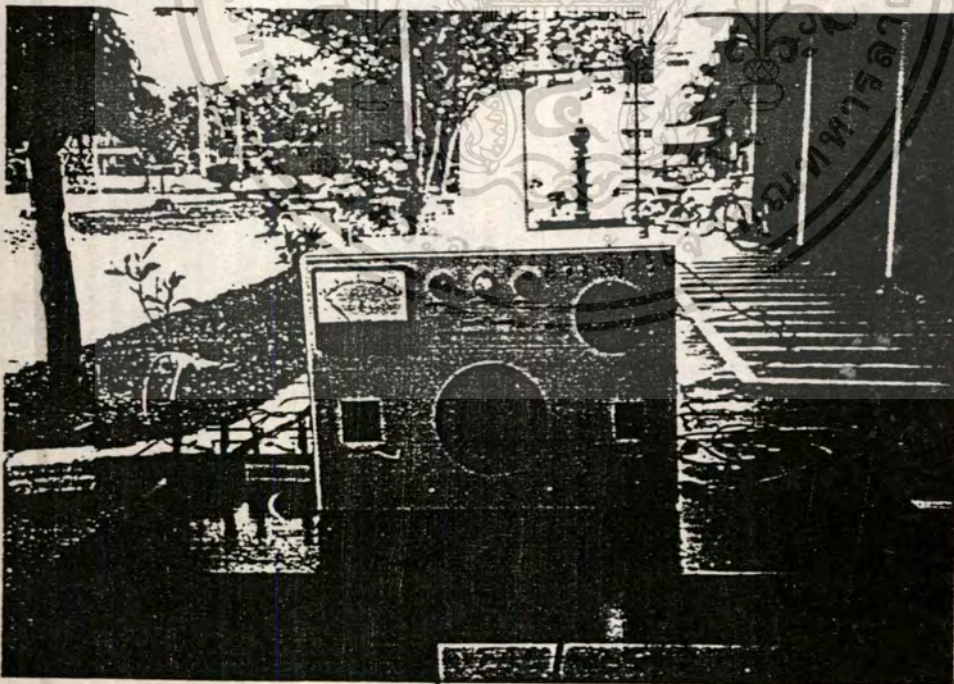
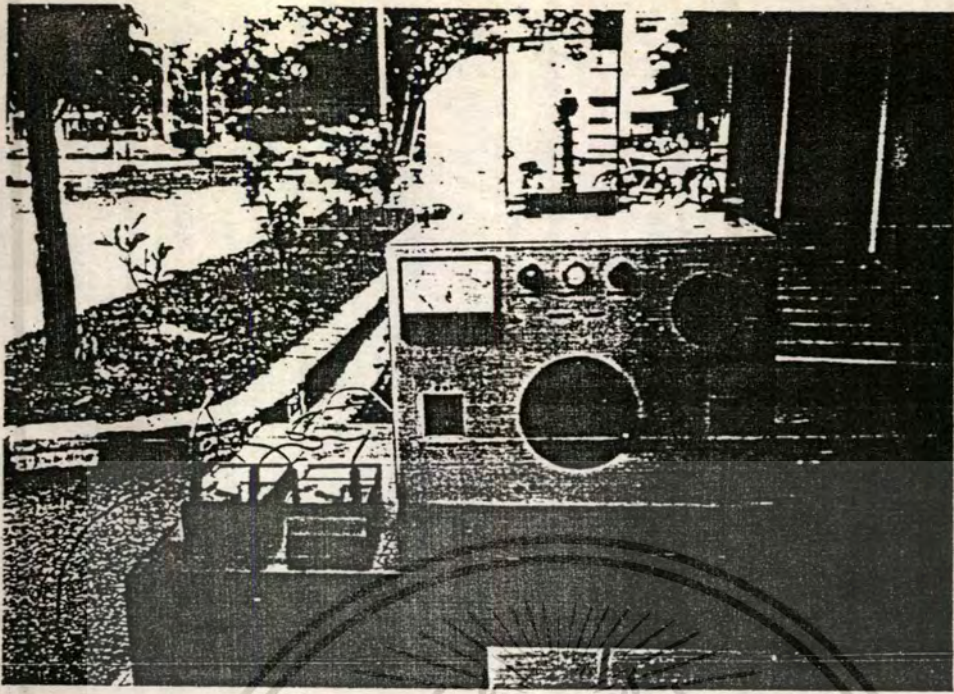


เอกสารนี้เป็นเอกสารนำไปด้วยไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

