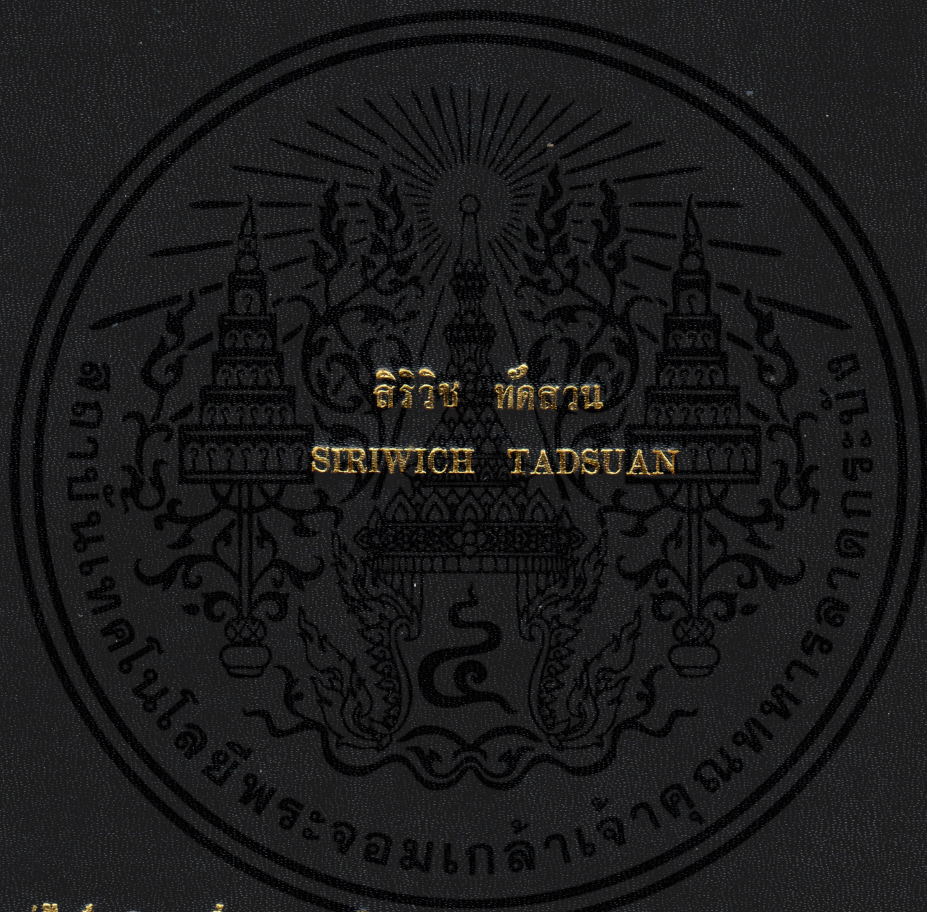


การทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน ที่ภาระเป็น  
เชิงเส้นและภาระไม่เป็นเชิงเส้น

TESTING OF TEMPERATURE OF OIL-IMMERSED TRANSFORMER  
AT LINEAR LOAD AND NON-LINEAR LOAD



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2548

ISBN 974-622-774-2

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน ที่ภาระเป็น  
เชิงเส้นและภาระไม่เป็นเชิงเส้น

TESTING OF TEMPERATURE OF OIL-IMMERSED TRANSFORMER  
AT LINEAR LOAD AND NON-LINEAR LOAD



สิริวิช ทัดสวน

SIRIWICH TADSUAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2543

ISBN 974 - 622 - 774 - 2

เลขหม.....

เลขทะเบียน..... 35953

วัน, เดือน, ปี- 3 ก.ค. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**TESTING OF TEMPERATURE OF OIL-IMMERSED TRANSFORMER  
AT LINEAR LOAD AND NON-LINEAR LOAD**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2000**

**ISBN 974 – 622 – 774 - 2**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2000**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

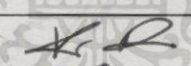

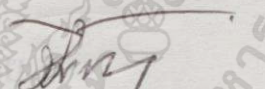
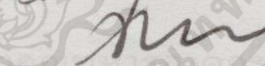
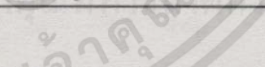
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน ที่ภาระเป็นเชิงเส้น  
และภาระไม่เป็นเชิงเส้น

TESTING OF TEMPERATURE OF OIL-IMMERSED  
TRANSFORMER AT LINEAR LOAD AND NON-LINEAR LOAD

ชื่อนักศึกษา นายสิริวิช ทัดสวน  
รหัสประจำตัว 40061068  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ศุภี บรรจงจิตร  
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม ดร.วิจิตร กิณเรศ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ชัยวุฒิ	ฉัตรอุทัย	
ผศ.ประภาส	ไพโรสุวรรณ	
ผศ.นิทัศน์	กฤษณจินดา	
ดร.วิจิตร	กิณเรศ	
รศ.ศุภี	บรรจงจิตร	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 4 พฤษภาคม 2543 เวลา 11.00-12.00 น.

สถานที่สอบ ณ ห้องสอบวิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ตึก 12 ชั้น ชั้น 4 ห้อง (E12-404)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.มนัส สังวรศิลป์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 31 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2543

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน ที่  
ภาระเป็นเชิงเส้นและภาระไม่เป็นเชิงเส้น

ชื่อนักศึกษา

นายสิริวิช ทัดสวน

รหัสประจำตัว

40061068

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2543

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ. ศุติ บรรจงจิตร

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม

ดร. วิจิตร กิณเรศ

### บทคัดย่อ

การออกแบบหม้อแปลงนั้น ควรที่จะต้องคำนึงถึงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนลวดตัวนำ, น้ำมัน  
ทั้งนี้ เพราะเมื่อหม้อแปลงจ่ายกระแสในสภาวะปกติ, สภาวะโหลดเกิน หรือสภาวะที่มีฮาร์โมนิก  
ร่วมด้วยนั้น อุณหภูมิบริเวณดังกล่าวจะมีความร้อนที่ไม่เท่ากัน ซึ่งถ้าการออกแบบคำนึงถึง  
อุณหภูมิ จะทำให้การออกแบบสามารถได้หม้อแปลงที่คุ้มค่ากับราคา ดังนั้น งานวิจัยนี้จะเป็นการ  
พัฒนาด้านการทดสอบหาอุณหภูมิที่ลวดตัวนำด้านแรงดันสูง แรงดันต่ำ และตำแหน่งน้ำมัน โดย  
จะทดสอบที่บริเวณด้านล่าง, ตรงกลาง, ด้านบน ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน การทดสอบ  
เหล่านี้ จะทำให้ทราบถึงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำ  
มันที่มีขนาด 10 kVA, 380V/220V, 3 เฟส,  $\Delta/Y$  และระบายความร้อนแบบ ONAN โดยจะแยกการ  
ทดสอบในลักษณะต่าง ๆ 3 ลักษณะดังนี้คือ 1. ทดสอบโดยการตัดวงจร 2. ใช้โหลดประเภทเชิง  
เส้น 3. ใช้โหลดประเภทไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบจากทั้ง 3 ลักษณะนี้จะนำ  
มาเปรียบเทียบกัน ซึ่งจะทำให้ทราบอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ มีลักษณะเหมือนหรือแตกต่างกัน  
มากน้อยเพียงใด ซึ่งค่าอุณหภูมินี้ถ้ามีค่ามากกว่าพิกัดของฉนวน ก็จะทำให้อายุการใช้งานของหม้อ  
แปลงสั้นลง ซึ่งการวัดอุณหภูมิจะใช้ตัวเทอร์โมคัปเปิลในการตรวจสอบ สุดท้ายเป็นการวิเคราะห์  
ถึงความสัมพันธ์ของความร้อนที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ ประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถที่  
จะนำไปสู่การพัฒนาออกแบบ, การแก้ไข, การป้องกันหม้อแปลง อันเนื่องมาจากความร้อนได้เป็น  
อย่างดี

<b>Thesis Title</b>	Testing of Temperature of Oil-Immersed Transformer at Linear Load and Non-linear Load.
<b>Student</b>	Mr. Siriwich Tadsuan
<b>Student ID.</b>	40061068
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2000
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Sulee Banjongjit
<b>Thesis Co-Advisor</b>	Dr. Vjijt Kinnares

### ABSTRACT

A design of transformer should consider the temperature at conductor, oil because when the transformer is operated under normal, overload conditions or nonlinear load associated with harmonic components, the temperature at those area is not equal. Therefore the consideration of temperature for designing will give the result of transformer that has reasonable cost. This paper proposes the test of temperature of conductor at high voltage part, low voltage and oil. The temperature is tested at the bottom, the middle and the top of Mineral-Oil-Immersed transformer. The temperature testing results show the difference of temperature at any location of the 10 kVA, 380V/220V, 3 phase,  $\Delta/Y$  and ONAN ventilating transformer. These are 3 conditions for testing, 1. Short circuit test, 2. Linear load test and 3. Non-linear load test. The result of measured temperature will be compared one another, Therefore the differences of temperature are known. If the temperature is higher than the rated of insulator in transformer, its lifetime will be shorter. The thermocouple was used for detecting the temperature. Final result will be analysed about the relations among heat at any location and are useful for design, correction and protection of the transformer in case of heat.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาต่าง ๆ จาก รศ. ศุติ บรรจงจิตร ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ และ ดร. วิจิตร กิณเรศ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม รวมถึง ผศ. จงรักษ์ บุนเส็ง ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือเรื่องการวัดฮาร์โมนิกในหม้อแปลงและแนะนำการใช้เครื่องมือวัดปริมาณฮาร์โมนิกเป็นอย่างดี ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านทั้งหลายและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ครู อาจารย์ ทุก ๆ ท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนข้าพเจ้า ตั้งแต่เด็กจนโต

ขอขอบพระคุณ ประธานกรรมการ คุณ ฉาย ทองเสม ผู้จัดการโรงงาน คุณ ทองดี ดอกไม้พุ่ม กรรมการผู้จัดการ คุณ สุทัศน์ ทองเสม และเจ้าหน้าที่ บริษัท พงษ์พิฆานการไฟฟ้า จำกัด ทุก ๆ ท่าน ที่ได้เอื้ออำนวยสถานที่ เครื่องมือ อุปกรณ์ ในการทดสอบหม้อแปลงตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา จนข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาของท่านทั้งหลาย

ขอขอบคุณ อาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ ม. เอเชียอาคเนย์ ซึ่งได้แก่ อ.บุญเลิศ ลือเฉย และ อ.ปัญญา มาลีวัตร ที่ช่วยเหลืองานด้านการทดสอบหม้อแปลงมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ อาจารย์โรงเรียน เซนต์จอห์น โปลิเทคนิค ท่านอาจารย์ใหญ่ อ. เชาว์ เกศเรือง ท่านรองอาจารย์ใหญ่ อ. คมศิลป์ ชินะผา หัวหน้าแผนกไฟฟ้า อ. ประเสริฐ วานิช และ อ. เอกพล เนตรแสงศรี อ. ชีวัตร เสริมวัฒนากุล และเพื่อนครูท่านอื่น ๆ ที่มีได้กล่าวไว้ ณ ที่นี้ด้วย ที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลืองานด้านต่าง ๆ รวมถึง คุณ ประนอม ทองแลล้ม และ น้อง เบล ที่คอยให้กำลังใจเป็นอย่างดีมาโดยตลอด จนวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

สุดท้ายขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย ที่เอื้อเพื่อให้บริการช่วยเหลือข้าพเจ้าในช่วงกำลังศึกษา และให้ทุนสนับสนุนเพื่อจัดทำรูปเล่มของวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สิริวิห ทัดสวน

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	VIII
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	XII
คำย่อและสัญลักษณ์.....	XXIX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 กล่าวนำ.....	1
1.2 จุดประสงค์ของการทำวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 เนื้อหาต่างๆ ของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 โครงสร้างและปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกับอายุการใช้งานของหม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน.....	5
2.1 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่าย.....	5
2.1.1 โครงสร้างภายนอก.....	6
2.1.2 โครงสร้างระหว่างภายในและภายนอก.....	8
2.1.3 โครงสร้างส่วนที่เป็นวงจรแม่เหล็ก.....	8
2.1.4 โครงสร้างที่เป็นวงจรไฟฟ้า.....	9
2.2 ฉนวน.....	10
2.2.1 ฉนวนของสายตัวนำ.....	11
2.2.2 น้ำมัน.....	11
2.2.2.1 คุณสมบัติต่างๆของน้ำมันหม้อแปลง.....	12
2.2.2.2 สาเหตุการเสื่อมสภาพของน้ำมัน.....	12
2.2.3 กระดาษ.....	13
2.3 คุณลักษณะทางความร้อนของหม้อแปลง.....	15
2.3.1 มาตรฐานของอุณหภูมิ.....	15
2.3.2 การถ่ายเทความร้อน.....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.2.1 การนำความร้อน.....	16
2.3.2.2 การพาความร้อน.....	16
2.3.2.3 การแผ่รังสีความร้อน.....	17
2.3.2.4 การถ่ายเทความร้อนร่วมของการแผ่รังสีความร้อน และการพาความร้อน.....	18
2.3.3 การระบายความร้อน.....	18
2.3.3.1 การระบายความร้อนภายในหม้อแปลงไฟฟ้า.....	18
2.3.3.2 ชนิดของหม้อแปลงและวิธีการระบายความร้อน.....	19
2.3.4 ขีดจำกัดความร้อนเกินและผลที่มีต่อความเป็นฉนวน.....	22
2.3.4.1 ฉนวนชั้นหนึ่ง (Class A).....	23
2.3.4.2 ฉนวนชั้นสอง (Class B).....	23
2.3.4.3 ฉนวนชั้นสาม (Class F).....	23
2.3.4.4 ฉนวนชั้นสี่ (Class H).....	23
2.3.5 ขั้นตอนการถ่ายเทความร้อนในหม้อแปลงชนิดน้ำมัน.....	24
2.4 วัฏจักรไหลต.....	26
2.4.1 วัฏจักรไหลตสมมูลหรือไหลตประสิทธิผล.....	26
2.4.2 ไหลตสูงสุดสมมูล.....	26
2.4.3 ไหลตต่อเนื่องสมมูล.....	26
2.4.4 การแบ่งประเภทวัฏจักรไหลตปกติและ ไหลตเกินพิกัดของหม้อแปลง.....	27
2.4.4.1 วัฏจักรไหลตปกติ.....	27
2.4.4.2 วัฏจักรไหลตฉุกเฉินช่วงเวลายาวนาน.....	27
2.4.4.3 วัฏจักรไหลตฉุกเฉินช่วงเวลาสั้น ๆ.....	28
2.5 ส่วนประกอบต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อความเย็นหม้อแปลง.....	30
2.5.1 อิทธิพลของความสูงที่มีผลกับการไหลตของหม้อแปลง.....	30
2.5.1.1 การทำงานที่ระดับพิกัดของหม้อแปลง.....	30
2.5.1.2 การทำงานที่ต่ำกว่าพิกัดของหม้อแปลง.....	30
2.5.2 อิทธิพลเนื่องจากอุณหภูมิแวดล้อมขณะทำการต่อไหลต.....	30
2.6 อายุของฉนวนโดยพิจารณาจากความร้อน.....	32
2.7 สมการอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลง ตามมาตรฐาน IEC และ IEEE.....	37

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.8	อุณหภูมิหม้อแปลงในสภาวะมีฮาร์โมนิก.....	41
บทที่ 3	ทฤษฎีและการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของหม้อแปลง.....	46
3.1	ข้อควรพิจารณาทั่ว ๆ ไปที่เกี่ยวกับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า.....	46
3.2	รายละเอียดต่างๆของค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียแต่ละแบบ.....	46
3.2.1	ค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็ก.....	46
3.2.1.1	การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส.....	47
3.2.1.2	การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน.....	48
3.2.2	กำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า กระแสตรงของขดลวด.....	50
3.2.3	กำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับของขดลวด.....	50
3.2.4	อุณหภูมิของตัวนำที่มีผลกับค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย.....	52
3.2.5	กำลังสูญเสียจากกระแสไหลวนในขดลวดเนื่องมาจาก สนามแม่เหล็กรั่วไหล.....	53
3.2.6	กำลังไฟฟ้าสูญเสียปลิกย่อยอันเนื่องมาจากเส้นแรงแม่เหล็กปลิกย่อย ในอุปกรณ์จับยึด โครงสร้างหม้อแปลง.....	55
3.3	การพิจารณาหาค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะมีฮาร์โมนิก.....	56
3.3.1	ค่าความสูญเสียต่อหน่วย.....	56
3.3.2	การคำนวณความเทียบเท่าความสามารถของหม้อแปลงโดยใช้ข้อมูล ที่ออกแบบความสูญเสียของกระแสไหลวน.....	57
3.4	ความผิดเพี้ยนของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเมื่อโหลด ไม่เป็นเชิงเส้น.....	58
3.5	หม้อแปลงพิกัด เค-แฟคเตอร์.....	62
3.6	วิธีการทดสอบหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียแบบต่าง ๆ.....	67
3.6.1	การทดสอบหาค่ากำลังสูญเสียโดยวิธีการเบ็ดดวงจรและถัดดวงจร.....	67
3.6.2	การทดสอบหาค่ากำลังสูญเสียโดยวิธีการใช้โหลดจริง.....	69
3.6.3	การทดสอบหาค่ากำลังสูญเสียโดยวิธีการต่อหม้อแปลงไฟฟ้า แบบเบื่อกุเบื่อก.....	70
3.6.4	การทดสอบหาค่าสูญเสียของโหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น. ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.6.5 การทดสอบหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยวิธีการแยกหาแต่ละ ความถี่ฮาร์โมนิก.....	72
บทที่ 4 เครื่องมือสนับสนุนในการทดสอบ.....	74
4.1 ทฤษฎีวงจรอินเวอร์เตอร์.....	74
4.1.1 ส่วนประกอบของอินเวอร์เตอร์.....	74
4.1.2 วงจรอินเวอร์เตอร์พื้นฐาน.....	74
4.1.3 การควบคุมความถี่.....	76
4.1.4 การควบคุมโวลต์เดจ.....	76
4.1.5 การสร้างวงจรถริกเกอร์.....	76
4.1.5.1 ลักษณะของวงจรถริกเกอร์และการทำงาน.....	77
4.1.5.2 การคำนวณและการสร้างวงจรถริกเกอร์.....	79
4.1.6 วงจรกรองความถี่.....	84
4.1.6.1 ทฤษฎีวงจรกรองความถี่.....	84
4.1.6.2 หลักการคำนวณหาค่า L และ C เพื่อใช้ในวงจรกรองความถี่ผ่าน.....	85
4.2 วงจรเรคตีไฟเออร์เต็มคลื่น 3 เฟส.....	86
บทที่ 5 การทดสอบหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและอุณหภูมิหม้อแปลง.....	88
5.1 การทดสอบและผลการทดสอบ.....	88
5.1.1 การทดสอบหาค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลดที่ความถี่ฮาร์โมนิกต่าง ๆ.....	88
5.1.2 วิธีการทดสอบและผลการทดสอบหาอุณหภูมิหม้อแปลงที่เงื่อนไขต่าง ๆ.....	93
5.1.2.1 เงื่อนไขของการทดสอบอุณหภูมิหม้อแปลง.....	93
5.1.2.2 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน.....	124
5.1.2.3 ผลของอุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของขดลวด.....	124
5.1.2.4 ผลของอุณหภูมิแตกต่างระหว่างน้ำมันกับขดลวดที่พิกัดโหลด.....	129
5.1.2.5 การเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มในแนวระดับ ของขดลวดและน้ำมัน.....	131

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.1.2.6 การทดสอบอุณหภูมิหม้อแปลงเมื่อโหลดเชิงเส้นและ ไม่เชิงเส้นที่หลายระดับ.....	136
5.2 การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิของการทดสอบเทียบกับการคำนวณ.....	159
5.3 การสร้างโปรแกรมซอฟต์แวร์ของการทำนายอุณหภูมิ, ค่าอายุที่สูญเสีย และอายุการ ใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน.....	190
5.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบและการคำนวณ.....	220
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	235
เอกสารอ้างอิง.....	238
ภาคผนวก.....	242
ภาคผนวก ก รูปโครงสร้างหม้อแปลงและการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล อื่น ๆ.....	243
ภาคผนวก ข ขั้นตอนการใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์ทำนายอุณหภูมิ, อายุที่สูญเสีย และอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน.....	248
ภาคผนวก ค รายละเอียดหม้อแปลง, เครื่องมือที่ใช้ทดสอบและอุปกรณ์อินเวอร์เตอร์.....	259
ภาคผนวก ง ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์.....	266
ประวัติผู้เขียน.....	284

