



การทำนายอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของหม้อแปลงชนิดน้ำมัน

Predicting Temperature Rise Of Oil Immerse Transformer

โดย

นาย เจษฎา นราธิศจรรย์

นาย พิชัย เตชะเลิศสุวัฒน์

นาย อนุวัต รงค์เหลืองอร่าม

วัน เดือน ปี... ๑๓ ก.ค. ๒๕๔๐
เลขทะเบียน... ๐๙๗๐๙๒
เลขเรียกหนังสือ... ๒๑๘๑๒๔ จ.๒๕๕ ก

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๓๘

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2538

การทำนายอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของหม้อแปลงชนิดน้ำมัน

Predicting Temperature Rise Of Oil Immerse Transformer

โดย

นาย เจษฎา นราธิศจรรย์	รหัส 35104080
นาย พิชัย เตชะเลิศสุวัฒน์	รหัส 35104295
นาย อนุวัต รงค์เหลืออร่าม	รหัส 35104525

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. สุธี บรรจงจิตร

อ. สมชาติ จิรวិภากร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

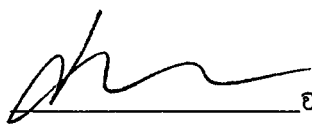
ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2538

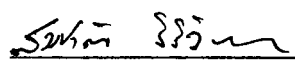
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การทำนายอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของหม้อแปลงชนิดน้ำมัน




อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ. ศุภี บรรจงจิตร)


อาจารย์ที่ปรึกษา
(อ. สมชาติ จิรวิภากร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทํานายอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของหม้อแปลงชนิดน้ำมัน

นาย เจษฎา นราธรรย์ รหัส 35104080

นาย พิชัย เตชะเลิศสุวัฒน์ รหัส 35104295

นาย อนุวัต รงค์เหลืองอร่าม รหัส 35104525

รศ. ศุภี บรรจงจิตร อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. สมชาติ จิรวิภากร อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2538

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้จัดทำขึ้นโดยมีจุดมุ่งหมายที่จะแสดงถึง ลักษณะของหม้อแปลงชนิดระบายความร้อนด้วยของเหลวและการสร้างโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการคำนวณค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในส่วนต่างๆ ของหม้อแปลงชนิดนี้ ทั้งที่เกิดขึ้นในขดลวดและของเหลวที่ใช้เป็นฉนวน และค่าอุณหภูมิ ณ จุดที่ร้อนที่สุด (Hot-Spot Temperature) ซึ่งเรานำค่าเหล่านี้มาใช้ในการวิเคราะห์หาความสามารถในการรับโหลดของหม้อแปลงว่าสามารถเพิ่มภาระให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าได้เต็มที่เท่าไรจึงไม่ทำให้หม้อแปลงเสียหายจากผลของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโดยสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าอุณหภูมิดังกล่าว อ้างอิงจากบทความของ IEEE TRANSACTION ON INDUSTRIAL APPLICATION VOL.30 NO.1 JAN / FEB ซึ่งสมการส่วนใหญ่อาศัยหลักของกฎการทรงพลังงาน สำหรับข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการคำนวณนั้น จะนำมาจากค่าพิกัดของหม้อแปลงที่ได้จากการทดสอบของผู้ผลิต และได้มีการพิจารณาผลของปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติมที่จะทำให้ได้ค่าที่มีความถูกต้องใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด ดังจะได้อธิบายถึงรายละเอียดต่าง ๆ ต่อไปนี้ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้.

Predicting Temperature Rise Of Oil Immerse Transformer

Jhtsada Naratuschan 35104080

Pichai Tachalertsuwat 35104295

Anuwat Rongluang-aram 35104525

Assc.Pro.Sulee Bunjongjit Advisor

Somchat Jilivipakorn Advisor

1995

Abstract

The objective of this thesis is to show the characteristics of oil immerse transformers and to create the active computer program that used to calculate various temperature in each part of the transformer. The program will show the temperature of the winding , fluid used for cooling and hot spot temperature. These values are used to predict the transformer loading capability and to find maximum load during the run time which at this load the transformer will not be failed . The equations used in this program are derived from a paper of IEEE TRANSACTION ON INDUSTRIAL APPLICATION VOL.30 NO.1 JAN / FEB . Almost all equations are refered by law of energy conservation. The primary data used to calculate is taken from the various transformer rated values. The analysis of other concerned factors is also included to adjust the most accurate values. The other details will be explained in the thesis.

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
Abstract	i
สารบัญ	iii
สารบัญรูป	vi
สารบัญตาราง	ix
สัญลักษณ์	x
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	2
2.1 ลักษณะโดยทั่วไปของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดน้ำมัน	2
2.2 ชนิดของหม้อแปลง	5
2.2.1 หม้อแปลงชนิดน้ำมัน	5
2.2.2 หม้อแปลงชนิดอัสคาเรล	5
2.2.3 หม้อแปลงชนิดบรรจุด้วยของเหลวไม่ติดไฟชนิดอื่นๆ	6
2.3 การเลือกชนิดของหม้อแปลง	8
2.4 ความร้อนที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง	9
2.5 การถ่ายเทความร้อนของหม้อแปลงชนิดน้ำมัน	10
2.5.1 การนำความร้อน	10
2.5.2 การพาความร้อน	10
2.5.3 การแผ่รังสีความร้อน	10
บทที่ 3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง	12
3.1 การเกิดโหลดเกินพิกัด	12
3.2 ข้อควรพิจารณาการใช้งานของโหลดของหม้อแปลงให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด	13
3.3 ชนิดของการระบายความร้อน	17
3.3.1. แบบอาศัยการไหลเวียนของน้ำมันและอากาศตามธรรมชาติ (Natural circulation of oil and air, ONAN)	20
3.3.2.แบบการไหลเวียนของน้ำมันตามธรรมชาติแต่มีพัดลมช่วย ระบายความร้อนออกสู่อากาศ (Natural Circulation of oil ; forced ventilation of air , ONAF)	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3. แบบมีปั๊มช่วยการไหลเวียนของน้ำมันและพัดลมเป่า (Forced circulation of oil and air ,OFAF)	22
3.3.4. แบบการไหลเวียนภายในโดยตรง (Directed oil circulation ; forced air circulation, ODAF)	23
3.3.5. การระบายความร้อนแบบไม่โดยตรง (Non-directed forced oil circulation and forced air circulation , NDFOA)	24
3.4 ฉนวนของเหลวที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้า	24
3.4.1 น้ำมันปิโตรเลียม (Petroleum Base Insulating Oil)	25
3.4.2 อัสคาเรล (Askarels)	27
3.4.3 ซิลิโคน (Silicone)	28
3.4.4 เฮกซีเฮกเซส (HTHs)	29
3.4.5 เทตราโคลโร เอทธีลีน (Tetrachloro ethlene)	30
3.4.6 วัสดุอื่น ๆ	31
3.5 ชนิดของขดลวดที่นำมาใช้เป็นลวดตัวนำในหม้อแปลง	33
3.6 ฉนวนของขดลวดตัวนำ	36
บทที่ 4 การวิเคราะห์สมการที่ใช้ในการหาค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นและผลกระทบของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ	38
4.1 ค่าอุณหภูมิขดลวดเฉลี่ย	38
4.2 ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำมันในท่อน้ำมันในขดลวด	39
4.3 ค่าอุณหภูมิมียอดสปอตของขดลวด	40
4.4 อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำมัน	42
4.5. อุณหภูมิของน้ำมันทางด้านบน และ ด้านล่างของหม้อแปลง	44
4.6. ค่าความหนืดของของเหลวและค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุที่ใช้	44
บทที่ 5 ผลการทดลองและโปรแกรมที่ใช้	46
5.1 โปรแกรมภาษาปาสคาลต้นแบบในการคำนวณ	46
5.2 ผลการรันโปรแกรม	53
5.3 ตัวอย่างการทดสอบโปรแกรม	54
5.4 การแสดงผลโดยผ่านโปรแกรมวิซวลเบสิก	65
5.5 แผนภูมิแสดงขั้นตอนในการคำนวณของโปรแกรม	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6 สรุปวิเคราะห์ผลการทดลองและข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น

70

จากการทดลอง

หนังสืออ้างอิง

กิตติกรรมประกาศ



สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบที่สำคัญของหม้อแปลงไฟฟ้า	2
รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของหม้อแปลงชนิดใช้ของเหลวระบายความร้อน	4
รูปที่ 2.3 หม้อแปลงชนิดน้ำมัน	6
รูปที่ 2.4 หม้อแปลงชนิดอัสคาเรล	7
รูปที่ 2.5 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เป็นแบบเอกซ์โปเนนเชียล	9
รูปที่ 2.6 ทิศทางการพาความร้อนของน้ำมันหม้อแปลง	11
รูปที่ 2.7 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำมัน	11
รูปที่ 3.1 แสดงกราฟระหว่างโหลดของหม้อแปลงกับความสูญเสียที่เกิดขึ้น	15
รูปที่ 3.2 แสดงกราฟประสิทธิภาพของหม้อแปลง A - E ที่โหลดค่าต่างๆ	15
รูปที่ 3.3 นำรูปที่ 3.2 มาเขียนใหม่แสดงการเกิดประสิทธิภาพสูงสุดของหม้อแปลงแต่ละตัว	16
รูปที่ 3.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในขดลวด	19
รูปที่ 3.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในตัวระบายความร้อน	19
รูปที่ 3.6 แสดงการกระจายอุณหภูมิ ณ ส่วนต่าง ๆ ภายในหม้อแปลง	20
รูปที่ 3.7 การระบายความร้อนแบบอาศัยการไหลเวียนของน้ำมันและ อากาศตามธรรมชาติ, อธิบายกราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ : $AB =$ น้ำมันใน ตัวระบายความร้อน ; $AC =$ น้ำมันในขดลวด ; $DE =$ ทองแดงในขดลวด ; $F =$ อุณหภูมิสูงสุด ; $AD = CE =$ ช่วงต่างของน้ำมันกับทองแดง ; $G =$ อุณหภูมิ เพิ่มขึ้นเฉลี่ยของทองแดง (average temperature rise)	21
รูปที่ 3.8 แสดงการไหลเวียนแบบเพิ่ม พัดลมช่วยระบายความร้อน;การกระจาย ของอุณหภูมิเป็นลักษณะเดียวกับรูปที่ 3.7	21
รูปที่ 3.9 หม้อแปลงแบบมีปั๊มช่วยแรงการไหลเวียนและโคอะแกรมแสดงอุณหภูมิ ที่เกิดขึ้น	22
รูปที่ 3.10 การระบายความร้อนของหม้อแปลง แบบมีปั๊มช่วยการไหลเวียนของ น้ำมันและพัดลมเป่า	22
รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะการระบายความร้อนแบบโดยตรง	23

รูปที่ 3.13 แสดงชนิดการผันขดลวดของหม้อแปลง	35
รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกับเวลาของหม้อแปลงที่มีการระบายความร้อนแบบอาศัยการไหลเวียนของน้ำมันและอากาศตามธรรมชาติ	55
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกับเวลาของหม้อแปลงที่มีการระบายความร้อนแบบอาศัยการไหลเวียนของน้ำมันและอากาศตามธรรมชาติแต่มีพัดลมช่วยระบายความร้อนออกสู่อากาศ	56
รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกับเวลาของหม้อแปลงที่มีการระบายความร้อนแบบอาศัยการไหลเวียนแบบไม่โดยตรง	57
รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกับเวลาของหม้อแปลงที่มีการระบายความร้อนแบบอาศัยการไหลเวียนภายในโดยตรง	58
รูปที่ 5.5 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ที่ค่าภาระต่างๆกันของหม้อแปลงที่มีการระบายความร้อนแบบอาศัยการไหลเวียนของน้ำมันและอากาศตามธรรมชาติ	59
รูปที่ 5.6 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ที่ค่าภาระต่างๆกันของหม้อแปลงที่มีการระบายความร้อนแบบอาศัยการไหลเวียนของน้ำมันและอากาศตามธรรมชาติแต่มีพัดลมช่วยระบายความร้อนออกสู่อากาศ	60
รูปที่ 5.7 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ที่ค่าภาระต่างๆกันของหม้อแปลงที่มีการระบายความร้อนแบบไม่โดยตรง	61
รูปที่ 5.8 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ที่ค่าภาระต่างๆกันของหม้อแปลงที่มีการระบายความร้อนแบบอาศัยการไหลเวียนของน้ำมันภายในโดยตรง	62
รูปที่ 5.9 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่คำนวณกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริงของหม้อแปลงขนาด 52.627 MVA ที่มีการระบายความร้อนแบบการไหลเวียนของน้ำมันตามธรรมชาติและมีพัดลมช่วยระบายความร้อน	63

รูปที่ 5.10 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่คำนวณกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริงของ หม้อแปลงขนาด 52.627 MVA ที่มีการระบายความร้อนแบบไม่โดยตรง	64
รูปที่ 5.11 แสดงหน้าจอที่ 1 ของโปรแกรม	65
รูปที่ 5.12 แสดงส่วนที่ 2 ซึ่งผู้ใช้สามารถเลือกได้	65
รูปที่ 5.13 แสดงตัวเลือกชนิดของการระบายความร้อน	66
รูปที่ 5.14 ส่วนการรับค่าชนิดของของเหลวที่ใช้	66
รูปที่ 5.15 เลือกชนิดของขดลวด	66
รูปที่ 5.16 ป้อนค่าน้ำหนักของส่วนต่างๆของหม้อแปลง	67
รูปที่ 5.17 ป้อนค่าอุณหภูมิขณะหม้อแปลงทำงานที่สภาวะโหลดเกินปกติ	67
รูปที่ 5.18 ป้อนค่าความสูญเสียต่างๆของหม้อแปลง	67
รูปที่ 5.19 ป้อนค่าช่วงเวลาในการคำนวณแต่ละครั้งและค่าคงตัวเวลา	68
รูปที่ 5.20 เลือกหม้อแปลงตัวอย่าง	.
รูปที่ 5.21 การแสดงค่าอุณหภูมิตามแต่ผู้ใช้ต้องการหาหรือดูเปรียบเทียบกัน	68
รูปที่ 5.22 แผนภูมิแสดงขั้นตอนในการคำนวณ	69

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 วิธีการระบายความร้อนแบบต่างๆ	18
ตารางที่ 3.2 ASTM D-3487	26
ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติเฉพาะของสารอีพอกซีเรต	28
ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติเฉพาะของสาร ซิลิโคน	29
ตารางที่ 3.5 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติเฉพาะของสาร HTHs	30
ตารางที่ 3.6 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติเฉพาะของสาร C_2Cl_4	30
ตารางที่ 3.7 ตารางแสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้า	31
ตารางที่ 3.8 แสดงความหมายและผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจาก คุณลักษณะจำเพาะ ของของเหลว	32
ตารางที่ 3.9 ค่าคุณสมบัติเฉพาะของทองแดงและอลูมิเนียมที่ 20 องศาเซลเซียส	34
ตารางที่ 3. 10 แสดงลักษณะการผันผวนของหม้อแปลงชนิดต่างๆ	34
ตารางที่ 3.11 แสดงค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ฉนวนแต่ละชนิดทนได้	36
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความหนืด	45
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความจุความร้อนจำเพาะ และค่าคงที่ เพื่อใช้ในการคำนวณหา ค่าความหนืด	45
ตารางที่ 5.1 แสดงคุณลักษณะของหม้อแปลง	54

สัญลักษณ์ที่ใช้

สัญลักษณ์	ความหมาย
B	ค่าคงที่ของสมการความหนืด
C	ค่าคงที่ของสมการความหนืด
$C_{P_{CORE}}$	ค่าความร้อนจำเพาะของแกนเหล็ก วัตต์-นาท./ ปอนด์ °C
$C_{P_{OIL}}$	ค่าความร้อนจำเพาะของของเหลว วัตต์-นาท./ ปอนด์ °C
$C_{P_{TANK}}$	ค่าความร้อนจำเพาะของถังหม้อแปลง วัตต์-นาท./ ปอนด์ °C
C_{P_W}	ค่าความร้อนจำเพาะของขดลวด วัตต์-นาท./ ปอนด์ °C
E_{HS}	P_E / P_W
H_{HS}	ค่าความสูงของขดลวด, Per Unit
K_{HS}	ค่า Temperature Correction ของการสูญเสียของขดลวดที่จุดที่ร้อนที่สุด
K_W	ค่า Temperature Correction ของการสูญเสียของขดลวด
L	ขนาดของโหลดที่คิดเป็น Per Unit ของโหลดที่พิกัด
M_{CC}	น้ำหนักของแกนเหล็กและขดลวด, ปอนด์
M_{CORE}	น้ำหนักของแกนเหล็ก, ปอนด์
M_{OIL}	น้ำหนักของของเหลวในหม้อแปลง, ปอนด์
M_{TANK}	น้ำหนักของถังหม้อแปลง, ปอนด์
M_W	น้ำหนักของขดลวด, ปอนด์
$P_{C,R}$	ค่าความสูญเสียที่แกนเหล็กที่พิกัดของหม้อแปลง, วัตต์
$P_{C,OE}$	ค่าความสูญเสียที่แกนเหล็กที่ขณะโหลดเกินพิกัด, วัตต์
P_E	ค่าความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy Current Loss) ที่พิกัดของหม้อแปลง, วัตต์
P_{EHS}	ค่าความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนที่ขณะโหลดเกินพิกัดของหม้อแปลง, วัตต์
P_S	ค่าความสูญเสียจากโครงสร้างของหม้อแปลง (Stray Loss) ที่พิกัดของหม้อแปลง, วัตต์
P_T	ค่าความสูญเสียรวมทั้งหมดของหม้อแปลง, วัตต์
P_W	ค่าความสูญเสียที่ขดลวด ที่พิกัดของหม้อแปลง, วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P_{WHS}	ค่าความสูญเสียที่ขดลวด ที่ขณะไหลเกินพิกัดของหม้อแปลง,วัตต์
$Q_{ABS,HS}$	ค่าพลังงานความร้อนที่ถูกดูดซับโดยขดลวดที่อุณหภูมิฮอตสปอต,วัตต์-นาที่.
$Q_{ABS,O}$	ค่าพลังงานความร้อนที่ถูกดูดซับโดยถังหม้อแปลง,แกนเหล็กและของเหลวที่อยู่ภายในหม้อแปลง ,วัตต์-นาที่
$Q_{ABS,W}$	ค่าพลังงานความร้อนที่ถูกดูดซับโดยขดลวด ,วัตต์-นาที่
Q_C	ค่าพลังงานความร้อนที่เกิดจากแกนเหล็ก ,วัตต์-นาที่
$Q_{GEN,HS}$	ค่าพลังงานความร้อนที่เกิดจากแกนเหล็กที่ อุณหภูมิฮอตสปอต,วัตต์-นาที่
$Q_{GEN,W}$	ค่าพลังงานความร้อนที่เกิดจากขดลวด ,วัตต์-นาที่
$Q_{LOST,HS}$	ค่าพลังงานความร้อนที่สูญเสียที่อุณหภูมิฮอตสปอต ,วัตต์-นาที่
$Q_{LOST,O}$	ค่าพลังงานความร้อนที่สูญเสียจากของเหลวไปยังอากาศ ,วัตต์-นาที่
$Q_{LOST,W}$	ค่าพลังงานความร้อนที่สูญเสียจากขดลวดไปยังน้ำมัน ,วัตต์-นาที่
Q_s	ค่าพลังงานความร้อนที่สร้างโดย สเตอรอส ,วัตต์-นาที่.
T	ค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความหนืด,°C
T_A	ค่าอุณหภูมิของอากาศรอบๆหม้อแปลง,°C
$T_{A,R}$	ค่าอุณหภูมิของอากาศรอบหม้อแปลงที่พิกัด,°C
T_{BO}	ค่าอุณหภูมิของของเหลวที่ก้นถัง,°C
$T_{BO,R}$	ค่าอุณหภูมิของของเหลวที่ก้นถังที่พิกัด,°C
T_{DAO}	ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของของเหลวในท่อระบายความร้อน,°C
$T_{DAO,R}$	ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของของเหลวในท่อระบายความร้อน ที่พิกัด,°C
T_{TDO}	ค่าอุณหภูมิของของเหลวที่ด้านบนของถัง,°C
$T_{TDO,R}$	ค่าอุณหภูมิของของเหลวที่ด้านบนของถังที่พิกัด,°C
T_{HS}	ค่าอุณหภูมิฮอตสปอต,°C
T_K	ค่าคงที่ของอุณหภูมิสำหรับขดลวดที่มีความต้านทานต่างกัน,°C
T_O	ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของของเหลวในถังหม้อแปลงและตัวระบายความร้อน,°C
T_{TO}	ค่าอุณหภูมิของของของเหลวทางด้านบนของถังหม้อแปลงและตัวระบายความร้อน ,°C

$T_{TO,R}$	ค่าอุณหภูมิของของเหลวทางด้านบนของถังหม้อแปลงและตัวระบายความร้อนที่พิกัด, °C
T_w	ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวด, °C
T_{wo}	ค่าอุณหภูมิของของเหลวที่ติดกับขดลวดที่จุดสอดคล้อง, °C
$T_{wo,R}$	ค่าอุณหภูมิของของเหลวที่ติดกับขดลวดที่จุดสอดคล้องที่พิกัด, °C
$T_{w,R}$	ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดที่พิกัด, °C
ΔT_{DO}	ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของของเหลวทางด้านบนของท่อระบายความร้อนเทียบกับทางด้านล่างของท่อระบายความร้อน, °C
ΔT_T	ค่าอุณหภูมิของของเหลวที่เพิ่มขึ้นทางด้านบนของตัวระบายความร้อนเทียบกับทางด้านล่างของตัวระบายความร้อน, °C
ΔT_{wo}	ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของของเหลว ณ จุดที่ติดกับจุดสอดคล้องเทียบกับอุณหภูมิของของเหลวด้านล่างถังหม้อแปลง, °C
Δt	เวลาที่เพิ่มขึ้นเพื่อใช้ในการคำนวณ , นาที
x	ค่า ตัวประกอบยกกำลัง ของของเหลวที่ใช้ในการคำนวณ เท่ากับ 0.5 สำหรับวิธีการระบายความร้อนแบบ OA , FA และ NDFOA เท่ากับ 1.0 สำหรับวิธีการระบายความร้อนแบบ DFOA
y	ค่า ตัวประกอบยกกำลัง ของของเหลวที่ใช้ในการคำนวณ เท่ากับ 0.8 สำหรับวิธีการระบายความร้อนแบบ OA เท่ากับ 0.9 สำหรับวิธีการระบายความร้อนแบบ FA และ NDFOA เท่ากับ 1.0 สำหรับวิธีการระบายความร้อนแบบ DFOA
z	ค่า ตัวประกอบยกกำลัง ของของเหลวที่ใช้ในการคำนวณ เท่ากับ 0.5 สำหรับวิธีการระบายความร้อนแบบ OA และ FA เท่ากับ 1.0 สำหรับวิธีการระบายความร้อนแบบ NDFOA และ DFOA
θ_{BO}	ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่ด้านล่างถึงน้ำมันเปรียบกับอุณหภูมิห้อง °C
θ_{TO}	ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่ด้านบนถึงน้ำมันเปรียบกับอุณหภูมิห้อง °C

μ เอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

μ_{HS}	ค่าความหนืดของของเหลวที่ใช้ในการคำนวณค่าอุณหภูมิสอตสปอต, centipoise
$\mu_{HS,R}$	ค่าความหนืดของของเหลวที่ใช้ในการคำนวณค่า ค่าอุณหภูมิสอตสปอต ที่พิกัด ,centipoise
μ_w	ค่าความหนืดของของเหลวที่ใช้ในการคำนวณค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของขด ลวด ,centipoise
$\mu_{w,R}$	ค่าความหนืดของของเหลวที่ใช้ในการคำนวณค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของขด ลวดที่พิกัด ,centipoise
τ_w	ค่าคงที่ของเวลา (Time constant) ,นาที่
t	คืออายุการใช้งานของหม้อแปลง
t_o	คือค่าคงที่ ขึ้นอยู่กับอายุการใช้งาน
θ	คือ ช่วงอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น °C
ตัวห้อย	1,2 จะบอกถึงสถานะของเวลาในขณะนั้น

บทที่ 1

บทนำ

ในการใช้งานหม้อแปลงในสถานะโดยทั่วไปนั้น เราจะพบว่าบ่อยครั้งความเสียหายที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงนั้นมีสาเหตุมาจากการใช้งานที่สถานะโหลดเกินพิกัด (OVERLOAD) ที่เกิดขึ้นบ่อยๆครั้ง ซึ่งทำให้อุณหภูมิของหม้อแปลงเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว อันอาจก่อให้เกิดความเสียหายขึ้นกับฉนวนที่หุ้มขดลวดอยู่ และทำให้เกิดการ ลัดวงจร ทำความเสียหายกับหม้อแปลงโดยรวมได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีการที่ว่าทำอย่างไรถึงจะให้หม้อแปลงได้อย่างคุ้มค่าและไม่ทำให้หม้อแปลงเกิดความเสียหาย โดยการพิจารณาผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงของแต่ละสภาพการใช้นั้นๆ ว่าก่อให้เกิดความเสียหายต่อหม้อแปลงตัวนั้นหรือไม่ ซึ่งในที่นี้ได้ทำการสร้างโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อใช้ในการคำนวณค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้น มาใช้แทนการวัดจากอุปกรณ์จริง เช่น เทอร์โมคอปเปิล (Thermocouples) หรือวัดจากผลของการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่สะดวก และสิ้นเปลืองกว่า ประโยชน์อีกอย่างที่ได้สำหรับโปรแกรมนี้อีก จะช่วยในการตัดสินใจของผู้ผลิตในการพิจารณาการออกแบบหม้อแปลง เพื่อให้ได้ต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุด เนื่องจากการที่ได้ทราบสถานะของหม้อแปลงภายใต้สถานะโหลดต่างๆกัน

สำหรับโปรแกรมสำเร็จรูปตัวนี้สามารถนำไปใช้งานได้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลธรรมดา เพียงแต่ป้อนค่า อินพุตตามข้อมูลตามผู้ผลิตให้เข้ากับตัวหม้อแปลงซึ่งเราเรียกว่าค่าที่พิกัดต่างๆเข้าไป โปรแกรมก็จะแสดงค่าอุณหภูมิที่จุดต่างๆของหม้อแปลงเทียบกับเวลาโดยเฉพาะ ค่าอุณหภูมิฮอตสปอตที่ใช้ในการทำนายอายุของหม้อแปลงตัวนั้นด้วย

ก่อนที่จะมาพิจารณาตัวโปรแกรมเราควรจะต้องศึกษาดังหลักการและโครงสร้างโดยพื้นฐานของหม้อแปลงเสียก่อนซึ่งแสดงไว้ในบทที่ 2 ส่วนในบทที่ 3 และ บทที่ 4 จะอธิบายถึงสมการในการคำนวณหาค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้น และปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ตัวโปรแกรมและการใช้งานโปรแกรมจะแสดงไว้ในบทที่ 5

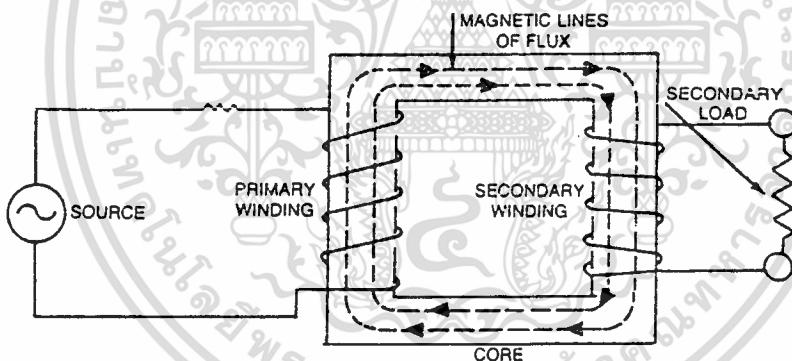
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ลักษณะโดยทั่วไปของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดน้ำมัน

หม้อแปลงไฟฟ้าคืออุปกรณ์ที่สามารถแปลงเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ตามต้องการ และกระแสไฟฟ้าสลับจะสามารถแปลงค่าแรงดันให้สูงไว้เพื่อเมื่อเกิดแรงดันลดด้านปลายทางซึ่งจะติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าที่ปลายทางอีกตัวหนึ่งเพื่อปรับค่าแรงดันที่ตกลงมาให้สูงขึ้นเพื่อจ่ายให้แก่ผู้ใช้ อีกทีหนึ่ง ในขณะที่ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นไม่มีอุปกรณ์อื่นใดที่จะมาเพิ่มหรือลดค่าแรงดันไฟฟ้าได้ จึงทำให้ไฟฟ้ากระแสตรงมีปัญหาเกี่ยวกับเรื่องแรงลดที่ปลายทางจึงต้องยกเลิกการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในที่สุด

หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่ในทุกวันนี้ก็ยังคงมีหลักการเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นมาตัวแรก ส่วนประกอบที่สำคัญของหม้อแปลงมีสามส่วนได้แก่ แกนแม่เหล็ก , ขดลวดทางด้นปฐมภูมิ และขดลวดทางด้นทุติยภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบที่สำคัญของหม้อแปลงไฟฟ้า

อัตราส่วนระหว่างจำนวนของขดลวดทางด้นปฐมภูมิและทางด้นทุติยภูมิจะเป็นตัวกำหนดว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าจากต้นทางนั้นจะถูกเพิ่มขึ้นหรือลดลง หรือมีค่าคงที่ (ในกรณีของ ISOLATION TRANSFORMER) ทางด้นทุติยภูมิ

ไฟฟ้ากระแสสลับที่ไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิจะทำให้แกนของหม้อแปลงกลายเป็นแม่เหล็กและก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวดทางด้นทุติยภูมิ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นนี้เป็นสัดส่วนกับอัตราส่วนของจำนวนขดลวดทางด้นปฐมภูมิเมื่อเทียบกับทางด้นปฐมภูมิ ในประเทศไทยหม้อแปลงที่เห็นติดตั้งอยู่ตามเสาไฟฟ้าริมถนนนั้นจะแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงให้เป็นไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ใช้ตามบ้าน คือ จากแรงดันไฟฟ้า 1200 โวลต์ หรือ 2400 โวลต์ แปลงลงมาเป็นไฟฟ้าแรงต่ำที่ 380 โวลต์ อัตราส่วนของขดลวดทางดำนปฐมภูมิเทียบกับดำนทุติยภูมิก็จะเป็น 3.15 ต่อ 1 และ 6.3 ต่อ 1 ตามลำดับ

โดยปกติแล้วเราจะไม่กำหนดคุณสมบัติของหม้อแปลงโดยพูดถึงอัตราส่วนของขดลวด แต่จะกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าทางดำนปฐมภูมิเทียบกับดำนทุติยภูมิเป็นหลักโดยเรียกเป็นค่า KVA หรือ MVA ขึ้นอยู่กับขนาดของมอเตอร์ ซึ่งผลคูณของค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสจากต้นทางก็จะมีค่าใกล้เคียงกับผลลัพท์ทางดำนปลายทาง เนื่องจากมีความสูญเสียในขดลวด และแกนแม่เหล็กต่างๆ น้อยมาก

ดังนั้น สมการขั้นพื้นฐานที่จะกำหนดความสัมพันธ์ของค่าแรงดันไฟฟ้ากับจำนวนขดลวดของหม้อแปลงจะสามารถเขียนได้ดังนี้คือ

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

เมื่อ	n	คือ	อัตราส่วนจำนวนรอบ (TURN RATIO)
	E_1	คือ	ค่าแรงดันไฟฟ้าทางดำนปฐมภูมิ
	E_2	คือ	ค่าแรงดันไฟฟ้าทางดำนทุติยภูมิ
	N_1	คือ	จำนวนขดลวดทางดำนปฐมภูมิ
	N_2	คือ	จำนวนขดลวดทางดำนทุติยภูมิ

สำหรับหม้อแปลงในอุดมคติจะไม่มีการสูญเสียทางด้านความร้อน และสามารถถ่ายเทพลังงานแม่เหล็กได้อย่างเต็มที่พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ขดลวดปฐมภูมิจะเท่ากับพลังงานไฟฟ้าที่ออกมาจากขดลวดทุติยภูมิ ดังนั้นจึงเขียนได้ว่า

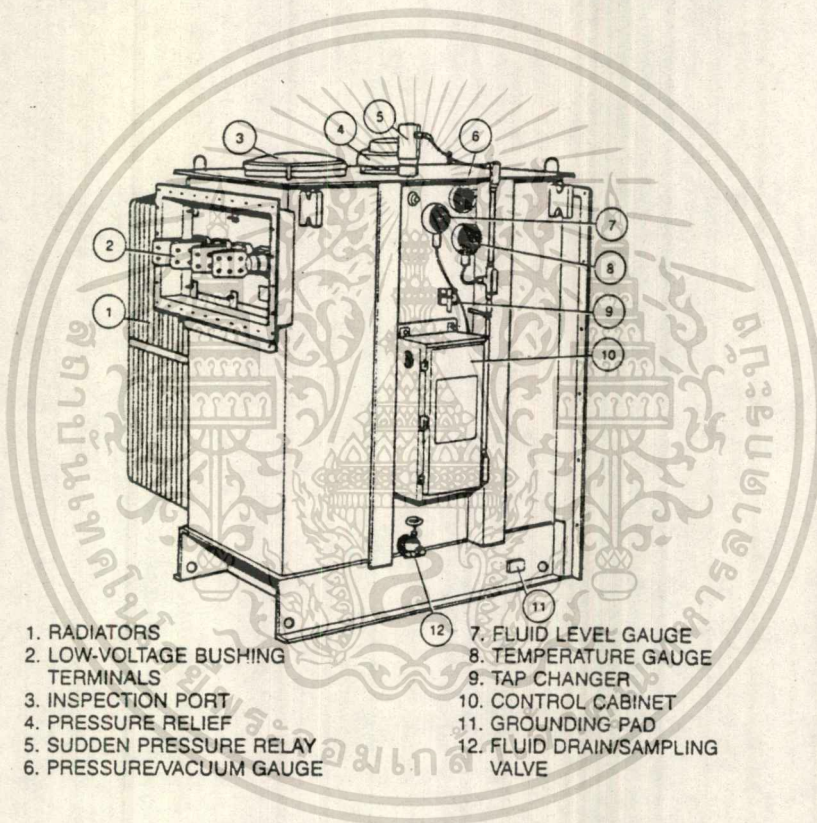
$$E_1 I_1 = E_2 I_2$$

เมื่อ	I_1	คือ	กระแสทางดำนปฐมภูมิ
	I_2	คือ	กระแสทางดำนทุติยภูมิ

และความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์ คือ

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{\frac{E_1}{I_2}}{\frac{E_2}{I_1}} = n^2$$

เมื่อ Z_1 คือ ค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านปฐมภูมิ
 Z_2 คือ ค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านทุติยภูมิ



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของหม้อแปลงชนิดใช้ของเหลวระบายความร้อน

1. ครัวระบายความร้อน
2. ขั้วต่อสายทางด้นแรงดันต่ำ
3. ช่องตรวจสอบ (INSPECTION PORT)
4. ช่องระบายความดันจากภายในหม้อแปลง
5. รีเลย์ความดัน สำหรับตัดเมื่อค่าความดันในหม้อแปลงสูงเกินกว่าที่กำหนด
6. ตัววัดความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.ตัววัดระดับของเหลว

8.ตัววัดอุณหภูมิ

9.แทปสำหรับเปลี่ยนรอบขดลวด

10.คูควบคุม

11.จุดต่อสายดิน

12.วาล์วระบายของเหลวเพื่อตรวจสอบของเหลวภายในหม้อแปลง

2.2 ชนิดของหม้อแปลง

หม้อแปลงสามารถแบ่งตามชนิดของฉนวนได้สองประเภทคือ แบบใช้ของเหลวเป็นฉนวน และแบบแห้ง ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะแบบที่ใช้ของเหลวเป็นฉนวนเท่านั้น ซึ่งหม้อแปลงแบบใช้ของเหลวเป็นฉนวนสามารถแบ่งได้เป็น

2.2.1.หม้อแปลงชนิดน้ำมัน

หม้อแปลงชนิดน้ำมันจะมีราคาถูกที่สุดในบรรดาหม้อแปลงที่ใช้ของเหลว โดยจะมีขดลวดที่บรรจุอยู่ในตัวถัง และภายในบรรจุด้วยน้ำมันหม้อแปลง

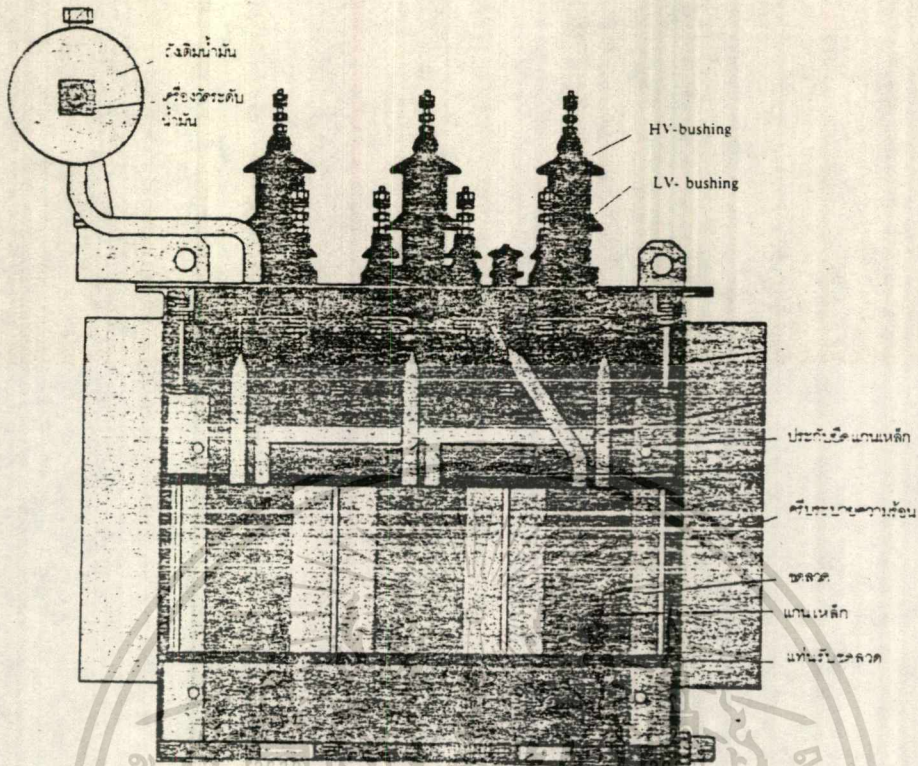
น้ำมันจะทำหน้าที่เป็นฉนวนระหว่างตัวถังกับขดลวด และระหว่างขดลวดกับแกนเหล็ก นอกจากนี้ยังเป็นตัวระบายความร้อน ที่จะรับความร้อนจากขดลวด และส่งผ่านไปยังตัวถังของหม้อแปลง ที่ตัวถังจะทำครีระบายความร้อน เพื่อให้ระบายความร้อนจากหม้อแปลง หรืออาจมีการทำหม้อระบายความร้อนซึ่งสามารถติดตั้งพัดลมเพื่อเป่าลมระบายความร้อน ซึ่งจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของหม้อแปลงได้ถึง 15% (สำหรับหม้อแปลงที่ขนาดตั้งแต่ 750-2000 KVA) และ 25% (สำหรับหม้อแปลงที่มีขนาดตั้งแต่ 2500 ไปจนถึง 10000 KVA) เนื่องจากน้ำมันสามารถติดไฟได้ หม้อแปลงชนิดนี้จึงเหมาะที่จะใช้งานภายนอกอาคารเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ได้มีการนำหม้อแปลงชนิดนี้มาใช้งานภายในอาคารเช่นเดียวกัน แต่จำเป็นต้องสร้างห้องบรรจุหม้อแปลงที่มีผนังกันไฟ และจะต้องมีบ่อสำหรับเก็บน้ำมันที่อาจเกิดรั่วไหลออกมาจากตัวถังของหม้อแปลง และควรมีระบบดับเพลิงอัตโนมัติติดตั้งไว้ในห้องที่บรรจุหม้อแปลงด้วย

2.2.2.หม้อแปลงชนิด อัสคาเรล (ASKAREL)

เนื่องจากปัญหาการติดไฟของน้ำมันจึงได้มีการคิดค้นหาของเหลวชนิดใหม่ที่ไม่ติดไฟ ซึ่งเป็นสารที่สังเคราะห์มาจาก โพลีคลอไรด์ไบฟีนิล และรู้จักกันในชื่อของ อัสคาเรล ได้ถูกนำมาใช้บรรจุในหม้อแปลงตั้งแต่ปีพ.ศ. 2488 เป็นต้นมา การที่สารอัสคาเรล ไม่ติดไฟทำให้สามารถสร้างหม้อแปลงที่สามารถนำมาใช้ภายในอาคารได้อย่างปลอดภัย หม้อแปลงชนิดที่บรรจุด้วยสารอัสคาเรลดังกล่าวได้รับความนิยมมาประมาณ 30 ปีแล้ว หม้อแปลงชนิดนี้มีข้อดีตรงที่สามารถป้องกัน

อันตรายจากการระเบิดและการเกิดอัคคีภัยได้ การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 รูปของหม้อแปลงชนิดน้ำมัน

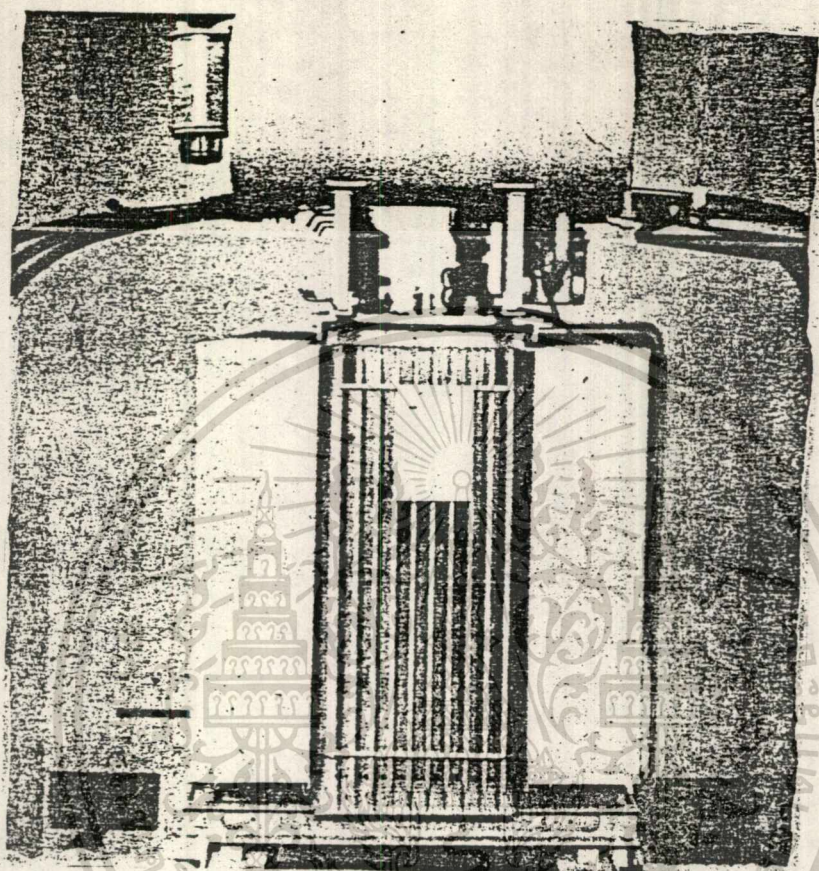
ต่อมาเมื่อมีการพบว่า สารโพลีคลอริเนตเตดไบฟีนิล หรือ PCB ที่อยู่ในสารอัสคาเรลเป็นสารที่เป็นพิษ ทั้งในกรณีที่เกิดการเผาไหม้ หรือแม้แต่ในสภาพปกติ นอกจากนี้ยังยากแก่การกำจัดประเทศต่างๆ จึงห้ามการนำหม้อแปลงชนิดนี้มาใช้งาน เช่น ประเทศญี่ปุ่นห้ามใช้ตั้งแต่ปีพ.ศ. 2515 และประเทศสหรัฐอเมริกาห้ามใช้ตั้งแต่ปีพ.ศ. 2521 และห้ามผลิตตั้งแต่พ.ศ. 2518 เป็นต้นมา ส่วนสถาบันการป้องกันสภาวะแวดล้อม (environmental protection agency หรือ EPA.) แห่งสหรัฐอเมริกา ก็ได้วางข้อกำหนดอย่างเข้มงวดสำหรับสำหรับควบคุมการใช้งานหม้อแปลงชนิดนี้ จึงกล่าวได้ว่าในปัจจุบันหม้อแปลงชนิดนี้ได้เลิกทำการผลิตไปแล้ว ส่วนหม้อแปลงที่ใช้อยู่ก็จะสามารถใช้งานได้จนหมดอายุการใช้งานเท่านั้น

2.2.3. หม้อแปลงชนิดบรรจุด้วยของเหลวไม่ติดไฟชนิดอื่น

จากการใช้หม้อแปลงชนิดบรรจุด้วยสารอัสคาเรล และมีการค้นพบว่าก่อให้เกิดปัญหาขึ้น จึงได้มีการคิดค้นของเหลวประเภทต่างๆ ที่ไม่ติดไฟมาใส่ในหม้อแปลงแทนของเหลวที่นิยมกันก็ได้แก่ โพลีอัลฟาโอเลฟินและซิลิโคนซึ่งซิลิโคนเป็นที่รู้จักกันอย่างดี และแพร่หลายมากกว่าโพลีอัลฟาโอเลฟิน โดยที่ซิลิโคนไม่ก่อให้เกิดปัญหากับสภาพแวดล้อม และเป็นของเหลวจำพวกที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายถึงแม้จะไม่สามารถสลายตัวได้ตามธรรมชาติแต่น้ำมัน ซิลิโคนถูกเผาก็จะเกิดควันเพียงเล็กน้อยเท่านั้นและไม่มีสารพิษเกิดขึ้น แม้ว่าตัวมันเองสามารถติดไฟได้แต่ก็สามารถดับเองได้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(self extinguished) เนื่องจากสารซิลิเนียมไดออกไซด์ (SiO_2) ที่เกิดจากการถูกไหม้ของหม้อแปลงจะทำหน้าที่ในการดับเปลวเพลิง



รูปที่ 2.4 หม้อแปลงชนิดอัสคาร์ล

อย่างไรก็ตามการนำน้ำมันซิลิโคนมาบรรจุในหม้อแปลงมีข้อเสียอื่นๆหลายประการ คือ น้ำมันซิลิโคนมีราคาสูงกว่าน้ำมันหม้อแปลงธรรมดา 8-10 เท่า และก็ยังมีราคาสูงกว่าอัสคาร์ล ดังนั้นหม้อแปลงประเภทนี้จึงมีราคาสูงกว่าหม้อแปลงแบบเดิม

น้ำมันซิลิโคนมีค่าความหนืดสูง ถ้าเปรียบกับหม้อแปลงขนาดเดียวกันที่ใช้ของเหลวชนิดอื่น ค่า KVA จะลดลงประมาณ 6-10% เนื่องจากน้ำมันซิลิโคนความสามารถในการระบายความร้อนเร็วกว่าน้ำมันชนิดอื่น

น้ำมันซิลิโคนมีสัมประสิทธิ์ในการขยายตัวสูง จึงต้องสร้างภาชนะบรรจุที่ค่อนข้างแบนของหม้อแปลงให้มีขนาดใหญ่กว่าหม้อแปลงชนิดอื่นๆ และเป็นการไม่ประหยัดที่จะสร้างหม้อแปลงแบบปกปิดมิดชิด นอกจากนี้การที่น้ำมันซิลิโคนมีความสามารถในการดูดกลืนความชื้นที่สูงกว่าน้ำมันหม้อแปลงชนิดอื่นๆ จึงจำเป็นจะต้องมีตัวดูดความชื้นที่ดี ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาในเรื่องของการบำรุงรักษาตามมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมาไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม้ว่าหม้อแปลงชนิดนี้จะไม่ต้องการห้องเก็บชนิดป้องกันไฟ แต่ก็จำเป็นจะต้องสร้างถึงสำหรับเก็บกักน้ำมันที่เกิดการรั่วไหลเพื่อให้สามารถรับน้ำมันซิลิโคนทั้งหมดที่มีอยู่ในหม้อแปลงได้

น้ำมันซิลิโคนนั้นจะทำหน้าที่เป็นตัวทำละลาย ดังนั้น ถ้ามีน้ำมันซิลิโคน ไหลออกมาเป็นภายนอกตัวถัง สีที่ทาหีบจะไม่ติดกับสีรองพื้นอีกต่อไป

ดังนั้น จึงจะเห็นได้ว่า หม้อแปลงที่บรรจุน้ำมันซิลิโคนนั้น สามารถแก้ปัญหาในเรื่องที่เกี่ยวกับอันตรายจากอัคคีภัย หรือเพลิงไหม้ที่เกิดขึ้นจากน้ำมันหม้อแปลงได้เท่านั้นเอง แต่ก็ยังมีปัญหาอื่นๆ ที่ยังคงเป็นข้อเสียของหม้อแปลงชนิดนี้อยู่

2.3 การเลือกชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้า

การเลือกชนิดของหม้อแปลงนั้นขึ้นอยู่กับว่า เราต้องการที่จะติดตั้งหม้อแปลงอยู่ภายในหรือภายนอกอาคาร ในกรณีที่ต้องการจะติดตั้งหม้อแปลงภายนอกอาคารนั้นแล้วหม้อแปลงที่เหมาะสมที่สุดก็คือ หม้อแปลงชนิดใช้น้ำมัน ซึ่งมีตัวถังปกปิดมิดชิดและสามารถทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศได้เป็นอย่างดี ส่วนในกรณีของหม้อแปลงแบบแห้งนั้นไม่เหมาะสมสำหรับที่จะใช้งานภายนอกอาคาร เพราะแม้ตัวหม้อแปลงเองจะสามารถทนต่อสภาพความชื้นได้ก็ตาม แต่ก็จำเป็นจะต้องทำตัวถังปิดครอบตัวหม้อแปลงแบบแห้งกลับต้องการช่องเปิดสำหรับระบายความร้อนของแกนหม้อแปลงและขดลวดออกไป

ในทางตรงกันข้าม สำหรับหม้อแปลงที่จะติดตั้งภายในอาคารนั้น หม้อแปลงแบบแห้งจะมีข้อได้เปรียบกว่าหม้อแปลงชนิดใช้น้ำมัน ประเด็นที่สำคัญที่สุดก็คือการที่หม้อแปลงแบบแห้งไม่ก่อให้เกิดอันตรายในด้านอัคคีภัย ในขณะที่หม้อแปลงแบบใช้น้ำมันจะมีอันตรายจากน้ำมันที่จุดติดไฟและในปัจจุบันหม้อแปลงชนิดที่ใช้สารออสเตอเรล ในการระบายความร้อนก็เป็นหม้อแปลงที่ถูกห้ามนำไปใช้และได้เลิกการผลิตไปแล้ว ส่วนหม้อแปลงชนิดที่ใช้น้ำมันซิลิโคนนั้น ก็เป็นหม้อแปลงที่มีปัญหาในเรื่องการหาน้ำมันมาเปลี่ยนทดแทน เมื่อน้ำมันซิลิโคนที่ใช้อยู่เดินนั้นเสื่อมสภาพไป ถ้าพูดถึงข้อดีข้อเสียเปรียบเทียบกับของหม้อแปลงชนิดใช้น้ำมันกับหม้อแปลงแบบแห้งแล้ว ก็อาจจะกล่าวได้ว่า สำหรับหม้อแปลงแบบใช้น้ำมันนั้นมันมีข้อดีในลักษณะที่ขนาดและน้ำหนักของหม้อแปลงชนิดนี้ค่อนข้างจะน้อย ตัวหม้อแปลงมีราคาถูก ค่าความสูญเสียในทางไฟฟ้าต่ำ อายุการใช้งานยืนยาว มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีมีระดับเสียงต่ำและสามารถทนการใช้งานเกินกำลัง (OVER LOAD) ได้ค่อนข้างสูง แต่ข้อเสียของหม้อแปลงชนิดนี้ก็คือ น้ำมันที่จุดติดไฟนั่นเอง

2.4 ความร้อนที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า

เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่า การสูญเสียต่างๆที่เกิดขึ้น ภายในหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งหมดจะมีภาระหรือไม่มีภาระก็ตามส่วนใหญ่ จะแปรสภาพเป็นความร้อนซึ่งทำให้อุณหภูมิของวัสดุในหม้อแปลงรวมทั้งรอบๆตัวหม้อแปลงมีอุณหภูมิสูงขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งภายหลังจากที่หม้อแปลงได้รับภาระจะมีผลทำให้อุณหภูมิภายในหม้อแปลงสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว (เป็นลักษณะ exponential) ดังแสดงใน รูปที่ 2.5 และอาจมีผลทำให้ฉนวนที่ห่อหุ้มขดลวดที่พันอยู่นั้นชำรุดเสียหายได้ อย่างไรก็ตามการที่อุณหภูมิของหม้อแปลงก็ขึ้นกับวัสดุที่ใช้ทำเป็นฉนวนด้วย กล่าวคือความสัมพันธ์ระหว่างอายุของฉนวน อุณหภูมิ และเวลาจะต้องเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ ซึ่งจะกล่าวไว้ในเรื่องของฉนวนในหัวข้อต่อไป

อุณหภูมิ



รูปที่ 2.5 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เป็นแบบ exponential

ดังนั้นการระบายความร้อนให้เร็วที่สุด จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งและถ้ากระทำอย่างถูกวิธีจะสามารถเพิ่มอัตรากำลังของหม้อแปลงได้ โดยที่ขนาดของโวลท์แอมป์ยังคงเดิม จากนั้นจะขอกกล่าวถึงความร้อนที่เกิดขึ้นที่หม้อแปลงและการระบายความร้อนเหล่านั้นโดยใช้น้ำมันซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดแรงดันต่ำและปานกลางนิยมใช้กันอย่างมากในปัจจุบัน

ความร้อนที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรทุกไฟฟ้าทุกชนิดรวมทั้งหม้อแปลงไฟฟ้านั้นจะเป็นการสูญเสียชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นเนื่องจากการทำงานของเครื่องจักรที่ส่วนต่างๆได้แก่ การสูญเสียที่ตัวนำ (I^2R loss) การสูญเสียเนื่องจากค่ากระแสไหลวนและการสูญเสียแบบฮิสเตอร์ซิสในแกนเหล็ก (CORE LOSS) ซึ่งทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น อุณหภูมิหรือความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นอย่างต่อเนื่องและขณะเดียวกันก็จะถูกถ่ายเทออกสู่ภายนอกในลักษณะใดลักษณะหนึ่งคือ การนำความร้อน การพาความร้อน หรือ การแผ่รังสีความร้อน พิจารณาขณะที่ภาระของหม้อแปลงไม่เปลี่ยนแปลง (กระแสคงที่) และจากกฎการเย็นตัวของนิวตัน พบว่า อัตราการสูญเสียพลังงานความร้อนที่วัตถุใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเป็นสัดส่วนกับความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างวัตถุนั้น และสภาพแวดล้อม จากกฎนี้เราอาจกล่าวได้ว่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่หม้อแปลงใด ๆ จะเป็นผลสืบเนื่องมาจากการสูญเสียความร้อนในรูปของการพาและการแผ่รังสีความร้อนออกสู่ภายนอก และจากการศึกษาพบว่าถ้าระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิยิ่งนานเท่าใดการเพิ่มของอุณหภูมิจะเป็นไปอย่างรวดเร็ว

2.5 การถ่ายเทความร้อนของหม้อแปลงชนิดน้ำมัน

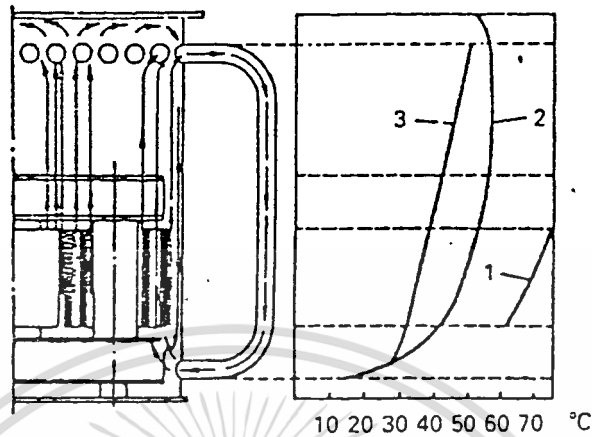
ความร้อนที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงนั้นส่วนใหญ่จะเกิดจากขดลวดและแกนเหล็กเป็นตัวสร้างและถ่ายเทให้แก่สภาวะแวดล้อมรอบๆ โดยอาศัยระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ซึ่งการถ่ายเทความร้อนนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ได้แก่ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน ดังจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไปนี้