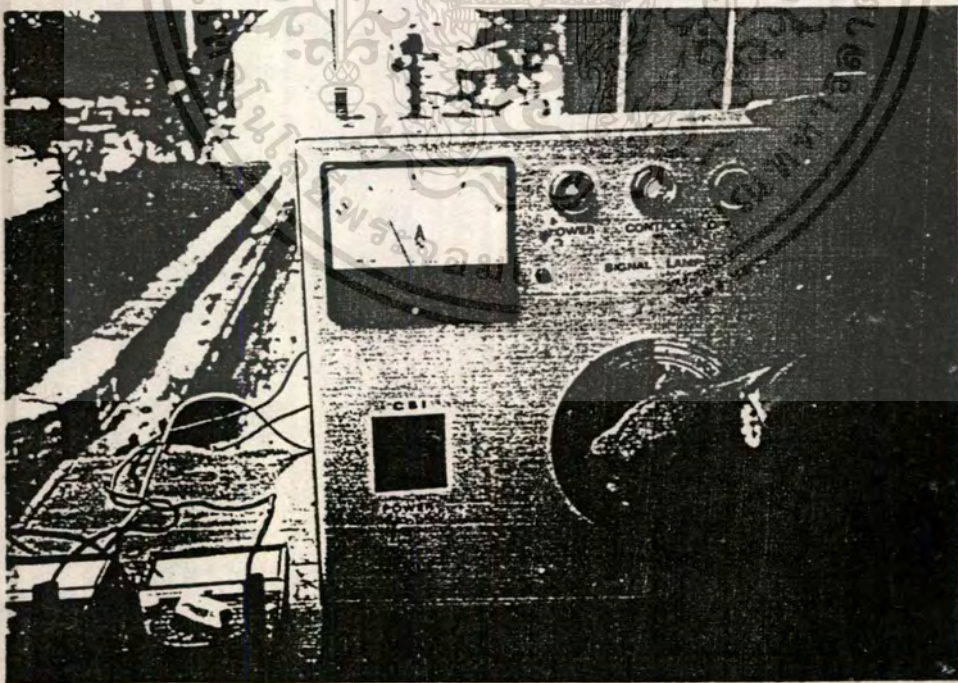
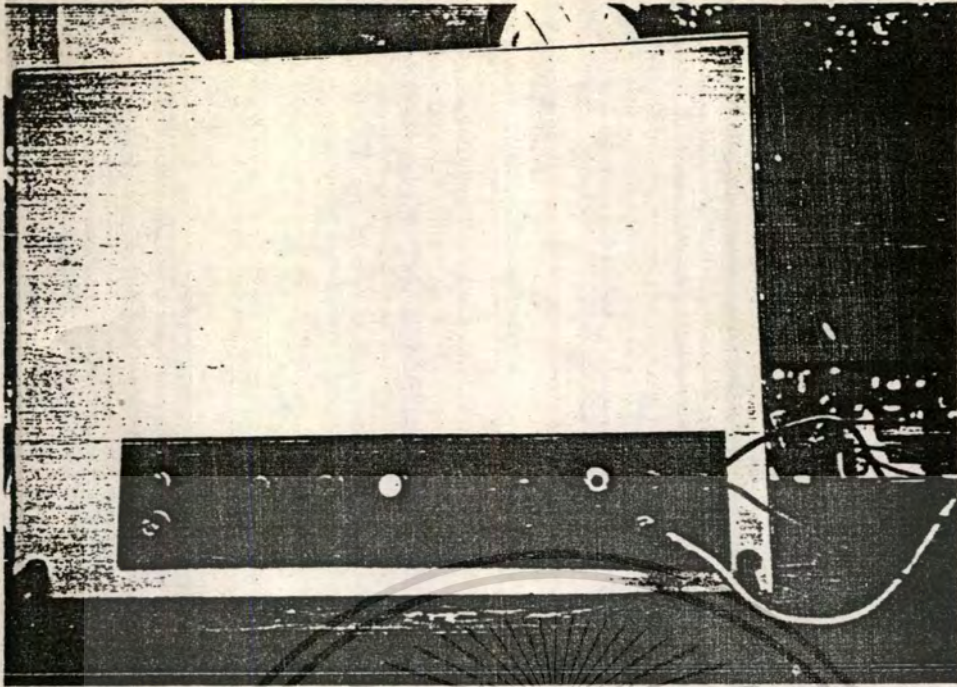


เอกสารนี้เป็นเอกสาร
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

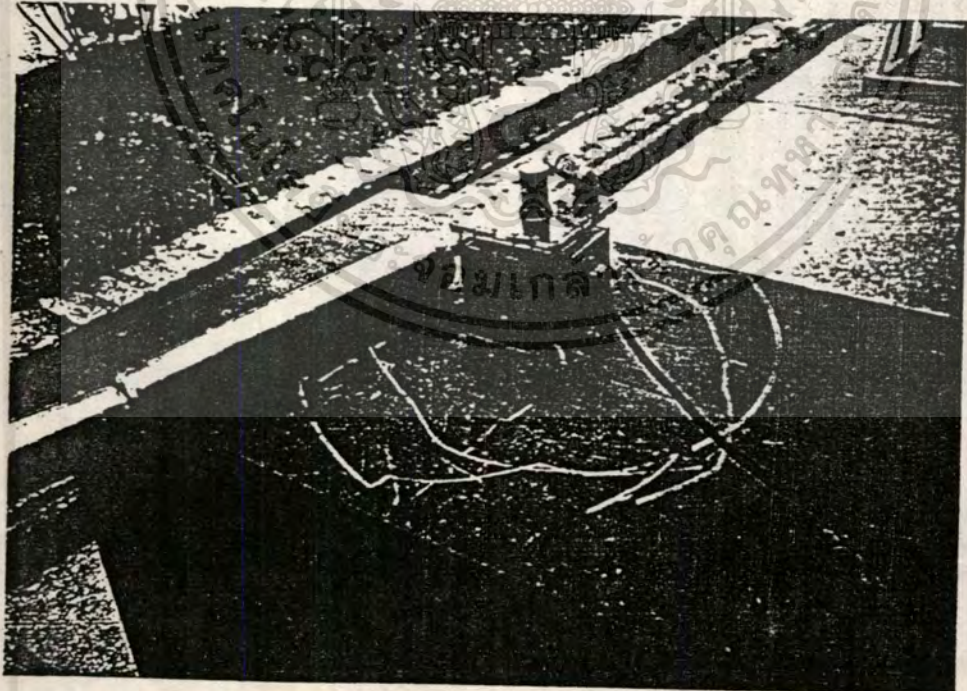