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงคุณสมบัติต่าง ๆ ของน้ำมันหม้อแปลง.....	13
2.2 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของกระดาษหุบน้ำมันที่ 20 °C .....	14
2.3 แสดงขีดจำกัดอุณหภูมิเพิ่มสำหรับหม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน.....	15
2.4 แสดงการถ่ายเทความร้อน(วัตต์/ม <sup>2</sup> ) จากถังผิวเรียบที่อุณหภูมิแวดล้อม 30 °C.....	18
2.5 แสดงขีดจำกัดของกระแสและอุณหภูมิในการโหลดในสภาวะ มากกว่าพิกัดหม้อแปลง.....	29
2.6 แสดงค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ของค่าอุณหภูมิเฉลี่ย ของตัวระบายความร้อนที่หม้อแปลง ทำงานที่พิกัด.....	30
2.7 แสดงความสัมพันธ์ของพิกัดอายุสัมพัทธ์, อุณหภูมิจุดร้อนสุดและช่วงเวลาอายุการใช้งาน....	36
2.8 แสดงการเปรียบเทียบสมการที่ใช้ในการคำนวณของมาตรฐาน IEC กับ IEEE.....	38
2.8 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบสมการที่ใช้ในการคำนวณของมาตรฐาน IEC กับ IEEE.....	39
2.8 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบสมการที่ใช้ในการคำนวณของมาตรฐาน IEC กับ IEEE.....	40
2.9 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณของมาตรฐาน IEC.....	40
2.10 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณของมาตรฐาน IEEE.....	41
2.11 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าอายุที่สูญเสีย และอายุการใช้งานหม้อแปลง.....	42
2.11 (ต่อ) แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าอายุที่สูญเสีย และอายุการใช้งานหม้อแปลง.....	42
3.1 แสดงอันดับและขนาดของฮาร์โมนิกที่อันดับต่าง ๆ สัญญาณของวงจรเรกติไฟเออร์ 3 เฟส 6 พัลส์ ร่วมกับโหลดความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำขนาดใหญ่.....	59
3.2 แสดงลำดับฮาร์โมนิกกับขนาดของฮาร์โมนิก.....	63
3.3 แสดงผลสรุป ค่า K-factor ของโหลดชนิดต่าง ๆ.....	64
3.4 แสดงพิกัด K-Factor และดัชนีของพิกัดโหลด K.....	65
3.5 แสดงตัวอย่างการคำนวณหาค่า KVA- I <sub>LK</sub> จากโหลดต่าง ๆ.....	66
4.1 แสดงการเลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ.....	85
4.2 แสดงช่วงมุมการนำกระแสของไดโอดแต่ละตัว.....	86
5.1 แสดงคุณสมบัติหม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน ที่ใช้ทดสอบ.....	88
5.2 แสดงผลลัพธ์ต่าง ๆ จากการทดสอบหาค่ากำลังสูญเสียที่ความถี่ฮาร์โมนิกต่าง ๆ.....	93

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.3 แสดงการทดสอบหาค่าต่าง ๆ ของแรงดัน ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเมื่อเป็น โหลดเชิงเส้น ที่ประมาณค่าพิกัดหม้อแปลง.....	96
5.4 แสดงค่าขนาดต่าง ๆ ของแรงดัน ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเมื่อเป็น โหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	96
5.5 แสดงค่าการทดสอบหาค่าอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนที่ตำแหน่ง 17.....	124
5.6 แสดงค่าการคำนวณหาค่าอุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของขดลวด.....	128
5.7 แสดงค่าความต้านทานที่ทดสอบในเงื่อนไขต่าง ๆ ที่เวลาเริ่มต้นและเวลา ณ จุดตัดกระแส ไฟฟ้า.....	129
5.8 แสดงผลของค่าการทดสอบและการคำนวณค่า $g_r$ ในสภาวะทดสอบแบบลัดวงจร, โหลดเชิงเส้นและ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	130
5.9 แสดงค่าขนาดต่าง ๆ ของแรงดัน ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านขดลวดปฐมภูมิ จากตัวอย่างที่ 1 ของการทดสอบ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น 2 ระดับ.....	144
5.10 แสดงค่าขนาดต่าง ๆ ของแรงดัน ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านขดลวดปฐมภูมิ จากตัวอย่างที่ 2 ของการทดสอบ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น 3 ระดับ.....	150
5.11 แสดงค่าขนาดต่าง ๆ ของแรงดัน ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านขดลวดปฐมภูมิ จากตัวอย่างที่ 3 ของการทดสอบ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น 3 ระดับ.....	155
5.12 แสดงการเปรียบเทียบอินพุทของแต่ละรูปแบบจากบล็อกที่ 1 ของรูปแผนผังที่ 5.168.....	194
5.13 แสดงการเปรียบเทียบสมการกำลัง ไฟฟ้าสูญเสียของแต่ละรูปแบบจากบล็อกที่ 2 ของรูปแผนผังรูปที่ 5.168.....	195
5.14 แสดงการจำลองค่าขนาดต่าง ๆ ของแรงดัน ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้าน ขดลวดปฐมภูมิ เมื่อเป็น โหลดไม่เป็นเชิงเส้น จากตัวอย่างที่ 1 ของการจำลอง โหลด ไม่เป็นเชิงเส้น.....	197
5.15 แสดงผลการคำนวณ K-Factor และการคำนวณกำลัง ไฟฟ้าแต่ละฮาร์โมนิก จากตัวอย่างที่ 1 ของการจำลอง โหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	198
5.16 แสดงการจำลองค่าขนาดต่าง ๆ ของแรงดัน ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้าน ขดลวดปฐมภูมิ เมื่อเป็น โหลดไม่เป็นเชิงเส้น จากตัวอย่างที่ 2 ของการจำลอง โหลด ไม่เป็นเชิงเส้น.....	209
5.17 แสดงผลการคำนวณ K-Factor และการคำนวณกำลัง ไฟฟ้าแต่ละฮาร์โมนิก จากตัวอย่างที่ 2 ของการจำลอง โหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	210

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.18 แสดงผลการทดสอบหาค่าอัตราส่วนของ $P_{LL}$ ที่จุดร้อนสุดของตัวนำที่โหลดใด ๆ ต่อ $P_{LL\_R}$ ที่จุดร้อนสุดของตัวนำที่พิกัดโหลด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า $R_{dc}$ .....	221
5.19 แสดงข้อมูลการจำลองกระแสโหลด ในสถานะที่กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ $h$ มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{h}$ ของกระแสมูลฐานและที่กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ $h$ มีค่ามากกว่า $\frac{1}{h}$ ของกระแสมูลฐาน.....	227
5.20 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดสัมพัทธ์ ในสถานะกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ $h$ มีค่า เท่ากับหรือต่ำกว่า $\frac{1}{h}$ ของกระแสมูลฐานเปรียบเทียบกับกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ $h$ มีค่ามากกว่า $\frac{1}{h}$ ของกระแสมูลฐาน.....	229
5.21 ตารางที่ 5.21 การเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์อายุที่สูญเสียจากตัวอย่างที่ 1 เมื่อพิจารณา ใช้อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยคงที่ตลอดปีกับอุณหภูมิแวดล้อมแบบชายน 2 ชั้น ของรูปแบบต่าง ๆ.....	230
5.22 ตารางที่ 5.22 การเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์อายุที่สูญเสียและอายุการใช้งานจากแบบ โหลดที่ 1 ถึง 4 ของแต่ละรูปแบบ เมื่อพิจารณาใช้อุณหภูมิแวดล้อมแบบชายน 2 ชั้น.....	233

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงโครงสร้างของหม้อแปลง.....	5
2.2 แสดงส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	6
2.3 แสดงชนิดของแกนเหล็ก.....	8
2.4 แสดงแกนเหล็กและขดลวดของหม้อแปลง 3 เฟส.....	10
2.5 แสดงการต่อขดลวดหม้อแปลง 3 เฟส แบบ $\Delta/Y$ .....	10
2.6 แสดงลักษณะการติดตั้งกระดาดบนระหว่างขดลวดแรงดันสูง และแรงดันต่ำของหม้อแปลง.....	14
2.7 แสดงการถ่ายเทความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	16
2.8 แสดงการกระจายอุณหภูมิในขดลวดแต่ละรอบ.....	24
2.9 แสดงทิศทางการพาความร้อนของน้ำมันในหม้อแปลง และอุณหภูมิ ที่เพิ่มขึ้นเหนือรอบ ๆ.....	25
2.10 แสดงลักษณะของวัฏจักรโหลดจริงและวัฏจักรโหลดสมมูล.....	26
2.11 แสดงตัวอย่างการต่อโหลดแบบวัฏจักร โหลดปกติ.....	27
2.12 แสดงตัวอย่างวัฏจักรโหลดฉุกเฉินช่วงเวลายาวนาน.....	28
2.13 แสดงวัฏจักรโหลดฉุกเฉินช่วงเวลาสั้น ๆ.....	28
2.14 แสดงนิยามของพารามิเตอร์ สำหรับอุณหภูมิแวดล้อมแบบฟังก์ชันชานส์สองชั้น.....	31
2.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิจุดร้อนสุดกับอายุการใช้งานของหม้อแปลง ที่ หม้อแปลงมีขนาด 500 kVA และต่ำกว่า.....	34
2.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิจุดร้อนสุดกับอายุการใช้งานของหม้อแปลง ที่ หม้อแปลงมีขนาดมากกว่า 500 kVA ถึง 100 MVA.....	35
2.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิจุดร้อนสุดกับอายุการใช้งานของหม้อแปลง ที่ หม้อแปลงมีขนาดมากกว่า 100 MVA.....	35
3.1 แสดงการสูญเสียจากฮีสเทอรีซิส.....	47
3.2 แสดงวงฮีสเทอรีซิส.....	48
3.3 แสดงการสูญเสียจากกระแสไหลวนในสารแม่เหล็ก.....	49
3.4 แสดงลักษณะการเกิดกระแสไหลวนอันเนื่องมาจากแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่แผ่นเหล็กบาง.....	49
3.5 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของลวดตัวนำกับความต้านทานไฟฟ้า.....	52
3.6 แสดงการเกิดกระแสไหลวนในขดลวด.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 แสดงไดอะแกรมการกระจายของเส้นแรงแม่เหล็กไว้.....	54
3.8 แสดงไดอะแกรมเส้นแรงแม่เหล็กไว้ของหม้อแปลงชนิดคอล์ย.....	54
3.9 แสดงเส้นปะเป็นการแสดงทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กไว้ตามแนวรัศมีของขดลวดแบบ ขดลวดไม่สมมาตร ไปยังผนังถึงหม้อแปลงและส่วนอื่น ๆ.....	55
3.10 แสดงวงจรการต่อเรกติไฟเออร์ 3 เฟส 6 พัลส์ ร่วมกับโหลดความต้านทานและตัว เหนี่ยวนำขนาดใหญ่.....	58
3.11 แสดงสัญญาณของวงจรเรกติไฟเออร์ 3 เฟส 6 พัลส์ ร่วมกับโหลดความต้านทานและ ตัวเหนี่ยวนำขนาดใหญ่.....	58
3.12 แสดงวงจรสมมูลแทนกระแสฮาร์โมนิกของเรกติไฟเออร์แบบ 3 เฟส 6 พัลส์.....	60
3.13 แสดงสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแสทางเข้าวงจรเรกติไฟเออร์ 3 เฟส 6 พัลส์ เมื่อโหลดเป็นตัวความต้านทานและตัวเก็บประจุ(D.C.)ต่อขนานกัน.....	60
3.14 แสดงสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแสทางเข้าวงจรเรกติไฟเออร์ 3 เฟส 6 พัลส์ เมื่อโหลดเป็นตัวความต้านทาน.....	61
3.15 แสดงการเกิดโวลท์เทจ นอช ในช่วงขณะคอมมิวเตชั่น.....	61
3.16 แสดงความสัมพันธ์ของ พิกัด K-Factor กับดัชนีของพิกัด โหลด K.....	66
3.17 แสดงวงจรเส้นเดียวของหม้อแปลง 3 เฟส ขณะทดสอบแบบเปิดวงจร.....	67
3.18 แสดงวงจรสมมูลของหม้อแปลงขณะทดสอบแบบเปิดวงจร.....	68
3.19 แสดงวงจรเส้นเดียวของหม้อแปลง 3 เฟส ขณะทดสอบแบบลัดวงจร.....	68
3.20 แสดงวงจรสมมูลของหม้อแปลงขณะทดสอบแบบลัดวงจร.....	69
3.21 แสดงวงจรเส้นเดียวของหม้อแปลง 3 เฟส ขณะทดสอบแบบใช้โหลดจริง.....	70
3.22 แสดงวงจรของหม้อแปลง 3 เฟส 2 ตัว ต่อแบบเบ็ททุเบ็ท.....	71
3.23 แสดงวงจรการทดสอบต่อเรกติไฟเออร์ 3 เฟสร่วมกับโหลด.....	72
3.24 แสดงวงจรการทดสอบหาค่าสูญเสียขณะมีโหลดที่ความถี่ไฟฟ้าต่าง ๆ โดยการลัดวงจรทางขดทุติยภูมิของหม้อแปลง.....	73
4.1 แสดงรูปวงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์.....	75
4.2 แสดงเอาท์พุทกระแสสลับสามเฟส.....	75
4.3 แสดงลำดับการนำกระแสของ IGBT.....	75
4.4 แสดงลำดับการทำงานของ IGBT.....	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรทริกเกอร์.....	77
4.6 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรทริกเกอร์ที่สร้างขึ้น.....	78
4.7 แสดงสัญญาณ ณ จุดต่าง ๆ ของรูปที่ 4.6.....	78
4.8 แสดงวงจรอะสเคมบลีลดีไวเซอร์.....	80
4.9 แสดงวงจรเครื่องมือับ 6 วงแหวน.....	81
4.10 แสดงวงจรโฮลค.....	81
4.11 แสดงวงจรขับเกทของไอจีบีที.....	82
4.12 แสดงวงจรแหล่งจ่ายของวงจรควบคุมและวงจรขับเกท IGBT.....	83
4.13 แสดงวงจรควบคุมของอินเวอร์เตอร์.....	83
4.14 แสดงวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน.....	84
4.15 แสดงวงจรเรกติฟายเออร์เต็มคลื่น 3 เฟส 6 พัลส์.....	86
4.16 แสดงช่วงการนำกระแส, แรงดันเอาต์พุต และแรงดันตกคร่อม ไดโอด.....	87
5.1 แสดงวงจรการทดสอบหาค่ากำลังสูญเสียของหม้อแปลงที่ความถี่ฮาร์โมนิกต่าง ๆ.....	88
5.2 แสดงคลื่นแรงดันสัญญาณไซน์ ทางขาเข้าขดลวดแรงดันสูง ที่ความถี่ 50 Hz.....	89
5.3 แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าฟิวเตอร์และขาออกฟิวเตอร์ ที่ความถี่ 150 Hz.....	89
5.4 แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าฟิวเตอร์และขาออกฟิวเตอร์ ที่ความถี่ 250 Hz.....	89
5.5 แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าฟิวเตอร์และขาออกฟิวเตอร์ ที่ความถี่ 350 Hz.....	89
5.6 แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าฟิวเตอร์และขาออกฟิวเตอร์ ที่ความถี่ 450 Hz.....	89
5.7 แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าฟิวเตอร์และขาออกฟิวเตอร์ ที่ความถี่ 550 Hz.....	89
5.8 แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าฟิวเตอร์และขาออกฟิวเตอร์ ที่ความถี่ 650 Hz.....	90
5.9 แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าฟิวเตอร์และขาออกฟิวเตอร์ ที่ความถี่ 750 Hz.....	90
5.10 แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าฟิวเตอร์และขาออกฟิวเตอร์ ที่ความถี่ 850 Hz.....	90
5.11 แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าฟิวเตอร์และขาออกฟิวเตอร์ ที่ความถี่ 950 Hz.....	90
5.12 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียของลวดตัวนำต่อค่า $(I_{Phase})^2$ .....	91
5.13 แสดงความสัมพันธ์ของค่า Harmonic Loss Factor(Kn) ต่อค่าลำดับฮาร์โมนิก.....	92
5.14 แสดงวงจรการทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม โดยวิธีการลัดวงจรทางขดลวดทุติยภูมิ.....	95
5.15 แสดงวงจรการทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม โดยวิธีการใช้โหลดแบบเชิงเส้น.....	95
5.16 แสดงวงจรการทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม โดยวิธีการใช้โหลด แบบไม่เป็นเชิงเส้น.....	95

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.17 แสดงสัญญาณแรงดันทางขดลวดแรงดันสูง เมื่อโหลดหม้อแปลงเป็นโหลดเชิงเส้น.....	97
5.18 แสดงสัญญาณกระแสทางขดลวดแรงดันสูง เมื่อโหลดหม้อแปลงเป็นโหลดเชิงเส้น.....	97
5.19 แสดงสัญญาณกระแสและแรงดันทางขดลวดแรงดันสูง เมื่อไม่ใส่ตัวเก็บประจุ ที่ $I_{pri}$ ประมาณ 100 %.....	97
5.20 แสดงสัญญาณกระแสและแรงดันทางขดลวดแรงต่ำ เมื่อไม่ใส่ตัวเก็บประจุ ที่ $I_{sec}$ ประมาณ 100 %.....	97
5.21 แสดงสัญญาณกระแสและแรงดันทางขดลวดแรงดันสูง เมื่อใส่ตัวเก็บประจุ ที่ $I_{pri}$ ประมาณ 110 %.....	98
5.22 แสดงสัญญาณกระแสและแรงดันทางขดลวดแรงต่ำ เมื่อใส่ตัวเก็บประจุ ที่ $I_{sec}$ ประมาณ 110 %.....	98
5.23 แสดงสัญญาณกระแสและแรงดันทางขดลวดแรงสูง เมื่อไม่ใส่ตัวเก็บประจุ ที่ $I_{pri}$ ประมาณ 75 %.....	98
5.24 แสดงสัญญาณกระแสและแรงดันทางขดลวดแรงต่ำ เมื่อไม่ใส่ตัวเก็บประจุ ที่ $I_{sec}$ ประมาณ 75 %.....	98
5.25 แสดงสัญญาณกระแสและแรงดันทางขดลวดแรงสูง เมื่อใส่ตัวเก็บประจุ ที่ $I_{pri}$ ประมาณ 86 %.....	99
5.26 แสดงสัญญาณกระแสและแรงดันทางขดลวดแรงดันต่ำ เมื่อใส่ตัวเก็บประจุ ที่ $I_{sec}$ ประมาณ 86 %.....	99
5.27 แสดงสัญญาณกระแสและแรงดันทางขดลวดแรงดันสูง เมื่อไม่ใส่ตัวเก็บประจุ ที่ $I_{pri}$ ประมาณ 52 %.....	99
5.28 แสดงสัญญาณกระแสและแรงดันทางขดลวดแรงดันต่ำ เมื่อไม่ใส่ตัวเก็บประจุ ที่ $I_{sec}$ ประมาณ 52 %.....	99
5.29 แสดงสัญญาณกระแสและแรงดันทางขดลวดแรงดันสูง เมื่อใส่ตัวเก็บประจุ ที่ $I_{pri}$ ประมาณ 62 %.....	100
5.30 แสดงสัญญาณกระแสและแรงดันทางขดลวดแรงดันต่ำ เมื่อใส่ตัวเก็บประจุ ที่ $I_{sec}$ ประมาณ 52 %.....	100
5.31 แสดงสัญญาณกระแสและแรงดันทางขดลวดแรงดันต่ำ เมื่อไม่ใส่ตัวเก็บประจุ ที่ $I_{sec}$ ประมาณ 26 %.....	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.32 สัญญาณกระแสและแรงดันทางขดลวดแรงดันต่ำ เมื่อใส่ตัวเก็บประจุ ที่ $I_{sec}$ ประมาณ 36 %.....	100
5.33 แสดงการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน....	101
5.34 แสดงการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล วัตถุประสงค์หม้อแปลงล้อยอมรอบๆ หม้อแปลงที่ทดสอบ จำนวน 2 ตำแหน่ง.....	101
5.35 แสดงผลของอุณหภูมิขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 1, 2, 3, 4, 5, 11 เมื่อเป็นการ ทดสอบแบบลัดวงจร.....	102
5.36 แสดงผลของอุณหภูมิขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 6, 7, 8, 9, 10 เมื่อเป็นการ ทดสอบแบบลัดวงจร.....	102
5.37 แสดงผลของอุณหภูมิน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 12, 13, 14, 15, 16, 17 เมื่อเป็นการ ทดสอบแบบลัดวงจร.....	103
5.38 แสดงผลของอุณหภูมิแวดล้อมขณะทำการทดสอบแบบลัดวงจร.....	103
5.39 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 1, 2, 3, 4, 5, 11 เมื่อเป็นการ ทดสอบแบบลัดวงจร.....	104
5.40 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 6, 7, 8, 9, 10 เมื่อเป็นการ ทดสอบแบบลัดวงจร.....	104
5.41 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 12, 13, 14, 15, 16, 17 เมื่อเป็นการ ทดสอบแบบลัดวงจร.....	105
5.42 แสดงผลของอุณหภูมิขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 1, 2, 3, 4, 5, 11 เมื่อเป็นการ ทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น.....	105
5.43 แสดงผลของอุณหภูมิขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 6, 7, 8, 9, 10 เมื่อเป็นการ ทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น.....	106
5.44 แสดงผลของอุณหภูมิน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 12, 13, 14, 15, 16, 17 เมื่อเป็นการ ทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น.....	106
5.45 แสดงผลอุณหภูมิแวดล้อมขณะทำการทดสอบ เมื่อเป็นการทดสอบแบบ โหลดเชิงเส้น.....	107
5.46 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่ง ที่1, 2, 3, 4, 5, 11 เมื่อเป็นการ ทดสอบแบบ โหลดเชิงเส้น.....	107