2.5.1 การนำความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนขั้นแรก โดยที่ความร้อนจะระบายออกมาจากขดลวด หรือส่วนภายในของแกนไปยังผิวที่เชื่อกันอยู่ในน้ำมัน และถ้าขดลวดตัวนำเป็นชนิดเนื้อเดียวกันและทุก ๆ จุดมีการระบายความร้อนอย่างสม่ำเสมอแล้ว ความร้อนจะกระจายออกตามแนวรัศมี

2.5.2 การพาความร้อน เมื่อน้ำมันภายในหม้อแปลงได้รับความร้อน น้ำมันจะหมุนเวียนไปด้วย ผลต่างระหว่างความหนาแน่นของน้ำมันที่เย็นและน้ำมันที่ร้อนโดยน้ำมันที่ร้อนรอบรอบผิวของขดลวดจะลอยตัวขึ้นสู่ข้างบน พร้อมกับพาความร้อนเคลื่อนที่ไปด้วย ขณะเดียวกันน้ำมันที่เย็นจะตกลงมา หากข้างถึงหม้อแปลงมีที่ระบายความร้อน น้ำมันที่ร้อนก็จะไหลขึ้นสู่ส่วนบนของท่อที่ติดอยู่กับถังนั้น และไหลไปตามท่อลงสู่ส่วนล่างของท่อไปยังขดลวดแทนที่ส่วนที่ร้อนต่อไปซึ่งความเร็วและลักษณะการไหลของน้ำมันรอบๆ ผิวขดลวดนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะของการพันขดลวด ขนาดของท่อ รวมทั้งระบบการถ่ายเทน้ำมันภายในหม้อแปลงด้วย

2.5.3 การแผ่รังสีความร้อน เป็นขั้นสุดท้ายของการระบายความร้อนจากหม้อแปลงโดยที่ความร้อนจะถ่ายเทจากผนังภายนอกของหม้อแปลง ออกสู่อากาศรอบๆ ภายนอกซึ่งหม้อแปลงที่มีผิวเรียบและทาสีจะสามารถแผ่รังสีออกจากถังได้ถึง 55 เปอร์เซ็นต์ของความร้อนทั้งหมดที่จะระบายออก แต่ถ้าถังมีที่ระบายความร้อนติดอยู่การแผ่รังสีจะมีค่าลดลง

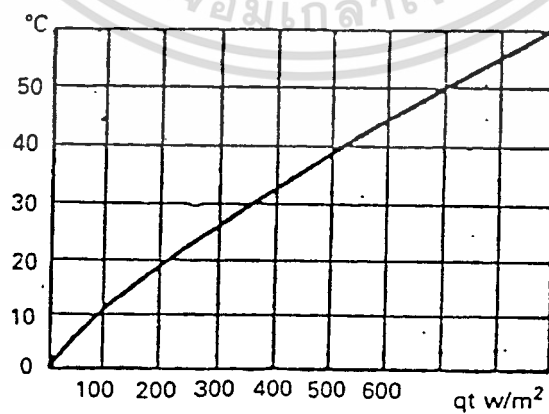
หลังจากที่มีการถ่ายเทความร้อนออกจากส่วนต่าง ๆ ของหม้อแปลงให้แก่ น้ำมันแล้วจะทำให้ให้น้ำมันมีอุณหภูมิสูงขึ้นโดยค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่สูงขึ้นของน้ำมันสามารถคำนวณได้จากความร้อนเฉลี่ย ตลอดความสูงของถังน้ำมัน แสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.7



- 1: เส้นโค้งของอุณหภูมิของขดลวด
- 2: เส้นโค้งของอุณหภูมิถึงหม้อแปลง
- 3: เส้นโค้งของอุณหภูมิของน้ำมันในท่อ

รูปที่ 2.6 ทิศทางการพาความร้อนของน้ำมันในหม้อแปลงและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

ต่อมาความร้อนที่ติดมากับน้ำมันจะถ่ายเทให้กับผนังของหม้อแปลงด้วยผลต่างของอุณหภูมิระหว่างน้ำมันและผนังถึง นอกจากนี้ยังขึ้นกับความร้อนจำเพาะของผนังถึงหม้อแปลงและวิธีการระบายความร้อนอีกด้วย



q_t = ค่าความร้อนจำเพาะขณะรับภาระของฉนวนถึง

รูปที่ 2.7 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้น

3.1 การเกิดโหลดเกินพิกัด (OVER LOAD)

ในการใช้งานหม้อแปลงโดยทั่วไปความต้องการใช้งานในแต่ละวันมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงอยู่ตลอดเวลา และตลอดอายุการใช้งานหม้อแปลงนั้นๆ เลยกี่ว่าได้และอาจกล่าวได้ว่ามีปริมาณเพิ่มขึ้นตามความต้องการใช้งานในแต่ละปีอีกด้วย

ดังนั้นบางทีโหลดของหม้อแปลงจะต่ำกว่าหรือสูงกว่าพิกัดของหม้อแปลง ซึ่งการใช้งานที่สถานะโหลดเกินพิกัดจะมีข้อจำกัดโดยผลของแรงดันตกคร่อม (Voltage drop) และส่วนอื่น ๆ ของหม้อแปลง และ โดยค่าใช้จ่ายของความสูญเสีย (losses) และโดยอายุการใช้งานของฉนวนที่จะสั้นลงอย่างแน่นอนจากผลของอุณหภูมิที่เกินขีดจำกัดของฉนวน ผลต่าง ๆ ที่จะเกิดขึ้นขึ้นอยู่อีกว่าเกิดโหลดเกินพิกัดนานเท่าไร

วัสดุที่ใช้ทำฉนวนในอุตสาหกรรมการผลิตหม้อแปลง ไม่ว่าจะเป็นจำพวกของแข็ง (กระดาษ, ไม้อัด, ไม้) หรือจำพวกของเหลว (น้ำมัน) จะสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีทางความร้อน และทนต่อตัวกระทำอื่นๆ เช่น ออกซิเจน และความชื้นซึ่งวัสดุต่างๆเหล่านี้สามารถจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีต่อกันได้ เช่น ทองแดงจะเป็นตัวเร่งในการเกิดออกไซด์ของน้ำมัน (เกิด oxidation) ในขณะที่การเปื้อนของกระดาษฉนวนจะให้น้ำมันเสื่อมคุณภาพลง

ได้มีการศึกษาถึงปัญหาในเรื่องนี้เป็นอย่างมาก โดยมีวิธีการแก้ไขที่น่าสนใจนำเสนอโดยชาวอเมริกัน มอนต์ซิงเกอร์ (Mr. Montsinger) ว่าอายุการใช้งานของฉนวนในหม้อแปลงจะหมดลงหลังจากความแข็งแรงเชิงยึดหยุ่น (tensile strength) ลดลง 50 เปอร์เซ็นต์ เขาได้สรุปว่าการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นทุกๆ 8 องศา จะทำอายุของฉนวนลดลงครึ่งหนึ่งตามสมการข้างล่าง

$$t = t_0 \cdot 2^{-\theta/8}$$

ซึ่ง	t	คืออายุการใช้งาน
	t_0	คือค่าคงที่ ขึ้นอยู่กับอายุการใช้งาน
	θ	คือ ช่วงอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (องศาเซลเซียส)

ลักษณะของการโหลดเกินพิกัดในหม้อแปลงไฟฟ้ามี 2 ลักษณะคือ

1. โหลดเกินพิกัดที่เกิดเป็นปกติ (RECURRENT OVERLOAD) ในการใช้งานทั่วไป ขึ้นอยู่กับการวางแผนหรือโปรแกรมการทำงานในช่วงเวลาต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. โหลดเกินพิกัดในภาวะฉุกเฉิน (EXCEPTIONAL OVERLOAD) เช่นในกรณีหม้อแปลงชำรุดบางตัวทำให้โหลดมากกว่าที่หม้อแปลงที่เหลือนั้น

โหลดเกินพิกัดในภาวะฉุกเฉินมีผลต่างจากโหลดเกินพิกัดที่เกิดเป็นปกติอย่างมาก กล่าวคือ ในแบบโหลดเกินพิกัดในภาวะฉุกเฉิน จนวนจะทนการเกิดโหลดเกินพิกัดได้ไม่นานเท่าโหลดเกินพิกัดที่เกิดเป็นปกติ และลักษณะการสะสมความสูญเสียจะแตกต่างกันด้วย

ดังนั้นการใช้งานโหลดให้เหมาะสมจึงควรคำนึงถึงการใช้งานให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่ใช้งาน หรือควรที่จะมีการตรวจสอบสภาพการใช้งานอยู่ตลอดเวลา ระวังการเกิดโหลดเกินพิกัดในภาวะฉุกเฉินด้วย

จากการศึกษาของ IEC ได้เสนอคู่มือเพื่อช่วยให้ผู้ใช้งานหม้อแปลงในการเลือกอัตรากำลัง ที่ใช้งานที่สภาวะแวดล้อมต่างๆ กันโดยมีข้อจำกัดเบื้องต้นของค่าสูงสุดต่างๆ เพื่อให้สอดคล้องกับ ลักษณะหม้อแปลงดังนี้

อุณหภูมิของอากาศที่สภาวะแวดล้อมใดๆ $= 140^{\circ}\text{C}$

อุณหภูมิของน้ำมันที่สภาวะโหลดเกินพิกัดในภาวะฉุกเฉิน $= 115^{\circ}\text{C}$

ในการใช้งานหม้อแปลงอย่างต่อเนื่องที่ค่าอุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียสจะนำไปสู่อายุการใช้งานที่สั้นลง และอัตรานี้จะเพิ่มเป็นสองเท่าถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอีก 6 องศาเซลเซียส

ยังมีข้อคำนึงถึงอื่นๆ ในการใช้งานหม้อแปลงเช่นที่จะได้กล่าวในหัวข้อต่อไปถึงการใช้งานหม้อแปลงให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดโดยคำนึงถึงการใช้งานโหลดที่เหมาะสมกับในแต่ละหม้อแปลง

3.2 ข้อควรพิจารณาการใช้งานโหลดของหม้อแปลงให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

เนื้อหาต่อไปนี้จะเป็นการเลือกใช้งานหม้อแปลงตัวหนึ่งๆ ให้สามารถใช้งานที่ประสิทธิภาพสูงสุด โดยคำนึงปริมาณโหลดที่ใช้ ที่จำเป็นต้องศึกษาในเรื่องนี้เป็นเพราะว่าในสภาวะปัจจุบันราคาค่าพลังงานมีแนวโน้มสูงขึ้นกว่าเดิมหลายเท่าตัวและในอนาคตข้างหน้าการนำทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดมาใช้ก็จำเป็นต้องตระหนักถึงเรื่องการนำมาใช้ให้ได้ประสิทธิภาพมากที่สุดด้วย

เนื่องจากการเลือกใช้งานหม้อแปลงที่สภาวะต่างๆ กันโดยแปรเปลี่ยนตามความมากน้อยของโหลดนั้นได้มีการศึกษาเป็นที่แน่ชัดแล้วว่า หม้อแปลงแต่ละตัว (ที่มีอัตราส่วนการสูญเสีย (loss ratio) ต่างๆ กัน ; ดังจะได้กล่าวต่อไป) จะมีประสิทธิภาพสูงสุดที่สภาวะการใช้งานโหลดต่างกัน จึงไม่ใช่เสมอไปที่ผู้ใช้งานหรือผู้ผลิตจะคำนึงถึงว่าใช้งานที่สภาวะโหลดเต็มพิกัดหรือ

สภาวะโหลดเกินพิกัด (OVERLOAD) จะเป็นการใช้งานที่คุ้มค่าและประหยัดจริง
 เอกสารฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นเอกสารอ้างอิงในการเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการนำไฟฟ้า
 ไม่ว่าจะเป็นทั้งด้านเทคนิคและด้านเศรษฐศาสตร์ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Transformer Losses พลังงานสูญเสีย (losses) ในหม้อแปลงประกอบด้วยความสูญเสียขณะไร้อภาระ (no-load loss) และ ความสูญเสียขณะมีภาระ (load loss) ซึ่ง ความสูญเสียขณะไร้อภาระ ประกอบด้วยความสูญเสียที่แกนเหล็ก (core loss) และ ความสูญเสียที่ขดลวด (copper loss) ซึ่งก็คือความสูญเสียเนื่องจากกระแสกระตุ้นในขดลวดคานปฐมภูมิ และความสูญเสียในฉนวน เมื่อมองขณะที่ใช้งานจริงแล้วจะพิจารณาเฉพาะความสูญเสียที่แกนเหล็กเท่านั้น ส่วนความสูญเสียขณะมีภาระประกอบด้วยความสูญเสียฮิสเทอรีซิส (hysteresis loss) และความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (eddy current loss)

โหลดขณะมีภาระประกอบด้วย

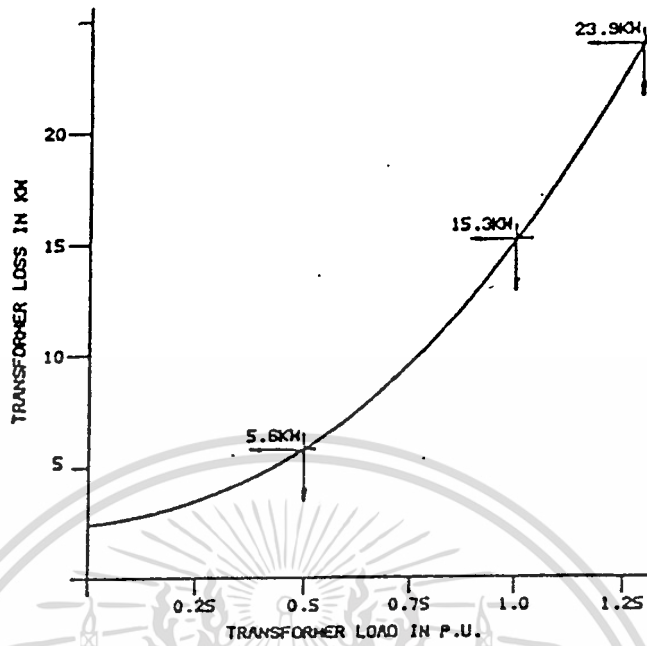
1. การสูญเสียเนื่องจากความต้านทาน (I^2R loss) เนื่องจากกระแสไหลผ่านขดปฐมภูมิและทุติยภูมิ ด้วยกระแสค่าเดียวกับที่ไหลผ่านโหลด
2. การสูญเสียจากกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นในตัวนำ
3. ความสูญเสียที่เกิดในโครงสร้าง (stray loss) ของหม้อแปลง

ในการใช้งานทั่วไป ความสูญเสียขณะไร้อภาระจะมีค่าคงที่สำหรับแรงดันทางคานปฐมภูมิ ค่าหนึ่งที่ย้ายเข้ามา ส่วนความสูญเสียขณะมีภาระ ถ้าพิจารณาอย่างง่าย จะมีค่าแปรตามกระแสที่ไหลผ่านโหลดคือ I^2 นั้นเอง

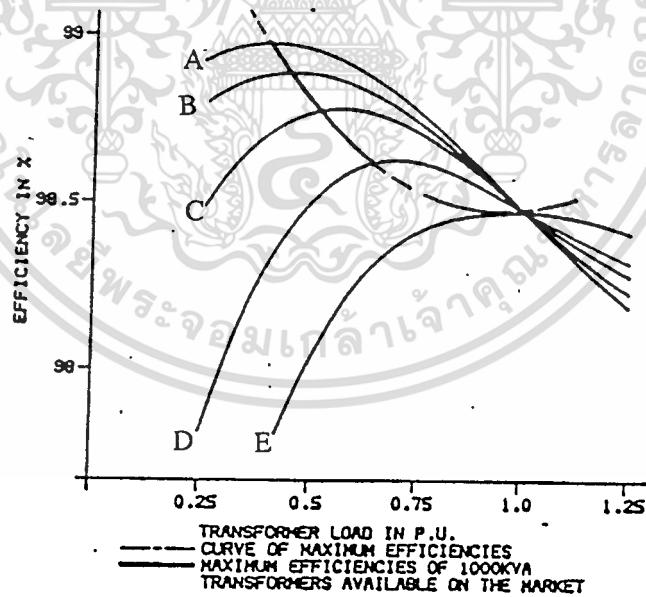
ประสิทธิภาพของหม้อแปลง (Transformer Efficiencies)

จากเดิมที่รู้กันว่าประสิทธิภาพสูงสุดของหม้อแปลงใดๆ จะเกิดขึ้นเมื่อหม้อแปลงนั้นได้รับการออกแบบให้ความสูญเสียขณะไร้อภาระ เท่ากับความสูญเสียขณะมีภาระ แต่ในความเป็นจริงลักษณะดังกล่าวจะเป็นจริงก็ต่อเมื่อหม้อแปลงได้ถูกใช้งานที่โหลดเต็มพิกัดเท่านั้น (ที่ 1.0 per unit load) ลองพิจารณารูปที่ 3.1 ซึ่งแสดงว่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงตัวหนึ่ง ๆ จะ ไม่คงที่ถ้าใช้งานที่สภาวะโหลดเปลี่ยนไป

ดังนั้นเพื่อให้การพิจารณาครอบคลุมไปทุกๆ การใช้งานโหลดต่างๆ ว่าหม้อแปลงตัวหนึ่งๆ จะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อใช้งานที่โหลดเท่าไร? จึงมีการวัดประสิทธิภาพของหม้อแปลงที่มีค่าอัตราการสูญเสีย (LOSS RATIO) ต่าง ๆ กัน (อัตราการสูญเสีย คืออัตราส่วนของ ความสูญเสียขณะมีภาระกับความสูญเสียขณะไร้อภาระ ; เนื่องจากโดยปกติความสูญเสียขณะมีภาระจะมากกว่าความสูญเสียขณะไร้อภาระ) พิจารณารูปที่ 3.2 ซึ่งแสดงการทดสอบหม้อแปลง A - E ซึ่งมีอัตราการสูญเสียต่าง ๆ กัน



รูปที่ 3.1 แสดงกราฟระหว่างโหลดของหม้อแปลงกับความสูญเสียที่เกิดขึ้น

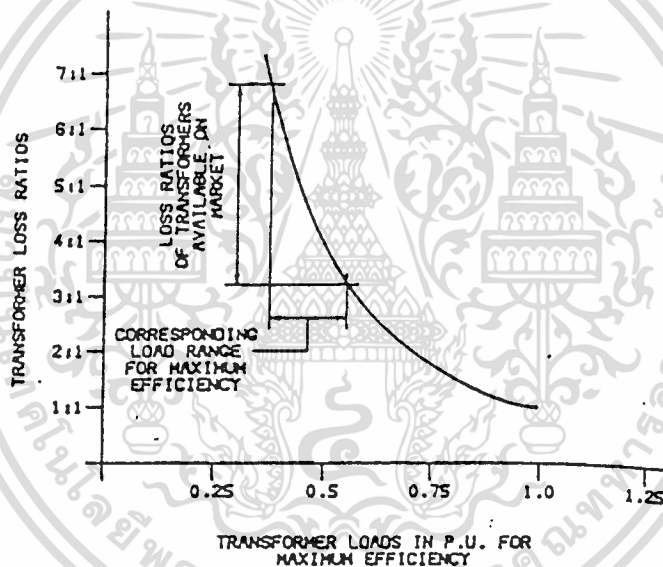


รูปที่ 3.2 แสดงกราฟประสิทธิภาพของหม้อแปลง A - E ที่โหลดค่าต่างๆ

จากรูปที่ 3.2 จะเห็นว่าหม้อแปลงแต่ละตัวจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเกิดขึ้นได้ที่ค่าโหลดต่าง-
 เอกสารฯ กัน ดังนั้น การที่สวทได้ดำเนินการใช้งานเพื่อการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้น A	อัตราการใช้ = 7 : 1	มีประสิทธิภาพสูงสุดที่	38 %	ของ โหลดเต็มพิกัด
เส้น B	อัตราการใช้ = 5 : 1	มีประสิทธิภาพสูงสุดที่	42 %	ของ โหลดเต็มพิกัด
เส้น C	อัตราการใช้ = 4 : 1	มีประสิทธิภาพสูงสุดที่	50 %	ของ โหลดเต็มพิกัด
เส้น D	อัตราการใช้ = 2 : 1	มีประสิทธิภาพสูงสุดที่	70 %	ของ โหลดเต็มพิกัด
เส้น E	อัตราการใช้ = 1 : 1	มีประสิทธิภาพสูงสุดที่	100 %	ของ โหลดเต็มพิกัด

จากรูปยังได้ข้อสรุปอีกว่าถ้าเราใช้งานหม้อแปลงเกินค่าที่ประสิทธิภาพสูงสุด (Optimum) จะเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพตกลงอย่างเห็นได้ชัด (ยิ่งอัตราการใช้มากเท่าไร ประสิทธิภาพจะตกลงมากเท่านั้น)



รูปที่ 3.3 นำรูปที่ 3.2 มาเขียนใหม่แสดงการเกิดประสิทธิภาพสูงสุดของหม้อแปลงแต่ละตัว

จากรูปที่ 3.3 เป็นการนำรูปที่ 3.2 มาเขียนใหม่โดยแสดงค่า อัตราการใช้ ที่สัมพันธ์กับโหลดของหม้อแปลงที่เหมาะสม (optimum) ซึ่งรูปนี้ใช้พิจารณาหม้อแปลงได้ทุกตัว และจะเป็นประโยชน์มากกรณีที่เราสามารถทราบอัตราการใช้ของหม้อแปลงที่ใช้งาน หรือเวลาที่เราจะสั่งพันหม้อแปลงสักตัวหนึ่งโดยคำนึงถึงการนำมาใช้งานที่เหมาะสมกับโหลดที่เราต้องการ (ในกรณีที่โหลดค่อนข้างคงที่) เราก็จะได้หม้อแปลงที่มีประสิทธิภาพสูงสุดอย่างแท้จริง สามารถลดต้นทุนค่าไฟฟ้าในแต่ละเดือนได้ และยังเป็นการส่งเสริมนโยบายการประหยัดพลังงานของรัฐบาลได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ชนิดของการระบายความร้อน

หัวข้อที่แล้วได้อธิบายไปถึงความร้อนที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงและสาเหตุที่เกิดความร้อนไปแล้ว ต่อไปจะได้อธิบายถึงวิธีที่ใช้ในการระบายความร้อนที่เกิดขึ้นดังกล่าว

หม้อแปลงที่เราใช้พิจารณาจะเป็นหม้อแปลงที่ใช้ของเหลวในการระบายความร้อน ซึ่งเป็นชนิดที่ใช้กันเป็นส่วนใหญ่ นั่นคือ การระบายความร้อนด้วยของเหลวโดยเฉพาะใช้น้ำมันนั้น มีข้อได้เปรียบแบบวิธีระบายความร้อนโดยอากาศ และ แบบใช้น้ำดังนี้

1.การใช้น้ำมันมีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนดีกว่าใช้อากาศเพียงอย่างเดียว 12 เท่า (ส่วนการใช้น้ำสัมประสิทธิ์มากกว่าอากาศ 100 เท่า)

2.การใช้อากาศระบายความร้อนจะเหมาะสมกับหม้อแปลงที่มีขนาดเล็กๆ เท่านั้น เพราะในหม้อแปลงขนาดใหญ่จะต้องเพิ่มเนื้อที่การระบายความร้อนขึ้นหลายเท่าตัว

3.การใช้น้ำระบายความร้อนมีข้อเสียคือต้องเพิ่มระบบการหมุนเวียนขึ้น ต่างกับการใช้น้ำมันที่ใช้หลักการหมุนเวียนตามธรรมชาติ คือน้ำมันที่ร้อนจะมีความหนาแน่นลดลง (ความหนืดลดลงนั่นเอง) จะลอยตัวขึ้นด้านบนส่วนน้ำมันที่ได้รับการระบายความร้อนออกสู่ภายนอกผ่านตัวระบายความร้อน (heat exchanger) แล้วจะเย็นตัวจึงมีความหนาแน่นมากขึ้นกลับเข้ามาแทนที่น้ำมันที่ลอยตัวขึ้นไป

4.น้ำธรรมดาจะมีจุดเดือดต่ำกว่าน้ำมันและมีจุดเยือกแข็งสูงกว่าน้ำมันหม้อแปลง ซึ่งข้อจำกัดนี้ทำให้ไม่สามารถใช้น้ำในการระบายความร้อนโดยตรงภายในหม้อแปลงได้

ส่วนลักษณะของน้ำมันที่ใช้ระบายความร้อนที่เหมาะสมจะได้อธิบายในหัวข้อต่อไป

ความร้อนที่เกิดจากความสูญเสียต่างๆจะถูกถ่ายเทมายังของเหลวที่ใช้ระบายความร้อน (อากาศหรือน้ำ) ผ่านในส่วนของตัวระบายความร้อน ซึ่งอาจมีลักษณะเป็นครีระบายความร้อนหรือเป็นท่อส่งผ่านน้ำมันกลับเข้าไปยังแท่งคัลได้ขึ้นอยู่กับขนาดของหม้อแปลงและสถานที่ใช้งาน

การพิจารณาถึงความสามารถในการส่งผ่านความร้อนหรือการระบายความร้อนออกจากหม้อแปลงได้ดีเพียงใด เราจะพิจารณาจากสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (convection coefficient)

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัย 5 ประการคือ

1. ความหนาแน่นของของเหลว (Density)
2. สัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน (Coefficient of thermal expansion)
3. ความหนืด (Viscosity)
4. ความร้อนจำเพาะ (Specific heat)
5. ความสามารถในการนำอุณหภูมิ (Thermal conductivity)

คุณสมบัติเหล่านี้ให้อู่ในหัวข้อลักษณะของน้ำมันหม้อแปลงต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการระบายความร้อนโดยใช้น้ำมันไหลวนในระบบ

จากที่ทราบกันแล้วว่าการระบายความร้อนแบบใช้น้ำมันส่งผ่านความร้อนจากภายในออกสู่ภายนอกอาศัยหลักการอย่างไร ซึ่งโดยทั่วไปจะแบ่งลักษณะการระบายความร้อนออกตามลักษณะการใช้งานอีกด้วยเช่น การให้น้ำมันไหลเวียนโดยธรรมชาติ หรือมีการช่วยระบายความร้อนออกสู่ภายนอกโดยติดพัดลมช่วย หรือออกแบบให้มีปั๊มภายในช่วยในการไหลเวียน ซึ่งแสดงแบบต่าง ๆ ในตารางที่ 3.1

<i>Type of Cooling Agent</i>	<i>Symbol</i>
Mineral Oil	O
Gas	G
Water	W
Air	A
<i>Type of Circulation</i>	<i>Symbol</i>
Natural	N
Forced	F
Directed through the winding	D
<i>Most Common Systems</i>	<i>Symbol</i>
Dry transformer with natural cooling in air	AN
Dry transformer with forced air cooling	AF
Transformer with natural circulation of air and oil	ONAN
Transformer with natural oil circulation and forced air circulation	ONAF
Transformer with forced oil and air circulation	OFAF
Transformer with forced air circulation and directed oil flow through the winding	ODAF
Transformer with forced oil and water circulation	OFWF

ตารางที่ 3.1 วิธีการระบายความร้อนแบบต่าง ๆ

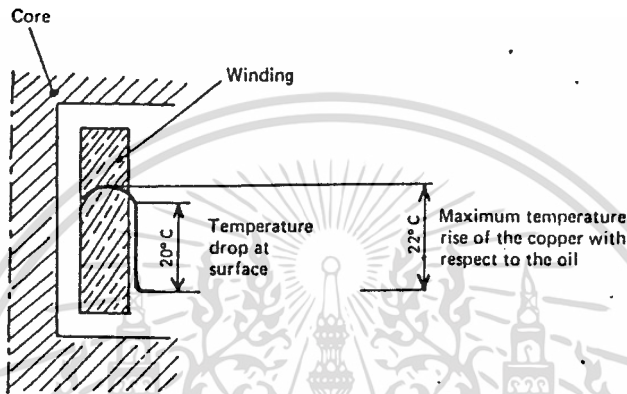
ทิศทางการกระจายความร้อนของขดลวดออกสู่บรรยากาศภายนอกแสดงในรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.6 ซึ่งแสดงว่าลักษณะการเกิดความร้อนของขดลวดภายในเป็นแบบโค้งพาราโบลา (