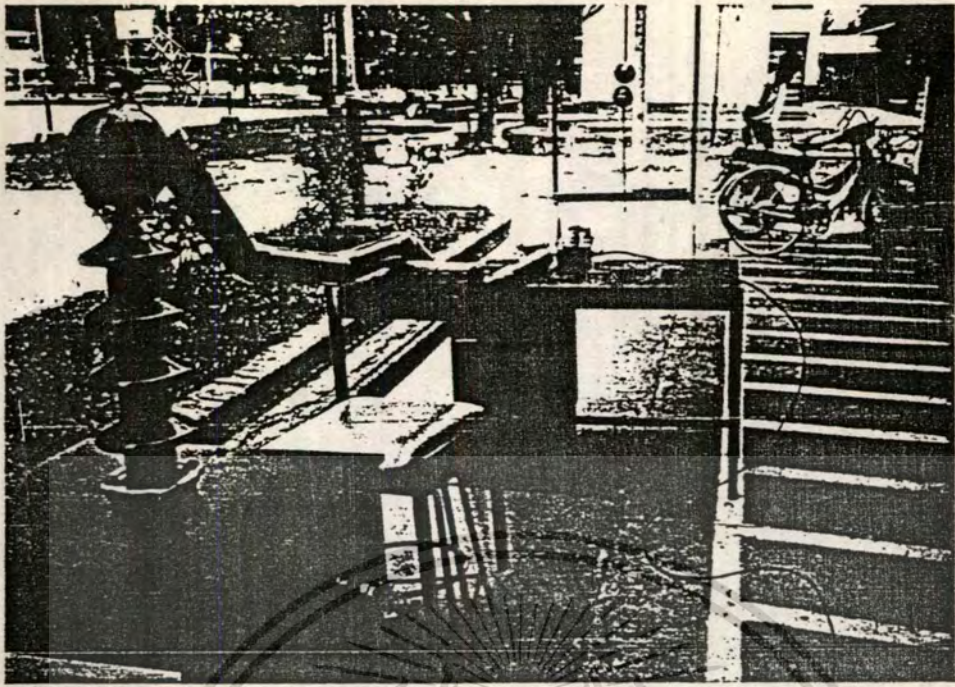
ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



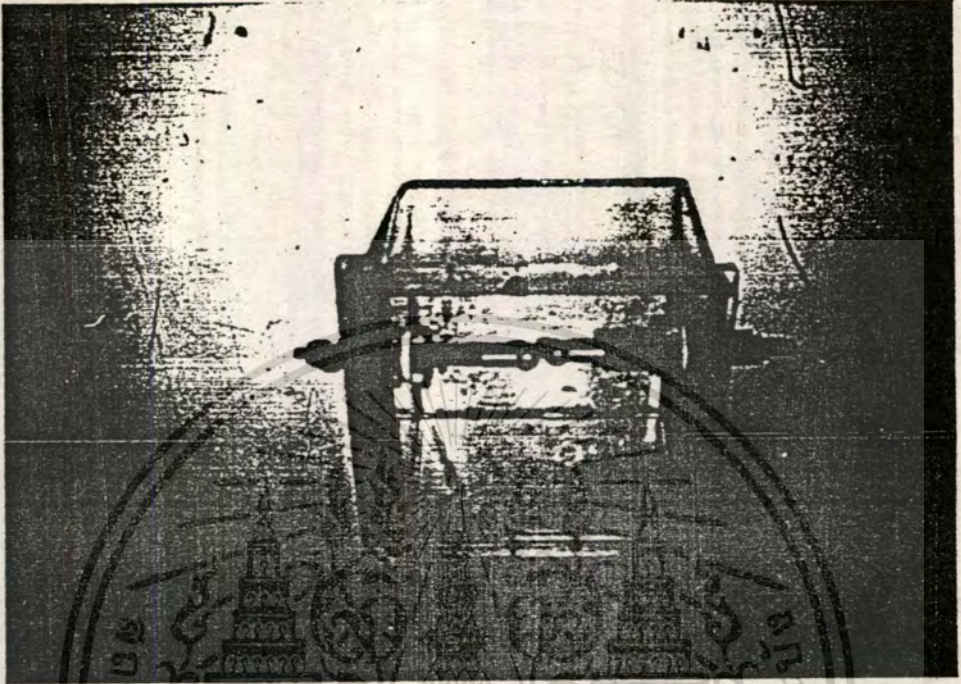
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