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.47 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 6, 7, 8, 9, 10 เมื่อเป็นการทดสอบแบบ โหลดเชิงเส้น.....	108
5.48 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 12, 13, 14, 15, 16, 17 เมื่อเป็นการทดสอบแบบ โหลดเชิงเส้น.....	108
5.49 แสดงผลของอุณหภูมิตลอดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 1, 2, 3, 4, 5, 11 เมื่อเป็นการทดสอบแบบ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	109
5.50 แสดงผลของอุณหภูมิตลอดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 6, 7, 8, 9, 10 เมื่อเป็นการทดสอบแบบ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	109
5.51 แสดงผลของอุณหภูมิน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 12, 13, 14, 15, 16, 17 เมื่อเป็นการทดสอบแบบ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	110
5.52 แสดงผลของอุณหภูมิแวดล้อมขณะทำการทดสอบแบบ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	110
5.53 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 1, 2, 3, 4, 5, 11 เมื่อเป็นการทดสอบแบบ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	111
5.54 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 6, 7, 8, 9, 10 เมื่อเป็นการทดสอบแบบ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	111
5.55 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 12, 13, 14, 15, 16, 17 เมื่อเป็นการทดสอบแบบ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	112
5.56 แสดงผลของความต้านทานที่วัดได้ต่อช่วงเวลา หลังจากตัดกระแสไฟฟ้าของขดลวดแรงสูง โดยทดสอบแบบลัดวงจร.....	112
5.57 แสดงผลของความต้านทานที่วัดได้ต่อช่วงเวลาหลังจากตัดกระแสไฟฟ้าของขดลวดแรงดันต่ำ โดยทดสอบแบบลัดวงจร.....	113
5.58 แสดงผลของความต้านทานที่วัดได้ต่อช่วงเวลา หลังจากตัดกระแสไฟฟ้าของขดลวดแรงสูง โดยทดสอบแบบ โหลดเชิงเส้น.....	113
5.59 แสดงผลของความต้านทานที่วัดได้ต่อช่วงเวลาหลังจากตัดกระแสไฟฟ้าของขดลวดแรงดันต่ำ โดยทดสอบแบบ โหลดเชิงเส้น.....	114
5.60 แสดงผลของความต้านทานที่วัดได้ต่อช่วงเวลาหลังจากตัดกระแสไฟฟ้าของขดลวดแรงสูง โดยทดสอบแบบ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	114

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.61 แสดงผลของความต้านทานที่วัดได้ต่อช่วงเวลาหลังจากตัดกระแสไฟฟ้า ของขดลวดแรงดันต่ำโดยทดสอบแบบไม่เป็น โหลดเชิงเส้น.....	115
5.62 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบการ ทดสอบแบบ ลัดวงจร, โหลดเชิงเส้น และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	115
5.63 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบการ ทดสอบแบบ ลัดวงจร, โหลดเชิงเส้น และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	116
5.64 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบการ ทดสอบแบบ ลัดวงจร, โหลดเชิงเส้น และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	116
5.65 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 4 เมื่อเปรียบเทียบการ ทดสอบแบบ ลัดวงจร, โหลดเชิงเส้น และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	117
5.66 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 5 เมื่อเปรียบเทียบการ ทดสอบแบบ ลัดวงจร, โหลดเชิงเส้น และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	117
5.67 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 6 เมื่อเปรียบเทียบการ ทดสอบแบบ ลัดวงจร, โหลดเชิงเส้น และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	118
5.68 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 7 เมื่อเปรียบเทียบการ ทดสอบแบบ ลัดวงจร, โหลดเชิงเส้น และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	118
5.69 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 8 เมื่อเปรียบเทียบการ ทดสอบแบบ ลัดวงจร, โหลดเชิงเส้น และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	119
5.70 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 9 เมื่อเปรียบเทียบการ ทดสอบแบบ ลัดวงจร, โหลดเชิงเส้น และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	119
5.71 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 10 เมื่อเปรียบเทียบการ ทดสอบแบบ ลัดวงจร, โหลดเชิงเส้น และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	120
5.72 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 11 เมื่อเปรียบเทียบการ ทดสอบแบบ ลัดวงจร, โหลดเชิงเส้น และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	120
5.73 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 12 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบ ลัดวงจร, โหลดเชิงเส้น และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	121
5.74 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 13 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบ ลัดวงจร, โหลดเชิงเส้น และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	121

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.75 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 14 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบ ลัดวงจร, โหลดเชิงเส้น และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	122
5.76 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 15 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบ ลัดวงจร, โหลดเชิงเส้น และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	122
5.77 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 16 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบ ลัดวงจร, โหลดเชิงเส้น และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	123
5.78 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 17 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบ ลัดวงจร, โหลดเชิงเส้น และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	123
5.79 แสดงการเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของลวดตัวนำ ด้านปฐมภูมิ ขณะตัดกระแสไฟฟ้า ที่พิกัดโหลดต่อช่วงเวลา โดยวิธีการลัดวงจร.....	125
5.80 แสดงการเขียนกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของลวดตัวนำด้านทุติยภูมิ ขณะตัดกระแสไฟฟ้า ที่พิกัดโหลดต่อช่วงเวลา โดยวิธีการลัดวงจร.....	125
5.81 แสดงการเขียนกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของลวดตัวนำด้านปฐมภูมิ ขณะตัดกระแสไฟฟ้า ที่พิกัดโหลดต่อช่วงเวลา โดยวิธีการใช้โหลดเชิงเส้น.....	126
5.82 แสดงการเขียนกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของลวดตัวนำด้านทุติยภูมิ ขณะตัดกระแสไฟฟ้า ที่พิกัดโหลดต่อช่วงเวลา โดยวิธีการใช้โหลดเชิงเส้น.....	126
5.83 แสดงการเขียนกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของลวดตัวนำด้านปฐมภูมิ ขณะตัดกระแสไฟฟ้า ที่ $I_1$ พิกัดโหลด ต่อช่วงเวลา โดยวิธีการใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้น....	127
5.84 แสดงการเขียนกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของลวดตัวนำด้านทุติยภูมิ ขณะตัดกระแสไฟฟ้าที่ $I_1$ พิกัดโหลด ต่อช่วงเวลา โดยวิธีการใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้น....	127
5.85 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มที่ระดับความสูงต่าง ๆ ของขดลวดแรงดันสูงและน้ำมันของ การทดสอบแบบลัดวงจร (ชั่วโมงที่ 10) .....	133
5.86 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มที่ระดับความสูงต่าง ๆ ของขดลวดแรงดันต่ำและน้ำมันของ การทดสอบแบบลัดวงจร (ชั่วโมงที่ 10) .....	133
5.87 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มที่ระดับความสูงต่าง ๆ ของขดลวดแรงดันสูงและน้ำมันของ การทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น (ชั่วโมงที่ 9) .....	134
5.88 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มที่ระดับความสูงต่าง ๆ ของขดลวดแรงดันต่ำและน้ำมันของ การทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น (ชั่วโมงที่ 9) .....	134

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.89 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มที่ระดับความสูงต่าง ๆ ของขดลวดแรงดันสูงและน้ำมันของการทดสอบแบบโหลดไม่เป็นเชิงเส้น (ชั่วโมงที่ 9) .....	135
5.90 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มที่ระดับความสูงต่าง ๆ ของขดลวดแรงดันต่ำและน้ำมันของการทดสอบแบบโหลดไม่เป็นเชิงเส้น (ชั่วโมงที่ 9) .....	135
5.91 แสดงการเปลี่ยนแปลงโหลด 5 ระดับ ในช่วงเวลา 10 ชั่วโมง.....	136
5.92 แสดงผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการทำนาย ของอุณหภูมิน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 17....	136
5.93 แสดงผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการทำนาย ของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 5.....	137
5.94 แสดงผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการทำนาย ของอุณหภูมิเพิ่มขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 10.....	137
5.95 แสดง การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ณ ตำแหน่งต่างๆ บริเวณคานบนขดลวดทั้ง 3 คอยล์.....	138
5.96 แสดงผลของอุณหภูมิของขดลวดและน้ำมันด้านบนขณะทำการทดสอบแบบลัดวงจรที่พิกัด ที่คอยล์ 1.....	138
5.97 แสดงผลของอุณหภูมิของขดลวดและน้ำมันด้านบนขณะทำการทดสอบแบบลัดวงจรที่พิกัด ที่คอยล์ 2.....	139
5.98 แสดงผลของอุณหภูมิของขดลวดและน้ำมันด้านบนขณะทำการทดสอบแบบลัดวงจรที่พิกัด ที่คอยล์ 3.....	139
5.99 แสดงผลของอุณหภูมิของขดลวดและน้ำมันด้านบนขณะทำการทดสอบแบบลัดวงจรที่พิกัด ที่คอยล์ 1.....	140
5.100 แสดงผลของอุณหภูมิของขดลวดและน้ำมันด้านบนขณะทำการทดสอบแบบลัดวงจรที่พิกัด ที่คอยล์ 2.....	140
5.101 แสดงผลของอุณหภูมิของขดลวดและน้ำมันด้านบนขณะทำการทดสอบแบบลัดวงจรที่พิกัด ที่คอยล์ 3.....	141
5.102 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิของขดลวด ทั้ง 3 คอยล์และน้ำมันด้านบนขณะทำการทดสอบแบบลัดวงจรที่พิกัด ที่สภาวะคงตัว.....	141
5.103 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด ทั้ง 3 คอยล์และน้ำมันด้านบนขณะทำการทดสอบแบบลัดวงจรที่พิกัด ที่สภาวะคงตัว.....	142

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.104 แสดงการเปลี่ยนแปลงโพลด 2 ระดับ ในช่วงเวลา 13 ชั่วโมง.....	143
5.105 แสดงผลของอุณหภูมิของขดลวดและน้ำมันด้านบน ขณะทำการทดสอบ แบบลัดวงจรที่พิกัด ที่คอยล์ 1.....	145
5.106 แสดงผลของอุณหภูมิของขดลวดและน้ำมันด้านบน ขณะทำการทดสอบ แบบลัดวงจรที่พิกัด ที่คอยล์ 2.....	145
5.107 แสดงผลของอุณหภูมิของขดลวดและน้ำมันด้านบน ขณะทำการทดสอบ แบบลัดวงจรที่พิกัด ที่คอยล์ 3.....	146
5.108 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดและน้ำมันด้านบน ขณะทำการทดสอบ แบบลัดวงจรที่พิกัด ที่คอยล์ 1.....	146
5.109 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดและน้ำมันด้านบน ขณะทำการทดสอบ แบบลัดวงจรที่พิกัด ที่คอยล์ 2.....	147
5.110 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดและน้ำมันด้านบน ขณะทำการทดสอบ แบบลัดวงจรที่พิกัด ที่คอยล์ 3.....	147
5.111 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิของขดลวด ทั้ง 3 คอยล์และน้ำมันด้านบน ขณะทำการทดสอบแบบลัดวงจรที่พิกัด ชั่วโมงที่ 9.....	148
5.122 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด ทั้ง 3 คอยล์และน้ำมันด้านบน ขณะทำการทดสอบแบบลัดวงจรที่พิกัด ชั่วโมงที่ 9.....	148
5.113 แสดงการเปลี่ยนแปลงโพลด 3 ระดับ ในช่วงเวลา 13 ชั่วโมง.....	149
5.114 แสดงผลของอุณหภูมิของขดลวดและน้ำมันด้านบน ขณะทำการทดสอบ แบบลัดวงจรที่พิกัด ที่คอยล์ 1.....	151
5.115 แสดงผลของอุณหภูมิของขดลวดและน้ำมันด้านบน ขณะทำการทดสอบ แบบลัดวงจรที่พิกัด ที่คอยล์ 2.....	151
5.116 แสดงผลของอุณหภูมิของขดลวดและน้ำมันด้านบน ขณะทำการทดสอบ แบบลัดวงจรที่พิกัด ที่คอยล์ 3.....	152
5.117 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดและน้ำมันด้านบน ขณะทำการทดสอบ แบบลัดวงจรที่พิกัด ที่คอยล์ 1.....	152
5.118 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดและน้ำมันด้านบน ขณะทำการทดสอบ แบบลัดวงจรที่พิกัด ที่คอยล์ 2.....	153

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.119 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดและน้ำมันด้านบนขณะทำการทดสอบ แบบลัดวงจรที่พิกัด ที่คอยล์ 3.....	153
5.120 แสดงการเปลี่ยนแปลงโหลด 3 ระดับ ในช่วงเวลา 12 ชั่วโมง.....	154
5.121 แสดงผลของอุณหภูมิของขดลวดและน้ำมันด้านบนขณะทำการทดสอบ แบบลัดวงจรที่พิกัด ที่คอยล์ 1.....	156
5.122 แสดงผลของอุณหภูมิของขดลวดและน้ำมันด้านบนขณะทำการทดสอบ แบบลัดวงจรที่พิกัด ที่คอยล์ 2.....	156
5.123 แสดงผลของอุณหภูมิของขดลวดและน้ำมันด้านบนขณะทำการทดสอบ แบบลัดวงจรที่พิกัด ที่คอยล์ 3.....	157
5.124 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดและน้ำมันด้านบนขณะทำการทดสอบ แบบลัดวงจรที่พิกัด ที่คอยล์ 1.....	157
5.125 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดและน้ำมันด้านบนขณะทำการทดสอบ แบบลัดวงจรที่พิกัด ที่คอยล์ 2.....	158
5.126 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดและน้ำมันด้านบนขณะทำการทดสอบ แบบลัดวงจรที่พิกัด ที่คอยล์ 3.....	158
5.127 แสดงผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน ซึ่งได้จากการทดสอบ และการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	161
5.128 แสดงผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำด้านแรงดันตำแหน่งที่ 5, ลวด ตัวนำด้านแรงดันสูงตำแหน่งที่ 10 และการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	161
5.129 แสดงผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน ซึ่งได้จากการทดสอบ และการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	164
5.130 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 1 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	165
5.131 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 2 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	165
5.132 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 3 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	166

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.133 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 4 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	166
5.134 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 5 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	167
5.135 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 6 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	167
5.136 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 7 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	168
5.137 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 8 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	168
5.138 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 9 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	169
5.139 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 10 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	169
5.140 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 11 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	170
5.141 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 12 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	170
5.142 แสดงผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน ซึ่งได้จากการทดสอบ และการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	174
5.143 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 1 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	174
5.144 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 2 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	175
5.145 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 3 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	175
5.146 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 4 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	176

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.147 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 5 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	176
5.148 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 6 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	177
5.149 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 7 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	177
5.150 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 8 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	178
5.151 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 9 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	178
5.152 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 10 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	179
5.153 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 11 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	179
5.154 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 12 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	180
5.155 แสดงผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน ซึ่งได้จากการทดสอบ และการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	184
5.156 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 1 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	184
5.157 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 2 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	185
5.158 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 3 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	185
5.159 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 4 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	186
5.160 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 5 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	186

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.161 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 6 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	187
5.162 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 7 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	187
5.163 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 8 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	188
5.164 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 9 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	188
5.165 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 10 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	189
5.166 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 11 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	189
5.167 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 12 ซึ่งได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ.....	190
5.168 แสดงแผนผังขั้นตอนการคำนวณค่าอุณหภูมิ, อายุที่สูญเสียและ อายุการใช้งานของหม้อแปลง.....	191
5.168 (ต่อ) แสดงแผนผังขั้นตอนการคำนวณค่าอุณหภูมิ, อายุที่สูญเสียและ อายุการใช้งานของหม้อแปลง.....	192
5.168 (ต่อ) แสดงแผนผังขั้นตอนการคำนวณค่าอุณหภูมิ, อายุที่สูญเสียและ อายุการใช้งานของหม้อแปลง.....	193
5.169 แสดงการจำลอง โหลด 3 ระดับ ในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง.....	196
5.170 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยคงที่ตลอดปี ( $\theta_{ay} = 40^{\circ}\text{C}$ ) กับอุณหภูมิ แวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปี ( $\theta_{ay} = 40^{\circ}\text{C}, A_{\text{year}} = 11, B_{\text{day}} = 6, DX = 110, TX = 14$ ) ที่การจำลองโหลดตัวอย่างที่ 1.....	199
5.171 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน ของการจำลองโหลดตัวอย่างที่ 1 จากทั้ง 3 รูปแบบ.....	200
5.172 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุดของตัวนำของจำลองโหลดตัว อย่างที่ 1 จากทั้ง 3 รูปแบบ.....	201

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.173 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิของน้ำมันด้านบน เมื่ออุณหภูมิแวดล้อม เฉลี่ยคงที่ตลอดปีของวันที่ 110 ของการจำลองไหลตัวอย่างที่ 1 จากทั้ง 3 รูปแบบ.....	202
5.174 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำ เมื่ออุณหภูมิแวดล้อม เฉลี่ยคงที่ตลอดปีของวันที่ 110 ของการจำลองไหลตัวอย่างที่ 1 จากทั้ง 3 รูปแบบ.....	203
5.175 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิของน้ำมันด้านบน เมื่ออุณหภูมิแวดล้อม เปลี่ยนแปลงตลอดปีของวันที่ 110 ของการจำลองไหลตัวอย่างที่ 1 .....	204
5.176 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำ เมื่ออุณหภูมิแวดล้อม เปลี่ยนแปลงตลอดปีของวันที่ 110 ของการจำลองไหลตัวอย่างที่ 1 จากทั้ง 3 รูปแบบ...	205
5.177 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิของน้ำมันด้านบน เมื่ออุณหภูมิแวดล้อม เฉลี่ยคงที่ตลอดปีกับอุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปี ของวันที่ 110 ของการจำลอง ไหลตัวอย่างที่ 1 จากทั้ง 3 รูปแบบ.....	206
5.178 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำ เมื่ออุณหภูมิแวดล้อม เฉลี่ยคงที่ตลอดปีกับอุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปี ของวันที่ 110 ของการจำลอง ไหลตัวอย่างที่ 1 จากทั้ง 3 รูปแบบ.....	207
5.179 แสดงการจำลองไหล 4 ระดับ ในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง.....	208
5.180 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยคงที่ตลอดปี ( $\theta_{ay} = 40^{\circ}\text{C}$ ) กับอุณหภูมิ แวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปี ( $\theta_{ay} = 40^{\circ}\text{C}$ , $A_{\text{year}} = 8$ , $B_{\text{day}} = 5$ , $DX = 115$ , $TX = 13$ ) ของการจำลองไหลตัวอย่างที่ 2.....	211
5.181 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนของการ จำลองไหลตัวอย่างที่ 2 จากทั้ง 3 รูปแบบ.....	212
5.182 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุดของตัวนำของการ จำลองไหลตัวอย่างที่ 2 จากทั้ง 3 รูปแบบ.....	213
5.183 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิของน้ำมันด้านบน เมื่ออุณหภูมิแวดล้อม เฉลี่ยคงที่ตลอดปีของวันที่ 115 ของการจำลองไหลตัวอย่างที่ 2 จากทั้ง 3 รูปแบบ.....	214
5.184 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำ เมื่ออุณหภูมิแวดล้อม เฉลี่ยคงที่ตลอดปีของวันที่ 115 ของการจำลองไหลตัวอย่างที่ 2 จากทั้ง 3 รูปแบบ.....	215
5.185 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิของน้ำมันด้านบน เมื่ออุณหภูมิแวดล้อม เปลี่ยนแปลงตลอดปีของวันที่ 115 ของการจำลองไหลตัวอย่างที่ 2 จากทั้ง 3 รูปแบบ....	216

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.186 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิจุกร้อนสุดของตัวนำ เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปีของวันที่ 115 ของการจำลองโหลดตัวอย่างที่ 2 จากทั้ง 3 รูปแบบ....	217
5.187 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิของน้ำมันด้านบน เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยคงที่ตลอดปีกับอุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปี ของวันที่ 115 ของการจำลองโหลดตัวอย่างที่ 2 จากทั้ง 3 รูปแบบ.....	218
5.188 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิจุกร้อนสุดของตัวนำ เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยคงที่ตลอดปีกับอุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปี ของวันที่ 115 ของการจำลองโหลดตัวอย่างที่ 2 จากทั้ง 3 รูปแบบ.....	219
5.189 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันจากวิธีการทดสอบทั้ง 3 เงื่อนไข.....	225
5.190 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำด้านแรงดันสูง จากวิธีการทดสอบทั้ง 3 เงื่อนไข.....	225
5.191 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำด้านแรงดันต่ำ จากวิธีการทดสอบทั้ง 3 เงื่อนไข.....	225
5.192 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน จากการใช้รูปแบบ Model เปรียบเทียบกับรูปแบบ K-factor จากเงื่อนไขที่ 1. เมื่อกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ h มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{h}$ ของกระแสมูลฐาน.....	227
5.193 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มจุกร้อนสุดของตัวนำ จากการใช้รูปแบบ Model เปรียบเทียบกับรูปแบบ K-factor จากเงื่อนไขที่ 1. เมื่อกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ h มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{h}$ ของกระแสมูลฐาน.....	228
5.194 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน จากการใช้รูปแบบ Model เปรียบเทียบกับรูปแบบ K-factor จากเงื่อนไขที่ 2. เมื่อกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ h มีค่ามากกว่า $\frac{1}{h}$ ของกระแสมูลฐาน.....	228
5.195 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มจุกร้อนสุดของตัวนำ จากการใช้รูปแบบ Model เปรียบเทียบกับรูปแบบ K-factor จากเงื่อนไขที่ 2. เมื่อกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ h มีค่ามากกว่า $\frac{1}{h}$ ของกระแสมูลฐาน.....	228
5.196 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยต่อเปอร์เซ็นต์อายุที่สูญเสีย.....	231
5.197 แสดงการจำลองโหลด 3 ระดับแบบโหลดที่ 2 ในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง.....	232