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย

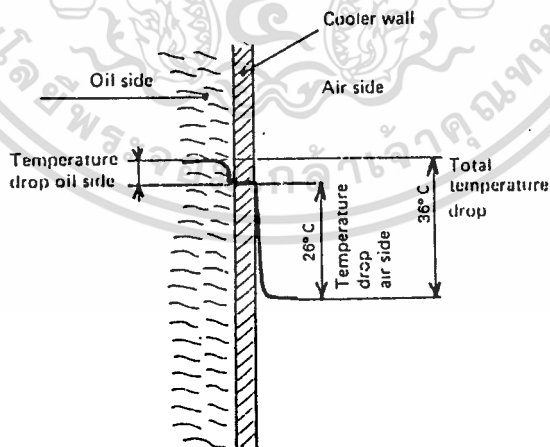
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



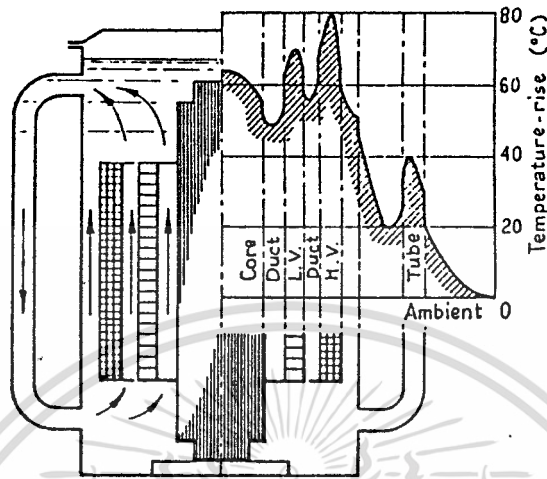
parabolic curve) ส่วนการกระจายความร้อนออกสู่ภายนอกจะกระจายความร้อนให้แก่น้ำมัน บริเวณที่อยู่ใกล้เคียงมากประมาณ 20 องศาเซลเซียส และที่เหลือห่างออกไปอีกเล็กน้อย ส่วนรูปที่ 3.5 แสดงเช่นกันกับรูปที่ 3.4 แต่เป็นบริเวณแท่ง ซึ่งอธิบายการกระจายความร้อนจากน้ำมันภายในออกสู่บรรยากาศ จะเห็นได้ว่าการกระจายความร้อนจะไปได้ไม่ไกลจากบริเวณผิวของแท่งมากนัก



รูปที่ 3.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในขดลวด



รูปที่ 3.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในตัวยาวระบายความร้อน



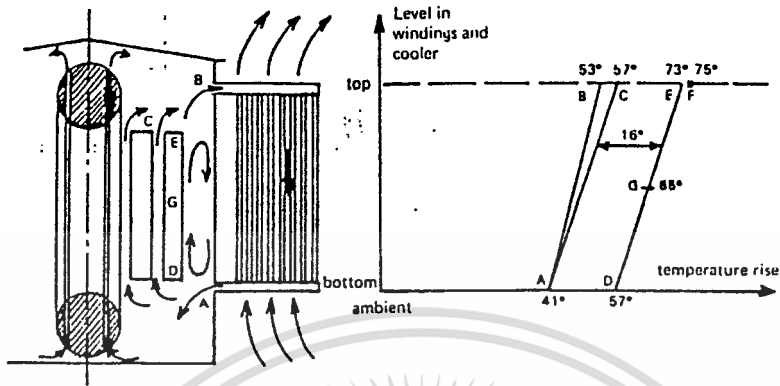
รูปที่ 3.6 แสดงการกระจายอุณหภูมิ ณ ส่วนต่าง ๆ ภายในหม้อแปลง

ในการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายของอุณหภูมิและการแปรเปลี่ยนของอุณหภูมิไปตามทิศทางการไหลของของเหลวเป็นสิ่งที่ซับซ้อนสำหรับหม้อแปลงต่างๆ เพราะลักษณะของการกระจายความร้อนในแบบโค้งพาราโบลาของขดลวดในแต่ละหม้อแปลงไม่เหมือนกัน ทำให้การทดลองหาอุณหภูมิที่ตกคร่อมในแต่ละส่วนทำได้ยาก ดังนั้นเพื่อให้การวิเคราะห์ง่ายขึ้นจึงสมมติให้การกระจายความร้อนที่พื้นผิวของขดลวดและแท่งเป็นแบบเชิงเส้น

จากตารางที่ 3.1 จะเห็นว่ามีรูปแบบการระบายความร้อนหลายแบบแต่ในการวิเคราะห์เพื่อทำนายความสามารถในการรับโหลดของหม้อแปลงจะแบ่งการระบายความร้อนออกเป็น 5 แบบดังนี้

3.3.1. แบบอาศัยการไหลเวียนของน้ำมันและอากาศตามธรรมชาติ (Natural circulation of oil and air, ONAN)

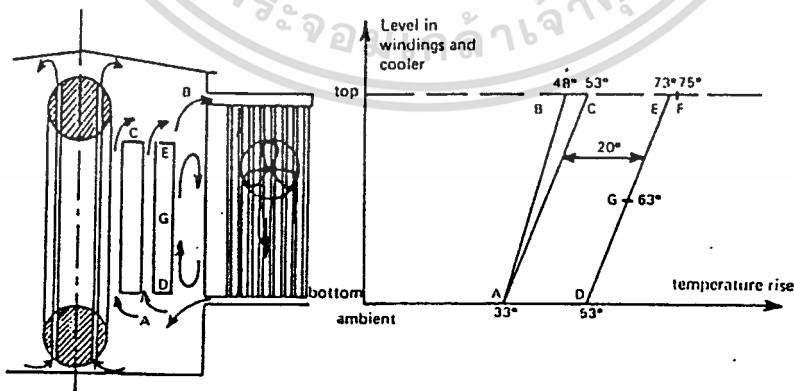
เป็นการระบายความร้อนโดยอาศัยการไหลเวียนของน้ำมันที่มีอุณหภูมิต่างกัน โดยน้ำมันที่ร้อนจะมีความหนาแน่นต่ำกว่าเดิมทำให้มีความหนืดลดลง น้ำมันส่วนนี้จึงพยายามลอยตัวขึ้นด้านบน ส่วนน้ำมันที่ได้รับการระบายความร้อนออกโดยตัวระบายความร้อน แล้วจะมีความหนืดมากกว่าน้ำมันที่ร้อน ก็จะเข้าแทนที่เป็นเช่นนี้สลับกันไป ตามรูปที่ 3.7 ซึ่งได้แสดงกราฟการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ณ จุดต่าง ๆ ด้วย



รูปที่ 3.7 การระบายความร้อนแบบอาศัยการไหลเวียนของน้ำมันและอากาศตามธรรมชาติ, อธิบายกราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ : AB = น้ำมันในตู้ระบายความร้อน ; AC = น้ำมันในขดลวด ; DE = ทองแดงในขดลวด ; F = อุณหภูมิสูงสุด ; AD = CE = ช่วงต่างของน้ำมันกับทองแดง ; G = อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉลี่ยของทองแดง (average temperature rise)

3.3.2.แบบการไหลเวียนของน้ำมันตามธรรมชาติแต่มีพัดลมช่วยระบายความร้อนออกสู่อากาศ (Natural Circulation of oil ; forced ventilation of air , ONAF)

ลักษณะการไหลเวียนของน้ำมันจะเหมือนเดิมแต่จะติดพัดลมช่วยระบายความร้อนออกสู่ภายนอกมากขึ้นดังรูปที่ 3.8



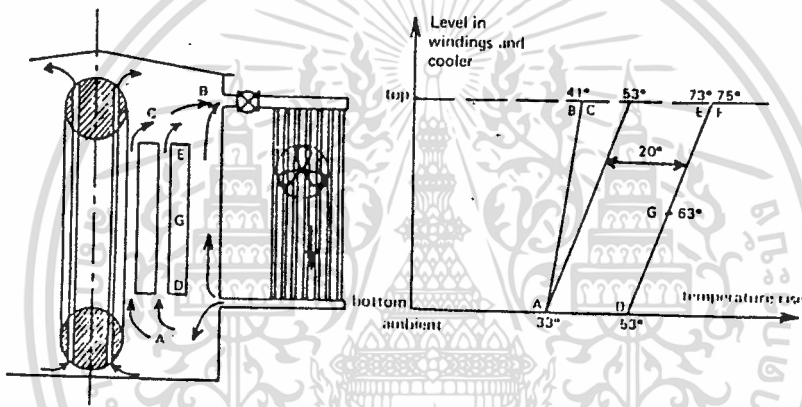
รูปที่ 3.8 แสดงการไหลเวียนแบบเพิ่มพัดลมช่วยระบายความร้อน ; การกระจายของอุณหภูมิเป็นลักษณะเดียวกับรูปที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

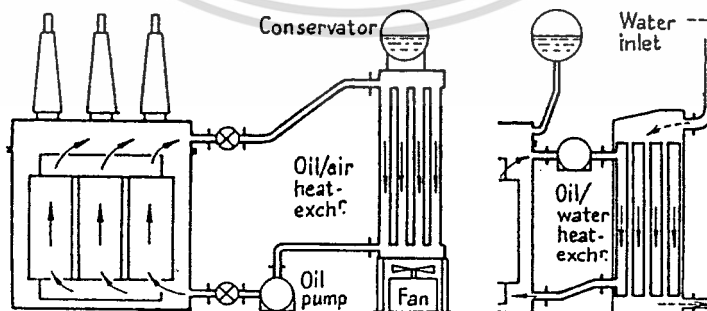
จะเห็นได้ว่าพัดลมช่วยระบายความร้อนได้ดีขึ้นมาก วิธีการนี้จะทำให้หม้อแปลงจ่ายโหลดได้เพิ่มขึ้นประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์และยังช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของฉนวนอีกด้วย

3.3.3. แบบมีปั๊มช่วยการไหลเวียนของน้ำมันและพัดลมเป่า (Forced circulation of oil and air ,OFAF)

การระบายความร้อนแบบนี้นอกจากมีพัดลมช่วยระบายออกสู่ภายนอกแล้วยังมีการติดตั้งช่วยเร่งการไหลเวียนของน้ำมันภายในระบบด้วย ดังรูปที่ 3.9 วิธีนี้ทำให้อุณหภูมิของน้ำมันลดลงมาก



รูปที่ 3.9 หม้อแปลงแบบมีปั๊มช่วยเร่งการไหลเวียนและไดอะแกรมแสดงอุณหภูมิที่เกิดขึ้น



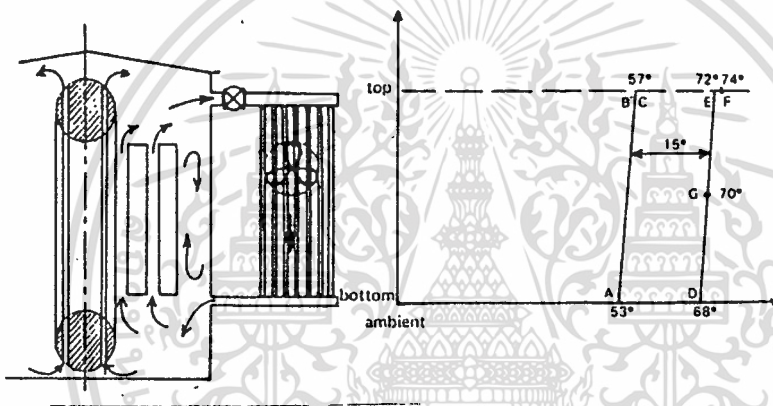
รูปที่ 3.10 การระบายความร้อนของหม้อแปลง แบบมีปั๊มช่วยการไหลเวียนของน้ำมันและ

พัดลมเป่า

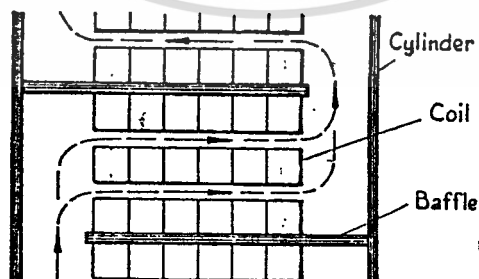
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4. แบบการไหลเวียนภายในโดยตรง (Directed oil circulation ; forced air circulation, ODAF)

ลักษณะคล้ายแบบมีปั๊มช่วยแรงการไหลเวียน แต่การไหลเวียนของน้ำมันภายในแตกต่างกันออกไป กล่าวคือ แบบนี้น้ำมันที่ออกจากตัวระบายความร้อนจะไม่ไหลเข้าสู่ช่องของขดลวดทั้งหมด แต่ส่วนหนึ่งจะไหลผ่านส่วนวงจรแม่เหล็กด้วยโดยความเร็วของน้ำมันภายในจะเร็วขึ้นจาก cm/s เป็น dm/s ซึ่งจะไปเพิ่มสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนเป็นเท่าตัว ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะการระบายความร้อนแบบโดยตรง



รูปที่ 3.12 แสดงลักษณะการไหลของน้ำมันในแบบการไหลเวียนภายในโดยตรง

ลักษณะการกระจายความร้อนแบบนี้ค่อนข้างที่จะคงที่สังเกตได้จากกราฟ โดยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นไม่เกิน 5 องศา ลักษณะแบบนี้มักใช้กันมากในหม้อแปลงขนาดกลางจนถึงขนาดใหญ่ (10 ถึง 100 MVA) และหม้อแปลงแรงสูงกว่า 100 MVA ขึ้นไปก็ใช้กันกว้างขวาง

3.3.5. การระบายความร้อนแบบไม่โดยตรง (Non-directed forced oil circulation and forced air circulation , NDFOA)

ลักษณะการไหลเวียนของน้ำมันในการระบายความร้อนแบบนี้จะต่างจาก 4 แบบที่กล่าวมานั้นคือ น้ำมันจะถูกปั๊มผ่านครีระบายความร้อนไปยังแท่งคอล์และน้ำมันจะไหลแยกเป็น 2 ส่วน ส่วนหนึ่งจะไหลผ่านท่อระบายความร้อนภายในขดลวด (winding ducts) อีกส่วนจะไหลตรงขึ้นไปสู่ด้านบนในตัวแท่งคอล์ ซึ่งทำให้อุณหภูมิของน้ำมันที่ด้านบนไม่เท่ากับอุณหภูมิของน้ำมันที่ออกมาจากท่อระบายความร้อนภายในขดลวด

3.4 ฉนวนของเหลวที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้า

ความร้อนที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าส่วนใหญ่เกิดจากการสูญเสียที่เกิดขึ้นดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการระบายความร้อนที่ดีเพื่อให้ หม้อแปลงทำงานได้อย่างต่อเนื่องและปลอดภัย ไม่เสียหาย โดยในหม้อแปลงขนาดเล็กจะใช้การระบายความร้อนด้วยอากาศเราเรียกหม้อแปลงชนิดนี้ว่า ชนิดแห้ง (DRY-TYPE) สำหรับหม้อแปลงขนาดใหญ่ที่ใช้ในระบบจำหน่าย หรือในโรงจักรไฟฟ้า จำเป็นต้องมีการระบายความร้อนที่ดีกว่านี้ ซึ่งในขณะนี้นิยมใช้ครีระบายความร้อน (radiator) กับอาศัยการถ่ายเทความร้อนภายในซึ่งใช้กันมานานกว่า 100 ปี สำหรับในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงชนิดของของเหลวต่างๆ ที่ใช้เป็นฉนวนและระบายความร้อนภายในหม้อแปลงชนิดนี้

ในอดีตของเหลวที่ใช้ในหม้อแปลง มักเป็นพวกชนิดที่มีความหนืดต่ำ เช่น วัสดุที่ได้จากน้ำมันปิโตรเลียม และใช้กันมาเป็นเวลานาน จนกระทั่งได้มีการนำสารสังเคราะห์จำพวก askarels หรือที่เรียกกันว่า (PCBs) เป็นพวกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (aromatic hydrocarbon) ที่สามารถทนไฟได้แต่มีผลต่อสิ่งแวดล้อม จึงได้มีการหันกลับมาใช้พวกไดเมทิลซิลิโคน (dimethyl silicon) และพวกไฮโดรคาร์บอนที่ติดไฟยาก เช่นพวกเฮกซีเซส (HTHs) C_2Cl และพวกสารโมเลกุลใหญ่ ซึ่งพวกนี้ใช้ในกลุ่มของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทนไฟได้และเป็นที่นิยมใช้ในทางอุตสาหกรรมและการพาณิชย์ ซึ่งน้ำมันที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดนี้เป็นพวกของเหลวที่ไม่จุดติดไฟและพวกอื่นๆ เช่นคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (Chloro fluorocarbon) และ ไฮโดรคาร์บอนสังเคราะห์

น้ำมันที่ใช้เป็นตัวกลางในการระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้าดังกล่าวนี้จะเป็นน้ำมันที่เป็นฉนวนไฟฟ้า และไม่ลุกไหม้ได้ง่าย โดยทั่วไปจะเรียกว่า น้ำมันหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(TRANSFORMER OIL) เป็นน้ำมันประเภทมินเนอรอล (MINERAL OIL) ซึ่งสกัดมาจากน้ำมันปิโตรเลียมดิบนั่นเอง โดยไม่ให้มีสารจำพวกกรดอินทรีย์, กำมะถัน, น้ำมันพืช, น้ำมันสัตว์ รวมทั้งสารบางชนิดที่เป็นเชื้อเพลิงได้ง่ายตาม ASTM Standard จะกำหนดให้น้ำมันหม้อแปลงนี้มีจุดลุกไหม้ได้ไม่ต่ำกว่า 149 องศาเซลเซียส น้ำมันนี้ได้มีการปรับปรุงคุณภาพเพิ่มจุดลุกไหม้ให้สูงขึ้นโดยกรรมวิธีต่างๆ น้ำมันชนิดที่เรียกว่า อัสคาเรล เป็นน้ำมันที่ใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้าโดยเป็นน้ำมันที่มีจุดลุกไหม้สูงมาก แต่ผลเสียของน้ำมันชนิดนี้คือจะเกิดก๊าซคลอรีนหรือกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งเป็นพิษต่อคนชั้นเมื่อมีการเกิดประกายไฟฟ้าขึ้น น้ำมันชนิดนี้จึงไม่ค่อยมีผู้นิยมใช้กันมากนัก น้ำมันซิลิโคน เป็นน้ำมันที่นิยมใช้กันมากสำหรับในปัจจุบัน

อย่างไรก็ตามน้ำมันดังกล่าวข้างต้นก็ยังมีโอกาสที่จะลุกไหม้ได้เมื่อน้ำมันมีอุณหภูมิสูง ดังนั้นเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้ามีการใช้งานจ่ายกระแสมาๆ อย่างต่อเนื่อง หรือเกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรเป็นเหตุให้หม้อแปลงไฟฟ้ามีอุณหภูมิสูงขึ้นจนเกินกว่าที่จะสามารถจะระบายความร้อนออกได้ทัน น้ำมันจึงเกิดการลุกไหม้ขึ้นภายในถัง และเกิดแรงอัดทำให้ถังที่บรรจุน้ำมันระเบิดขึ้น น้ำมันที่ลุกไหม้ก็จะกระจายออกไปจนกลายเป็นเพลิงไหม้ลุกลามต่อไป จึงเป็นการไม่สมควรอย่างยิ่งที่จะนำหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดนี้ไปติดตั้งไว้ในอาคารนอกเสียจากว่า จะได้มีการเตรียมโครงสร้างอาคารเป็นพิเศษเพื่อเตรียมรับกับแรงระเบิดที่จะเกิดขึ้น ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างอาคารเพิ่มขึ้น

นอกจากนั้นแล้ว ห้องที่เตรียมไว้สำหรับติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำมันนี้ต้องมีการสร้างบ่อรับน้ำมัน ซึ่งอาจมีการล้นหรือรั่วซึมของน้ำมันอีกด้วย ซึ่งเป็นปัญหากับงานด้านโครงสร้าง

3.4.1 น้ำมันปิโตรเลียม (Petroleum Base Insulating Oil)

วัสดุชนิดนี้ คือ วัสดุที่ใช้สำหรับเป็นฉนวนเพื่อถ่ายเทและระบายความร้อนสำหรับใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้าที่นิยมใช้กันอย่างมากในวงการอุตสาหกรรม หม้อแปลงตัวแรกที่สร้างขึ้นเมื่อประมาณ 100 ปีที่ผ่านมาใช้นี้วัสดุชนิดนี้ คือ ทองแดง เหล็ก การ์ดบอร์ด (cardbord) และ น้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งใช้มาจนถึงทุกวันนี้ แม้ว่าจะมีการพัฒนาในส่วนของน้ำมันที่ใช้ ซึ่งเป็นที่ยอมรับและพิสูจน์ได้ว่าใช้ได้ดีในทางอุตสาหกรรมโดยสถาบัน American Society of Testing Materials (ASTM) D-3487 น้ำมันของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากการกลั่นจากน้ำมันปิโตรเลียม โดยปราศจากความชื้น สามารถแสดงคุณสมบัติดังนี้

-ค่าความเป็นฉนวนทางไฟฟ้าสูง

-ความหนืดต่ำ

-ปราศจากกรด ไอออนแกนนิค วัสดุจากน้ำมันดิน (asphalt) และสารประกอบกำมะถัน

-ต้านทานการรวมตัวซึ่งกันและกันได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-ตกตะกอนรวดเร็ว

-จุดหลอมเหลวต่ำ

-สามารถทนแรงดัน sludging voltage ได้ ภายใต้แรงดันปกติ

-จุดติดไฟ (flash point) สูง

โดยในตารางที่ 3.2 จะแสดงคุณสมบัติค่าความเป็นฉนวนของน้ำมันปิโตรเลียมและ test number ของ ASTM test และ ค่าเฉพาะของแต่ละการทดลอง

Property	Specification value	Typical value	ASTM NO.
Collor	0.5 max	0.5	D-1500
Dielectric Breakdown at 60 Hz	30 kV/min	35 kV	D-877
0.100 in. gap	28 kV/min	30 kV	D-1816
0.040 in. gab	56 kV/min	60 kV	D-1816
0.080 in. gab	0.03 mg max	0.01mg	D-974
Neutralization number	Noncorroive	Noncorroive	D-1275
Free or Corrosive sulphur			
Flash point	145°C(293°F)min	150°C	D-92
pour point	-40°C(-40°F)max	-55°C	D-97
viscosity			
max. cs @ 100 ° C	3 sec	3 sec	D-88
max. cs @ 40 ° C	12 sec	10 sec	D-88
max. cs @ 0 ° C	76 sec	70 sec	D-88
Moisture content	35 ppm max	20 ppm	D-1533
Specific gravity @ 60 ° F	0.910 max	0.890	D-1298
Inorganic chlorindes or sulfates	None	None	D-878
Interfacial tension	40 dynes/min	45 dynes	D-971
Power factor, 60Hz			
25 ° C (77 ° F)	0.05% max	0.01%	D-924
100 ° C (212 ° F)	0.30% max	0.10%	D-924

Oxidation stability

เอกสารนี้เป็นเอกสารตัวอย่างสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sludge after 72 hr	0.15%	0.1%	D-2400
Sludge after 164 hr	0.30%	0.2%	D-2400
Total acid after 72 hr	0.5 mg KOH	0.2 mg KOH	D-2400
Total acid after 164 hr	0.6 mg KOH	0.3 mg KOH	D-2400
Aniline point	63-83 °C	75 °C	D-611
Dielectric breacdown,			
Impulse, needle-negative	145 kV	105 kV	D-3300

ตารางที่ 3.2 ASTM D-3487

3.4.2 อัสคาเรล (Askarels)

ประกอบด้วย อาโรคลอ (Aroclor ซึ่งมีชื่อเรียกอีกอย่างว่า ฟิซีบี-เอส , PCBs) ผสมกับ ไตรโคลเบนซินหรือเตตราโคลเบนซิน เป็นของเหลวที่ติดไฟยาก ใช้ในงานติดตั้งภายในที่มี โอกาสเกิดการลุกไหม้ไฟได้ ของเหลวชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้กันมากในช่วงกลางทศวรรษที่ 1970 แต่ ไม่ดีพอกับสภาพแวดล้อม ดังนั้นหม้อแปลงไฟฟ้าที่ยังใช้สารชนิดนี้จึงหมดความนิยมไป มีหลายวิธี ที่จะเลิกใช้สารพวกฟิซีบีเอสโดยที่หม้อแปลงไฟฟ้ายังทำงานได้อย่างปกติ โดยอาจเลือกเอาวัสดุที่ ติดไฟยากมาใช้แทน สำหรับคุณสมบัติของอัสคาเรล สามารถแสดงไว้ในตารางที่ 3.3 และสำหรับ ตารางที่ 3.7 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติของอัสคาเรลกับฉนวนอื่นๆ

Flash point °C	None
Fire point °C	None to boiling
Fire hazard rating-U.L.	2-3
Expansion coefficient, cc/cc/ °C @ 25 °C	0.0007
Pour point, °C	-37
Water solubility, ppm @ 50° C	550
Viscosity , cS	
100 °C	3
50 °C	8
25 °C	15
Specific gravity, gm/cm ³	1.37
Dielectric strength, ASTM D-877, kV	40
Impulse breakdown,kv	

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับองค์กรใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Negative polarity	119
Positive polarity	114
Dielectric Constant	5.85
Power factor at 50 °C, %	1.20

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติเฉพาะของสารอีพอกซีเรซิน

3.4.3 ซิลิโคน (Silicone)

เนื่องจากการใช้พีซีบี-เอส ค่อยๆ เสื่อมความนิยมลง หลายคนเริ่มเปลี่ยนมาใช้ 50-CS ซิลิโคน (Polydimethyl Siloxane หรือ PDMS) แทน ของเหลวชนิดนี้มีคุณสมบัติที่ดี และสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดีในงานทางไฟฟ้าและสามารถเข้ากับสภาพแวดล้อมได้ด้วย ซิลิโคนนั้นมีคุณสมบัติที่ยอดเยี่ยมมาก ทั้งด้านการเป็นฉนวนและการเป็นตัวการถ่ายเทความร้อนที่ดี ถึงแม้ว่าตัวมันเองจะติดไฟได้ แต่ก็มิจุดติดไฟค่อนข้างสูงกว่าพวกน้ำมันชนิดอื่นๆ จึงจัดอยู่ในกลุ่มของพวกที่ติดไฟยาก ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดใน Natural Elective Code, Section 450-23

ซิลิโคนถูกพิสูจน์แล้วว่ามีความนิยมที่จะใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบรีโทรฟิลลิง (retrofilling) ซึ่งของเดิมมันบรรจุด้วยอีพอกซีเรซิน แต่เพราะตัวมันมีความหนืดสูงจึงทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลง ในหม้อแปลงไฟฟ้าตัวใหม่ๆ ซึ่งเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบมาโดยอาศัยคุณสมบัติพิเศษของซิลิโคน ดังนั้นการใช้ซิลิโคนจึงมีมากขึ้นเป็นอันดับที่ 2 รองจากน้ำมันปิโตรเลียม ตารางที่ 3.4 แสดงชนิดและคุณสมบัติเฉพาะของซิลิโคน พิจารณาตารางที่ 3.7 สำหรับการเปรียบเทียบกับของเหลวชนิดอื่น

Flash point °C	300
Fire point °C	344
Fire hazard rating - U.L.	4-5
Expansion coefficient, cc/cc/ °C @ 25 °C	0.00104
Pour point, °C	-55
Water solubility, ppm @50 °C	600
Interfacial tension dynes /cm	35
Viscosity , cS	
100 °C	16
50 °C	30
25 °C	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Specific gravity, gm/cm ³	.960
Dielectric strength, ASTM D - 877, kV	35
Impulse breakdown , kv	
Negative polarity	296
Positive polarity	100
Dielectric Constant	2.50
Power factor at	
50 °C,%	0.02
25 °C,%	0.01

ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติเฉพาะของสาร ซีลีโคน

3.4.4 เซลล์ไฮโดรคาร์บอน (High-Temperature or High-Molecular weight Hydrocarbon , HTHs)

สำหรับตัวเลือกอื่น ๆ ที่ใช้แทนพีซีบี-เอส คือพวกเซลล์ไฮโดรคาร์บอน ซึ่งมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี และมีคุณสมบัติการระบายความร้อนที่ดีกว่า มีลักษณะทางเคมีที่เหมือนกับน้ำมันปิโตรเลียมมาก อย่างไรก็ตามมันก็มีจุดเดือดที่สูงกว่าและมีมวลโมเลกุลที่ใหญ่กว่า ดังนั้นจุดติดไฟจึงสูงกว่า แต่ตัวมันเองก็มีความหนืดสูง ดังนั้นจึงเป็นการลดประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลง วัสดุชนิดนี้จัดอยู่ในพวกดีดไฟยาก