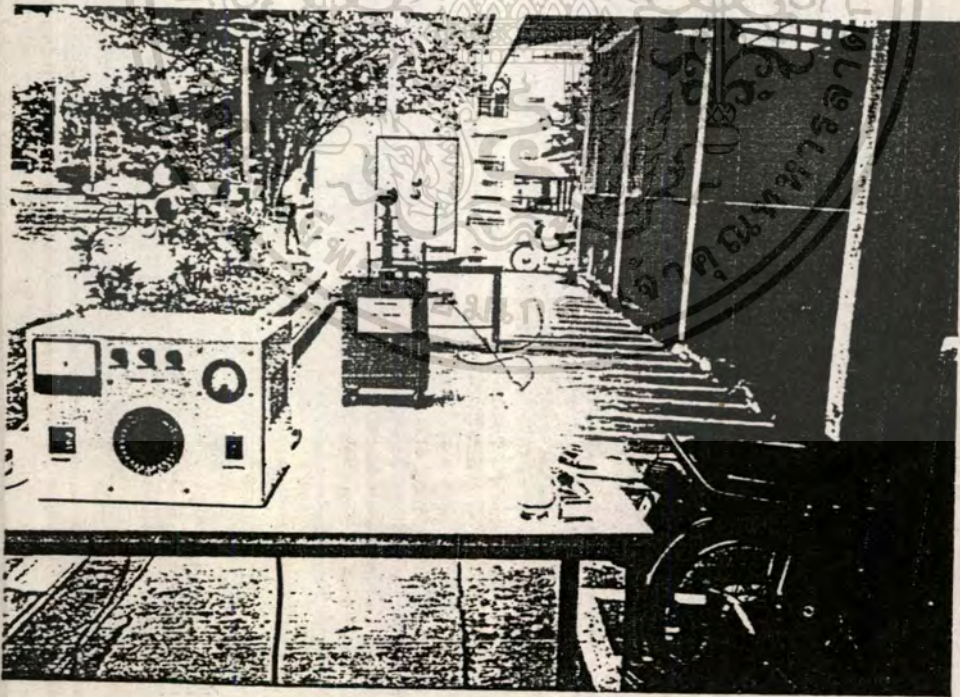
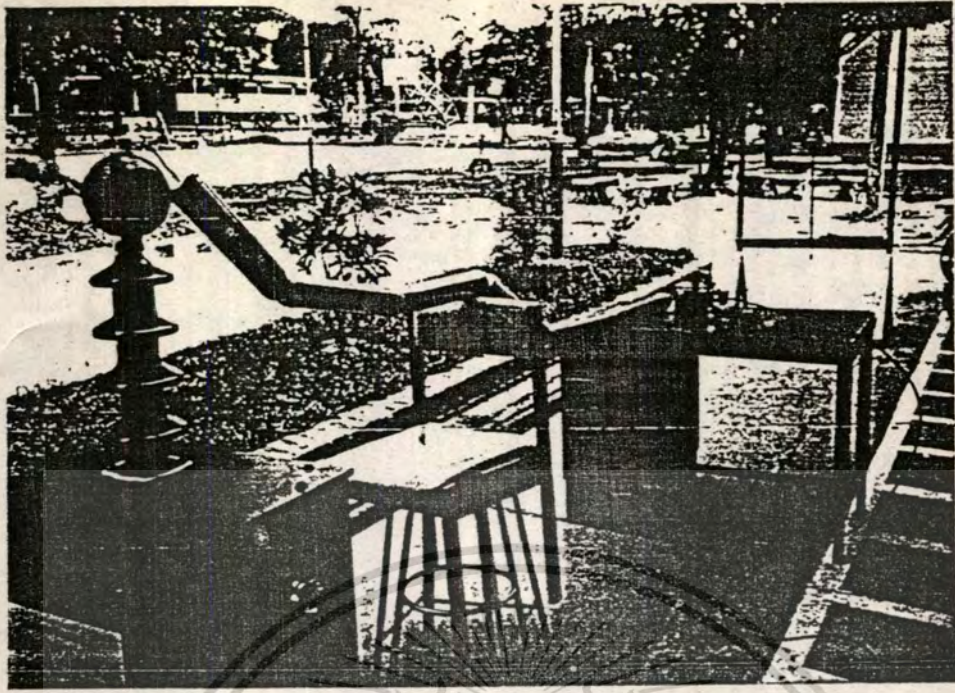
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



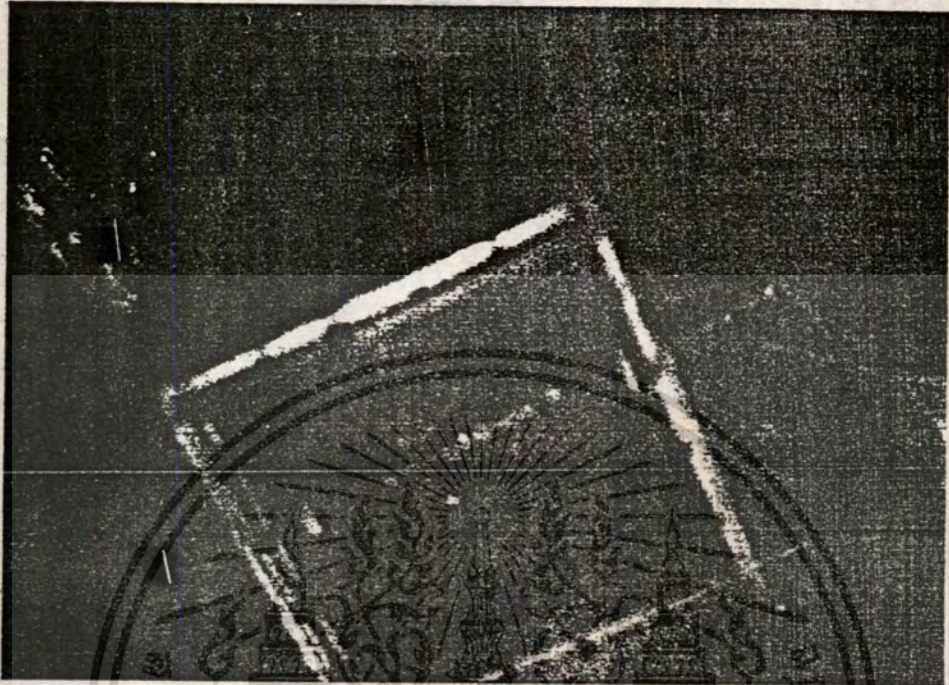
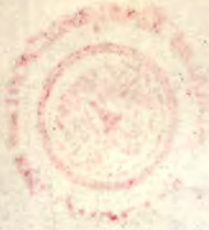
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็น

ต้นฉบับการค้ำ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้