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัวอย่างอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.198 แสดงการจำลองโหลด 3 ระดับแบบโหลดที่ 3 ในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง.....	232
5.199 แสดงการจำลองโหลด 3 ระดับแบบโหลดที่ 4 ในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง.....	232
5.200 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองทั้ง 4 แบบ ที่สมมติขึ้นต่อเปอร์เซ็นต์อายุที่สูญเสียของหม้อแปลง.....	233
5.201 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองทั้ง 4 แบบที่สมมติขึ้นต่ออายุการใช้งานของหม้อแปลง.....	234
1 ภาคผนวก ก แสดงโครงสร้างภายนอก - ด้านหน้า ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน.....	244
2 ภาคผนวก ก แสดงการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ในแนวระดับที่ขดลวดและน้ำมัน.....	244
3 ภาคผนวก ก แสดงการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล บริเวณด้านบนของขดลวดทั้ง 3 ชุด.....	245
4 ภาคผนวก ก แสดงรูปขยายของการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลที่ขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ.....	245
5 ภาคผนวก ก แสดงชุดรีกคิฟายเออร์แบบ 3 เฟส 6 พัลส์ และตัวคาปาซิเตอร์.....	246
6 ภาคผนวก ก แสดงแท่งลวดความร้อนและหลอดไฟแบบอินแคนเดสเซนต์.....	246
7 ภาคผนวก ก แสดงชุดอินเวอร์เตอร์ แบบ 3 เฟส คลื่นเอาต์พุทแบบ 6 ชั้น.....	247
8 ภาคผนวก ก แสดงชุดฟิลเตอร์แบบกรองความถี่ต่ำผ่าน.....	247

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

$P_T$	หมายถึง กำลังสูญเสียรวม หน่วยเป็น วัตต์
$P_{T\_R}$	หมายถึง กำลังสูญเสียรวม ที่พิกัด หน่วยเป็น วัตต์
$P_{LL}$	หมายถึง กำลังสูญเสียขณะมีภาระ หน่วยเป็น วัตต์
$P_{LL}(pu)$	หมายถึง กำลังสูญเสียขณะมีภาระ ต่อหน่วย
$P_C$	หมายถึง กำลังสูญเสียที่แกนเหล็ก หน่วยเป็น วัตต์
$P_{C\_R}$	หมายถึง กำลังสูญเสียที่แกนเหล็ก ที่พิกัด หน่วยเป็น วัตต์
$P_{hys}$	หมายถึง กำลังสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส หน่วยเป็น วัตต์
$P_{ec}$	หมายถึง กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนที่แกนเหล็ก หน่วยเป็น วัตต์
$P_{ecw}$	หมายถึง กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนที่ขดลวด หน่วยเป็น วัตต์
$P_{ecw\_R}$	หมายถึง กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนที่ขดลวดที่พิกัด หน่วยเป็น วัตต์
$P_{ecw\_R}(pu)$	หมายถึง กำลังสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนที่ขดลวดที่พิกัด ต่อหน่วย
$P_{ecw\_H}$	หมายถึง กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนที่จอร์ออนสุด หน่วยเป็น วัตต์
$P_{ecw\_H}(pu)$	หมายถึง กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนที่จอร์ออนสุด ต่อหน่วย
$P_{tan k}$	หมายถึง กำลังสูญเสียสูญเสียที่ถังและส่วนที่เป็นโลหะ หน่วยเป็น วัตต์
$P_{tank\_R}$	หมายถึง กำลังสูญเสียสูญเสียที่ถังและส่วนที่เป็นโลหะ ที่พิกัด หน่วยเป็น วัตต์
$P_{dc}$	หมายถึง กำลังสูญเสียเนื่องจากความต้านทานกระแสตรงของสวดตัวนำ หน่วยเป็น วัตต์
$P_{ac}$	หมายถึง กำลังสูญเสียเนื่องจากความต้านทานกระแสสลับของสวดตัวนำ หน่วยเป็น วัตต์
$P_{stray}$	หมายถึง กำลังสูญเสียปลิกย่อย หน่วยเป็น วัตต์
$P_{OSL}$	หมายถึง กำลังสูญเสียปลิกย่อยอื่น ๆ นอกเหนือจากขดลวด หน่วยเป็น วัตต์
$P_{OSL\_R}(pu)$	หมายถึง กำลังสูญเสียปลิกย่อยอื่น ๆ นอกเหนือจากขดลวด ที่พิกัด ต่อหน่วย
$P_{OSL}(p.u.)$	หมายถึง กำลังสูญเสียปลิกย่อยอื่น ๆ นอกเหนือจากขดลวด ต่อหน่วย
$R_{en}$	หมายถึง ความต้านทานประสิทธิผลที่ความถี่ฮาร์โมนิก หน่วยเป็น โอห์ม
$R_{el}$	หมายถึง ความต้านทานประสิทธิผลที่ความถี่มูลฐาน หน่วยเป็น โอห์ม
$R_{ac}$	หมายถึง ค่าความต้านทานกระแสสลับ หน่วยเป็น โอห์ม
$R_{dc}$	หมายถึง ความต้านทานกระแสตรง หน่วยเป็น โอห์ม
$R_p$	หมายถึง ความต้านทานของขดลวดปฐมภูมิ หน่วยเป็น โอห์ม
$R_s$	หมายถึง ความต้านทานของขดลวดทุติยภูมิ หน่วยเป็น โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา **XXIX** อย่างไรก็ดีเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

$R_{t1}$	หมายถึง ความต้านทานของขดลวดที่ได้จากการวัดที่เวลาก่อนเริ่มทดสอบ( $t_1$ ) หน่วยเป็น โอห์ม
$R_{t2}$	หมายถึง ความต้านทานของขดลวดที่ เวลาตัดกระแสไฟฟ้า( $t_2$ ) หน่วยเป็น โอห์ม
$R_t$	หมายถึง ความต้านทานรีซิสแตนซ์ที่อุณหภูมิใด ๆ หน่วยเป็น โอห์ม-เมตร
$R_{t0}$	หมายถึง ความต้านทานรีซิสแตนซ์ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส หน่วยเป็น โอห์ม-เมตร
$R_h$	หมายถึง ความต้านทานทางความร้อนของวัสดุ หน่วยเป็น(เมตร-เคลวิน)ต่อวัตต์
$R_s'$	หมายถึง ความต้านทานทางด้านแรงดันต่ำที่โอนย้ายมาทางด้านขดลวดปฐมภูมิ หน่วยเป็น โอห์ม
$R_{ps}$	หมายถึง ความต้านทานรวม พิจารณาทางด้านขดลวดปฐมภูมิ หน่วยเป็น โอห์ม
$X_{ps}$	หมายถึง ความรีแอกแตนซ์รวม พิจารณาทางด้านขดลวดปฐมภูมิ หน่วยเป็น โอห์ม
$Z_{ps}$	หมายถึง อิมพีแดนซ์รวม พิจารณาทางด้านขดลวดปฐมภูมิ หน่วยเป็น โอห์ม
$h$	หมายถึง ลำดับฮาร์โมนิก
THDF	หมายถึง Transformer harmonic derating factor
CF	หมายถึง Crest Factor
$K_n$	หมายถึง ตัวประกอบค่าสูญเสียฮาร์โมนิก
$K$	หมายถึง อัตราส่วนโหลดขณะใช้งาน ต่อพิกัดโหลดที่แผ่นป้ายชื่อหม้อแปลง
K-factor	หมายถึง ตัวประกอบ K
$K_T$	หมายถึง ค่าคงที่ ขึ้นอยู่กับการออกแบบ รูปร่างและวัสดุของหม้อแปลง
$F_{(p,n)}$	หมายถึง ฟังก์ชันที่ขึ้นกับสเปกตรัมของกระแสฮาร์โมนิกของโหลดประเภทไม่ เป็นเชิงเส้น
$R$	หมายถึง อัตราส่วนค่ากำลังสูญเสียโหลดที่พิกัด ต่อค่ากำลังสูญเสียที่ไร้ภาระ
$I_p$	หมายถึง กระแสของขดลวดปฐมภูมิ หน่วยเป็น แอมแปร์
$I_s$	หมายถึง กระแสของขดลวดทุติยภูมิ หน่วยเป็น แอมแปร์
$I_{rms}$	หมายถึง กระแสไฟฟ้าประสิทธิผล หน่วยเป็น แอมแปร์
$I_h$	หมายถึง กระแสประสิทธิผลที่ฮาร์โมนิกลำดับ $h$ หน่วยเป็น แอมแปร์
$I_h (p.u.)$	หมายถึง กระแสประสิทธิผลที่ฮาร์โมนิกลำดับ $h$ ต่อหน่วย
$I_R$	หมายถึง กระแสไฟฟ้าที่พิกัดหม้อแปลง หน่วยเป็น แอมแปร์
$L_{d1}, L_{d2}, L_{d3}, \dots, L_{dn}$	หมายถึง ชั้นโหลดต่าง ๆ ต่อหน่วย หรือเป็นค่าจริง KVA , กระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

- $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$  หมายถึง ช่วงเวลาที่เกิดโหลด โดยพิจารณาเรียงตามลำดับ
- $n_t$  หมายถึง จำนวนแต่ละช่วงเวลา
- $N_{sum}$  หมายถึง จำนวนผลรวมของช่วงเวลาที่เท่ากัน
- $t_{age}$  หมายถึง อายุการใช้งาน หน่วยเป็น ชั่วโมง
- $tt_{age}$  หมายถึง อายุการใช้งานรวม หน่วยเป็น ชั่วโมง
- A, B หมายถึง ค่าคงที่สำหรับcurve การทำนายอายุที่เหมาะสม
- $\Theta_{hs}$  หมายถึง อุณหภูมิจุดร้อนสุดของขดลวด หน่วยเป็น องศาเซลเซียส
- $\Theta_{hr}$  หมายถึง อุณหภูมิจุดร้อนสุดของขดลวดที่พิกัดโหลด หน่วยเป็น องศาเซลเซียส
- $\Theta'_h$  หมายถึง อุณหภูมิจุดร้อนสุดของขดลวดที่รวมถึงการพิจารณาความสัมพันธ์ ความต้านทาน-อุณหภูมิ ของตัวนำ หน่วยเป็น องศาเซลเซียส
- $\Theta_{w1}$  หมายถึง อุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดที่เวลาก่อนเริ่มทดสอบ( $t_1$ ) หน่วยเป็น องศาเซลเซียส
- $\Theta_{w2}$  หมายถึง อุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดที่เวลาตัดกระแสไฟฟ้า( $t_2$ ) หน่วยเป็น องศาเซลเซียส
- $\Theta_w$  หมายถึง อุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดที่เวลาใด ๆ ( $t$ ) หน่วยเป็น องศาเซลเซียส
- $\Theta_{wr}$  หมายถึง อุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของขดลวดที่มากกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่พิกัดโหลด หน่วยเป็น องศาเซลเซียส
- $\Theta_{imr}$  หมายถึง อุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของน้ำมัน หน่วยเป็นองศาเซลเซียส
- $\Theta_{ir}$  หมายถึง อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนที่ระดับเดียวกับขดลวดด้านบน หน่วยเป็น องศาเซลเซียส
- $\Theta_{br}$  หมายถึง อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านล่าง หน่วยเป็น องศาเซลเซียส
- $\Theta_{gr}$  หมายถึง อุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุดของตัวนำที่มากกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบน ที่พิกัดโหลด หน่วยเป็น องศาเซลเซียส
- $\Theta_{or}$  หมายถึง อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน ที่มากกว่าอุณหภูมิแวดล้อม ที่พิกัดโหลด หน่วยเป็น องศาเซลเซียส
- $\Theta_{oi}$  หมายถึง อุณหภูมิเพิ่มเริ่มต้นน้ำมันด้านบนที่มากกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่ช่วงเวลาเริ่มต้น หน่วยเป็น องศาเซลเซียส
- $\Theta_{ou}$  หมายถึง อุณหภูมิเพิ่มสุดท้ายน้ำมันด้านบนที่ทุก ๆ โหลด หน่วยเป็น องศาเซลเซียส

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

$\Theta_{ot}$	หมายถึง อุณหภูมิเพิ่มเริ่มต้นน้ำมันด้านบนที่มากกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่สถานะชั่วขณะ หน่วยเป็น องศาเซลเซียส
$\Theta_{gi}$	หมายถึง อุณหภูมิเพิ่มเริ่มต้นจุกร้อนสุดของตัวนำ ที่มากกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนในช่วงระหว่างเวลาเริ่มต้น หน่วยเป็น องศาเซลเซียส
$\Theta_{gu}$	หมายถึง อุณหภูมิเพิ่มสุดท้ายของจุกร้อนสุดของตัวนำที่มากกว่าอุณหภูมิของน้ำมันด้านบนที่ทุก ๆ โหลด หน่วยเป็น องศาเซลเซียส
$\Theta_{gt}$	หมายถึง อุณหภูมิเพิ่มจุกร้อนสุดของตัวนำที่มากกว่าอุณหภูมิของน้ำมันด้านบนที่สถานะชั่วขณะ หน่วยเป็น องศาเซลเซียส
$\xi_r$	หมายถึง อุณหภูมิแตกต่างระหว่างน้ำมันกับขดลวดที่พิกัดโหลด หน่วยเป็น องศาเซลเซียส
H	หมายถึง ตัวประกอบจุกร้อนสุด
T	หมายถึง อุณหภูมิสัมบูรณ์ หน่วยเป็น เคลวิน
$\Theta_{dif}$	หมายถึง ผลต่างของอุณหภูมิทั้งสองตำแหน่ง หน่วยเป็น เคลวิน
$\Theta_{CT}$	หมายถึง อุณหภูมิเพิ่ม หน่วยเป็น องศาเซลเซียส
$\Theta_{mat}$	หมายถึง อุณหภูมิของวัสดุส่วนที่ร้อน หน่วยเป็น องศาเซลเซียส
$q_{wdg}$	หมายถึง ความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) ของผิวขดลวด หน่วยเป็น วัตต์ต่อตารางเมตร
$\Theta_a$	หมายถึง อุณหภูมิแวดล้อมแบบฟังก์ชันชานี่สองชั้น หน่วยเป็น องศาเซลเซียส
$\Theta_{ay}$	หมายถึง อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยต่อปี หน่วยเป็น องศาเซลเซียส
$A_{year}$	หมายถึง ขนาดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงประจำปี ของค่าเฉลี่ยอุณหภูมิแวดล้อมประจำวัน หน่วยเป็น องศาเซลเซียส
$B_{day}$	หมายถึง ขนาดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงประจำวัน หน่วยเป็น องศาเซลเซียส
DX	หมายถึง วันที่ร้อนที่สุดประจำปี
TX	หมายถึง ชั่วโมงที่ร้อนที่สุดประจำวัน
day	หมายถึง หมายเลขวัน
hour	หมายถึง ชั่วโมงของวัน
$\tau$	หมายถึง เวลาที่ความร้อนของน้ำมันคงตัว หน่วยเป็น ชั่วโมง

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

$\tau_0$	หมายถึง เวลาที่ความร้อนของน้ำมันคงตัวที่พิกัดโหลดหม้อแปลง โดยพิจารณาที่อุณหภูมิเพิ่มเริ่มต้นของน้ำมันด้านบนที่มีค่าที่ 0 องศาเซลเซียส หน่วยเป็น ชั่วโมง
$\tau_{hs}$	หมายถึง เวลาความร้อนของตัวนำคงตัวที่จุดร้อนสูงสุด หน่วยเป็น ชั่วโมง
x	หมายถึง กำลังเอ็กโปเนนเชียลของน้ำมัน จากมาตรฐาน IEC
n	หมายถึง กำลังเอ็กโปเนนเชียลของน้ำมัน จากมาตรฐาน IEEE
y	หมายถึง กำลังเอ็กโปเนนเชียลของขดลวด จากมาตรฐาน IEC
m	หมายถึง กำลังเอ็กโปเนนเชียลของขดลวด จากมาตรฐาน IEEE
f	หมายถึง ความถี่ไฟฟ้า หน่วยเป็น เฮิรตซ์
$L_{inc}$	หมายถึง ระยะทางระหว่างตำแหน่งทั้งสอง หน่วยเป็น เมตร
$S_{ur}$	หมายถึง พื้นที่ผิวของวัสดุ หน่วยเป็น ตารางเมตร
AT	หมายถึง กระแสต่อรอบ ของขดลวดแรงดันสูงหรือแรงดันต่ำ หน่วยเป็น แอมแปร์-รอบ
$B_{max}$	หมายถึง ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก หน่วยเป็น เวเบอร์ต่อตารางเมตร
$V_{ol}$	หมายถึง ปริมาตรของแกนเหล็ก หน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตร
$\mu_0$	หมายถึง ความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กสัมบูรณ์ มีค่า $4\pi \times 10^{-7}$ หน่วยเป็น เฮนรีต่อเมตร
$l_{mt}$	หมายถึง ความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวดแรงดันสูงและแรงดันต่ำ หน่วยเป็น เมตร
l	หมายถึง ความยาวตามแนวแกนขดลวด หน่วยเป็น เมตร
$E_t$	หมายถึง แรงดันไฟฟ้าต่อรอบ หน่วยเป็น โวลต์ต่อรอบ
a	หมายถึง ความกว้างตามแนวรัศมีของร่องน้ำมัน หน่วยเป็น เมตร
$b_1$	หมายถึง ความกว้างตามแนวรัศมีของขดลวดแรงดันต่ำ หน่วยเป็น เมตร
$b_2$	หมายถึง ความกว้างตามแนวรัศมีของขดลวดแรงดันสูง หน่วยเป็น เมตร
M	หมายถึง ตัวเลขจำนวนเต็มบวกใดๆ
V	หมายถึง พิกัดอายุสัมพัทธ์
L	หมายถึง อายุสูญเสียสัมพัทธ์
$W_{VR}$	หมายถึง กำลังสูญเสียจากการพาร่วมกับการแผ่รังสี หน่วยเป็น วัตต์ต่อตารางเมตร
$W_{conv}$	หมายถึง กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการพา หน่วยเป็น วัตต์ต่อตารางเมตร
$W_{cond}$	หมายถึง กำลังสูญเสียจากการนำ หน่วยเป็น วัตต์ต่อตารางเมตร
$F_a$	หมายถึง แฟคเตอร์ความเสียหายของอากาศ

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

$P_{ress}$	หมายถึง ความดันของบรรยากาศ (ที่ระดับน้ำทะเลมีค่าเท่ากับ 1)
$k$	หมายถึง ค่าคงที่ สำหรับทองแดง = 234.5 และ อลูมิเนียม = 225
$k_t$	หมายถึง ค่าคงที่
$T_{urn}$	หมายถึง จำนวนรอบของขดลวด
$L_{ine}$	หมายถึง ความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวด หน่วยเป็น เมตร
$A_{rea}$	หมายถึง พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ หน่วยเป็น ตารางเมตร
$\sigma$	หมายถึง ค่า Steinmetz exponent
$\eta$	หมายถึง ค่าคงที่ ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของสารแม่เหล็ก เรียกว่า Steinmetz
$\rho$	หมายถึง ความต้านทานจำเพาะของตัวนำ หน่วยเป็น โอห์ม-เมตร
$\alpha_0$	หมายถึง สัมประสิทธิ์ความต้านทานอุณหภูมิของตัวนำที่ 0 องศาเซลเซียส
$\chi$	หมายถึง ค่าคงที่ ได้จากการทดลองมีค่าประมาณ 0.6 ถึง 0.7
$\beta$	หมายถึง ค่าคงที่ที่ยกกำลัง มีค่าประมาณ 1.0 - 1.25 ขึ้นอยู่กับรูปร่างและพื้นผิวของวัตถุ ที่จะระบายความร้อน
$\nabla$	หมายถึง ค่าคงที่
$^{\circ}C$	หมายถึง หน่วยของอุณหภูมิเป็น เซลเซียส