สำหรับค่าคุณสมบัติโดยพื้นฐานของเซลล์ไฮโดรคาร์บอน แสดงไว้ในตารางที่ 3.5 และแสดงการเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ ในตารางที่ 3.7

Flash point °C	285
Fire point °C	312
Fire hazard rating - U.L.	5-10
Expansion coefficient, cc/cc/°C @ 25 °C	0.0008
Pour point , °C	-30
Interfacial tension , dynes/cm	38
Viscosity , cS	
100 °C	16
50 °C	85
25 °C	350
Specific gravity , gm/cm ³	0.877

เอกสารนี้เป็นเอกสารสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Dielectric strength , ASTM D-877, kV	43
Impulse breakdown , kv	
Negative polarity	118
Positive polarity	85
Dielectric Constant	2.38
Power factor at	
100°C,%	0.4
50°C,%	0.01
25°C,%	<.001

ตารางที่ 3.5 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติเฉพาะของสาร HTHs

3.4.5 เทตราโคลโร เอทรีลีน (Tetrachloro ethylene)

เทตราโคลโร เอทรีลีน หรือ เพอร์โคลโร เอทรีลีน (Perchloro ethylene) เป็นวัสดุฉนวนที่ไม่ติดไฟ สามารถนำไปใช้ได้เลยหรือผสมกับน้ำมันก็ได้ วัสดุชนิดนี้มีความบริสุทธิ์สูงและใช้ในงานที่แห้งและสะอาด มีความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมีความหนืดต่ำสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีมาก และยังมีคุณสมบัติไม่ติดไฟเมื่อผสมกับน้ำมัน C₂Cl₄ และ C₂Cl₄ ถูกจัดอยู่ในพวกไม่ติดไฟ

Flash point °C	None
Fire point °C	None
Fire hazard rating - U.L.	N/A
Expansion coefficient, cc/cc/ °C @ 25 °C	0.00102
Pour point , °C	-22 (freezes)
Viscosity , cS	
100 °C	0.36
50 °C	0.42
25 °C	0.55
Specific gravity , gm/cm ³	1.620
Dielectric strength , ASTM D-877, kV	43
Dielectric constant	2.365
Power factor at 50 °C, %	0.05

ตารางที่ 3.6 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติเฉพาะของสาร C₂Cl₄

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการค้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางอุตสาหกรรมโดยในตารางที่ 3.6 แสดงคุณสมบัติของ C_2Cl_4 และตารางที่ 3.7 เป็นการเปรียบเทียบวัสดุนี้กับชนิดอื่นๆ

3.4.6 วัสดุอื่น ๆ

ในกลุ่มของคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (Chlorofluorocarbon) บางตัว สามารถใช้ได้เหมือนกัน วัสดุนี้นี้มีคุณสมบัติที่ดีแต่ราคาแพง และมีผลกระทบต่อโอโซนในชั้นบรรยากาศอีกด้วย

สารสังเคราะห์จำพวกไฮโดรคาร์บอน เช่นพอลิอัลฟาโอเลฟิน (Polyalphaolefins) สามารถนำมาใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีลักษณะพิเศษ กล่าวคือมีความเป็นฉนวนที่ดี และมีการถ่ายเทความร้อนที่ดีและมีความทนทาน อย่างไรก็ตามก็มีราคาค่อนข้างสูง ส่วนคุณสมบัติทางไฟฟ้าก็มีลักษณะคล้าย ๆ กับน้ำมันปิโตรเลียม

Property	Oil	PCBs	Silicone	C_2Cl_4	HTHs
Thermal:					
Flash point	150	None	300	None	285
Fire point	160	N.T.B.	344	None	312
Physical :					
Specific gravity , gm/cm ³	0.890	1.37	0.960	1.620	0.877
Viscosity @ 100° C, cS	3	3	0.36	0.36	16
Electrical :					
Dielectric breakdown (ASTM D-877)	35	40	43	43	43
Power factor ,60 Hz, 50° C	0.02	1.2	0.05	0.05	0.01

ตารางที่ 3.7 ตารางแสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้า

สรุปการเลือกใช้ของเหลวที่เหมาะสม

ของเหลวที่ใช้ในหม้อแปลงนั้นว่ามีความสำคัญมากต่อการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้นจึงต้องพิจารณาอย่างรอบคอบในการเลือกวัสดุที่ใช้ให้ดีที่สุด ในบางกรณีตำแหน่งในการติดตั้งของหม้อแปลงไฟฟ้านับเป็นปัจจัยอันดับแรกในการพิจารณาเลือกใช้ ตัวอย่างเช่นหม้อแปลงไฟฟ้าจำเป็นต้องตั้งอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับแหล่งเชื้อเพลิงก็ควรเลือกใช้ของเหลวที่จุดติดไฟสูงเป็นต้น หรือในบางกรณีการพิจารณาด้านราคาก็สำคัญที่สุด เช่น ในพวกหม้อแปลงไฟฟ้าตัวใหญ่ๆ จะมีการลงทุนเริ่มแรกสูง ในการเลือกของเหลวชนิดใดนั้นจะมีผลต่อการออกแบบอุปกรณ์ต่างๆของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจสอบน้ำมันเพื่อหาถึงสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า เช่น การทดสอบหาปริมาณแก๊สในน้ำมัน (Gas-In-Oil Test) สามารถแสดงให้เห็นถึงปัญหาในฉนวนส่วนต่างๆของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ และ การเปลี่ยนแปลงสภาพความหนืดต่างๆ และคุณสมบัติต่างไฟฟ้า สามารถที่จะทราบถึงข้อมูลเกี่ยวกับความผิดพลาดทางไฟฟ้าและทางกลของหม้อแปลง และบั้งที่ช่วยระบายความร้อนโดยปกติแล้วสามารถถ่ายน้ำมันจากหม้อแปลงไฟฟ้าโดยไม่ต้องทำการจัดจ้งหะการทำงานของมันและสามารถทำได้เป็นประจำ

คุณลักษณะจำเพาะ

ผลกระทบที่เกิดขึ้น

ความหนืด

ถ้าน้ำมันหม้อแปลงมีความหนืดต่ำ จะทำให้ประสิทธิภาพในการระบายความร้อนดี

ความแข็งแรง

ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งแรงเชิงกำลังไฟฟ้ามีค่าต่ำ เชิงกำลังไฟฟ้าแต่ละจะทำให้ก๊าซที่ละลายในน้ำมันเกิดการแตกตัวมากขึ้น และค่าความเป็นฉนวนของน้ำมันจะลดลง

จุดวาบไฟ

เป็นระดับอุณหภูมิที่ไอน้ำมันสามารถติดไฟขึ้นเองได้โดยธรรมชาติ ถ้าน้ำมันหม้อแปลงมีจุดวาบไฟต่ำ จะทำให้น้ำมันระเหยได้ง่ายและขยายตัวได้มาก

ความหนาแน่น

นั่นคือ ทำให้ความดันในหม้อแปลงมีค่าสูง เป็นค่าที่ระบุไว้เพื่อป้องกันมิให้น้ำมันกลายเป็นน้ำแข็งในสถานะที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยทั่วไปจะกำหนดไว้ประมาณ 0.895 g/cm^3 ที่ 20°C

จุดไหลเท

เป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับความหนาแน่น ซึ่งจะเป็นค่าอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่น้ำมันยังไหลได้

ค่ามุลน้ำมันและ

ค่าความเป็นกรด

เป็นค่าที่เกิดขึ้นภายหลังที่น้ำมันทำปฏิกิริยากับอากาศ ซึ่งหากค่าความเป็นกรดสูง จะทำให้ประสิทธิภาพการระบายความร้อนต่ำ และยังมีผลต่อการไหลเวียนของน้ำมันในท่อน้ำมันด้วย เพราะว่า มุลน้ำมันไปเกาะ

ภายในท่อน้ำมัน

ความแข็งแรงเชิงไฟฟ้า

เป็นค่าที่ระบุความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้า เพื่อให้ น้ำมันคงค่าความเป็นฉนวนได้ดี

การปะปนของสารอื่น

ได้แก่ สารจำพวก กำมะถันและน้ำ ซึ่งกรณีของ กำมะถันนั้นจะต้องไม่มีอยู่เลยในน้ำมัน ส่วนน้ำก็จะ ต้องอยู่ในพิสัย ทั้งนี้เพื่อรักษาความเป็นฉนวนของน้ำมัน

ตารางที่ 3.8 แสดงความหมายและผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจาก คุณลักษณะจำเพาะของของเหลว

3.5 ชนิดของขดลวดที่นำมาใช้เป็นลวดตัวนำในหม้อแปลง

วัสดุ (Materials) ขดลวดของหม้อแปลงทำหน้าที่รับและส่งพลังงานภายในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยเราจะพิจารณาถึงลักษณะของการเหนี่ยวนำของแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า และการเปลี่ยนแปลงของแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า (magneto-mechanical force) เพื่อใช้พิจารณาชนิดของขดลวดที่ใช้ภายในหม้อแปลงไฟฟ้าที่เหมาะสม

ตัวนำ (conductors) ถ้าความหนาแน่นของกระแสคือ J ไหลในตัวนำซึ่งมีค่าความต้านทานจำเพาะ (resistivity , ρ) และความหนาแน่น (σ) ค่าความสูญเสียต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร คือ $J^2\rho$ ค่าความสูญเสียต่อหนึ่งหน่วยมวลคือ $P = J^2\rho/\sigma$ ทองแดงมักนิยมใช้เป็นตัวนำมากที่สุดแต่ปัจจุบันมักใช้ อลูมิเนียม

ทองแดง มีการทดสอบจากสถาบัน IACS. ที่อุณหภูมิ 20°C ทองแดงมีค่า $\rho = 0.017241 \mu\Omega\text{m}$ สัมประสิทธิ์ความต้านทานต่ออุณหภูมิ (resistance-temperature-coefficient) = 0.00393 ต่อองศาเซลเซียส และความแข็งแรงเชิงยึดหยุ่น (tensile strength) = 220-250 MN/m² การทำงานที่อุณหภูมิต่างกันจะทำให้ค่าความแข็งแรงเชิงกลเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในความเป็นตัวนำ หม้อแปลงส่วนมากมักจะพันด้วยลวดทองแดงที่มีความนำไฟฟ้าสูง แต่ในหม้อแปลงตัวใหญ่ๆ จำเป็นต้องใช้ทองแดงที่ได้ทดสอบความแข็งแรงมาแล้ว ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ (turbo generator) ใช้โลหะทองแดงผสมโลหะเงิน (silver-barring) ซึ่งมีความต้านทานอุณหภูมิเพิ่มขึ้น โลหะผสมทองแดงกับแคดเมียม มักนิยมนำมาใช้เพราะสามารถขึ้นรูปได้โดยไม่มีความเสียหาย

อลูมิเนียม ตัวนำอลูมิเนียมอัลลอยที่ใช้งานกันทั่วไปได้แก่ชนิด BS 3242 มี ρ ที่ $20^\circ\text{C} = 0.0325 \mu\Omega\text{m}$ ในอุตสาหกรรมมักจะนิยมใช้อลูมิเนียมที่เป็นแผ่นในการพันขดลวดแรงดันต่ำของหม้อแปลง ที่มีพิสัยแคบๆ ถึง ปานกลาง ค่าลักษณะเฉพาะต่างๆ ของอลูมิเนียมที่ 20°C แสดงได้ดัง ตารางที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	ρ ($\mu\Omega\text{m}$)	α (per $^{\circ}\text{C}$)	σ (kg/m^3)
Copper: annealed	0.0172	0.00393	8900
hard-drawn	0.0178	0.00393	
Aluminium: cast	0.045	0.00390	2700
hard-drawn	0.0325	0.00390	

ตารางที่ 3.9 ค่าคุณสมบัติเฉพาะของทองแดงและอลูมิเนียมที่ 20 องศาเซลเซียส

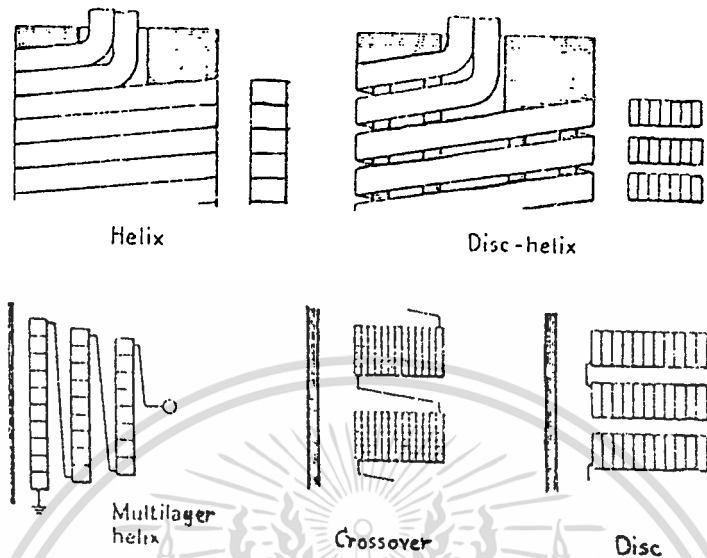
การพันหม้อแปลง (TRANSFORMER WINDINGS)

แบบของการพันขึ้นอยู่กับพิกัดของ MVA และ พิกัด kV ตามตารางข้างล่างนี้
แบบของการพันดูได้จากรูป

Transformer Windings					
Service	Rating MVA	H.V. winding kV	type	L.V. winding kV	type
Distribution	up to 1	11-33	foil, cross- over or multilayer	0.43	helix
System 1-30	33-66		disc	11	disc or helix
Transmission	30 and upward	132-500	disc or multilayer	11, 33, 66	disc or disc-helix
Generator	30 and upward	132-500	disc or multilayer	11-22	disc-helix

ตารางที่ 3. 10 แสดงลักษณะการพันขดลวดของหม้อแปลงชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานในเชิงวิชาการเท่านั้น เมื่อผู้ใดได้เห็นใบเขียวระบายนการการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 แสดงชนิดการพันขดลวดของหม้อแปลง

เฮลิคซ์ (HELIX) เป็นการพันทีละเส้นรอบ ๆ แกนกลาง ตัวนำจะมีเพียงเส้นเดียวหรือมากกว่า นำมาขนาบกัน ทีแต่ละปลายจะเชื่อมกัน

ดิสค์เฮลิคซ์ (DISC-HELIX) เมื่อมีพิกัดกระแสที่สูง ต้องใช้ตัวนำหลาย ๆ ตัวมาต่อขนาบกัน เป็นการนำ HELIX หลาย ๆ ชุดมาขนาบกัน

มัลติเลเยอร์เฮลิคซ์ (MULTILAYER HELIX) มักใช้ในด้านแรงดันสูงของหม้อแปลงตัวใหญ่ ๆ ซึ่งความจุไฟฟ้าของแต่ละเลเยอร์จะช่วยกระจาย แรงดันเซอร์จ (SURGE VOLTAGE) แต่ก็เป็นกรยากที่จะทำให้ตัวนำมีเลเยอร์ที่บาง ยาว และแข็งแรง

ครอสโอเวอร์ (CROSS-OVER) ลักษณะคล้ายมัลติเลเยอร์เฮลิคซ์เพียงแต่แต่ละส่วนจะสั้น และต่ออนุกรมกัน ซึ่งจะมีโทษระบายความร้อนแนวตั้ง

ดิสค์ (DISC) แตกต่างกับแบบอื่นที่การพัน ลักษณะแบบหนึ่งรอบต่อหนึ่งเลเยอร์ต้องพันเป็นคู่เพื่อให้ได้ระยะที่ต้องการ โดยจะเป็นการพันจากข้างนอกเข้าข้างใน แล้วนำมาประกอบกัน

คอนตินิวอัสดิสค์ (CONTINUOUS DISC) คล้ายกับแบบดิสค์ ขึ้นตอนคือ พันเข้าโดยไม่ตัดตัวนำ ทำให้มีพื้นที่เล็กลง ถ้าต้องการกระแสสูง ๆ ก็ทำการพันหลาย ๆ ตัว

ฟอยล์ (FOIL) ใช้อลูมิเนียมในการพัน นิยมใช้เนื่องจากบาง และยืดหยุ่นกว่าทองแดง เป็นการพันแบบบอบบิน (BOBBIN) 1 แกนต่อ 1 เลเยอร์

3.6 ฉนวนของขดลวดตัวนำ

วัสดุที่ใช้เป็นฉนวนของตัวนำมีลักษณะเฉพาะคือ ไม่เป็นโลหะ เป็นวัสดุธรรมชาติ หรือเป็นสารสังเคราะห์

วัสดุที่ใช้เป็นฉนวนของตัวนำในอุดมคติควรมีคุณสมบัติดังนี้

- 1. มีความทนทานทางไฟฟ้าสูง มีความทนทางสูงที่อุณหภูมิสูง
- 2. นำความร้อนได้ดี
- 3. ไม่เปลี่ยนสภาพที่อุณหภูมิสูง
- 4. มีความทนทานทางกลที่ดี

วัสดุที่ใช้ส่วนมากมีผลทางด้านอุณหภูมิ ซึ่งเราสามารถแบ่งชนิดของฉนวนได้ดังนี้
Class Y ได้แก่ ผ้าฝ้าย ผ้าไหม กระดาษ ไม้ เยื่อไม้ ฯลฯ ซึ่งไม่ชอบน้ำมัน
Class A ได้แก่ ฉนวนประเภท Class Y นำมาชุบน้ำมัน
Class E ได้แก่ ผ้าฝ้าย ผ้าไหม formaldehyde นำมาประกอบกันทำเป็นแผ่น
Class B ได้แก่ ไม้ก้ำ ใยแก้ว นำมาประกอบกัน
Class F ได้แก่ วัสดุประเภทเดียวกับ Class B แต่มีความทนต่ออุณหภูมิสูงกว่า
Class H ได้แก่ ใยแก้ว ประกอบกับ abestos และ built up ไม้ก้ำ ประกอบกับ ซิลิโคน เรซิน
Class C ได้แก่ ไม้ก้ำ เซรามิก แก้ว ควอตซ์ กับ ซิลิโคนเรซินทนความร้อนสูง

Insulation Class	Y	A	E	B	F	H	C
Maximum temp, °C	90	105	120	130	155	180	>180

ตารางที่ 3.11 แสดงค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ฉนวนแต่ละชนิดทนได้

ในสภาวะปกติ วัสดุเหล่านี้จะมีอายุใช้งานประมาณ 20 ปี และอายุการใช้งานนั้นขึ้นอยู่กับค่า ของอุณหภูมิขดลวดที่เกิดขึ้น

ตัวอย่างของวัสดุที่ใช้ทำฉนวนตัวนำ

ไมก้า (MICA) บริสุทธิ์ หรือที่ทำเป็นแผ่น นั้นใช้งานได้หลากหลาย ส่วนมากมักใช้ในรูปของแผ่นร่วมกับ SHEELAC BITUMEN หรือ POLYESTER

ไมก้าโฟเลียม (MICA FOLIUM) คือการห่อเศษ ไมก้าในกระดาษ ซึ่งอาจพันบนตัวนำแล้วขดระหว่างแผ่นความร้อนเพื่อทำให้วัสดุมีความแข็งแรงและปกป้องตัวนำจากอากาศ

ไฟเบอร์กลาส (FIBROUS GLASS) ทำมาจากวัสดุที่ไม่มี ออกไซด์ของ โลหะ อัลคาไลน์ ซึ่งจะทำให้สารเคลือบผิวของแก้วแตกหักง่าย เทปและผ้า จะมีความต้านทานสูงและนำความร้อนได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารของกองมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากกองมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม จะถือว่าผิดกฎหมาย และต้องรับผิดชอบต่อเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอสเบสทอส (ASBESTOS) ไม่มีความแข็งแรงทางกล ถึงแม้จะคล้ายใยฝ้ายก็ตาม แต่สามารถเทียบได้กับใยแก้ว ASBESTS กับ เรซินสังเคราะห์ ประกอบกัน จะมีความคงทนทางกลที่ดี
ใยฝ้าย (COTTON FIBRE) แล่ผ้าเย็บจากผ้าฝ้าย มีการทนความร้อนสูงแต่มีไฮโกรสโคปิก (HYGROSCOPIC) น้อยกว่าผ้าฝ้ายธรรมดา

โพลีเอไมด์ (POLYAMIDES) เช่น ไนลอน ทำเป็นแถบที่มีความทนทานทางกลสูง และ ช่วยประหยัดพื้นที่

สารสังเคราะห์เคลือบเรซิน (SYNTHETIC-RESIN ENAMELS) ทำให้มีความเรียบมาก และ ทำให้ขดลวดมีความต่อเนื่อง

วัสดุที่ทำเป็นเส้น (SLOT-LINING MATERIALS) นิยมใช้ในอดีต แต่ ไม่กล้า จะถูกทำให้งอในการพัน จึงมักใช้กับ เครื่องจักรตัวเล็ก ๆ

ไม้ (WOOD) การนำมาใช้โดยทำการ ลามิเนตก่อน มีราคาแพงแต่มีคุณภาพที่ดี

ซิลิโคน (SILICONES) ได้จากการรวม ซิลิคอน กับ ออกซิเจน จัดอยู่ใน Class H มักใช้ในหม้อแปลงแบบแห้ง

อีพอกไซด์ (EPOSIDE) มีการใช้มากขึ้นเพราะมีคุณสมบัติที่ดี มักใช้กับหม้อแปลงตัวเล็ก ๆ

น้ำมันปิโตรเลียม (PETROLEUM-BASED MINERAL OILS) มักใช้ในหม้อแปลงน้ำมันท่วม มีคุณสมบัติที่ดีในทุก ๆ ด้าน ทั้งความต้านทาน การถ่ายเทความร้อน ความหนืด และอื่น ๆ

อัสคาเรล (ASKARELS) เป็นของเหลวสังเคราะห์ประกอบด้วย 60/40 เฮกซะคลอโรดีเฟนนิล/ ไตรคลอโรเบนซีน มีคุณสมบัติที่เหมาะสมทั้งทางอุณหภูมิและความหนืด

CLASS A, B, C, F, และ H ใช้ในหม้อแปลงแบบแห้ง ซิลิโคนมีความได้เปรียบเพราะคุณสมบัติการป้องกันของมัน สำหรับหม้อแปลงแบบน้ำมันใช้ CLASS A กระจายทั่ว ๆ ไปหรือผ้าใช้สำหรับเครื่องจักรตัวเล็ก ๆ ส่วนสารเคลือบเรซินสังเคราะห์ ใช้กับด้านแรงต่ำของ 17.5 kV ส่วนหม้อแปลงชนิดน้ำมันใช้แบบ CLASS A

บทที่ 4

การวิเคราะห์สมการที่ใช้ในการหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นและผลกระทบของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ

การหาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นได้จากสมการกฎการทรงพลังงาน ระหว่างช่วงเวลา Δt โดยค่าอุณหภูมิในช่วงเวลาแรก(t_1)จะใช้ในการหาอุณหภูมิในช่วงเวลาต่อไป($t_1 + \Delta t$) หรือ(t_2) โดยเวลาจะเพิ่มขึ้นเป็นเวลาเท่ากับ Δt และเวลาที่ใช้ในการคำนวณช่วงสุดท้ายจะใช้ในการคำนวณช่วงถัดๆไป โดยในแต่ละช่วงเวลาจะมีการคำนวณค่า loss ต่างๆ และค่าความหนืด ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ และเพื่อให้ค่าที่คำนวณได้มีความถูกต้องมากที่สุด ต้องเลือกใช้ค่า Δt ที่มีค่าน้อยๆจะถูกดีกว่า

4.1 ค่าอุณหภูมิขดลวดเฉลี่ย (Average Winding Temperature) T_w

จากกฎการทรงพลังงานและพิจารณาในช่วงเวลา t_1 ถึง $t_1 + \Delta t = t_2$ สามารถแสดงสมการดังนี้

$$\begin{array}{l} \text{ความร้อนที่สร้างโดยขดลวด} \\ \text{ในเวลา } \Delta t (Q_{GEN,w}) \end{array} = \begin{array}{l} \text{ความร้อนที่ถูกดูดซับโดยขดลวด} \\ \text{ในเวลา } \Delta t (Q_{ABS,w}) \end{array} + \begin{array}{l} \text{ความร้อนที่สูญเสียโดยขดลวด} \\ \text{ในเวลา } \Delta t (Q_{LOST,w}) \end{array} \dots\dots\dots(1)$$

ค่าความร้อนที่สร้างโดยขดลวดในเวลา Δt หรือจาก $t_1 \rightarrow t_2$

$$Q_{GEN,w} = L^2 \left[P_w K_w + \frac{P_w}{K_w} \right] \Delta t \dots\dots\dots(2)$$

$$K_w = \frac{T_{w,1} + T_K}{T_{w,R} + T_K} \dots\dots\dots(3)$$

ค่าความร้อนที่ถูกดูดซับโดยขดลวดในเวลา Δt

$$Q_{ABS,w} = M_w C_{pw} (T_{w,1} - T_{w,2}) \dots\dots\dots(4)$$

สำหรับค่า มวลขดลวด(M_w) และค่าความร้อนจำเพาะ (C_{pw}) ของขดลวด สามารถหาได้จากสมการโดยอาศัยค่าคงที่ของเวลา (Time Constant),(T_w) ของขดลวด ที่ได้จากการวิเคราะห์

กราฟ cooling curve ที่ได้จากการทดสอบวัดอุณหภูมิของผู้ผลิต และสามารถหาค่า $M_w C_{pw}$ จากสมการ

$$M_w C_{pw} = \frac{(P_w + P_e)}{(T_{w,R} - T_{DAO,R})} \tau_w \quad \text{.....(5)}$$

ค่าความร้อนที่สูญเสียจากขดลวด ในเวลา Δt

สามารถพิจารณาได้ 2 กรณี โดยอาศัยลักษณะการระบายความร้อนของหม้อแปลง สำหรับการระบายความร้อนแบบ OA , FA และ NDFOA จะมีการพิจารณาถึงค่าความหนืดของของเหลวที่ใช้น้ำ โดยสมการที่ใช้หาค่าความร้อนที่สูญเสียในขดลวดในเวลา Δt คือ

$$Q_{LOST,W} = \left[\frac{T_{w,1} - T_{DAO,1}}{T_{w,R} - T_{DAO,R}} \right]^{5/4} \left[\frac{\mu_{w,R}}{\mu_{w,1}} \right]^{1/4} (P_w + P_e) \Delta t \quad \text{.....(6A)}$$

สำหรับการระบายความร้อนแบบ OFOA จะมีการเพิ่มปั๊มน้ำมันเข้ามา ทำให้ผลของความหนืดของของเหลวที่ใช้น้อยลง สมการที่ใช้ในการหาค่า ความร้อนที่สูญเสียในขดลวดในเวลา Δt คือ

$$Q_{LOST,W} = \left[\frac{T_{w,1} - T_{DAO,1}}{T_{w,R} - T_{DAO,R}} \right] \left[\frac{\mu_{w,R}}{\mu_{w,1}} \right] (P_w + P_e) \Delta t \quad \text{.....(6B)}$$

ดังนั้นนำสมการที่ (2) $\rightarrow$ (6) แทนในสมการที่ 1 สามารถหาค่าอุณหภูมิขดลวดเฉลี่ยจากสมการที่ 7

$$T = \frac{Q_{GEN,W} - Q_{LOST,W} + M_w C_{pw} T_{w,1}}{M_w C_{pw}} \quad \text{.....(7)}$$

4.2 ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำมันในท่อน้ำมันในขดลวด(Winding Duct Oil Temperature

Rise) ΔT_{DO} เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถหาค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำมันนี้ได้จากสมการข้างล่างนี้ จาก

$$T_{DO} - T_{BO} = \Delta T_{DO} = \left[\left(\frac{Q_{LOST,W}}{P_W + P_E} \right) \Delta t \right]^x (T_{DO,R} - T_{BO,R}) \quad \text{.....(8)}$$