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบันนี้ ความเจริญรุ่งเรืองทางภาคอุตสาหกรรมได้เติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว ปัจจัยสำคัญที่ต้องการควบคู่กันก็คือพลังงานไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมประเภทใดก็ตามมีความจำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด ดังนั้นจึงได้มีการจัดหาแหล่งพลังงานต่าง ๆ มาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าให้เพียงพอกับความต้องการของผู้บริโภค พลังงานไฟฟ้าจำเป็นต้องมีขบวนการส่งถ่ายไปยังผู้บริโภค อุปกรณ์ที่ใช้ในการส่งจ่ายพลังงานส่วนหนึ่งก็คือหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงที่ใช้งานในปัจจุบันนี้มีอยู่หลาย ๆ แบบ เช่นหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน, แบบแห้ง, แบบอัดก๊าซ SF<sub>6</sub> เป็นต้น การเลือกใช้งานขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ อาทิ เช่น สถานที่ติดตั้ง, ราคา, การดูแลซ่อมบำรุง เป็นต้น

เมื่อหม้อแปลงอยู่ในสถานะจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับภาระหรือไว้ภาระก็ตาม เป็นเรื่องปกติที่หม้อแปลงจะเกิดความร้อนขึ้นอันเนื่องมาจากกำลังสูญเสียต่าง ๆ ในหม้อแปลง ยิ่งเมื่อหม้อแปลงมีภาระมากขึ้นเท่าใด ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นก็จะสูงขึ้นตาม ปริมาณความร้อนที่กล่าวนี้ จะทำให้ค่าความเป็นฉนวนผิวลวดทองแดงหรือกระดาษฉนวนเสื่อมสภาพลง การเสื่อมสภาพของฉนวนนี้จะเกิดมากที่ตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูง ๆ ดังนั้น หม้อแปลงที่มีอุณหภูมิสูง ๆ ก็จะทำให้เกิดค่าอายุที่สูญเสียมากขึ้นตาม ซึ่งส่วนกลับของค่าอายุที่สูญเสียที่มากขึ้นนี้ก็คือช่วงอายุการใช้งานของหม้อแปลงที่ลดลง ดังนั้น การศึกษาสภาพความร้อนที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงนั้นจะมีความจำเป็นอย่างมาก เพราะจะทำให้ช่วยยืดอายุการใช้งานของหม้อแปลงให้ยาวนานได้

ปัจจัยที่ทำให้เกิดความร้อนสูงในหม้อแปลงมีด้วยกันหลาย ๆ อย่าง เช่น อุณหภูมิแวดล้อม, ระดับความสูงที่ติดตั้งหม้อแปลงเหนือระดับน้ำทะเล, สถานที่ติดตั้งหม้อแปลงภายในอาคาร-นอกอาคารหรือในอุโมงค์, ประเภทของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เป็นภาระของหม้อแปลง

ลักษณะของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในปัจจุบันนี้ เป็นอุปกรณ์ประเภทที่กินกระแสเชิงเส้นและกินกระแสไม่เป็นเชิงเส้น อุปกรณ์ที่กินกระแสไม่เป็นเชิงเส้นปัจจุบันนี้ได้เกิดขึ้นอย่างมากมาย เช่น อุปกรณ์แปลงกระแสสลับเป็นกระแสตรง, อุปกรณ์แปลงกระแสสลับเป็นกระแสตรงแบบควบคุมได้, คอนเวอร์เตอร์แบบความถี่, เต้าหลอมแบบอาร์ค เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบอาร์ค, คอมพิวเตอร์ อื่น ๆ อุปกรณ์ที่กล่าวมานี้จะเป็นตัวกำเนิดสัญญาณฮาร์โมนิก ผลกระทบที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากฮาร์โมนิกนั้น สามารถเกิดขึ้นได้หลายแง่ อาทิ เช่น ระบบสายส่ง, เครื่องจักรไฟฟ้า,

หม้อแปลงไฟฟ้า, รีเลย์ป้องกัน, สวิตช์เกียร์, มิเตอร์วัดไฟฟ้า, แบงค์คาปาซิเตอร์, ฟิวส์, อุปกรณ์ของ  
ผู้ใช้ไฟฟ้าอื่น ๆ เป็นต้น

ดังนั้นการศึกษาผลกระทบของฮาร์โมนิกต่ออายุการใช้งานของหม้อแปลงจะมีประโยชน์  
กับการป้องกันหม้อแปลงและอุปกรณ์ต่อรวม อันเนื่องมาจากความร้อนเกินได้เป็นอย่างดี

## 1.2 จุดประสงค์ของการทำวิจัย

1. ศึกษาการทดสอบและเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน  
เมื่อมีการทดสอบแต่ละเงื่อนไขต่าง ๆ
2. ศึกษาค่าอายุที่สูญเสียและอายุการใช้งานของหม้อแปลง ในสภาวะโหลดเชิงเส้นและ  
สภาวะที่มีฮาร์โมนิกร่วมด้วย
3. ศึกษาการทดสอบแยกหาค่าลิ่งไฟฟ้าขณะมีภาระของหม้อแปลง ที่ความถี่ฮาร์โมนิก  
ต่าง ๆ จากชุดทดสอบอินเวอร์เตอร์
4. การเปรียบเทียบผลอุณหภูมิหม้อแปลงที่ได้จากการทดสอบกับการคำนวณจากรูปแบบ  
ต่าง ๆ ที่กำหนดขึ้น
5. ศึกษาเรื่องการทำนายค่าอุณหภูมิของหม้อแปลง, ค่าอายุที่สูญเสีย, อายุการใช้งาน, การ  
กำหนดโหลดให้กับหม้อแปลง ด้วยโปรแกรมซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. เป็นการศึกษาอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในเงื่อนไขต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ  
แช่น้ำมัน 3 เฟส, 10 kVA,  $\Delta/Y$  และมีการระบายความร้อนแบบ ONAN
2. เป็นการทดสอบแยกหาค่าลิ่งไฟฟ้าในช่วงความถี่ตั้งแต่ 50 ถึง 950 Hz ขณะหม้อแปลงมี  
ภาระไฟฟ้า
3. บริเวณที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิหม้อแปลงมีจำนวนสูงสุด 17 ตำแหน่ง
4. สร้างซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ เพื่อนำไปใช้ในการทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลง  
ไฟฟ้าแบบแช่น้ำมันได้
5. การศึกษาจะละเอียดเรื่อง ชนิดของน้ำมันหม้อแปลง, ความหนืดของน้ำมันหม้อแปลง  
และระดับความสูงของหม้อแปลงเหนือระดับน้ำทะเล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ค่าความต้านทานกระแสตรงที่กระแสพิกัด ( $R_{d.c\_R}$ ) ที่นำมาพิจารณา จะคิดเฉพาะตอนที่อุณหภูมิของน้ำมันคงตัวที่กระแสพิกัด

#### 1.4 เนื้อหาต่าง ๆ ของวิทยานิพนธ์

ข้อมูลรายละเอียดต่าง ๆ ของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ โดยได้ทำการแยกเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกันออกเป็นบท ๆ และแต่ละบทที่มีเนื้อหาต่อเนื่องกันจะถูกเรียงลำดับไว้ด้วยกัน ซึ่งจุดประสงค์เพื่อง่ายต่อการค้นหาข้อมูลและทำให้การศึกษามีลำดับการเข้าใจง่ายขึ้น ซึ่งรายละเอียดที่แบ่งเป็นบท ๆ มีดังนี้

##### บทที่ 1 บทนำ

เป็นการกล่าวถึงปัญหาต่าง ๆ ในปัจจุบันที่เกิดจากคุณภาพไฟฟ้าที่เลวร้าย อันเนื่องมาจากการใช้ภาระที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งจุดประสงค์ของบทนำนี้เป็นการสร้างแรงจูงใจในการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบจากฮาร์โมนิกที่เกิดจากโหลดประเภทไม่เป็นเชิงเส้น

##### บทที่ 2 โครงสร้างและปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกับอายุการใช้งานของหม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน

เนื้อหาของบทนี้ เป็นการกล่าวถึงโครงสร้างของหม้อแปลงอย่างคร่าว ๆ จุดประสงค์เพื่อกล่าวถึงคุณสมบัติบางประการของวัสดุที่นำมาประกอบสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า อาทิ เช่น ฉนวนหม้อแปลง (น้ำมัน, กระดาษฉนวน) โดยคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ก็คือความร้อน ซึ่งปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงนี้มีมากน้อยเพียงใด จะมีผลกับอายุการใช้งานของหม้อแปลงด้วย ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวถึงอิทธิพลต่าง ๆ ที่ทำให้หม้อแปลงมีความร้อนสูงขึ้น ในส่วนเนื้อหาช่วงท้าย ๆ ของบทนี้ เป็นการกล่าวถึงผลกระทบทางกำลังไฟฟ้าสูญเสียและอุณหภูมิของหม้อแปลงอันเนื่องมาจากฮาร์โมนิก โดยข้อมูลหรือสมการต่าง ๆ ที่กล่าวอ้างส่วนใหญ่มักจะใช้มาตรฐาน IEC และ IEEE อ้างอิง

##### บทที่ 3 ทฤษฎีและการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของหม้อแปลง

เนื้อหาของบทนี้ จะกล่าวถึงรายละเอียดของกำลังไฟฟ้าสูญเสียต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้าต่อจากบทที่ 2 ซึ่งรายละเอียดของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่กล่าวถึงก็มี กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะหม้อแปลงไร้ภาระ, กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะหม้อแปลงมีภาระ, กำลังไฟฟ้าสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนที่ขดลวดในสภาวะไม่มีกระแสฮาร์โมนิกและมีกระแสฮาร์โมนิก และกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ถ่วงน้ำหนัก แต่การศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้จะมุ่งเน้นไปที่กำลังไฟฟ้าสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนที่ขดลวด เพราะว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียค่านี้ จะแปรตามปริมาณกระแสไฟฟ้า ยิ่งในสภาวะที่หม้อแปลงมีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นด้วยแล้ว จะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียค่านี้มีปริมาณมากขึ้นอีก ในช่วงท้าย ๆ บท ได้กล่าวถึงการทดสอบหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียแบบต่าง ๆ ซึ่งการ

ทดสอบประเภทแยกหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะหม้อแปลงมีภาระที่ความถี่ฮาร์โมนิกต่าง ๆ จะถูกนำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ด้วย

บทที่ 4 เครื่องมือสนับสนุนในการทดสอบ

เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษากำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากฮาร์โมนิก ดังเช่นในเนื้อหาช่วงท้าย ๆ ของบทที่ 3 ได้กล่าวถึงทฤษฎีของการแยกหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดที่ความถี่ไฟฟ้าฮาร์โมนิกต่าง ๆ ดังนั้นเนื้อหาของบทนี้จะแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1. เป็นรายละเอียดต่าง ๆ ของการออกแบบสร้างอินเวอร์เตอร์เอาต์พุตสัญญาณแบบ คลื่น 6 ขั้น (six step) ร่วมกับการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (low pass filter) ซึ่งช่วงของความถี่ตั้งแต่ 150 Hz ถึง 950 Hz ส่วนที่ 2. เป็นทฤษฎีคร่าว ๆ ของวงจรเรกติไฟเออร์แบบ 3 เฟส 6 พัลส์

บทที่ 5 การทดสอบหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและอุณหภูมิหม้อแปลง

เนื้อหาของบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ 1. การทดสอบหาค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลดที่ความถี่ฮาร์โมนิกต่าง ๆ ซึ่งจะนำอินเวอร์เตอร์และตัวกรองความถี่ต่ำผ่านที่สร้างขึ้นจากบทที่ 4 มาใช้ทดสอบ โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ค่าต่าง ๆ และความถี่ฮาร์โมนิกในช่วง 150 Hz ถึง 950 Hz ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบก็คือค่าความต้านทานประสิทธิภาพที่ความถี่ต่าง ๆ 2. เป็นการตั้งเงื่อนไขและขั้นตอนของวิธีการทดสอบแต่ละแบบ รวมถึงผลการทดสอบและการเปรียบเทียบอุณหภูมิหม้อแปลงที่เงื่อนไขต่าง ๆ 3. การสร้างโปรแกรมซอฟต์แวร์ของการทำนายอุณหภูมิ, ค่าอายุที่สูญเสีย และอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน 4. วิเคราะห์ผลการทดสอบและการคำนวณ ซึ่งจะเป็นการยืนยันขั้นตอนการทดสอบว่ามีค่าความถูกต้องหรือค่าความคลาดเคลื่อนมากน้อยเพียงใด

บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

เนื้อหาของบทนี้จะเป็นการสรุปผลงานทั้งหมดที่ได้ทำในวิทยานิพนธ์นี้ โดยแยกเป็นข้อสรุปย่อย ๆ ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวถึงผลกระทบของฮาร์โมนิกที่มีต่อหม้อแปลงไฟฟ้า, ตำแหน่งของจุดร้อนสุดที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลง, อิทธิพลของอุณหภูมิแวดล้อมที่มีผลต่ออายุการใช้งานของหม้อแปลง, ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในหม้อแปลง สุดท้ายของบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงจุดบกพร่องต่าง ๆ ของวิทยานิพนธ์, จุดที่ต้องปรับปรุงแก้ไขรวมถึงข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อไป

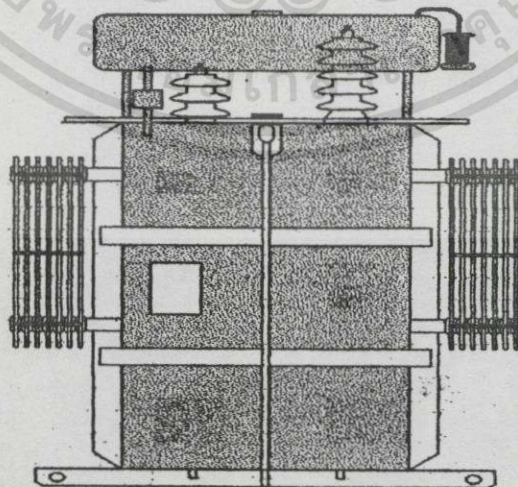
# โครงสร้างและปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกับอายุการใช้งานของหม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน

## 2.1 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่าย

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงแรงดันไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับให้มีขนาดสูงหรือต่ำลง ส่วนสำคัญของหม้อแปลงคือวงจรแม่เหล็ก ประกอบขึ้นจากแผ่นเหล็กซิลิคอนเป็นแกนแม่เหล็ก วงจรไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วยขดลวดพันรอบแกนแม่เหล็กและการฉนวนซึ่งประกอบด้วยฉนวนแข็งร่วมกับฉนวนเหลว หรือฉนวนแข็งร่วมกับก๊าซ ทั้งฉนวนเหลวและฉนวนก๊าซนี้ นอกจากจะทำหน้าที่เป็นฉนวนแล้วยังทำหน้าที่เป็นตัวระบายความร้อนอีกด้วย

หม้อแปลงที่ใช้ในระบบจำหน่ายมักจะมีขนาดตั้งแต่ 5 kVA จนถึง 2000 kVA ขนาดตัวเล็กจะเป็นแบบเฟสเดียว ขนาดตัวใหญ่จะเป็นแบบ 3 เฟส (ใหญ่กว่า 50 kVA) ใช้ในการลดแรงดันไฟฟ้าลงจากระบบแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่ายมาเป็นขนาดขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ตามบ้าน หรืออาจแปลงแรงดันจากระบบสายส่งมาเป็นแรงดันในระบบจำหน่ายก็ได้ ด้านแรงดันสูงอาจมีขนาดแรงดัน 12 , 22(24) , 33 และ 69 kV

หม้อแปลงคังรูปที่ 2.1 มีโครงสร้างง่ายกว่าอุปกรณ์อื่นชนิดเดียวกัน เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ข้อแตกต่างที่เห็นได้ชัดเจนคือสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงโดยไม่ต้องอาศัยส่วนที่เคลื่อนที่ (Rotating part) หรือ (Bearings)



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของหม้อแปลง



ช่วยระบายความร้อนออกไปสู่อากาศโดยรอบ ๆ ถ้าหม้อแปลงขนาดเล็กลงตัวถึงส่วนใหญ่จะใช้แบบเรียบ แต่ถ้าเป็นหม้อแปลงขนาดใหญ่พื้นที่ผิวในการระบายความร้อนของตัวถังแบบแบนเรียบจะไม่เพียงพอ เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นอาจทำให้อุณหภูมิของตัวถังหม้อแปลงสูงเกินขีดจำกัด ดังนั้นเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการระบายความร้อนอาจทำตัวถังเป็นแบบลอนลูกคลื่น หรือใช้วิธีติดครีบบระบายความร้อนรอบตัวถัง

## 2. น้ำมัน(Oil)

จาก[15,18-19,35] น้ำมันที่ใช้ในหม้อแปลงนั้น จะมีหน้าที่พาความร้อนออกจากขดลวด (Winding) และแกนเหล็ก(Iron core)

## 3. เครื่องวัดระดับน้ำมัน (Oil Gauge)

มีจุดประสงค์เพื่อเช็คระดับน้ำมัน ซึ่งแบ่งได้ 2 ชนิด คือ ชนิดที่ใช้หลอดแก้ว(Rod type Oil Gauge) และชนิดที่มีหน้าปัดเข็มชี้ (Dial-type Oil Gauge)

## 4. ห้องรองรับน้ำมันและระบบรักษาน้ำมัน (Conservator)

ทำหน้าที่รักษาน้ำมัน(Preservation System) มีหน้าที่รองรับการขยายตัวของน้ำมัน ซึ่งสัมพันธ์กับการขยายตัวสูงมากในขณะที่น้ำมันร้อน น้ำมันจะขยายตัวผ่านเข้าไปในท่อและลิ้นบังคับ (Valve) และผ่านไปยังห้องรองรับน้ำมัน

## 5. ห้องหายใจรองความชื้น และเครื่องทำให้แห้ง

ความชื้น (Moisture) มีความสำคัญต่อความแข็งแรง(Strength) ของน้ำมันที่มีต่อแรงดันมาก ห้องหายใจรองความชื้นและเครื่องทำให้แห้ง มีหน้าที่ปรับความดันภายในและภายนอกให้เท่ากัน และป้องกันความชื้นของอากาศและฝุ่นเข้าไปในหม้อแปลงได้

## 6. ลิ้นระบายความดัน

ความผิดปกติที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลง เช่น เกิดประกายไฟ(Arcing) อันเป็นผลทำให้เกิดแรงดันของก๊าซอย่างสูงขึ้น แรงดันของก๊าซที่สูงมากนี้จะผ่านท่อระบายความดัน ไปกระแทกแผ่นระบายความดัน(Bursting Plate)ที่ส่วนบนเพื่อออกสู่ภายนอก

7. อุปกรณ์ที่ใช้ในการป้องกัน เช่น ดิฟเฟอเรนเชียลรีเลย์ (Differential relay) , บุคโฮลท์ รีเลย์ (Buchholtz relay) และรีเลย์ความร้อน(Thermal relay) เป็นต้น

8. เทอร์โมมิเตอร์ ซึ่งจะบอกอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง และอุณหภูมิของขดลวด (Winding Temperature)

## 9. อุปกรณ์การกระจายความร้อน พัดลม, ปั๊มน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. ปลอกรองแกน (Bushing) เป็นฉนวนที่ติดอยู่ระหว่างตัวถังหม้อแปลงกับภายนอก บริเวณที่สายตัวนำ(Lead)ต่อออกมา

## 2.1.2 โครงสร้างระหว่างภายในและภายนอก

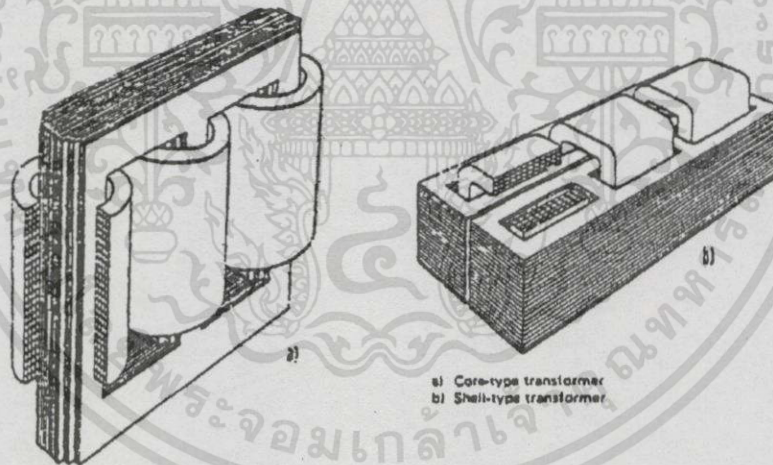
1. สายตัวนำและปลายขั้ว

2. สวิตช์และตัวเปลี่ยนแทป(Tap changer) ทำหน้าที่เปลี่ยนอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดหม้อแปลง เพื่อให้แรงดันไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าคงที่หรือเปลี่ยนแปลงให้อยู่ในมาตรฐาน

## 2.1.3 โครงสร้างส่วนที่เป็นวงจรแม่เหล็ก

1. แกนเหล็ก

แกนเหล็กของหม้อแปลงสร้างจากแผ่นซิลิคอนบาง ๆ นำมาเรียงกัน มีโครงสร้างหลายชนิด แต่ทุกชนิดก็จะออกแบบให้ฟลักซ์แม่เหล็กผ่านแผ่นเหล็กในแนวที่ทำให้คุณสมบัติของแม่เหล็กดีที่สุด ชนิดของแกนเหล็กที่นิยมใช้กันมีอยู่ 2 ชนิด คือ แบบคอร์ กับแบบเชลล์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงชนิดของแกนเหล็ก