โดยค่า $Q_{LOST,W}$ หาได้จากสมการที่ 6 สำหรับหม้อแปลงที่มีโหลดการระบายความร้อนแบบ NDFOA ถ้าไม่สามารถหาค่า $T_{DO,R}$ ได้ก็สามารถสมมติให้เท่ากับ $T_{W,R}$ ได้ สำหรับค่าของอุณหภูมิสูงสุดของน้ำมันในท่อน้ำมันในขดลวดจุด HOT SPOT (T_{WO}) สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\Delta T_{WO} = H_{HS} (T_{DO} - T_{BO}) \quad \text{.....(9)}$$

$$T_{WO} = T_{BO} + \Delta T_{WO} \quad \text{.....(10A)}$$

เมื่อค่าของอุณหภูมิในท่อน้ำมัน น้อยกว่า ค่าของอุณหภูมิของน้ำมันทางด้านบนของถังน้ำมัน ดังนั้น

$$T_{WO} = T_{TO} \quad \text{.....(10B)}$$

4.3 ค่าอุณหภูมิ Hot Spot ของขดลวด (winding hottest spot temperature) T_{HS}

ในการคำนวณหาค่า winding hottest spot temperature นั้น ใช้หลักสมดุลย์ทางความร้อน เช่นเดียวกับการหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดซึ่งสมการสามารถแสดงได้ดังนี้

ค่าความร้อนที่ สร้างที่ ขดสปอตในเวลา Δt $Q_{GEN,HS}$	=	ค่าความร้อนที่ถูก ดูดซับที่ ขดสปอตใน เวลา Δt $Q_{ABS,HS}$	+	ค่าความร้อน สูญเสียที่ ขดสปอตใน เวลา Δt $Q_{LOST,HS}$	(11)
--	---	---	---	---	-----------

การหาค่าความร้อนที่สร้างขึ้นที่จุดที่เกิดอุณหภูมิฮอตสปอต จำเป็นต้องตรวจสอบหาค่าการสูญเสียจากอุณหภูมิของขดลวดปกติ ไปยังจุดที่ขดลวดร้อนที่สุด สามารถพิจารณาหาค่าการสูญเสียนี้จากสมการข้างล่างนี้

$$P_{HS} = \left[\frac{T_{HSR} + T_K}{T_{W,R} + T_K} \right] P_W \quad \text{.....(12)}$$

$$P_{EHS} = E_{HS} P_{HS} \quad \text{.....(13)}$$

ดังนั้นค่าความร้อนที่สร้างขึ้นที่จุดที่ร้อนที่สุดของขดลวดสามารถแสดงได้ดังสมการข้างล่างนี้

$$Q_{GEN,HS} = L^2 \left[P_{HS} K_{HS} + \frac{P_{EHS}}{K_{HS}} \right] \Delta t \quad \text{.....(14)}$$

$$K_{HS} = \frac{T_{HS,1} + T_K}{T_{HS,R} + T_K} \quad \text{.....(15)}$$

ค่าความร้อนที่ถูกดูดซับ ณ จุดที่ร้อนที่สุดของขดลวดสามารถหาได้จากสมการนี้

$$Q_{ABS,HS} = M_W C_{PW} (T_{HS,2} - T_{HS,1}) \quad \text{.....(16)}$$

ค่าความร้อนที่สูญเสียที่ตำแหน่งที่ขดลวดร้อนที่สุด สามารถพิจารณาได้เป็น 2 กรณีเช่นกัน แยกตามวิธีการระบายความร้อน สำหรับวิธีการการระบายความร้อนแบบ OA, FA และNDFOA สามารถหาค่าความร้อนที่สูญเสียจากสมการข้างล่างนี้

$$Q_{LOST,HS} = \left[\frac{T_{HS,1} - T_{WO}}{T_{HS,R} - T_{WO,R}} \right]^{5/4} \left[\frac{P_{HS}}{P_{EHS}} \right]^{1/4} \Delta t \quad \text{.....(17)}$$

สำหรับวิธีการการระบายความร้อนแบบ DFOA ไม่ต้องพิจารณาผลของความหนืดที่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงตัดผลของความหนืดทิ้งไปเนื่องจากผล ของปั๊มน้ำมันที่เดิมเข้าไป สมการในการพิจารณาจึงแสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q_{LOST,HS} = \left[\frac{T_{HS,1} - T_{WO}}{T_{HS,R} - T_{WO,R}} \right] \left[\frac{P_{HS}}{P_{EHS}} \right] \Delta t \quad \dots\dots\dots(18)$$

แทนค่าสมการที่ 12 ถึง สมการที่ 18 ลงในสมการที่ 11 และหาค่าอุณหภูมิฮอตสปอตได้ดังนี้

$$T_{HS,2} = \frac{Q_{GEN,HS} - Q_{LOST,HS} + M_w C_{PW} T_{HS,1}}{M_w C_{PW}} \quad \dots\dots\dots(19)$$

4.4 อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำมัน(average oil temperature) T_Q

ในการวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำมัน เหมือนกับการวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวด ค่าความร้อนที่สูญเสียโดยขดลวดไปยังท่อน้ำมัน และความร้อนที่สร้างโดยแกนเหล็ก ซึ่งทั้งหมดจะถูกดูดซับโดยน้ำมันในถัง และ กระจายความรอนและถ่ายเทไปยังอากาศโดยรอบ ดังนั้นสามารถสร้างสมดุลความร้อนได้ตามสมการข้างล่างนี้

ค่าความ ร้อนสูญเสียจาก ขดลวดไปยัง น้ำมันใน เวลา Δt	+	ค่าความ ร้อนที่สร้างใน แกนเหล็ก ในเวลา Δt	+	ค่าความ ร้อนที่เกิดจาก สเตรย์ลอส ในเวลา Δt	=	ค่าความร้อน ที่ถูกดูดซับ โดยถังน้ำมัน และน้ำมัน ในช่วงเวลา Δt	+	ค่าความร้อน ที่สูญเสียใน ถังน้ำมันและ ตัวเรดิเอเตอร์ ในช่วงเวลา Δt	(20)
--	---	--	---	---	---	---	---	--	-----------

ค่าความร้อนที่สร้างในแกนเหล็กจะเปลี่ยนแปลง เล็กน้อยตามอุณหภูมิที่เกิดขึ้นแต่ในที่นี้จะสมมุติให้คงที่ และในช่วงเวลาที่ทำงานเกินพิกัดค่าความร้อนที่สูญเสียในขดลวดก็จะเพิ่มขึ้นด้วย สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ ดังนี้

ในสภาวะใช้งานปกติ

$$Q_C = P_{C,R} \Delta t \quad \dots\dots\dots(21A)$$

ในสภาวะใช้งานเกินพิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q_C = P_{C,OB} \Delta t \tag{21B}$$

ค่าความร้อนที่สร้างโดย Stray loss หาได้จากสมการ

$$Q_S = \left[\frac{L^2 P_s}{K_w} \right] \Delta t \tag{22}$$

ค่า K_w คือค่าเดียวกับที่ใช้ในสมการที่ 3

ค่าความร้อนที่ถูกดูดซับโดย ถังน้ำมัน, แกนเหล็ก และน้ำมัน สามารถแสดงโดยสมการ

$$Q_{ABS,O} = (\sum MC_P)(T_{O,2} - T_{O,1}) \tag{23}$$

$$\sum MC_P = \dot{M}_{TANK} C_{PTANK} + \dot{M}_{CORE} C_{PCORE} + \dot{M}_{OIL} C_{POIL} \tag{24}$$

โดยค่ามวลของแกนเหล็กสามารถหาได้เมื่อทราบผลรวมของมวลของหม้อแปลง จากสม

การ

$$M_{CORE} = M_{CC} - M_w \tag{25}$$

$$M_w = \frac{M_w C_{PW}}{C_{PW}} \tag{26}$$

ค่าความร้อนที่สูญเสียในน้ำมันสามารถแสดงดังสมการ

$$Q_{LOST,O} = \left[\frac{T_{O,1} - T_{A,1}}{T_{O,R} - T_{A,R}} \right]^{1/y} P_T \Delta t \tag{27}$$

$$P_T = P_w + P_E + P_S + P_C \tag{28}$$

แทนค่าสมการที่ 21 ถึงสมการที่ 28 ในสมการที่ 20 จะสามารถหาค่า อุณหภูมิของน้ำมัน

เฉลี่ยได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_{O,2} = \frac{Q_{LOST,W} + Q_S + Q_C - Q_{LOST,O} + (\sum MC_P)T_{O,1}}{\sum MC_P} \quad \text{.....(29)}$$

4.5 อุณหภูมิของน้ำมันทางด้านบน และ ด้านล่างของหม้อแปลง (Top and Bottom oil temperature) T_{TO}, T_{BO}

สามารถพิจารณาหาค่าต่างๆได้จากสมการ

$$T_{TO} = T_O + \frac{\Delta T_{TB}}{2} \quad \text{.....(30)}$$

$$T_{BO} = T_O + \frac{\Delta T_{TB}}{2} \quad \text{.....(31)}$$

$$\Delta T_{TB} = T_{TO} - T_{BO} = \left[\frac{Q_{LOST,O}}{P_T \Delta t} \right]^2 (T_{TO,R} - T_{BO,R}) \quad \text{.....(32)}$$

โดยค่า T_O คือค่าจากสมการที่ 29

4.6 ค่าความหนืดของของเหลวและค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุที่ใช้ μ, C_p

เนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีผลทำให้ค่าความหนืดของของเหลวที่ใช้ทำ
ฉนวนเปลี่ยนไปดังสมการ

$$\mu = Be^{\frac{C}{(T+273)}} \quad \text{.....(33)}$$

ค่าของอุณหภูมิที่ใช้ในสมการข้างต้นสามารถพิจารณาจาก ตารางที่ 1 สำหรับค่าคงที่ของวัสดุที่นำมาใช้ B,C สามารถพิจารณาเลือกใช้ได้จาก ตารางที่ 2 และตารางที่ 2 ยังแสดงค่า ความร้อนจำเพาะ C_p ของวัสดุที่ใช้ด้วย

ค่าความหนืด	อุณหภูมิที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความหนืด
$\mu_{w,R}$	$(T_{w,R}+T_{DAO,R})/2$
$\mu_{w,I}$	$(T_{w,I}+T_{DAO,I})/2$
$\mu_{HS,R}$	$(T_{HS,R}+T_{WO,R})/2$
$\mu_{HS,I}$	$(T_{HS,I}+T_{WO,I})/2$

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความหนืด

วัสดุ	C_p (watt-min./ °C)	lb. B	C
น้ำมัน	13.92	.0013573	2797.30
ซิลิโคน	11.49	.12127	1782.30
HTHC	14.55	.00007343	4434.7
ถังน้ำมัน(เหล็ก)	3.51		
แกน(เหล็ก)	3.51		
ทองแดง	2.91		
อลูมิเนียม	6.80		

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความจุความร้อนจำเพาะ และค่าคงที่ เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าความหนืด

บทที่ 5

ผลการทดลองและโปรแกรมที่ใช้

จากสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆ ของหม้อแปลงกับตัวแปรค่าต่างๆ ที่ได้เสนอในบทที่ 4 สามารถนำมาเขียนโปรแกรมคำนวณค่าอุณหภูมิดังกล่าวในบทนี้ และสำหรับการใช้งานเป็นไปได้อย่างขึ้น ได้นำโปรแกรมซึ่งเขียนด้วยภาษาปาสคาล (Turbo Pascal) ไปดัดแปลงให้ผู้ใช้สามารถเรียนรู้และใช้งานได้อย่างขึ้นในโปรแกรมวิชวลเบสิก (Visual BASIC) ดังจะได้นำเสนอต่อไป

5.1 โปรแกรมภาษาปาสคาลต้นแบบในการคำนวณ

```

program Predict;
uses crt;
var again : char ;

procedure Calculate;
{ Variable Define }
var    {Data input}   ThsR ,TwR ,TaR, TbR, TtR, TdaoR,TwoR,Ta1,Pe,Pw,Pc,Ps,
                                Pt, MTank , Moil , Mcore , Mw , t , Load ,timecon ,
                                {Data output} Ths1, Ths2, Tw1, Tw2, To1, To2, Phs ,Pehs ,Ehs ,
                                QgenW, QlostW , QlostO, QgenHS, QlostHS, Khs ,
                                Qc, Qs, Uhsr, Uhs1, Uwr, Uw1, Kw, dTtb, Tto, Tbo,Two,
                                MC, dTdo, dTwo, MwCpw, Mcc,dThs,

                                {Definite Data} Cptank , Cpcore ,Cpoil,Cpw, B ,C , Hhs ,Tk , J , L
                                : real;

                                {Variable}    i,n,m,p,liquid,z,cool,winding : integer ;

                                Fgraph  :: text;

                                name , liq , coolm ,wind : string[30];

begin

clrscr;
  
```

{ Input Value from User }

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

write('Name of file to keep :> '); readln(name);
assign(Fgraph, name); rewrite(Fgraph);  writeln;
writeln('***** Please insert data of your Transformer. *****');
write('Mass of tank (Lbs.) = ');      readln(Mtank);
write('Mass of core + coil (Lbs.) = '); readln(Mcc);
write('Mass of oil (Lbs.) = ');      ;readln(Moil);
write('Ta,R = ');readln(TaR);        write('Tw,R = ');readln(TwR);
write('Tt,R = ');readln(TtR);        write('Tb,R = ');readln(TbR);
write('THS,R = ');      readln(THSR);
write('Temp of ambient = ');readln(Ta1);
write('Two,R = ');readln(TwoR);write('Pw(w) = ');readln(Pw);
write('Pe(w) = ');readln(Pe);        write('Ps(w) = ');readln(Ps);
write('Pc(w) = ');readln(Pc);      }
timecon := 14;
write('Load you want take = ');      readln(Load);
write('Temperature near you = '); readln(Ta1) ;
writeln ('      1. Oil');      writeln ('      2. Silicone');
writeln ('      3. HTHC');      write('Type of LIQUID used in Transformer. => ');
readln(Liquid);      writeln ('-----');
writeln ('      1. Copper');      writeln ('      2. Aluminium');
write('Type of WINDING (1,2) => ');readln(winding);
writeln ('      1. OA ');writeln ('      2. FA ');writeln ('      3. NDFOA ');
writeln ('      4. DFOA');
write('Type of COOLING MODE. => ');readln(Cool);
writeln (' n      Ths      Tw      To      Tt      Tb      Two');
case Liquid of
    1: begin B:=0.00135730;C:=2797.3;Cpoil:=13.92;liq:='oil';end;
    2: begin B:=0.12127000;C:=1782.3;Cpoil:=11.49;liq:='Silicone'; end;
    3: begin B:=0.00007343;C:=4434.7;Cpoil:=14.55;liq:='HTHC'; end;
end; {case}

```

case.cool of

```
1:begin Ttr:= 59 ; Tbr:= 33 ; coolm:='OA' end;
2:begin Ttr:= 55 ; Tbr:= 25 ; coolm:='FA' end;
3:begin Ttr:= 45 ; Tbr:= 35 ; coolm:='NDFOA'end;
4:begin Ttr:= 59 ; Tbr:= 55 ; coolm:='DFOA' end;
```

end;

Tdaor := (Ttr+Tbr)/2 ;

case winding of

```
1: begin Tk:=234.5;Cpw := 2.91 ;wind:='copper';end;
2: begin Tk:=225.0;Cpw := 6.80 ;wind:='Aluminium';end;
end; {case}
```

m := 1; z := 0 ;

writeln(Fgraph,' t= ',t:2, ', load per unit = ',load:2,', liquid = ',liq);

writeln(Fgraph,' winding = ',wind,', Cooling = ',coolm);

{begin with ambient temp}

Tw1 := Tal ; Tol :=Tal ;

Ths1:=Tal ; Tbo := Tal ;

Tto := Tal ; Two :=Tal ;

writeln(Fgraph,' n Ths Tw To Tt Tb Two');

writeln(m:3,Ths1:10:3,Tw1:10:3,Tol:10:3,Tto:10:3,Tbo:10:3,Two:10:3);

{ writeln(Fgraph,m:3,Ths1:10:3,Tw1:10:3,Tol:10:3,Tto:10:3,Tbo:10:3,Two:10:3); }

Cpcore := 3.51 ; Cptank := 3.51 ;

t := 1 ;

{ Cpcore = (watts-min)/lb. C

END OF INPUT VALUE }

repeat

Kw :=(Tw1+Tk)/(TwR+Tk);

เอกสารนี้เป็นเอกสารของงานวิจัยที่จัดทำขึ้นโดยศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานทดแทนของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


```

MwCpw := ((Pw+Pe)*timecon)/(TwR-TdaoR);
Mw:=MwCpw / Cpw;
Mcore := Mcc - Mw;
case cool of
1..3: begin
    UwR := B * ( exp(C / (((TwR+TdaoR)/2)+273)) ) ;
    Uw1 := B * ( exp(C / (((Tw1+(1.3*To1))/2)+273)) ) ;
    if Tw1 = To1 then QlostW := 0 else
    QlostW := (exp( 1.25 * ln((Tw1-(1.05*To1))/(TwR-TdaoR)))) * (exp( 0.25 * ln
    ((UwR/Uw1)))) * (Pw+PE) * t ;
    end;
    4: QlostW := ((Tw1-(1.05*To1))/(TwR-TdaoR)) * (PE+PW) * t ;
    end; {case}
Tw2 := ((QgenW-QlostW)/(MwCpw)) + Tw1 ;
{END OF Tw}
{ Find To }
MC := (Mtank*Cptank) + (Mcore*Cpcore) + (Moil*Cpoil) ;
Qc := 1.5*Pc*t ; { find at overexciting }
Qs := ((sqr(Load)*Ps)/Kw)*t ;
Pt := Pw+Pe+Pc+Ps ;
if To1 = Ta1 then QlostO := 0 else
case Cool of
1: QlostO := (exp((1.25)*ln((To1-Ta1)/(TdaoR-TaR))))*Pt*t;
2..3: QlostO := (exp((1.11)*ln((To1-Ta1)/(TdaoR-TaR))))*Pt*t;
4: QlostO := ((To1-Ta1)/(TdaoR-TaR)) * Pt * t ;
end; {case}
{QonO := QlostW+Qs+Qc;}
To2 := ((QlostW+Qs+Qc-QlostO)/MC)+To1 ;{ Should more higer }
{END OF To}
{ Find Tto , Tbo }

```

```

{ dTtb is temp rise in duct = top - bottom }
if QlostO = 0 then dTtb := 0 else
case Cool of
    1..2: dTtb := (exp(0.5*ln(QlostO/(PT*t))))*(TtR-TbR);
    3..4: dTtb := (QlostO/(PT*t))*(TtR-TbR);
end; { case }
Tto := To2+(dTtb/2)
{***** Problem*****};
Tbo := To2-(dTtb/2);
{ Then To1 = (Tbo+Tto)/2 = Tdao1
END OF Tt,Tb }
{ Find Two }
Hhs := 0.9 { around 0.8 - 0.9 } ;
if Qlostw = 0 then dTdo := 0 else
case Cool of
    1..3: dTdo := (exp(0.5*ln(QlostW/((Pw+Pe)*t))))*((1.2*TtR)-TbR);
    4: dTdo := (QlostW/((Pw+PE)*t))*(TtR-TbR);
end;{case}
dTtwo := hHS * dTdo ;
Two := Tbo + dTwo
{END OF Two}

{ Find Ths }
Phs := ((Thsr+Tk)/(Twr+Tk))*Pw ;
Ehs := Pe/Pw { not sure ***** } ;
Pehs := Ehs*Phs ;
Khs := ((Thsl+Tk)/(Thsr+Tk)) ;
QgenHS:= sqr(Load)*((Phs*Khs)+(Pehs/Khs))*t;
case Cool of

```

1..3: begin

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Uhsr:=B*(exp(C/(((Thsr+TwoR)/2)+273)));
Uhs1:=B*(exp(C/(((Ths1+Two)/2)+273)));
if Ths1 <= Two then QlostHS := 0 else
QlostHS := (exp(1.25*ln((Ths1-Two)/(THSR-TwoR))))
*(exp(0.25*ln((UHSR/UHS1))))*(Phs+Pehs)*t;
end;
4:  QlostHS:=((THS1-Two)/(THSR-TwoR))*(Phs+Pehs)*t;
end; {case}

Ths2 := ((QgenHS-QlostHS)/(MwCpw))+Ths1 {mark};
{END OF THS}
{ if Tw2 > Ths2 then readln else }
dThs := Abs(Ths2 - Ths1);
Tw1 := Tw2 ; Ths1:= Ths2 ; Tol := To2 ;
{ show the results }
m := m+1 ;
writeln (m:3,Ths1:10:3,Tw1:10:3,Tol:10:3,Tto:10:3,Tbo:10:3,Two:10:3);
{ writeln (Fgraph,m:3,Ths1:10:3,Tw1:10:3,Tol:10:3,Tto:10:3,Tbo:10:3);}
p := m mod 15;
if p = 0 then
begin
z := z + 1;
writeln (Fgraph,z:3,Ths1:10:3,Tw1:10:3,Tol:10:3,Tto:10:3,Tbo:10:3); readln;
writeln (' n   Ths   Tw   To   Tt   Tb   Two');
end;
until dThs < 0.05 ;
close(Fgraph);
end;

begin{main}
repeat

```


5.2 ผลการรันโปรแกรม

จากโปรแกรมจะได้แสดงค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้น 5 ค่าคือ

1. อุณหภูมิ ณ จุดร้อนที่สุดของหม้อแปลง (Hottest spot Temperature)
2. อุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวด (Average Winding Temperature)
3. อุณหภูมิเฉลี่ยของของเหลวภายในหม้อแปลง (Average oil Temperature)
4. อุณหภูมิที่ด้านบนของหม้อแปลง (Top oil Temperature)
5. อุณหภูมิที่ด้านล่างของหม้อแปลงซึ่งเป็นจุดที่ของเหลวผ่านการระบายความร้อนจากตัวระบายความร้อนมาแล้ว (Bottom oil Temperature)

ในการทดสอบโปรแกรมจะใช้ตัวอย่างหม้อแปลงขนาดต่างๆ กันโดยการป้อนข้อมูลที่จำเป็นในการคำนวณค่าเริ่มต้นซึ่งข้อมูลดังกล่าวได้แก่

1. โหลดที่ผู้ใช้งานต้องการ ซึ่งในตัวอย่างที่จะได้แสดงต่อไปจะแสดงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของหม้อแปลงตัวเดียวกันแต่ใช้งานที่สภาวะโหลดต่างๆ ได้แก่ 0.7 p.u.load , 1.0 p.u.load และ 1.5 p.u.load

2. ชนิดของของเหลวที่ใช้ในการระบายความร้อน
3. ชนิดของขดลวด
4. วิธีการระบายความร้อนซึ่งแบ่งออกเป็น 4 แบบ

- 4.1 OA (Natural oil and air circulation)
- 4.2 FA (Natural oil and forced air circulation)
- 4.3 NDFOA (Non-direct forced oil and air circulation)
- 4.4 DFOA (Direct forced oil and air circulation)

5. น้ำหนักของส่วนต่างๆ ของหม้อแปลง ได้แก่ น้ำหนักแกนเหล็ก น้ำหนักขดลวด หรือผู้ใช้งานป้อนค่ารวมของแกนเหล็กกับขดลวดก็ได้ โดยจะใช้การคำนวณแยกค่าดังกล่าวด้วยค่าคงตัวของเวลา (time constant) ดังที่ได้กล่าวในบทที่ 4 และน้ำหนักของน้ำมันและของตัวถังหม้อแปลงด้วย ซึ่งค่าต่างๆ ต้องป้อนเป็นปอนด์

6. ค่าอุณหภูมิทดสอบที่พิกัดโหลด ซึ่งค่าดังกล่าวจะได้จากผู้ผลิต ได้แก่ อุณหภูมิสถานะแวดล้อม อุณหภูมิฮอตสปอต อุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวด อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำมัน รวมถึงอุณหภูมิที่ด้านบนและด้านล่างของหม้อแปลงด้วย

7. ค่าความสูญเสียต่างๆ ของหม้อแปลง ได้แก่ ความสูญเสียจากความต้านทานของขดลวด (I²R loss) ความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน ความสูญเสียเนื่องจากโครงสร้างของหม้อแปลง และความสูญเสียในแกนเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนี้ไปจะได้แสดงผลการทดสอบจากตัวอย่างหม้อแปลงขนาด 52.267 MVA (จากเปเปอร์ของ IEEE) และเปรียบเทียบผลที่กับค่าที่ทำการทดสอบจริง

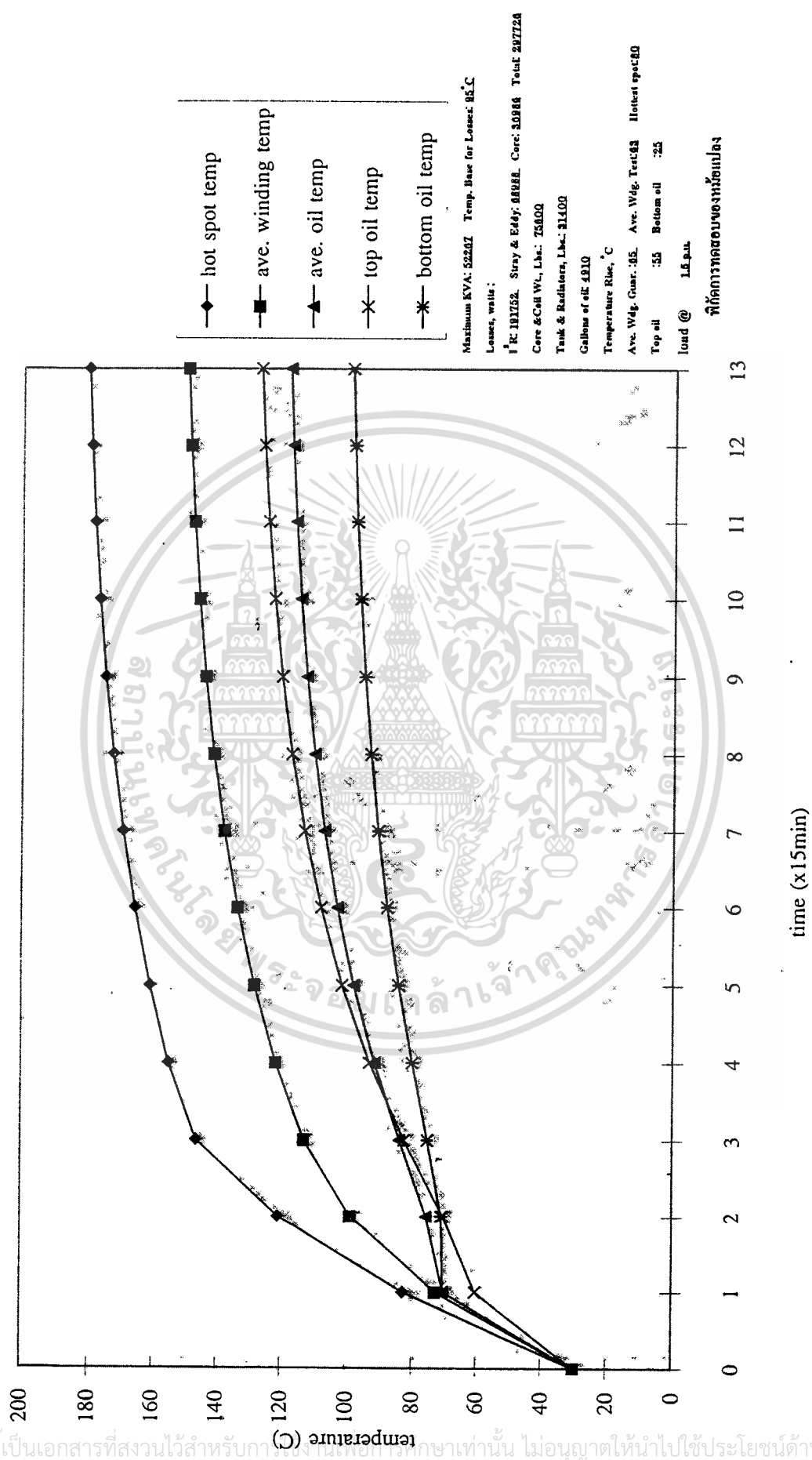
5.3 ตัวอย่างการทดสอบโปรแกรม

หม้อแปลงขนาด 52.267 MVA ซึ่งมีค่าเฉพาะของหม้อแปลงดังตารางที่ 5.1

Cooling mode	FA	NDFOA
Maximum KVA	52267	52267
Temp. Base for Losses	95°C	95°C
Losses, watts :		
I^2R	191752	191752
Stray & Eddy	68988	68988
Core	36986	36986
Total	297726	297726
Core & Coil Wt., Lbs.	75600	75600
Tank & Radiators, Lbs.	31400	31400
Gallons of oil	4910	4910
Temperature Rise, °C		
Ave. Wdg. Guar.	65	65
Ave. Wdg. Test.	63	63
Hottest spot	80	80
Top oil	55	45
Bottom oil	25	35