แกนแบบคอร์นั้นขดลวดจะหุ้มแกนเหล็ก และมีขดลวดมากกว่า 1 ขดขึ้นไป ส่วนแกนเหล็กแบบเชลล์นั้นแกนเหล็กจะหุ้มขดลวด และแกนเหล็กจะมีตั้งแต่สองวงขึ้นไป ลักษณะสมบัติของแกนเหล็กแบบคอร์คือ จะมีความยาวของวงจรแม่เหล็กยาว และความยาวรอบโดยเฉลี่ยของขดลวดจะสั้น โครงสร้างแกนเหล็กแบบคอร์จะใช้แกนเหล็กที่มีพื้นที่หน้าตัดขวางเล็กน้อย และสามารถมีจำนวนรอบได้มากกว่าแบบเชลล์ ส่วนแกนเหล็กแบบเชลล์จะกลับกัน

หม้อแปลงที่แกนเหล็กเป็นแบบคอร์จะมีรูปร่างของพื้นที่หน้าตัดขวางอาจจะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือสี่เหลี่ยมจัตุรัสสำหรับหม้อแปลงขนาดเล็ก ส่วนหม้อแปลงขนาดใหญ่ขึ้นแรงดันสูงขึ้นจะมีพื้นที่ภาพตัดขวางเป็นแบบรูปเหลี่ยมอัดในวงกลมหรือที่เรียกว่าแบบ ครุซiform (cruciform) สำหรับแกนเหล็กที่มีพื้นที่ภาพตัดขวางใหญ่ขึ้นจะมีการแบ่งชั้นถึงชั้น เพื่อลดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางสำหรับพื้นที่ค่าหนึ่งให้มีขนาดเล็กลง ทำให้ประหยัดเหล็กและลดทองแดงและลดพลังงานสูญเสียในทองแดงด้วย นอกจากนี้การทำให้แกนเหล็กกลมมากขึ้นจะมีผลดีในแง่ของขดลวดมีเสถียรภาพทางด้านแรงกลดีขึ้น

## 2. โยคและขา(Yoke and Limb)

โยคและขาแกน มีหน้าตัดเป็นชั้นๆ ทั้งคู่ แต่จำนวนชั้นของโยคอาจจะน้อยกว่า ทั้ง ๆ ที่พื้นที่หน้าตัดอาจใหญ่กว่า 5-10 % เส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่าน โยคและขาแม้ว่าจะเป็นค่าเดียวกันแต่ความหนาแน่นในส่วนกลางจะไม่เท่ากัน มีผลให้เกิดความสูญเสียของกระแสไหลวน(Eddy current)มากขึ้นระหว่างชั้นของแกนในส่วนของ โยค เนื่องจากการปรับตัวความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งเกิดขึ้นตรงมุมของชั้นแกน การลดกำลังสูญเสียดังกล่าวจะกระทำได้ด้วยการเสริมโยคเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มพื้นที่หน้าตัดให้แก่โยค

## 3. เครื่องยึด

แกนจะยึดได้ด้วยหมุด (Pin) สอดผ่านทะลุรูของชั้นต่าง ๆ ฉนวนที่หุ้มนั้นต้องสูงเพื่อมิให้เกิดการลัดวงจรระหว่างชั้นขึ้น

### 2.1.4 โครงสร้างที่เป็นวงจรไฟฟ้า

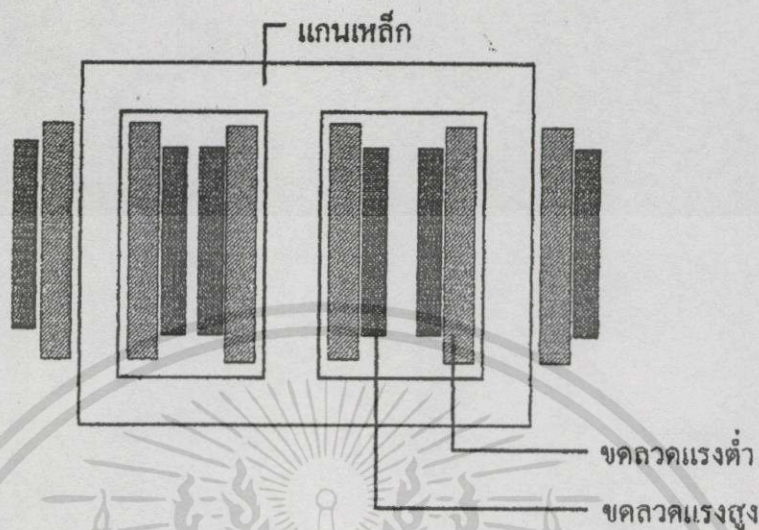
#### 1. ขดลวด

ขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยขดลวดแรงดันต่ำและขดลวดแรงดันสูง จะต้องออกแบบให้มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีที่สุดเท่าที่จะทำได้ และในขณะเดียวกันจะต้องมีความแข็งแรงทางกลพอที่จะทนต่อแรงที่เกิดขึ้นขณะลัดวงจร มีการระบายความร้อนที่ดี เพื่อที่จะไม่เกิดปัญหาอุณหภูมิสูงเกินไป หรือมีจุดใดจุดหนึ่งร้อนผิดปกติหรือเกินขีดจำกัดตามมาตรฐาน

วิธีการพันขดลวดนั้นส่วนใหญ่จะเป็นแบบที่เรียกว่า คอนเซนตริก(Concentric type) โดยทั่วไปจะพันขดลวดแรงดันต่ำหนึ่งชั้น และพันอยู่ข้างในติดกับแกนเหล็ก ถ้าจะพันมากกว่าหนึ่งชั้นมักจะใช้ในแง่ของต้องการระบายความร้อน ส่วนขดลวดแรงสูงก็จะพันรอบนอกของขดลวดแรงดันต่ำอีกทีหนึ่ง ขนาดพื้นที่หน้าตัดขวางของขดลวดกำหนดด้วยความหนาแน่นของกระแส ถ้ากระแสสูงมากพื้นที่หน้าตัดขวางก็จะโตมากขึ้น ในกรณีนี้มักจะใช้ลวดตัวนำหลายเส้นขนานกัน เพื่อป้องกันการสูญเสียเนื่องมาจากกระแสไหลวน ดังนั้นในเวลาการพันขดลวดเพื่อที่จะให้ตัวนำที่จะอยู่ข้างนอกและข้างในมีค่ารีแอกแตนซ์เท่ากัน โดยให้กระแสไหลเฉลี่ยเท่า ๆ กัน จึงต้องมีการ

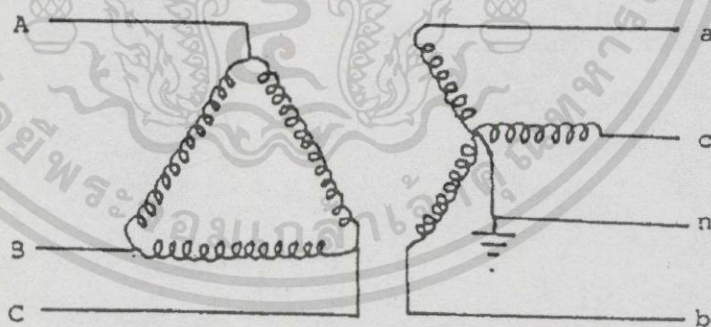
พันสลับที่ขดลวดในขณะที่พันด้วย  
แปลง 3 เฟส ดังรูปที่ 2.4

ซึ่งสามารถแสดงส่วนของแกนเหล็กและขดลวดของหม้อ



รูปที่ 2.4 แสดงแกนเหล็กและขดลวดของหม้อแปลง 3 เฟส

การต่อขดลวดของหม้อแปลง 3 เฟสอาจต่อได้หลายแบบ สำหรับหม้อแปลงที่มีแรงดันสูงระดับขั้นต้นจะเป็นแบบ  $\Delta/Y$  โดยด้านแรงดันไฟฟ้าสูงต่อเป็นแบบ  $\Delta$  และด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำต่อแบบ Y ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงการต่อขดลวดหม้อแปลง 3 เฟส แบบ  $\Delta/Y$

## 2.2 ฉนวน

ฉนวนที่จะกล่าวต่อไปนี้ สามารถแบ่งแยกได้ดังต่อไปนี้

1. เป็นฉนวนของสายตัวนำ
2. น้ำมันหม้อแปลง
3. กระดาษฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1 ฉนวนของสายตัวนำ

ฉนวนของสายตัวนำเองนั้น จะขึ้นอยู่กับเส้นผ่าศูนย์กลางหรือพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมของสายลวดตัวนำขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.2 ถึง 1.3 มม. มีสารเคลือบเหมาะที่จะใช้กับแกนขนาดเล็ก ถ้าต้องการให้ฉนวนดีขึ้นและทนความร้อนได้มากกว่าให้เคลือบด้วยไวนิเฟล็กซ์(Viniflex) หรือพันทับด้วยไหมแคปรอน(caprone), เทเรไลน์(tereline) หรือคอตตอน(cotton) ลวดตัวนำที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 ถึง 1.4 มม. จะพันด้วยกระดาษเคเบิล (cable paper)หลาย ๆ ชั้น ส่วนลวดตัวนำหน้าตัดสี่เหลี่ยมก็เช่นเดียวกัน ถ้าต้องการทนความร้อนมากขึ้นให้พันทับด้วยไฟเบอร์กลาส(fiber glass)

### 2.2.2 น้ำมัน

ในหม้อแปลงไฟฟ้า(Power Transformer , Distribution Transformer) น้ำมันและกระดาษเป็นฉนวนหลักที่ยังคงความนิยม ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ด้วยเหตุผลที่ประนีประนอมระหว่างราคากับคุณสมบัติในการใช้งาน ในปัจจุบันคุณภาพของฉนวนทั้งน้ำมันและกระดาษที่ใช้ มีการปรับปรุงขึ้นมาก ทำให้หม้อแปลงสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงขึ้น และด้วยอายุใช้งานที่ยืนยาวขึ้น การบำรุงรักษาตามวาระ (Routine Maintenance) เช่น การคอยตรวจสอบสภาพของน้ำมัน และการปรับปรุงสภาพเมื่อถึงเวลาอันสมควร นับว่ามีส่วนสำคัญในการยืดอายุการใช้งานให้นาน ตรงเท่าที่การออกแบบได้กำหนดไว้ เช่นเดียวกับการบำรุงรักษาป้องกัน (Preventive Maintenance) ได้เข้ามามีบทบาทมากขึ้น ในการลดอัตราความล้มเหลว (Failure rate) ของหม้อแปลง

ในหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ฉนวนชนิดน้ำมัน-กระดาษ นั้น อายุของกระดาษจะขึ้นกับเสถียรภาพของน้ำมัน (ปัจจัยการเสื่อมสภาพของกระดาษคือความร้อนและความชื้น น้ำมันทำหน้าที่ระบายความร้อนให้กระดาษ และหน่วงการแพร่ของความชื้นจากภายนอกที่เข้าสู่กระดาษให้ช้าลง) เมื่อน้ำมันเสื่อมลง โยเซลลูโลสซึ่งเป็นองค์ประกอบของกระดาษจะถูกเร่งให้เกิดการแตกแยกเร็วขึ้น ความแข็งแรงทางกลของกระดาษจะลดลงจนกระดาษยุ่ยเปื่อยในที่สุด และนั่นหมายถึงวาระสุดท้ายของหม้อแปลง

น้ำมันหม้อแปลงเมื่อเสื่อมสภาพลง จะสามารถเปลี่ยนหรือปรับปรุงสภาพให้ดีขึ้นได้ แต่กระดาษเซลลูโลสที่เสื่อมแล้ว จะปรับคุณภาพให้กลับคืนใหม่ไม่ได้ ดังนั้น ความรู้ความเข้าใจเพื่อพิจารณาเลือกใช้น้ำมัน ตลอดจนการบำรุงรักษา และวิเคราะห์จึงเป็นหนทางที่จะช่วยอายุการใช้งานของหม้อแปลงยืนยาวได้นาน

น้ำมันหม้อแปลงผลิตจากน้ำมันธรรมชาติ(Crude Oil) ซึ่งมีด้วยกัน 3 ชนิด คือ naphthenic crudes , paraffinic crudes และ mixed base crudes แต่ละชนิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบด้วยโครงสร้างที่เป็น Paraffins , naphthenes และ aromatics ด้วยอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

### 2.2.2.1 คุณสมบัติต่าง ๆ ของน้ำมันหม้อแปลง

#### 1) ทางกายภาพ

เป็นคุณสมบัติที่บ่งบอกถึงลักษณะต่าง ๆ ของน้ำมัน เช่นความหนืด,ความหนาแน่น,ชนิดของน้ำมัน จุดวาบไฟ ดังเช่นตารางที่ 2.1

#### 2) ทางเคมี

เป็นคุณสมบัติที่บ่งบอกถึงสภาพความเป็นpHของน้ำมัน, การตกตะกอนของสิ่งเจือปน, การกัดกร่อนจากสารประเภทซันเฟอร์

#### 3) คุณสมบัติทางไฟฟ้า

จะเป็นตัวที่บ่งบอกถึงค่าความต้านทานจำเพาะ, การเบรคดาวน, เปรอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์

### 2.2.2.2 สาเหตุการเสื่อมสภาพของน้ำมัน

#### 1) การเสื่อมสภาพทางออกซิเดชัน

การเสื่อมสภาพของน้ำมันเริ่มตั้งแต่ น้ำมันถูกใส่เข้าไปในอุปกรณ์ โดยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อยู่ตัว(unsafe)ในน้ำมัน จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนภายในอุปกรณ์ (ซึ่งอาจเป็นออกซิเจนที่ละลายมากับน้ำมัน หรือตกค้างหลังการผลิตจากโรงงาน หรืออาจมาจากอากาศโดยตรง ในกรณีหม้อแปลงระบบเปิดที่หายใจผ่าน ซิลิกาเจล) ภายใต้อุณหภูมิ, ทองแดง, เหล็ก และตัวเร่งปฏิกิริยา (ความร้อนสนามไฟฟ้า) เกิดผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเป็นออกไซด์ในรูปของ เพอโรไซด์, แอลกอฮอล์ และกรดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง กรดที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับทองแดง, เหล็ก, วานิช หรือสีในหม้อแปลงเกิดสารที่ค่อนข้างนำไฟฟ้าและละลายในน้ำมันได้ปานกลาง เรียกว่า ตะกอน เมื่อตะกอนมีการสะสมตัวมากขึ้นๆ ความสามารถในการละลายจะลดลง เกิดการตกตะกอนและก่อสารที่ขึ้นเหนียวเกาะผิวกระดาษ ฉนวนตัวถัง, ร่องน้ำมัน หรือ ครอบระบายความร้อน ทำให้การระบายความร้อนของอุปกรณ์แยลง สารเสื่อมสภาพที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือที่เรียกว่าสารการเสื่อมสภาพนี้ จะทำให้สีของน้ำมันเหลืองมากขึ้น จนกลายเป็นน้ำตาลอ่อนและน้ำตาลเข้มเมื่อปริมาณตะกอนมากขึ้น น้ำมันที่เค็มใสจะขุ่นขึ้น ความสามารถในการส่งผ่านความร้อนของน้ำมันจะลดลง นอกจากนี้โพลีคาร์บอนเปอเล็คทีฟที่เกิดจะลดความเป็นฉนวนไฟฟ้าของน้ำมัน ส่วนสารเจือปนหรือพวกสารเปรอะเปื้อน ได้แก่ น้ำ, ฝุ่น, เศษผงดำนำ จะทำให้น้ำมันขุ่นมัว และการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

#### 2) การเสื่อมสภาพทางไฮโดรไลติก

เนื่องจากน้ำเป็นสารที่มีขั้ว มีค่า ไดอิเล็กตริก คอนสแตนซ์ สูง(ราว 80) ในขณะที่ของน้ำมันมีค่า 2.2 น้ำในรูปของน้ำอิสระ ที่อยู่ในบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง จะสร้างปัญหาของการเกิดคีสซารจ์ในน้ำมัน ทำให้ความแข็งแรงทางฉนวนลดลง นอกจากนี้ น้ำละลาย ทำให้เกิดการสูญเสียทางฉนวน (dielectric loss) เพิ่มแฟลคเตอร์การสูญเสียและการนำไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3) การเสื่อมสภาพทางไฟฟ้า

ความเครียดของสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันสูงขึ้น น้ำมันเสื่อมสภาพเร็วขึ้น

สารประเภทที่เป็นตัวขี้ยัง ที่เติมในน้ำมันเพื่อปรับปรุงสภาพด้านการต่อต้านออกซิเดชัน ส่วนใหญ่จะลดคุณสมบัติด้านค่าความแข็งแรงอิมพัลส์ของน้ำมัน

### 4) การเสื่อมสภาพทางความร้อน

ความร้อนจะเร่งให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันเกิดเร็วขึ้น น้ำมันจึงเสื่อมสภาพเร็วขึ้น นอกจากนี้ ความร้อนเป็นศัตรูที่สำคัญในการทำให้กระดาษเสื่อมสภาพ หากสภาพการระบายความร้อนของน้ำมันแย่ง อายุการใช้งานของกระดาษจะสั้นลง

จาก[21] ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของน้ำมันที่ได้จากการทดสอบสามารถแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติต่าง ๆ ของน้ำมันหม้อแปลง

คุณสมบัติ	น้ำมันหม้อแปลง
ความถ่วงจำเพาะ $g/cm^3$	0.9
จุดไฟติด $^{\circ}C$	130-180
สภาพนำความร้อน $mW/cm^{\circ}C$	1.6
ความต้านทานจำเพาะ $ohm-cm$ ที่ $85^{\circ}C$	$100 \times 10^{12}$
แฟคเตอร์พลังงานสูญเสียที่ $80^{\circ}C$ , 50 Hz	$10 \times 10^{-4}$
ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตาม IEC Standard ที่ $20^{\circ}C$ kV/mm	10-25
เปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ $\epsilon_r$ (50Hz)	2-2.5
ความชื้นที่ยอมให้มีได้สูงสุด (ppm)	50
ความหนืด การขยายตัว (20 - $100^{\circ}C$ )	$7 \times 10^{-4}/^{\circ}C$
ผลแตกตัวขององค์ประกอบ เมื่อเกิดอาร์คไฟฟ้า	ไฮโดรเจน อะเซททีลีน

#### 2.2.3 กระดาษ

ปกติกระดาษที่ใช้เพื่อวัตถุประสงค์การฉนวน รู้จักกันในลักษณะกระดาษบาง ๆ หรือกระดาษเหนียว ความหนาแน่นและความหนาขึ้นอยู่กับการใช้งาน ความหนาแน่นต่ำ ( $0.8 g/cm^3$ ) เหมาะกับการใช้เป็นตัวฉนวนของคานาปาดิเตอร์ความถี่สูงและเป็นฉนวนของเคเบิล ความ

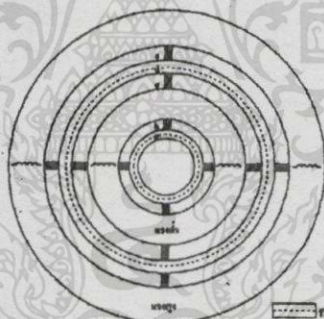
หนาแน่นปานกลาง ( $1 \text{ g / cm}^2$ ) ใช้เป็นไดอิเล็กทริกของคาปาซิเตอร์กำลัง กระดาษที่มีความหนาแน่นสูงใช้ในคาปาซิเตอร์กระแสตรงเพื่อเก็บพลังงาน หรือเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง

เนื่องจากกระดาษที่มีคุณสมบัติดูดซึมความชื้นได้ ฉะนั้นการใช้กระดาษเป็นฉนวนจำเป็นต้องทำให้แห้งแล้วชุบฉนวนเหลว เช่นน้ำมันฉนวน ค่าเปอร์มิตติวิตีของกระดาษชุบฉนวนเหลวขึ้นอยู่กับค่าเปอร์มิตติวิตีของเซลลูโลสของกระดาษและของฉนวนเหลวที่ชุบ และค่าความหนาแน่นของกระดาษ ส่วนกระดาษฉนวนที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้า[21] มีค่าเปอร์มิตติวิตีดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าเปอร์มิตติวิตีของกระดาษชุบน้ำมันที่  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$

ฉนวนเหลวที่ใช้ชุบ	เปอร์มิตติวิตีกระดาษชุบฉนวนเหลว $\epsilon_r$ ตามความหนาแน่นของกระดาษ		
	$0.8 \text{ g / cm}^2$	$1.0 \text{ g / cm}^2$	$1.2 \text{ g / cm}^2$
Transformer Oil	3.26	3.72	4.3

ส่วนฉนวนเพื่อระบายความร้อนเช่น จำพวกกระดาษอัด(pressboard) หรือฉนวนที่ใช้กั้นระหว่างขดลวดแรงดันสูงและแรงดันต่ำที่ใช้จำพวก โพลีเอสเตอร์ฟิล์มพร้อมทั้งมีท่อระบายความร้อน(cooling duct) ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะการติดตั้งกระดาษฉนวนระหว่างขดลวดแรงดันสูงและแรงดันต่ำของหม้อแปลง