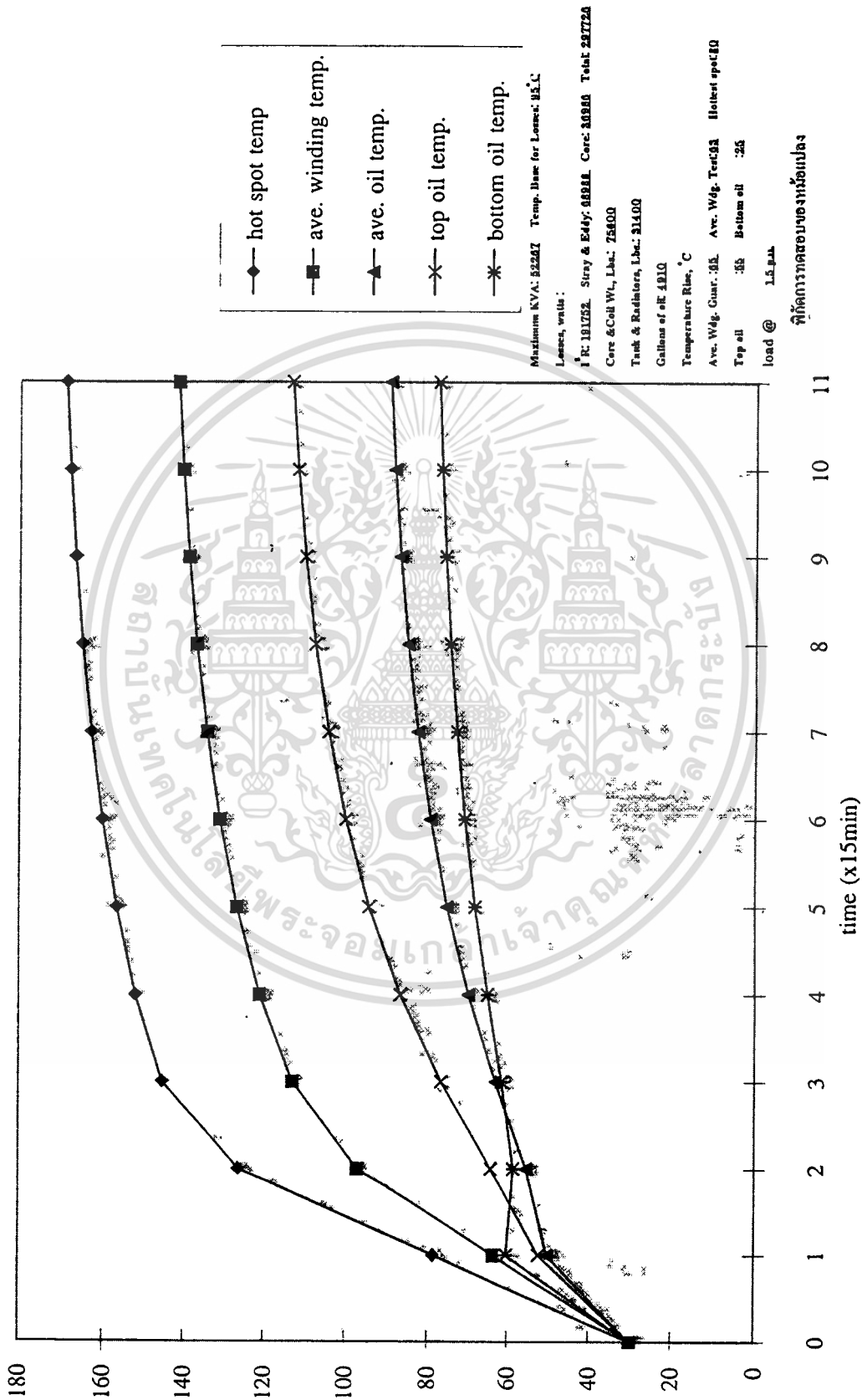
ตารางที่ 5.1 แสดงคุณลักษณะของหม้อแปลง

และหลังจากได้ป้อนค่าจากตารางที่ 5.1 ในโปรแกรมแล้วสามารถนำผลที่ได้มาแสดงในกราฟดังรูปที่ 5.1 ถึง 5.4 ซึ่งแสดงอุณหภูมิในแต่ละวิธีการระบายความร้อน และรูปที่ 5.5 ถึง 5.8 แสดงผลเปรียบเทียบของการใช้งานหม้อแปลงที่สภาวะโหลดต่าง ๆ กันโดยแสดงเฉพาะค่าอุณหภูมิฮอตสปอตเท่านั้น



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกับเวลาของหม้อแปลงที่มีการระบายความร้อนแบบอาศัยการไหลเวียนของน้ำมันและอากาศตามธรรมชาติ

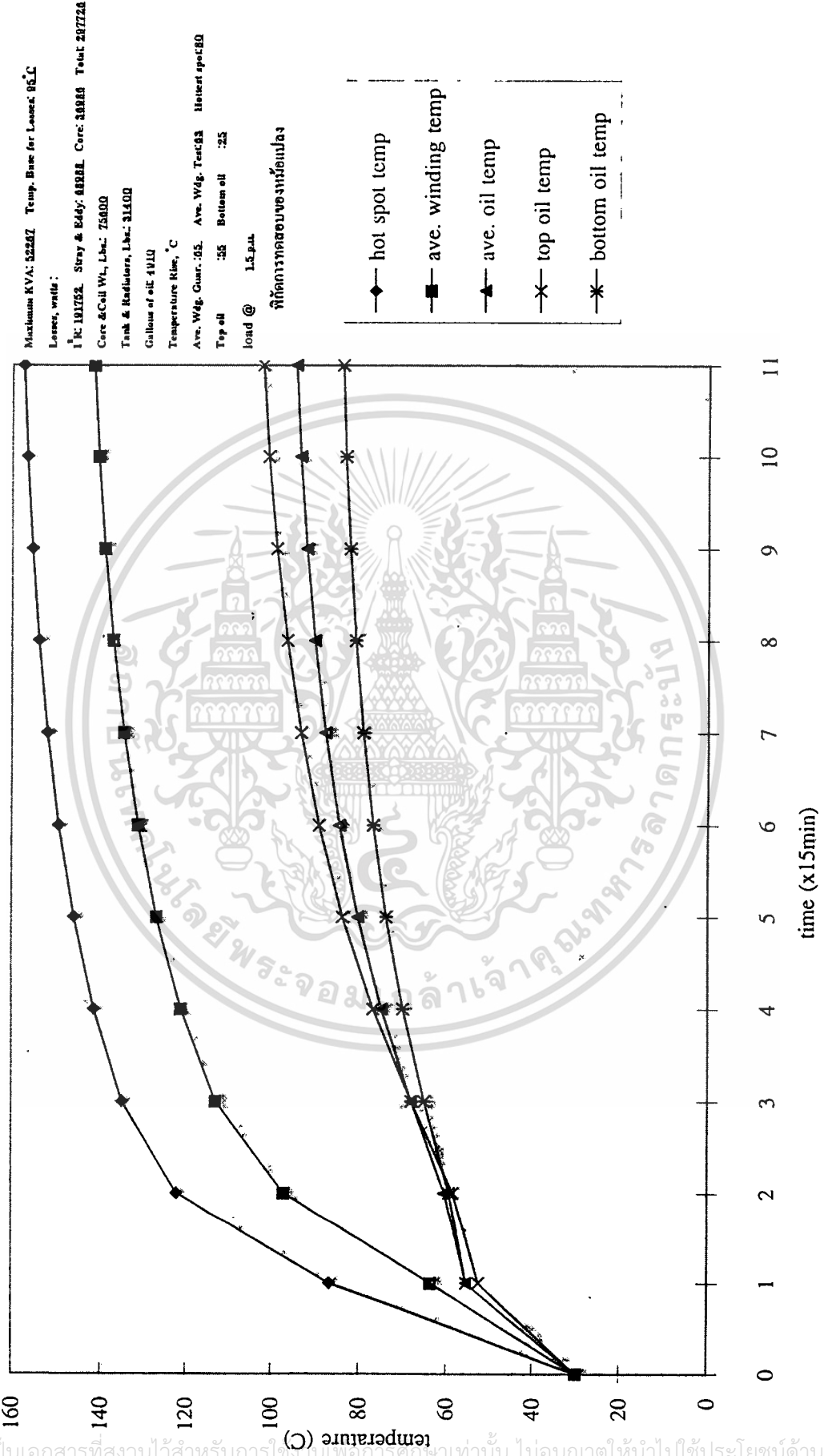
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ที่ได้การทดสอบของหม้อแปลง

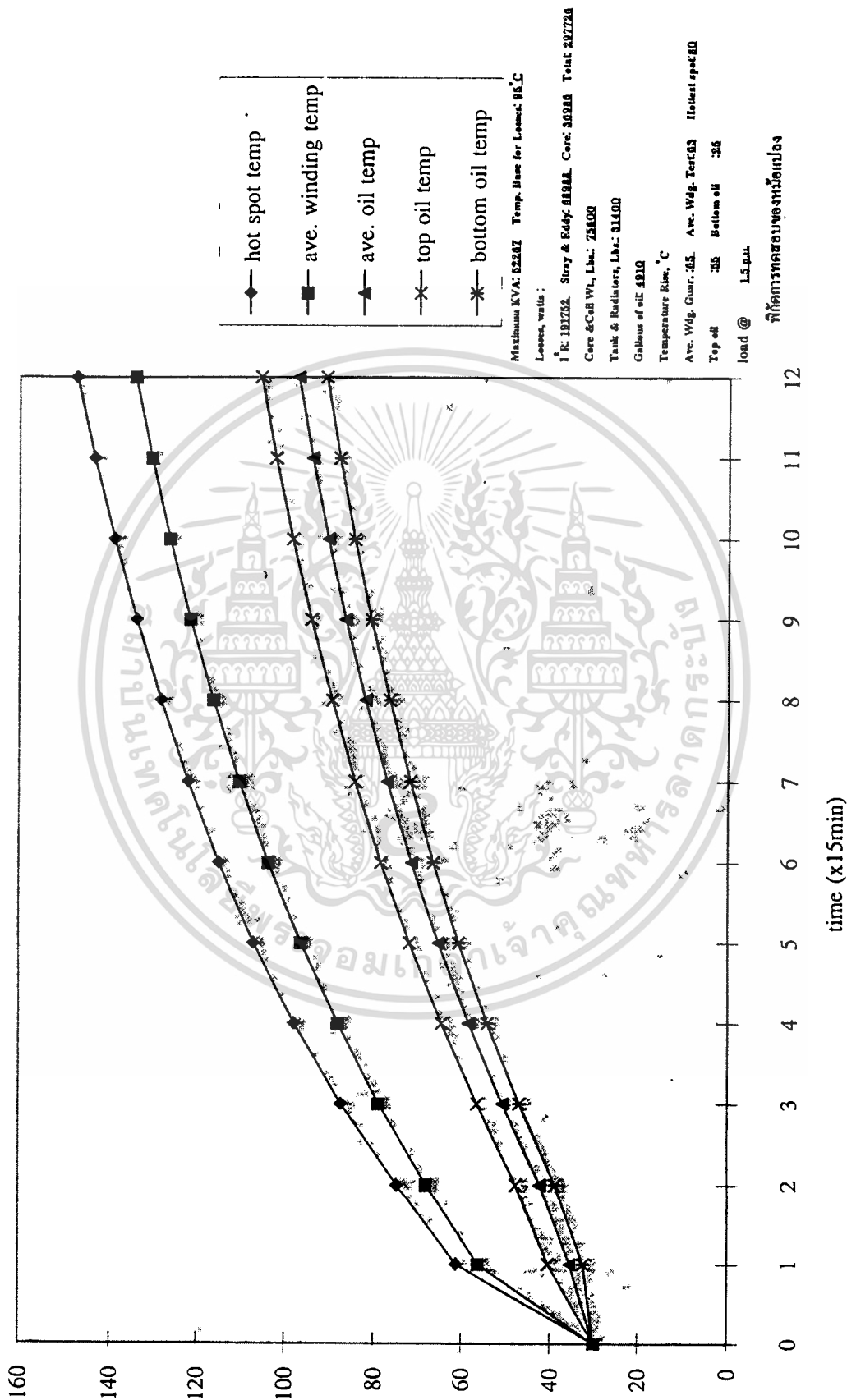
รูปที่ 6.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกับเวลาของหม้อแปลงที่การระบายความร้อนแบบการไหลเวียนของน้ำมันตามธรรมชาติที่มีพัฒนาช่วยระบาย

ความร้อนออกสู่อากาศ



รูปที่ 5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลาของหม้อแปลงที่มีการระบายความร้อนแบบไม่โดยตรง

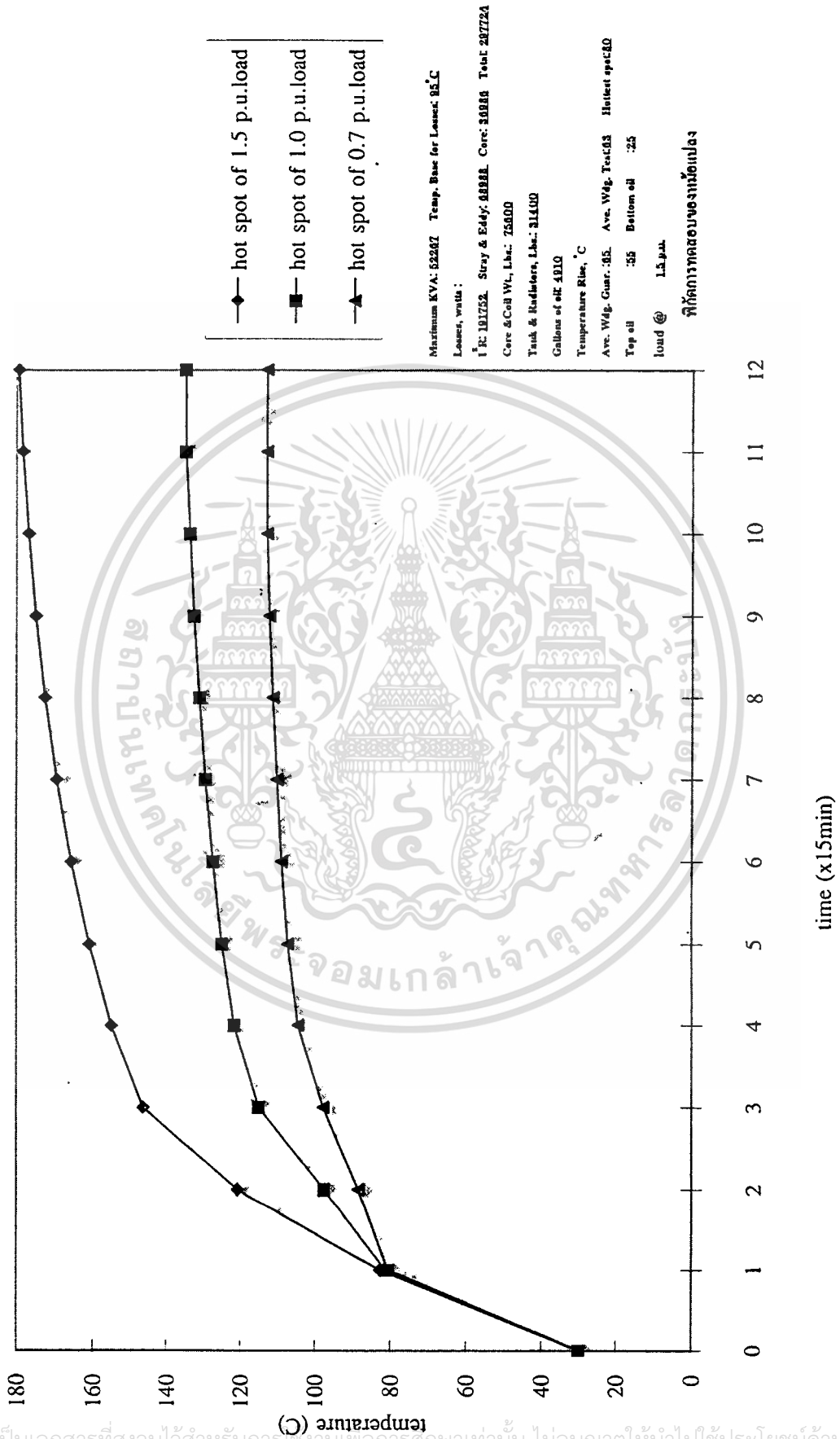
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



อัตราการไหลของน้ำมัน

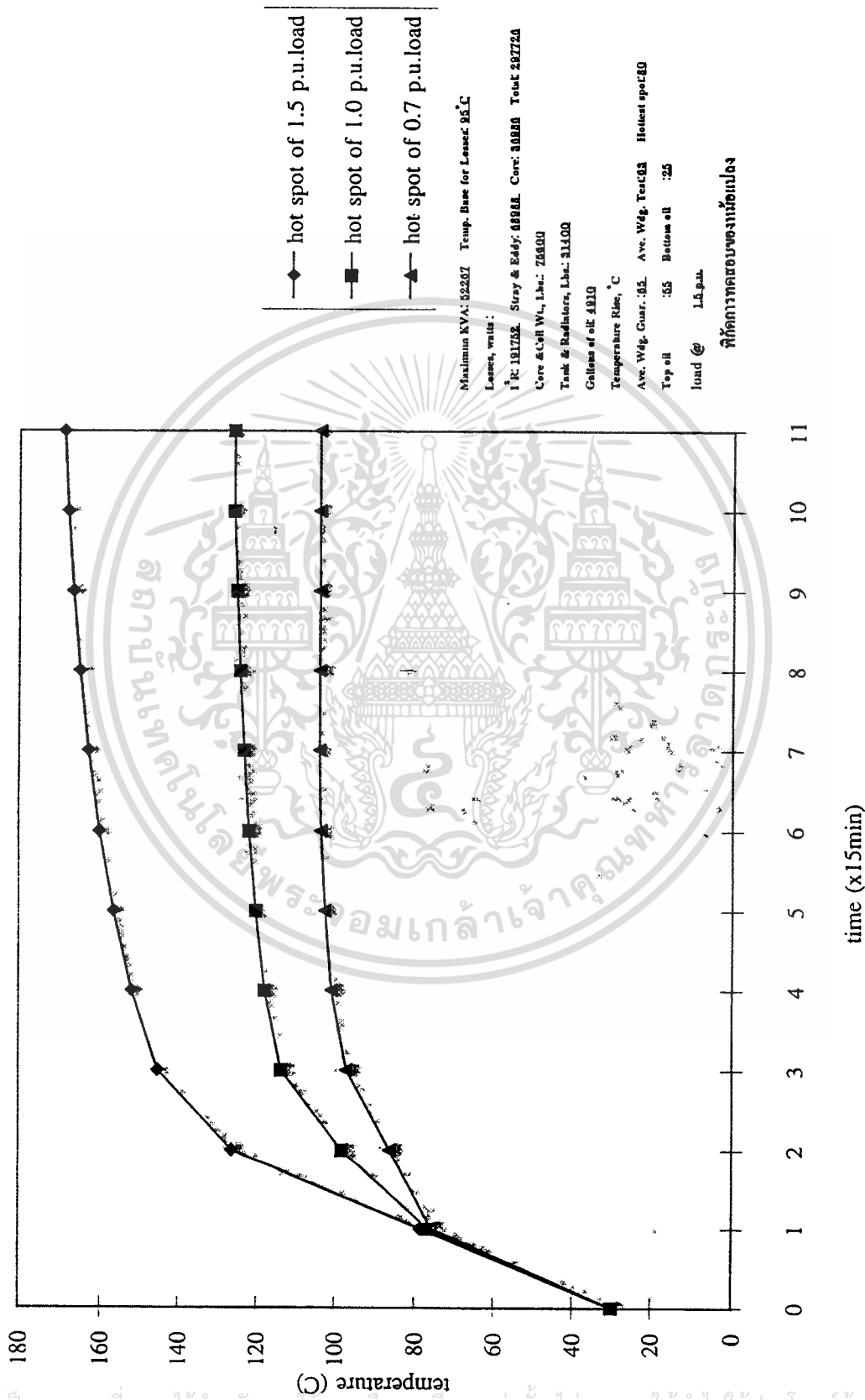
รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกับเวลาของหม้อแปลงที่มีการระบายความร้อนแบบการไหลเวียนภายในโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



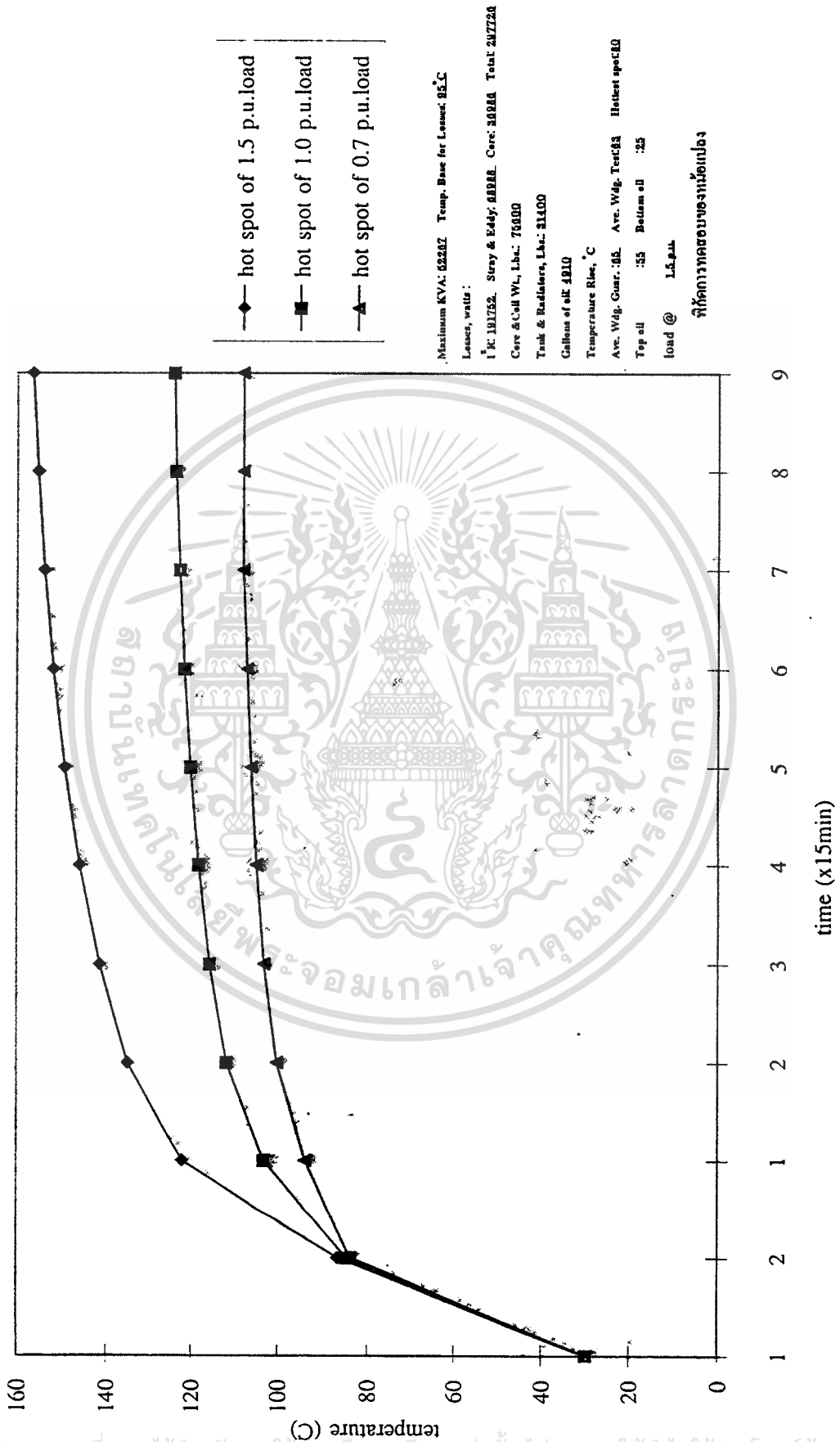
รูปที่ 6.5 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปภายใต้ภาระต่างๆ กับของหม้อแปลงที่มีการระบายความร้อนแบบพาความร้อนด้วยการไหลเวียนของน้ำมันและอากาศตามธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



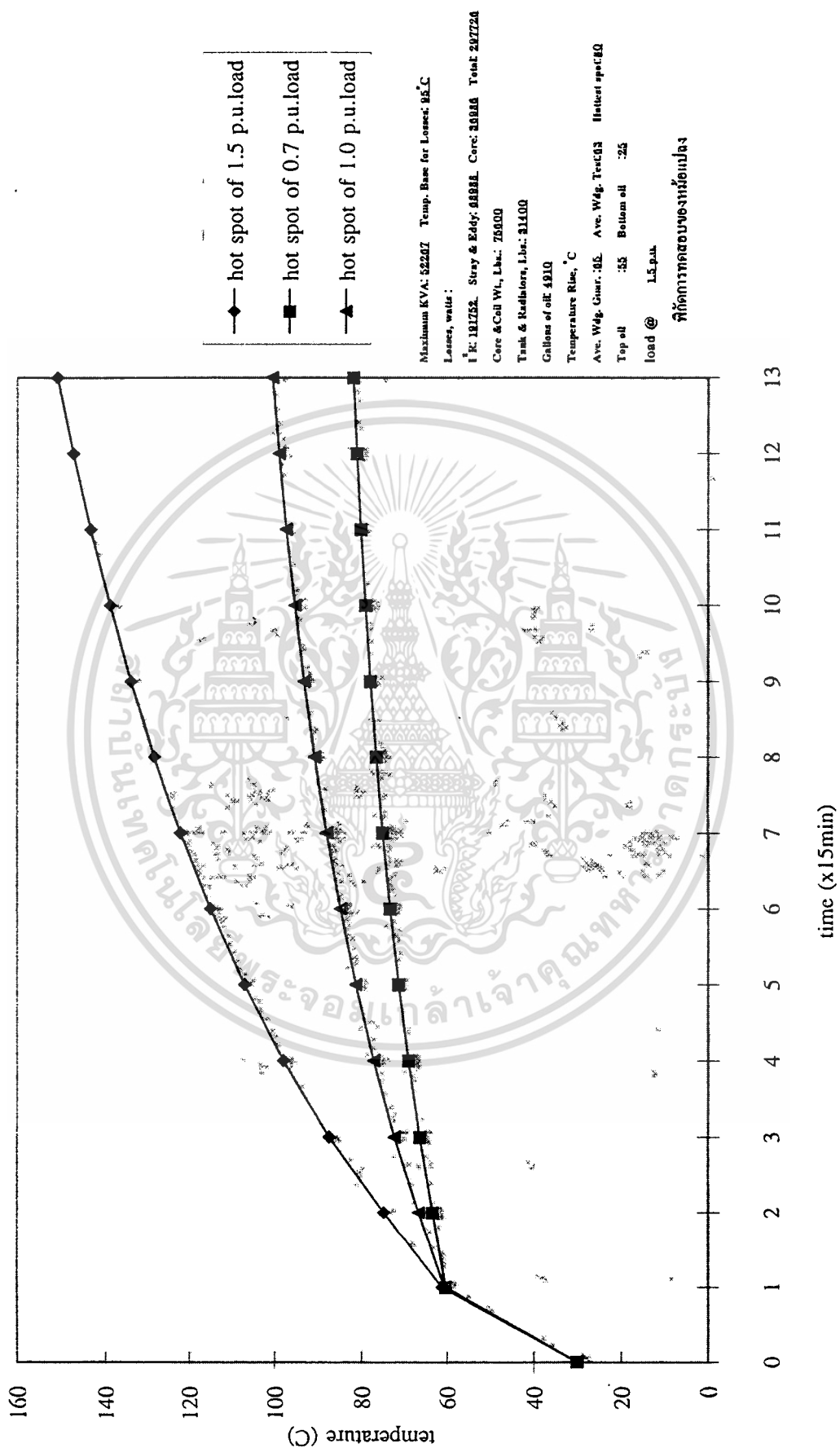
รูปที่ 6.6 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปที่ค่าภาระต่างๆ กับของหม้อแปลงที่มีการระบายความร้อนแบบการไหลเวียนของน้ำมันที่ธรรมชาติที่มีพัฒนาช่วยระบายความร้อนออกสู่อากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ



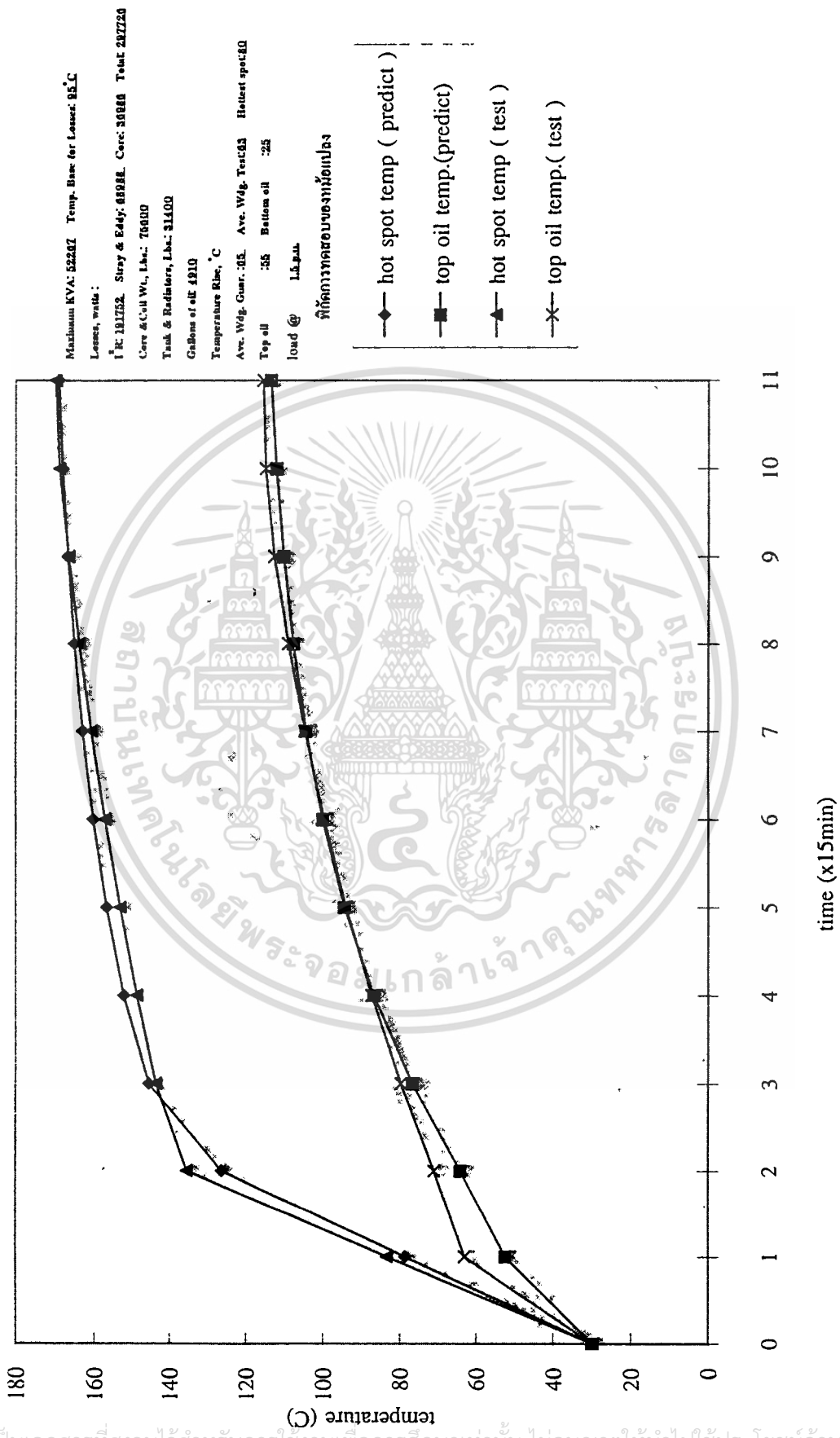
รูปที่ ๕.7 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปที่ค่าการต่างๆ กันของหม้อแปลงที่มีการระบายความร้อนแบบไม่โดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



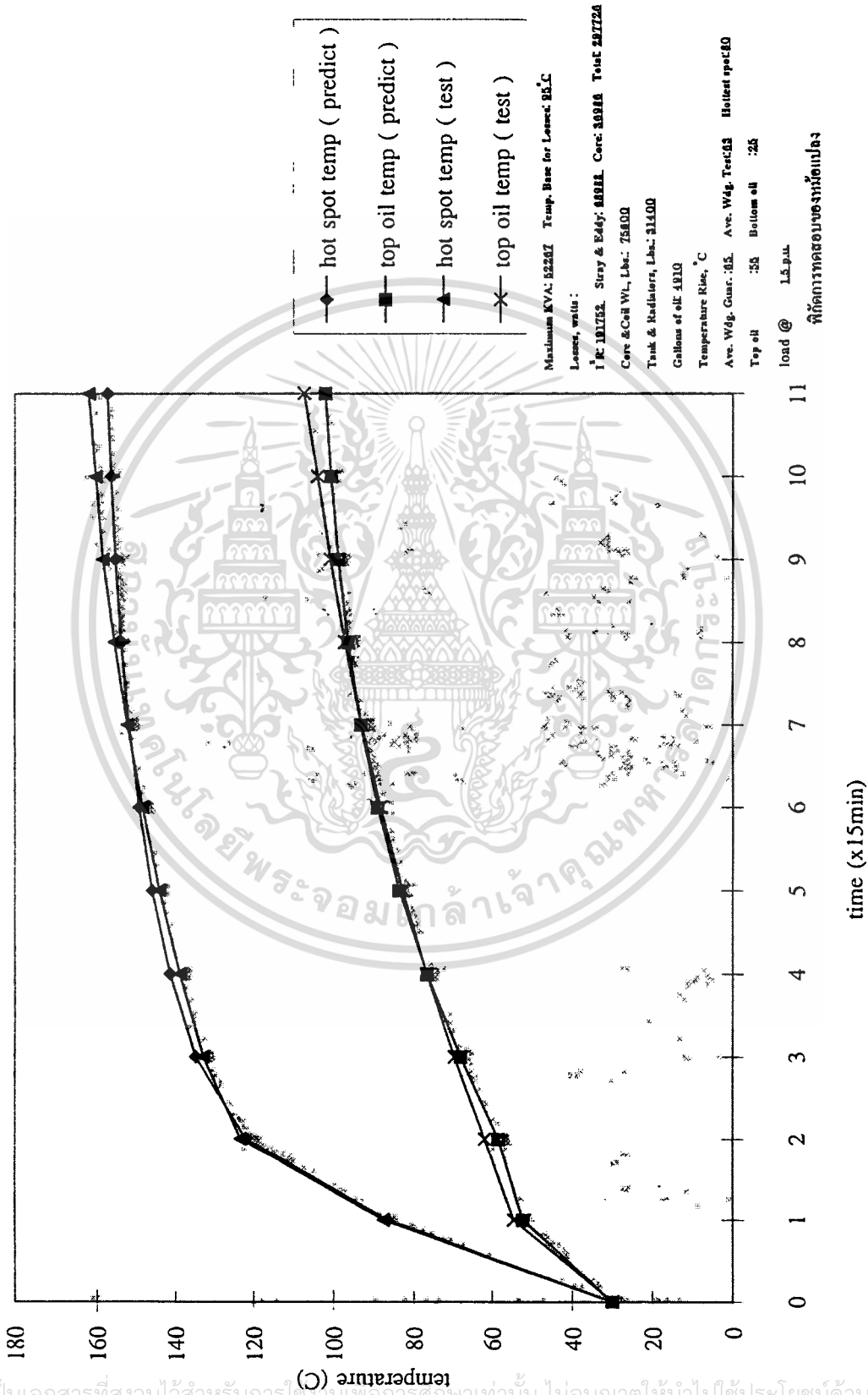
รูปที่ 5.8 แสดงการเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปที่ค่าการต่างๆ กับของหม้อแปลงที่มีการระบายความร้อนแบบการไหลเวียนภายในโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.9 แสดงการเปรียบเทียบค่าของอุณหภูมิที่คำนวณได้กับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง ของหม้อแปลงขนาด 52.627 MVA ที่มีการระบายความร้อนแบบการไหลเวียนของน้ำมันตามธรรมชาติแต่มีพัดลมช่วยระบายความร้อนออกสู่อากาศ

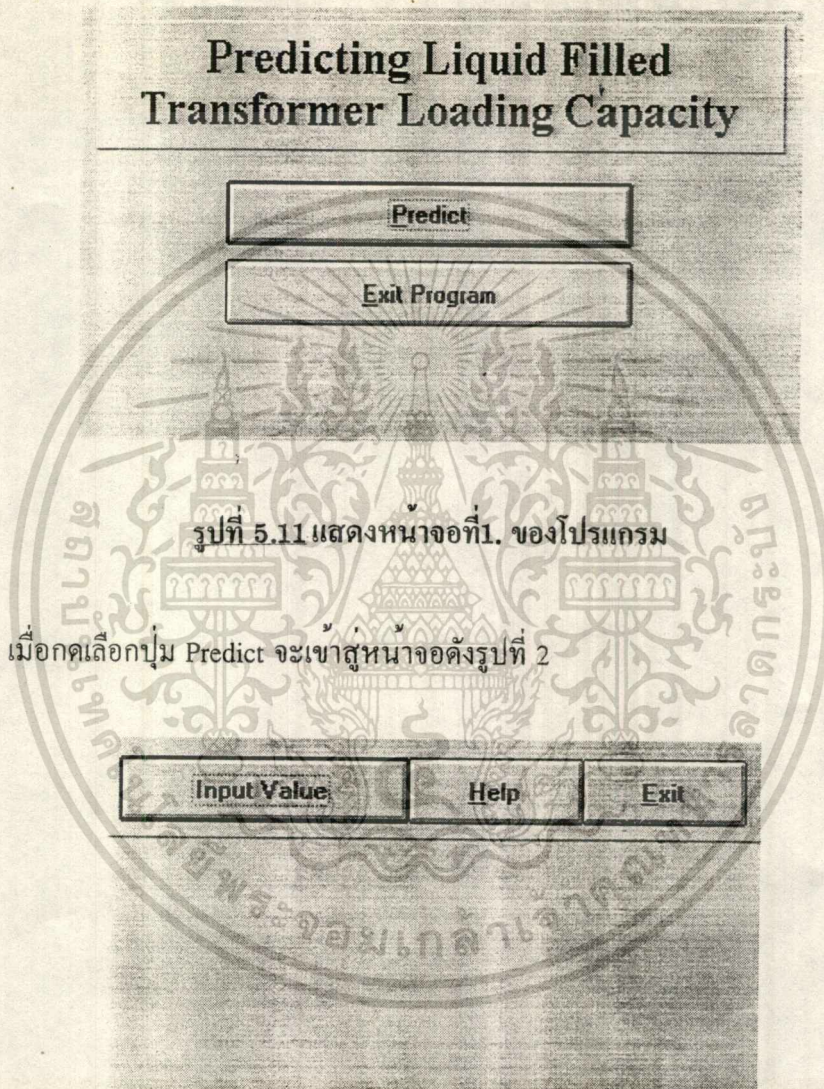
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 แสดงการเปรียบเทียบค่าของอุณหภูมิที่คำนวณได้กับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง ของหม้อแปลงขนาด 52.627 MVA ที่มีการระบายความร้อนแบบไม่โดยตรง

5.4 การแสดงผลโดยผ่านโปรแกรมวิซวลเบสิก (Visual BASIC)

1. หน้าจอเบื้องต้นให้ผู้ใช้เลือกเข้าโปรแกรมหรือออกจากโปรแกรมโดยกดปุ่มคลิกจากเมาส์หรือคเคอนเตอร์ โดยใช้แท็บ (Tab) เลื่อน



รูปที่ 5.11 แสดงหน้าจอที่ 1. ของโปรแกรม

2. เมื่อกดเลือกปุ่ม Predict จะเข้าสู่หน้าจอดังรูปที่ 2

รูปที่ 5.12 แสดงส่วนที่ 2 ซึ่งผู้ใช้สามารถเลือกได้

3. ก่อนอื่นผู้ใช้ต้องป้อนค่าเฉพาะต่างๆ ของหม้อแปลงที่ต้องการทำนายความสามารถในการรับโหลดซึ่งค่าต่างๆ จะได้แสดงในรูปต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COOLING	Type of winding ☐ Natural oil and air circulation (OA) ☐ Natural oil and forced air cool (FA) ☐ Direct forced oil and air cool (DFOA) ☐ Non-direct forced oil and air cool (NDFOA)
----------------	---

รูปที่ 5.13 แสดงตัวเลือกชนิดของการระบายความร้อน

4. ต่อไปจะได้แสดงข้อมูลเฉพาะของหม้อแปลงอื่นๆ ได้แก่ชนิดของของเหลวที่ใช้ในการระบายความร้อน ชนิดของขดลวด ค่าความสูญเสียต่างๆ ของหม้อแปลง ค่าอุณหภูมิที่วัดขณะเดินโหลดเต็มพิกัด ช่วงเวลาที่ใช้ในการคำนวณค่าในแต่ละครั้ง ค่าคงตัวเวลา (time constant) ของขดลวด ดังแสดงในรูปที่ 5.4 ถึง 5.9

FLUID	Type of fluid ☐ OIL ☐ SILICON ☐ HTHC
--------------	--

รูปที่ 5.14 ส่วนการรับค่าชนิดของของเหลวที่ใช้

WINDING	Type of winding ☐ COPPER ☐ ALUMINIUM
----------------	---

รูปที่ 5.15 เลือกชนิดของขดลวด

MASS		Input Mass of Transformer (Lbs.)
TANK		
OIL		
CORE		
COIL		
CORE & COIL		

รูปที่ 5.16 ป้อนค่าน้ำหนักของส่วนต่างๆ ของหม้อแปลง

TEMPERATURE		Input rated load temperature (C)
AMBIENT		
WINDING (ave.)		
TOP OIL		
BOTTOM OIL		
HOT SPOT		
OIL adjacent to hot spot location		

รูปที่ 5.17 ป้อนค่าอุณหภูมิขณะหม้อแปลงทำงานที่สถานะโหลดเกินพิกัด

LOSS		Input losses of transformer (watts.)
COPPER LOSS		
CORE LOSS		
EDDY CURRENT LOSS		
STRAY LOSS		

รูปที่ 5.18 ป้อนค่าความสูญเสียต่างๆ ของหม้อแปลง

TIME	Time
	Period of time to calculate ☐ 0.5 min ☐ 1 min
	Time constant

รูปที่ 5.19 ป้อนค่าช่วงเวลาในการคำนวณแต่ละครั้งและค่าคงตัวเวลา

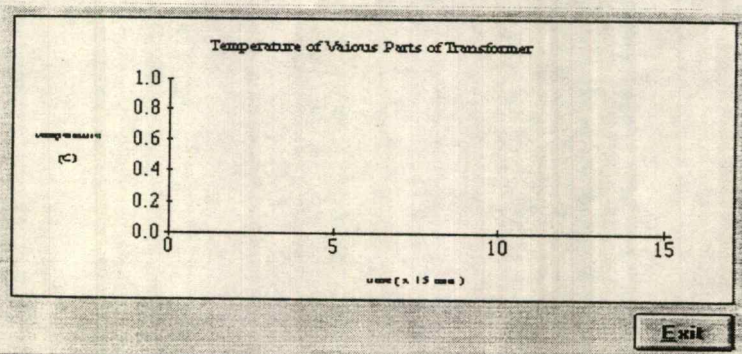
5. ผู้ใช้อาจป้อนค่าตามที่ต้องการได้ดังรูปที่ 5.4 ถึง 5.9 หรืออาจเลือกดูข้อมูลตัวอย่างซึ่งได้ใส่ค่าเฉพาะดังกล่าวไว้แล้วดังรูปที่ 5.10

Example	Example
	☐ 1000 KVA
	☐ 1250 KVA
	☐ 1600 KVA
	☒ 52267 KVA [IEEE]

รูปที่ 5.20 เลือกหม้อแปลงตัวอย่าง

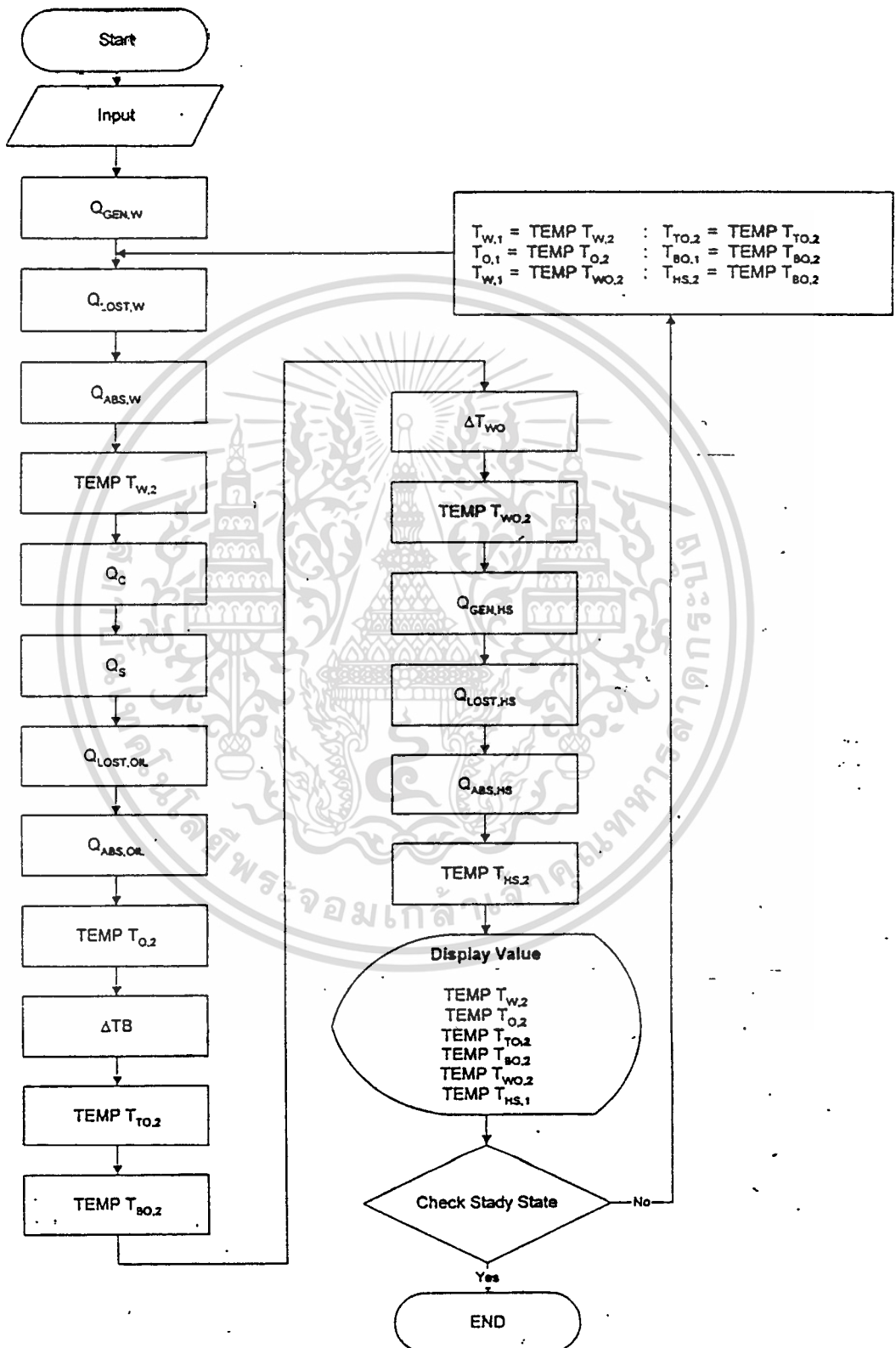
6. ถ้าผู้ใช้ป้อนค่าเฉพาะต่างๆ ของหม้อแปลงเสร็จแล้ว สามารถทำการคำนวณค่าอุณหภูมิที่จะเกิดขึ้น ณ ส่วนต่างๆ ของหม้อแปลง และสามารถดูความสามารถในการรับโหลดของหม้อแปลงได้โดยการปรับค่าโหลดที่ผู้ใช้ต้องการ และดูกราฟดังรูปที่ 5.11 เพื่อเปรียบค่าอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้น ดังจะได้ดูจากรายงานผลอีกทีหนึ่ง โดยเลือกจากเมนูในตอนแรก และยังสามารถดูคำแนะนำในการใช้งานโหลดหม้อแปลงตัวนั้นๆ ได้ด้วย

ซึ่งตัวอย่างในการทดลองโปรแกรมจะได้แสดงในหัวข้อต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 5.21 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิตามแต่จุดที่ต้องการดูหรืออาจดูเปรียบเทียบได้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 แผนภูมิแสดงขั้นตอนในการคำนวณของโปรแกรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ 5.22 แผนภูมิแสดงขั้นตอนในการคำนวณ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กล่าวถึงการสร้างโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อใช้ในการทำนายความสามารถในการรับโหลดของหม้อแปลงชนิดระบายความร้อนด้วยของเหลว และได้อธิบายถึงลักษณะของหม้อแปลงชนิดนี้ประกอบเพื่อช่วยอธิบายในส่วนของการรายละเอียดต่างๆ เช่น วิธีการระบายความร้อนในลักษณะที่ต่างๆ กันของหม้อแปลงชนิดนี้ และลักษณะของความสูญเสียที่เกิดขึ้นในส่วนต่างๆ ของหม้อแปลงที่เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดความร้อนภายในหม้อแปลง

สมการที่ใช้ในการคำนวณอาศัยหลักการส่งถ่ายพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงเช่นการส่งผ่านความร้อนที่เกิดจากการสูญเสียในขดลวดออกสู่ของเหลวที่ใช้ระบายความร้อนอยู่รอบๆ ซึ่งส่วนหนึ่งของความร้อนจะยังคงอยู่ในขดลวดซึ่งถ้าสูงมากๆ อาจทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงลดลงได้ เมื่อของเหลวในหม้อแปลงได้รับความร้อนก็มีการส่งถ่ายออกสู่ภายนอกเช่นกัน โดยอาศัยลักษณะการระบายความร้อนแบบต่างๆ

สมการที่ใช้ได้อ้างอิงจากบทความของ IEEE ซึ่งมีการพัฒนาขึ้นมาจากสมการพิจารณาความสามารถในการรับโหลดของเดิม โดยได้นำปัจจัยที่สำคัญหลายอย่างมาพิจารณามาเพิ่มเติมปัจจัยที่ใช้พิจารณาเพิ่มเติมได้แก่ พิจารณารูปแบบของการระบายความร้อนแบบใช้ของเหลวไหลเวียนภายใน ซึ่งปัจจัยนี้มีผลกับค่าอุณหภูมิ ณ จุดสูงสุดและต่ำสุดของหม้อแปลงเช่นในการระบายความร้อนแบบโดยตรงอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดจะไม่ต่างกันมากนักซึ่งต่างกับการระบายในแบบที่เหลือนเป็นต้น พิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิห้องไปตามโหลดขณะใช้งาน และพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของความหนืดของของเหลวในช่วงเวลาการใช้งาน ซึ่งความหนืดของของเหลวจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

ข้อสรุปของโปรแกรมคำนวณ

จากผลการทดลองรันโปรแกรมและนำค่าอุณหภูมิต่างๆ มาแสดงในกราฟจะเห็นได้ว่าค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในแต่ละวิธีการระบายความร้อนเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ทดสอบจริงตามกราฟรูปที่ 5.9 และ 5.10 จะได้กราฟที่ใกล้เคียงพอสมควรทีเดียว

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อเราทำการโหลดหม้อแปลงที่ 1.5 เท่าของพิกัด และค่าอุณหภูมิที่จุดยอดสเปคที่ได้เราสามารถนำไปใช้พิจารณาความสามารถในการรับโหลดของหม้อแปลงได้ดังที่ได้กล่าวไปในบทที่ 1 ถึง 3

ปัญหาที่พบในการคำนวณค่าคือ

1. ในการป้อนข้อมูลก่อนการคำนวณของผู้ใช้ ข้อมูลของหม้อแปลงในขนาดเล็กซึ่งใช้กันมากในเมืองไทย จะไม่ทราบข้อมูลทดสอบหลายค่าดังได้แสดงในภาคผนวกท้ายเล่ม
2. ปัญหาในส่วนของการวิเคราะห์สมการที่ใช้ในการคำนวณซึ่งอ้างอิงหลักการส่งถ่ายความร้อน เรามีข้อจำกัดในการแก้ไขและปรับปรุงสมการดังกล่าวบ้าง เช่น ในการปรับให้ใช้งานตามความเหมาะสมของผู้ใช้
3. ค่าอุณหภูมิที่ใช้คำนวณในสภาวะโหลดเต็มก็ยังมีข้อจำกัด เนื่องจากการทดสอบไม่ระบุค่าที่จำเป็นเพียงพอ

แนวทางในการพัฒนาโปรแกรม

ในการพัฒนาโปรแกรมต่อไปนี้นั้นอาจได้มีการปรับค่าตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์เพิ่มเติมหลังจากที่ได้้นำค่าตัวแปรที่จำเป็นมาพิจารณาไปแล้วเช่น มีการพิจารณาถึงอุณหภูมิที่สภาวะการใช้งานต่างกันในแต่ละประเทศ หรืออาจมีการเสนอแบบแผนในการทดสอบให้เป็นมาตรฐานมากขึ้นและแนวทางที่สำคัญในการพัฒนาต่อไปคือการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นดังกล่าวข้างต้น

กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้จะไม่สามารถสำเร็จลงไปได้ด้วยดีถ้าหากไม่ได้รับความช่วยเหลือจาก
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ศุติ บรรจงจิตร และ อ. สมชาติ จิรวินาคร ที่ให้คำแนะนำและปรึกษาต่าง ๆ

และบุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้องอื่น ๆ ตั้งแต่เริ่มทำโครงการโดยเฉพาะเพื่อน ๆ ในภาควิชาไฟ
ฟ้า ตลอดจนเพื่อน ๆ ทุกคน และเพื่อนๆภาคคอมพิวเตอร์ ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือ ที่ให้ใช้
คอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง รวมถึง บริษัท เกร็ท วิสวกรรม จำกัด ที่ได้เอื้อเฟื้อข้อมูลต่าง ๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

- [1] L.W. Pierce , “ Predicting Liquid Filled Transformer Loading Capability ” , IEEE Trans. on Power Delivery. Vol. 30 No. 1 pp. 172-198 Jan / Feb 1994
- [2] Mg. Say , Alternating Current Machine , Fifth Edition , Longman Scientific & Thecnichal , 1983
- [3] J.P. Kovacs , member of IEEE , “Economic Cinsideration of Power Transformer Selection and Operation ” , IEEE Trans on Industry Applications, Vol. IA-16 No. 5 Sep / Oct 1980
- [4] W.J. Mc.Nutt , “ Insulation Thermal Life Considerations For Transformer Loading Guides ” , IEEE Trans. on Power Delivery Vol. 7 No. 1 , Jan 1992
- [5] Bernard Hochart , Power Transformer Handbook , Fifth English Edition , P. 63-88 , Butterworth 1989
- [6] William M. flanagan , Handbook of Transformer Design and Application, P. 8.2-9.15 , Second Edition , McGRAW-HILL , 1993
- [7] รศ. ดร. ชำนาญ ห่อเกียรติ และ ถาวร อมตกิตต์ , “ Low Impedance Faults in Distribution Transformer ” , 70 เรื่องน่ารู้เทคนิคไฟฟ้า บริษัท เอ็ม แอนด์ อี จำกัด
- [8] รศ. ศุภี บรรจงจิตร , “ สถานีไฟฟ้าหน่วยย่อย ” , อุปกรณ์และการติดตั้งในงานระบบไฟฟ้า หน้า 24-57 บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด
- [9] ประเสริฐ ภู่มั่นทพมย์ , “ ความร้อนในหม้อแปลงไฟฟ้า ” , 51 เรื่องน่ารู้เทคนิคไฟฟ้า , (รวมบทความทางไฟฟ้าจากวารสารเทคนิค) , บริษัท เอ็ม แอนด์ อี จำกัด
- [10] ศุภรัตน์ พัฒนพงศ์ไพศาล , “ เรื่องของหม้อแปลงไฟฟ้า ” , 51 เรื่องน่ารู้เทคนิคไฟฟ้า , (รวมบทความทางไฟฟ้าจากวารสารเทคนิค) , บริษัท เอ็ม แอนด์ อี จำกัด