คุณสมบัติต่าง ๆ ของกระดาษฉนวน

### 1. ทางกายภาพ

เป็นคุณสมบัติที่บ่งบอกถึงลักษณะต่าง ๆ ของกระดาษ เช่น ความชื้น , ความหนาแน่น, ความสามารถในการดูดซับของเหลว เป็นต้น

### 2. ทางเคมี

เป็นคุณสมบัติที่บ่งบอกถึงสภาพการนำไฟฟ้าในของเหลวที่ pH ต่าง ๆ เป็นต้น

### 3. คุณสมบัติทางไฟฟ้า

จะบ่งบอกถึงความคงทนต่อแรงดันในเงื่อนไขต่าง ๆ, ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 คุณลักษณะทางความร้อนของหม้อแปลง

กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แกนเหล็กและขดลวดของหม้อแปลง เป็นสาเหตุทำให้เกิดความร้อนขึ้นและความร้อนนี้ต้องถูกระบายออกจากหม้อแปลง อุณหภูมิในหม้อแปลงเป็นสิ่งสำคัญที่มีผลต่อเควีเอทีกำหนด (Rated kVA) และอายุการใช้งานของหม้อแปลง

### 2.3.1 มาตรฐานของอุณหภูมิ (Temperature Standards)

ตามมาตรฐานของอุณหภูมิ[19] ได้กำหนดขีดจำกัดอุณหภูมิเพิ่มสำหรับหม้อแปลงน้ำมันระบายความร้อนได้โดยวิธีธรรมชาติ(Oil-Immersed Self-Cooled Transformer) และมีอุณหภูมิแวดล้อม(Ambient Temperature)สูงสุดเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงขีดจำกัดอุณหภูมิเพิ่มสำหรับหม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน

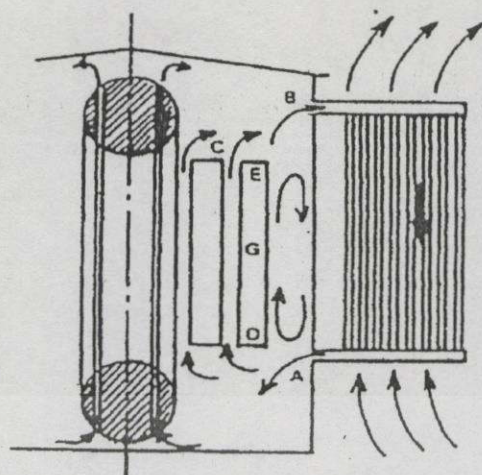
รายการชิ้นส่วนของหม้อแปลง	อุณหภูมิเพิ่ม(องศาเซลเซียส)
ขดลวดที่มีฉนวนคลาส A (วัดจากความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง)	65
น้ำมันส่วนบน(Top oil) (วัด โดยเทอร์โมมิเตอร์)	60 (หม้อแปลงปิดผนึก หรือมีคอนเซอเวเตอร์) 55 (หม้อแปลงไม่ปิดผนึก หรือไม่มีคอนเซอเวเตอร์)
แกนเหล็กและชิ้นส่วนอื่นๆ	อุณหภูมิต้อง ไม่สูงถึงค่าที่ทำให้แกนเหล็กหรือส่วนที่ติดกันเสียหายได้

### 2.3.2 การถ่ายเทความร้อน (Mode of Heat Transfer)

จาก[15] ความร้อนที่เกิดในหม้อแปลงแบบน้ำมันมีระบบถ่ายเทความร้อน 2 ขั้นตอน คือ

1. ระบบความร้อนของแกนเหล็กและขดลวดถ่ายเทสู่น้ำมัน
2. ระบบความร้อนของน้ำมันถ่ายเทสู่อากาศ

เมื่อพิจารณาถึงวิธีการถ่ายเทความร้อน จากขดลวดของหม้อแปลงไปสู่บรรยากาศแวดล้อม ดังในรูปที่ 2.7 การถ่ายเทความร้อนแต่ละวิธีจะถูกปฏิบัติแยกจากกัน โดยการนำความร้อนมีความสำคัญน้อยที่สุด และการพามีความสำคัญมากที่สุด ดังนั้นการออกแบบการระบายความร้อนของหม้อแปลง จึงพิจารณาการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนเท่านั้น



รูปที่ 2.7 แสดงการถ่ายเทความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า

โดยความร้อนจะถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง หรือทั้ง 3 วิธี ดังต่อไปนี้

- วิธีการนำความร้อน (Conduction)
- วิธีการพาความร้อน (Convection)
- วิธีแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

### 2.3.2.1 การนำความร้อน

การส่งผ่านความร้อน โดยการนำระหว่างตำแหน่งสองตำแหน่งนั้น จะเป็นส่วนกลับกับค่าความต้านทานทางความร้อนของวัสดุและระยะทางระหว่างสองตำแหน่ง และจะเป็นสัดส่วนแปรตามกับผลต่างของอุณหภูมิสองตำแหน่งนั้น ๆ และพื้นที่ผิวของวัสดุ ดังสมการที่ 2.1

$$W_{\text{cond}} = \frac{S_{\text{ur}} \Theta_{\text{dif}}}{L_{\text{inc}} R h} \quad (2.1)$$

### 2.3.2.2 การพาความร้อน

เมื่อนำวัตถุที่ร้อนจุ่มลงในของไหล ความร้อนของวัตถุจะถูกพาออกจากพื้นผิวของวัตถุไปสู่ตัวกลางที่เย็นกว่าวัตถุนั้น การเพิ่มอุณหภูมิในของไหลจะทำให้ความหนาแน่นของตัวกลางลดลง ดังนั้น จะทำให้เกิดขบวนการไหลเวียนของของไหล โดยของไหลที่เบากว่าจะจากไปและจะมีของไหลที่หนักกว่ามาแทนที่ ขบวนการไหลเวียนของของไหลจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ความร้อนที่ถูกถ่ายเทโดยการพาความร้อน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.2

$$W_{\text{conv}} = \nabla \cdot \Theta_{\text{CT}}^{\beta} \quad (2.2)$$

สำหรับถังผิวเรียบอยู่ในอากาศที่มีความสูงประมาณ 60 ซม. ขึ้นไป และมีอุณหภูมิเพิ่มถึง 75 องศาเซลเซียส ที่ระดับน้ำทะเลจะมีค่าคงที่ต่าง ๆ ดังนี้

$$\nabla = 2.17$$

$$\beta = 1.25$$

ได้มีการค้นคว้าพบว่า การสูญเสียที่ทำให้เกิดอุณหภูมิเพิ่ม มีการเปลี่ยนแปลงตามรากที่สองของความหนาแน่นของอากาศ สำหรับพื้นผิวของถังหม้อแปลงที่มีการติดครีบบระบายความร้อน ซึ่งต้องมีความต้านทานของการไหลของอากาศ จึงจำเป็นต้องมีค่าแฟคเตอร์แก้ไขคือ แฟคเตอร์ความเสียดทานของอากาศ (Air Friction Factor) ซึ่งมีค่าการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับลักษณะของครีบบระบายความร้อน ดังนั้นแฟคเตอร์นี้จะต้องหาค่าโดยการทดลอง จากสมการที่ 2.2 สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$W_{conv} = 2.17 F_a \sqrt{P_{ress}} \cdot \Theta_{CT}^{1.25} \quad (2.3)$$

### 2.3.2.3 การแผ่รังสีความร้อน

การถ่ายเทความร้อนโดยวิธีการแผ่รังสีความร้อน เกิดขึ้นเพราะทุกส่วนของวัสดุที่มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเหนืออุณหภูมิแวดล้อม โดยจะแผ่พลังงานความร้อนมาในรูปของคลื่น (Waves) พลังงานความร้อนสูงสุดที่ถูกแผ่ออกมาที่อุณหภูมิหนึ่ง จะเกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่นหนึ่ง แต่หากอุณหภูมิเพิ่มขึ้น จุดของพลังงานความร้อนสูงสุดจะเลื่อนไปในช่วงความยาวคลื่นที่สั้นกว่า โดยทั่วไปพื้นที่ของพลังงานความร้อนสูงสุดมักอยู่ในช่วงอินฟราเรด (Infrared Spectrum)

พื้นที่สำหรับการแผ่รังสีความร้อนที่มีประสิทธิภาพคือ พื้นผิวภายนอกที่ห่อหุ้มตัววัตถุ พื้นผิวที่แผ่รังสีความร้อนได้จริงคือ ผลคูณของความสูงและความยาวของถังผิวเรียบ (Plain Tank) ที่ห่อหุ้มหม้อแปลง อย่างไรก็ตามสีของพื้นผิวซึ่งมีแฟคเตอร์ของการแผ่รังสี (Emissivity Factor) ถ้าพื้นผิวมีสีดำสนิทจะมีแฟคเตอร์ของการแผ่รังสีเท่ากับ 1 แต่ถ้าแฟคเตอร์ของการแผ่รังสีน้อยกว่า 1 ประสิทธิภาพของการแผ่รังสีจะมีค่าลดลงเท่ากับ พื้นผิวที่ห่อหุ้มด้วยแฟคเตอร์ของการแผ่รังสี การแผ่รังสีของสีที่ใช้ทางปฏิบัติส่วนมากจะมีค่าใกล้เคียงกับ 1 โดยทั่วไปประมาณ 0.90-0.95 เช่น สีเขียว (Green Paint) หรือสีเทา (Gray Paint) เป็นต้น

การถ่ายเทความร้อนโดยวิธีการแผ่รังสีความร้อน สามารถเขียนเป็นสมการ โดยกฎของสเตฟาน โบลซ์มานน์ (Stefan Boltzmann Law) ได้ดังสมการที่ 2.4

$$W_{rad} = 5.7 \times 10^{-8} E (\Theta_{mat}^4 - \Theta_a^4) \quad (2.4)$$

ในตารางที่ 2.3 ได้แสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ถูกถ่ายเทของถังผิวเรียบที่ระดับน้ำทะเล และสีของถังมีแฟคเตอร์การแผ่รังสีเท่ากับ 0.95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 แสดงการถ่ายเทความร้อน(วัตต์/ม<sup>2</sup>) จากถังผิวเรียบที่อุณหภูมิแวดล้อม 30 °C

อุณหภูมิเพิ่ม °C	การแผ่รังสีความร้อน (E=0.95)	การพาความร้อน (ที่ระดับน้ำทะเล)	รวม (การแผ่รังสีความร้อน+การพาความร้อน)
10	63.40	38.59	101.99
20	133.16	91.78	224.94
30	209.72	152.36	362.08
40	293.49	218.29	511.78
50	384.91	288.52	673.43
60	484.44	362.37	846.81
70	592.53	439.37	1030.90

### 2.3.2.4 การถ่ายเทความร้อนร่วมของการแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อน

ผลรวมของการถ่ายเทความร้อน จากถังหม้อแปลงพื้นผิวแนวตั้งเรียบ สามารถรวมสมการที่ 2.3 และสมการที่ 2.4 ได้ดังนี้

$$W_{\text{tr}} = 5.7 \times 10^{-8} E (T_2^4 - T_1^4) + 2.17 F_a \theta_C^{1.25} \sqrt{P_{\text{press}}} \quad (2.5)$$

### 2.3.3 การระบายความร้อน

การสูญเสีย(Losses)พลังงานไฟฟ้าต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าที่แกนแม่เหล็ก เช่น การสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) และในขดลวด เช่นการสูญเสียในทองแดง (Copper loss) และในส่วนต่าง ๆ ของหม้อแปลงในขณะที่จ่ายภาระอยู่นั้น พลังงานสูญเสียทั้งหมดจะเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานความร้อน ทำให้อุณหภูมิของวัสดุมีโอกาสดลัดจุดสูงสุดที่วัสดุนั้นจะทนได้ และทำให้อายุขัยของหม้อแปลงในที่สุด ทำให้หม้อแปลงใช้งานไม่ได้ (Failure) ฉะนั้นการระบายความร้อน (Cooling) ให้เร็วที่สุดเท่าที่จะเร็วได้ จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง

#### 2.3.3.1 การระบายความร้อนภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

โดยธรรมชาติแล้วความร้อนจะระบายออก (Dissipate) ตามผิวของวัตถุ(Material) ด้วยวิธีการแผ่รังสี(Radiation) และวิธีการพา(Convection) ในหม้อแปลงนั้นการระบายความร้อนจะใช้วิธีใดขึ้นอยู่กับขนาดที่รูปร่างและอัตรากำลังของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้

หม้อแปลงก่อนที่จะถูกนำไปใช้งานนั้นจะมีอุณหภูมิภายในหม้อแปลงเท่ากับอุณหภูมิรอบ ๆ ภายนอก(Ambient Temperature) หลังจากทีหม้อแปลงได้รับภาระอุณหภูมิภายในหม้อแปลง

เฉพาะส่วนที่มีกระแสไหล(Active Component) จะเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว และถ่ายความร้อนให้แก่ วัสดุหรืออากาศรอบ ๆ ทำให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในเวลาต่อมาช้าลง จนในที่สุดไม่เพิ่มขึ้นอีกเลย เมื่อถึงอุณหภูมิค่าหนึ่ง แสดงว่า ความร้อนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากมีกระแสไหลผ่าน จะเท่ากับความร้อน ที่ระบายออกผลก็คือ อุณหภูมิคงที่

ปริมาณความร้อนที่ ๆ มีผลให้อุณหภูมิสูงขึ้นเช่นนี้ ศัพท์ทางช่างเรียกว่าความร้อนเกิน (Overheat) จากหลักการทางฟิสิกส์ อุณหภูมิของหม้อแปลงแยกออกได้ว่าเป็นผลบวกของอุณหภูมิ ที่เพิ่มขึ้นและอุณหภูมิรอบ ๆ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนี้ขึ้นอยู่กับพลังงานสูญเสียภายในหม้อแปลง หรือ ภาระที่ผ่านหม้อแปลง สภาพอากาศรอบ ๆ ไม่มีผลต่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นและอุณหภูมิหรือปริมาณ ความร้อนที่เพิ่มขึ้นเท่านั้นที่มีผลต่อฉนวนที่ใช้

### 2.3.3.2 ชนิดของหม้อแปลงและวิธีการระบายความร้อน

ชนิดของหม้อแปลงที่นิยมใช้ในขณะนี้[2, 18, 19] สามารถแบ่งออกเป็น

#### 1) หม้อแปลงชนิดผึ่งอากาศ (Dry type Transformer)

วิธีการระบายความร้อนของหม้อแปลงชนิดผึ่งอากาศนั้นแบ่งออกได้เป็น

##### 1. ระบายความร้อนโดยธรรมชาติ (Self-Air Cooling) มี สัญลักษณ์ เป็น AA

หม้อแปลงชนิดนี้ส่วนใหญ่จะติดตั้งในร่ม(Indoor) ขนาดจึงเล็กมีลักษณะเช่นเดียวกับหม้อแปลงทั่ว ๆ ไป วงขดลวดและแกนเหล็กจะติดตั้งอยู่ในตู้ความร้อน จากวงขดลวดจะถ่ายเทให้แก่อากาศรอบ ๆ และส่วนต่าง ๆ ของหม้อแปลงอย่างช้า ๆ ทำให้ไม่สามารถขยายอัตราค่าลงให้ใหญ่ขึ้นได้ แม้ว่า หม้อแปลงชนิดนี้จะใช้กันมานานแล้วก็ตาม ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาฉนวนชนิด H ซึ่งทน อุณหภูมิได้สูงมากขึ้นกว่าเดิมแล้ว หม้อแปลงชนิดนี้จึงสามารถเพิ่มอัตราได้ถึง 3.5 MVA ด้วย ระบบแรงดันไฟฟ้าปฐมภูมิ 22 kV

ข้อดีของหม้อแปลงชนิดนี้ก็คือปลอดภัยจากการระเบิด ไม่มีก๊าซพิษและอันตรายที่เกิด จากสารไวไฟ จึงเหมาะที่จะใช้ในระบบจำหน่าย

##### 2. ระบายความร้อน โดยมีทั้งวิธีธรรมชาติและพัดลมเป่าลมเข้าช่วย (Self Cooled/Forced Air Cooled หรือ Air Blast cooled) มีสัญลักษณ์ AA / FA

หม้อแปลงชนิดนี้เล็ก กินเนื้อที่น้อย น้ำหนักเบา มีช่องว่างอากาศระหว่างขดลวดกับขด ลวดและระหว่างขดลวดและแกนเหล็ก ทุกส่วนของหม้อแปลงลมจะต้องเป่าถึง ไล่ความร้อนออก จากส่วนนั้น ๆ ฉะนั้นด้วยการไล่ความร้อนเช่นนี้ จะสามารถเพิ่มอัตราค่าลงให้แก่หม้อแปลงได้อีก 33.33 % โดยที่ขนาด (Size) ไม่เปลี่ยนแปลง

## 2) หม้อแปลงชนิดแช่น้ำมัน (Oil - Immersed Transformer)

ส่วนวิธีการระบายความร้อนของหม้อแปลงชนิดแช่น้ำมัน มีหลายวิธีดังนี้

### 1. ระบายความร้อนโดยอาศัยอากาศการพาความร้อนออกไป (Oil-Immersed Self Cooled With Air)

มีสัญลักษณ์เป็น OA

หม้อแปลงชนิดนี้ทั้งวงขดลวดและแกนเหล็กจะบรรจุอยู่ในถังโลหะที่มีน้ำมันหม้อแปลงอยู่เต็มถัง น้ำมันจะทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนจากแกนเหล็กและวงขดลวดไปยังตัวถัง ส่วนตัวถังจะถ่ายเทความร้อนออกสู่อากาศภายนอกอีกต่อหนึ่ง โดยวิธีแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

ลักษณะถังหม้อแปลงชนิดนี้มีหลายชนิด ซึ่งแตกต่างกัน เพื่อสนองตามความประสงค์ของผู้ใช้ดังนี้

#### ก. พวงผนังถังราบเรียบ(Plain Tank Wall)

หม้อแปลงชนิดนี้ เป็นหม้อแปลงขนาดเล็ก เหมาะกับระบบจำหน่าย น้ำมันเมื่อได้รับความร้อนจากแกนและขดลวด จะขยายตัวลอยขึ้นสู่เบื้องบน ขณะเดียวกันก็จะถ่ายเทความร้อนให้แก่ผนังถัง(Tank Wall) น้ำมันที่ระบายความร้อนเรียบร้อยแล้วจะเย็นตัวและจมลงสู่ด้านล่างอีก การออกแบบการระบายความร้อนของหม้อแปลงชนิดนี้จึงต้องคำนึงถึงการจัดการวางแกนและขดลวดในถัง ถ้าแกนและขดลวดทั้งสองวางอยู่กันถึง ตัวถังทั้งหมดจะร้อน ความร้อนทั้งหมดจะถ่ายเทได้ดีกว่าที่จะนำส่วนประกอบทั้งสองไปติดตั้งที่ส่วนบนของถัง

หม้อแปลงชนิดนี้ เมื่อต้องการเพิ่มอัตรากำลังให้มากขึ้น ขนาดปริมาตรของวัตถุภายในหม้อแปลงก็จำเป็นต้องเพิ่มให้ใหญ่ขึ้น ทำให้ความร้อนภายในหม้อแปลงสูงขึ้นตาม ถ้าพื้นที่ผิวถังไม่กว้างขึ้นการถ่ายเทความร้อนจะไม่สะดวก ดังนั้นจึงต้องเพิ่มความสูงของถังให้มากกว่าปกติ

#### ข. พวงผนังถังที่มีครีบริบหรือแผ่นยื่นออก (Tank Wall With Fins or Plates)

หม้อแปลงชนิดนี้ เพิ่มพื้นที่ผิวระบายความร้อนระบายความร้อนด้วยการเชื่อมครีบริบ (Fins) หรือแผ่น (Plates) ติดกับผนังถัง (Tank Wall)

#### ค. พวงผนังถังที่มีครีบริบกลวงหรือท่อติดอยู่ (Tank Wall with Hollow Fins or Tubes)

หม้อแปลงชนิดนี้ เป็นหม้อแปลงขนาดกลาง (Medium Size) ปริมาตรของวัตถุภายในหม้อแปลงจึงต้องใหญ่ขึ้น อัตราการเพิ่มปริมาตรของวัตถุภายในหม้อแปลงจะมากกว่าอัตราการเพิ่มพื้นที่ผิวถังภายนอก การระบายความร้อน จึงต้องแก้ด้วยการเพิ่มครีบริบกลวง (Hollow Fins) หรือท่อ (Tubes) โดยเชื่อมติดทั้งส่วนบนและส่วนล่างของตัวถัง เพื่อให้ น้ำมันไหลผ่านท่อหรือครีบริบกลวงได้คล่องขึ้น และลดความร้อนในที่สุด

#### ช. พวงผนังถังที่ติดตั้งตัวแผ่รังสีความร้อนภายนอกถัง (Tank Wall with External Radiators)

หม้อแปลงชนิดนี้ เป็นหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่ ตัวแผ่รังสีความร้อนประกอบด้วยท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบายความร้อนกลวง(Hollow Cooler Tubes) ซึ่งต่อมาบรรจบกับท่อขวาง(Header) ทั้งข้างบนและข้างล่างของตัวถัง ท่อขวางนี้จะเชื่อมต่อโดยใช้ครีป (Flange) ติดกับผนังถัง หม้อแปลงบางตัวอาจมีการติดตั้งลิ้นปิดเปิด(Shutoff Valve)ตรงบริเวณท่อขวาง เพื่อสะดวกในการซ่อมตัวแผ่รังสีความร้อน โดยไม่ต้องถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกหมด

2. ระบายความร้อนโดยวิธีเพิ่มกำลังการหมุนเวียนอากาศ(Oil Immersed Self Cooled with Air-Blast for Additional Cooling) มีสัญลักษณ์ว่า FA

หม้อแปลงชนิดนี้มีพัดลมพัดที่ตัวแผ่รังสีความร้อน ทำให้สามารถระบายความร้อนได้เร็วขึ้น เพิ่มอัตรากำลังรับภาระของหม้อแปลงได้ ซึ่งหม้อแปลงจะสามารถรับอัตรากำลังภาระมากกว่าวิธีที่ 1 ถึง 33%

พัดลมของหม้อแปลงชนิดนี้ จะทำงานเฉพาะเวลารับภาระสูงสุด (Peak Load) การควบคุมอาจกระทำได้ทั้งวิธีกดสวิตช์ธรรมดา(Manual) หรืออัตโนมัติ โดยมีตัวควบคุมทำหน้าที่เช็คความร้อนของน้ำมัน และส่งสัญญาณไปเปิดพัดลมเป่าอุณหภูมิถึงจุด ๆ หนึ่ง ทำนองเดียวกัน ถ้าอุณหภูมิถึงจุด ๆ หนึ่ง ก็จะมีสัญญาณสั่งปิดพัดลมทันทีเช่นกัน

3. ระบายความร้อน โดยวิธีเพิ่มให้น้ำหมุนเวียน (Oil-Immersed Self-Cooled with Water) มีสัญลักษณ์ว่า OW

4. ระบายความร้อน โดยวิธีเพิ่มแรงหมุนเวียนให้แก่น้ำและน้ำมัน(Oil Immersed Forced Oil Cooled with Force water Cooled) มีสัญลักษณ์ว่า FOW

หม้อแปลงชนิดนี้มีการติดตั้งเครื่องเร่งการหมุนเวียนของน้ำมันและติดตั้งเครื่องเร่งการหมุนเวียนของน้ำเพื่อระบายความร้อนอีกทีหนึ่ง

### 3) ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มอัตรากำลังภาระที่หม้อแปลงได้รับกับการระบายความร้อน

วิธีการระบายความร้อนดังกล่าวอาจมีหลายขั้นตอน เพื่อผลประโยชน์ในการเพิ่มอัตรากำลังรับภาระของหม้อแปลง เช่น ในหม้อแปลงชนิดผึ่งอากาศระบายความร้อนโดยวิธีธรรมชาติ (AA) เป็นขั้นแรกของการระบายความร้อน โดยให้อากาศรอบ ๆ หมุนเวียนตามธรรมชาติเมื่อติดตั้งพัดลมเพิ่มขึ้นหนึ่งชุดเป็นขั้นที่สองกลายเป็น FA อากาศจะผ่านส่วนที่ร้อนเร็วขึ้นและเพิ่มภาระให้แก่หม้อแปลงได้รับมากขึ้น ในหม้อแปลงชนิดแช่น้ำมันก็เช่นกัน OA เป็นขั้นแรกของการระบายความร้อนโดยอาศัยการหมุนเวียนของน้ำมันตามธรรมชาติ เมื่อติดตั้งพัดลมภายนอกของหม้อแปลงเพิ่มขึ้นเป็น FA ก็สามารถเร่งการระบายความร้อนออกสู่ภายนอกได้เร็วขึ้นอันเป็นลำดับที่สอง และถ้าเนื้อที่พอสำหรับติดตั้งพัดลมเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งชุด ก็จะเป็นขั้นที่สาม มีสัญลักษณ์ว่า

FA / FA เป็นต้น นอกจากนี้ ถ้าใช้วิธีทำให้น้ำมันหมุนเวียนเร็วขึ้น โดยการเพิ่มปั๊ม เช่น FOA ก็จะสามารถเพิ่มภาระให้แก่หม้อแปลงเช่นกัน ขึ้นตอนต่าง ๆ จึงอาจเป็นได้ทั้ง OA / FA / FA เป็นต้น แต่ละขั้นตอนของการระบายความร้อนดังกล่าว จะสามารถเพิ่มอัตรากำลังรับภาระให้มากขึ้นกว่าเดิมได้ถึง 33.33 %

#### 4) ชื่อย่อที่ใช้เรียกกันในวิธีการระบายความร้อนหม้อแปลงตามมาตรฐาน

ตัวชื่อย่อการเรียกวิธีการระบายความร้อนทั้งมาตรฐานอเมริกา และแคนาดา พอสรุปได้ดังนี้

ก. ตัวกลางระบายความร้อน

- O คือ น้ำมัน
- A คือ อากาศ
- L คือ ของเหลวที่สังเคราะห์แล้ว
- G คือ แก้ว
- F คือ พัดลม

ข. วิธีการที่เป็นสาเหตุให้ตัวกลางหมุนเวียน

- N คือ ธรรมชาติ
- F คือ แรงเร่ง

ค. วิธีการถ่ายเทความร้อน

- S คือ ถ่ายเทเอง
- P คือ ลมพัด
- W คือ ระบายด้วยน้ำ

#### 2.3.4 ซีดจำกัดความร้อนเกินและผลที่มีต่อความเป็นฉนวน

ขีดจำกัดอุณหภูมิของหม้อแปลงกับวัสดุที่ใช้ ฉนวนที่พันขดลวดส่วนใหญ่มีสารอินทรีย์ (Organic Materials) และเส้นใย (Fibrous) ผสมอยู่ เช่น กระดาษหนาสีน้ำตาล (Kraft Paper) กระดาษนิลา (Manila Paper) แผ่นกระดานอัด (Press Board) เป็นต้น สารดังกล่าวเมื่อถูกความร้อนสูง ๆ จะให้คาร์บอน (Carbon) ออกมาและเปราะ ฉนวนจึงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อกำเนิดคาร์บอน (Carbonize Action) ทำลายความแข็งแรงของฉนวน (Insulation Strength) และความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical Strength) ความสัมพันธ์ระหว่างอายุของฉนวน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลา โดยได้มีการกล่าวไว้ในมาตรฐาน NEMA (National Electrical Manufacturers Association) TR98-1.04

สารสังเคราะห์ที่ได้ผลิตขึ้นมาใหม่นี้ จึงต้องการชนิดที่ทำปฏิกิริยากับอากาศ(Oxidation) และการแตกตัว (Decomposition) น้อยลงที่อุณหภูมิกว่า 100 °C เช่น วานิช(Vanish) ปิ้งจี้อื่น ๆ นอกเหนือจากความร้อนที่ทำให้ลายฉนวนได้แก่ การพับ, การฉีกฉีก, การแตก เป็นต้น

ด้วยเหตุนี้มาตรฐานอุตสาหกรรมหม้อแปลงของ NEMA และ ANSI(American National Standard Institute) จึงได้แบ่งชั้นของฉนวน(Insulation Class) ออกเป็น 4 ชั้น ตามสภาพเงื่อนไขที่สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงสุดที่เพิ่มขึ้น (Temperature rise) ได้ดังนี้

#### 2.3.4.1 ฉนวนชั้นหนึ่ง (Class A)

ฉนวนชั้นนี้ บังคับให้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในสภาวะทรงตัว (Steady State) ต้องไม่เกิน 55 °C ฉ.อุณหภูมิรอบ ๆ 40 °C และอนุโลมให้อุณหภูมิที่จุดสูงสุด(Hottest spot) ไม่เกิน 105 °C

#### 2.3.4.2 ฉนวนชั้นสอง (Class B)

ฉนวนชั้นนี้ บังคับให้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในสภาวะทรงตัว (Steady State) ต้องไม่เกิน 80 °C ฉ.อุณหภูมิรอบ ๆ 40 °C และอนุโลมให้อุณหภูมิที่จุดสูงสุด(Hottest spot) ไม่เกิน 150 °C

#### 2.3.4.3 ฉนวนชั้นสาม (Class F)

ฉนวนชั้นนี้ บังคับให้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในสภาวะทรงตัว (Steady State) ต้องไม่เกิน 115 °C ฉ.อุณหภูมิรอบ ๆ 40 °C และอนุโลมให้อุณหภูมิที่จุดสูงสุด(Hottest spot) ไม่เกิน 185 °C

#### 2.3.4.4 ฉนวนชั้นสี่ (Class H)

ฉนวนชั้นนี้ บังคับให้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในสภาวะทรงตัว (Steady State) ต้องไม่เกิน 150 °C ฉ.อุณหภูมิรอบ ๆ 40 °C และอนุโลมให้อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (Hottest spot) ไม่เกิน 220 °C

ฉ. อุณหภูมิรอบ ๆ 40 °C และอนุโลมให้อุณหภูมิที่จุดสูงสุด(Hottest spot) ไม่เกิน 220 °C วัสดุพวกนี้ส่วนใหญ่เป็นพวกผ้า(Cotton), ไหม(Silk), กระดาษ(Paper) และสารอินทรีย์ (Organic Material) แห่อยู่ในของเหลวกำบังไฟฟ้า(Liquid Dielectric ) ผ้าเซลลูโลส(Cellulose Active) บาง ๆ สารเรซิ่น(Phenolec resins) วานิชอินทรีย์สาร(Organic Vanish) ที่เคลือบตัวนำ วัสดุพวกไมก้า(Mica) ไยแก้ว(Glass Fiber) หรือแอสเบสตอส(Asbestos) ฯลฯ วัสดุพวกนี้ส่วนใหญ่จะมีสารอินทรีย์และอนินทรีย์เคลือบอยู่เพื่อให้สามารถทนต่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามมาตรฐาน

หม้อแปลงชนิดฝังอากาศ ฉนวนที่ใช้เป็นฉนวนชั้นสอง(Class B) ความร้อนไม่สามารถทำลายความแข็งแรงเชิงกล(Machanical Strength)ได้ ส่วนหม้อแปลงชนิดแช่น้ำมันฉนวนที่ใช้เป็นฉนวนชั้นหนึ่ง(Class A) ชีดจำกัดความร้อนที่อนุโลมให้ สำหรับแต่ละส่วนของหม้อแปลงชนิดนี้ได้กำหนดค่าดังนี้

- ขดลวด	อุณหภูมิเพิ่ม	65 °C
- ผิวแกน	อุณหภูมิเพิ่ม	75 °C
- น้ำมันหม้อแปลงชนิดที่มีการถ่ายเทไม่ได้	อุณหภูมิเพิ่ม	60 °C
- น้ำมันหม้อแปลงชนิดที่มีการถ่ายเทได้	อุณหภูมิเพิ่ม	55 °C

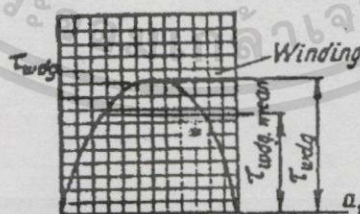
อุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดภายในช่วงอายุการใช้งานของหม้อแปลงจะต่ำกว่า 105 °C มาก ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิรอบ ๆ จะผันแปร และภาระก็ไม่อยู่ในสภาวะคงตัว ค่าอุณหภูมิส่วนใหญ่จึงมีค่าประมาณ 75 °C ผลเช่นนี้จะทำให้อายุการใช้งานของฉนวนในหม้อแปลงยาวนานขึ้นประมาณที่ 15-20 ปี

### 2.3.5 ขั้นตอนการถ่ายเทความร้อนในหม้อแปลงชนิดน้ำมัน

ความร้อนในหม้อแปลงนั้น ขดลวดและแกนเป็นตัวสร้างและถ่ายเทให้แก่สภาวะรอบ ๆ ได้ โดยอาศัยระดับอุณหภูมิที่ต่างกัน การถ่ายเทความร้อนดังกล่าวมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี แต่ละวิธีไม่ขึ้นแก่กัน กล่าวคือ การนำความร้อน, การแผ่รังสีและและการพาความร้อน ซึ่งวิธีสุดท้ายเป็นวิธีสำคัญในการระบายความร้อนในหม้อแปลงดังกล่าวได้ต่อไป

ตัวอย่างของการถ่ายเทความร้อนในหม้อแปลงชนิดใช้น้ำมันนั้น

ขั้นที่ 1. ความร้อนจะระบายออกจากส่วนภายในของขดลวด หรือส่วนภายในของแกนไปยังผิวของฉนวนที่แช่อยู่ในน้ำมันด้วยวิธีการนำความร้อน ถ้าทองแดงเป็นชนิดเนื้อเดียวกันและทุกจุดระบายความร้อนสม่ำเสมอ ความร้อนจะกระจายตามแนวรัศมี (Radial Direction) ระดับอุณหภูมิที่กระจายในทิศทางรัศมีจะเป็นไปตามกฎของพาราโบลา (Parabola Law) ดังรูปที่ 2.8 อย่างไรก็ตามรูปที่ 2.8 เป็นเพียงค่าคาดคะเนอุณหภูมิที่แท้จริงของขดลวดแต่ละชั้น จึงต้องใช้กฎการสุ่ม (Empirical Formular) และแก้ไขให้ถูกต้อง (Correction) อีก



รูปที่ 2.8 แสดงการกระจายอุณหภูมิในขดลวดแต่ละรอบ

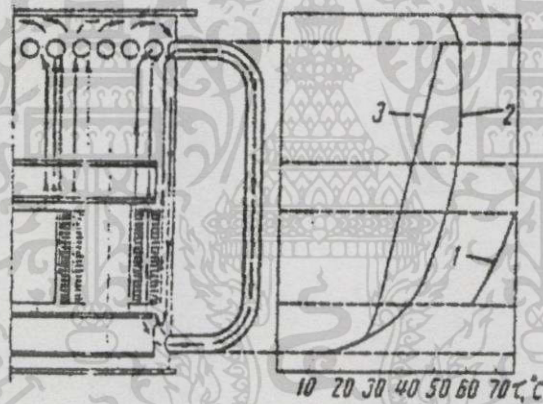
ขั้นที่ 2. ความร้อนถ่ายเทจากผิวของขดลวดยังน้ำมันที่อยู่รอบ ๆ ขดลวด ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างตัวกลางทั้งสอง ขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนของขดลวดที่สามารถแผ่ออกมา ตำแหน่งส่วนสูงของขดลวด ขนาดท่อน้ำมันที่ใช้เพื่อระบายความร้อน และความหนาแน่นของน้ำมัน

ฉะนั้นความร้อนเกิน (Over heating) หรืออุณหภูมิที่เพิ่มของขดลวดสูงกว่าน้ำมัน  
คำนวณได้ดังสมการที่ 2.6

$$g_r = k_t q_{wdg}^x \quad (2.6)$$

ขั้นที่3. เมื่อน้ำมันภายในหม้อแปลงได้รับความร้อน น้ำมันจะหมุนเวียนไปด้วยผลต่างระหว่าง  
ความหนาแน่นของน้ำมันที่เย็นและน้ำมันที่ร้อนการถ่ายเทความร้อนในลักษณะเช่นนี้เป็นวิธีการพา  
ความร้อน ความเร็วและลักษณะการไหลของน้ำมันรอบ ๆ ผิวขดลวดนี้ ขึ้นอยู่กับชนิดขดลวด  
ลักษณะการพัน, ขนาดท่อ และระบบการถ่ายเทน้ำมัน

การพาความร้อนในลักษณะเช่นนี้ น้ำมันที่ร้อนรอบ ๆ ผิวของขดลวดจะลอยตัวขึ้นสู่  
เบื้องบนพร้อมกับการพาความร้อนเคลื่อนที่ไปด้วย ขณะเดียวกันน้ำมันที่เย็นลงจะตกลงมา ถ้าข้าง  
ถึงหม้อแปลงมีท่อระบายความร้อน ส่วนที่ร้อนของน้ำมันจะไหลขึ้นสู่ส่วนบนของท่อที่ติดอยู่กับถัง  
และไหลตามท่อลงสู่ส่วนล่างของท่อหม้อแปลงไปยังขดลวดแทนที่ส่วนที่ซึ่งลอยตัวขึ้นไป ดังรูป  
ที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงทิศทางการพาความร้อนของน้ำมันในหม้อแปลง และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเหนือ  
รอบ ๆ

ขั้นที่4. ความร้อนที่ติดมากับน้ำมันจะถ่ายเทให้แก่ผนังถังของหม้อแปลง ด้วยผลต่างของอุณหภูมิ  
ระหว่างน้ำมันและผนังถังเช่นเดียวกับการถ่ายเทความร้อนในขั้นที่สอง ซึ่งขึ้นกับความร้อนจำเพาะ  
(Specific Heat) ของผนังถังหม้อแปลง และเครื่องมือระบายความร้อน (Cooling Device)

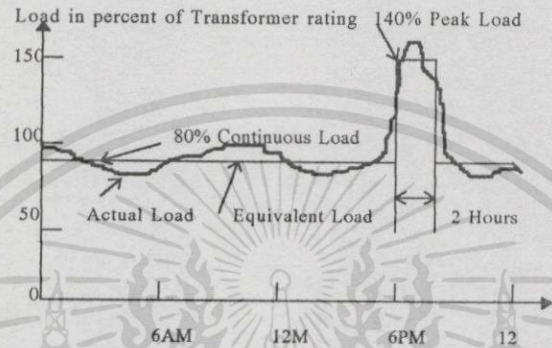
ขั้นที่5. พลังความร้อนจะส่งผ่านทะลุความหนาของผนังของถังหม้อแปลงออกสู่ภายนอก ผลต่าง  
ของอุณหภูมิตั้งแต่ในและผิวชั้นนอกจะมีค่าน้อยกว่า  $1^{\circ}\text{C}$  อุณหภูมิของผนังถังภายนอกและ  
ภายในจึงเกือบเท่ากัน

ขั้นที่6. เป็นขั้นสุดท้าย ความร้อนจะถ่ายเทจากผนังถังภายนอกของหม้อแปลง หรือเครื่องมือระบาย  
ความร้อนออกสู่อากาศรอบ ๆ ถึงหม้อแปลงด้วยวิธีการพาความร้อนของอากาศและการแผ่รังสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 วัฏจักรโหลด

จาก[1] เมื่อหม้อแปลงมีการทำงานบนวัฏจักรโหลด ซึ่งจะเป็นการซ้ำ ๆ กัน ทุก 24 ชั่วโมง คั่งวัฏจักรโหลดสมมูล ซึ่งประกอบด้วยภาระที่แกว่งไปมาของโหลดโดยตลอดทั้งวัน สิ่งเหล่านี้มักจะเกิด 1 คาบในแต่ละวัน การเปลี่ยนแปลงของวัฏจักรโหลดจะไม่เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด แต่จะค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงทีละเล็กละน้อย ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะของวัฏจักร โหลดจริงและวัฏจักร โหลดสมมูล

### 2.4.1 วัฏจักรโหลดสมมูลหรือโหลดประสิทธิผล

หม้อแปลงที่จ่าย โหลดที่แกว่งขึ้น ๆ ลง ๆ จะทำให้เกิดค่าสูญเสียขึ้น ๆ ลง ๆ ผลกระทบที่เกิดขึ้นจะเหมือนกันกับ โหลดที่เกิดระดับปานกลางโดยพิจารณาที่คาบเวลาที่เท่ากัน สิ่งนี้เป็นคุณลักษณะการสะสมความร้อนของวัสดุในหม้อแปลงสภาวะที่โหลดที่คงที่ จะเกิดค่าสูญเสียที่มีขนาดค่าสูญเสียที่เฉลี่ยเท่ากับค่าสูญเสียที่เกิดจากการแกว่งขึ้น ๆ ลง ๆ ซึ่งจะเรียกว่าเป็นวัฏจักรโหลดสมมูลหรือโหลดประสิทธิผล ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.7

$$\text{โหลดสมมูลหรือโหลดประสิทธิผล} = \sqrt{\frac{L_{d1}^2 \cdot t_1 + L_{d2}^2 \cdot t_2 + L_{d3}^2 \cdot t_3 + \dots + L_{dn}^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + t_3 \dots t_n}} \quad (2.7)$$

### 2.4.2 โหลดสูงสุดสมมูล

การประมาณโหลดต่อเนื่องที่มีค่าสูงสุด จะพิจารณาจากอิทธิพลของโหลดที่มีค่ามากกว่าค่าโหลดประสิทธิผล โหลดสูงสุดสมมูลจะมีค่าไม่น้อยกว่า 90 % ของความต้องการสูงสุดในช่วงเวลาดังกล่าว

### 2.4.3 โหลดต่อเนื่องสมมูล

จากสมการที่ 2.7 ซึ่งเป็นโหลดประสิทธิผล ผลลัพธ์ที่ได้จะมีค่าเท่า ๆ กันกับการพิจารณาคาบเวลาจำนวน 12 ชั่วโมง ที่เกิดขึ้นก่อนหน้าที่จะเกิดค่าโหลดสูง ระยะห่างระหว่าง (t) ที่ 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยแสดงดังสมการที่ 2.8

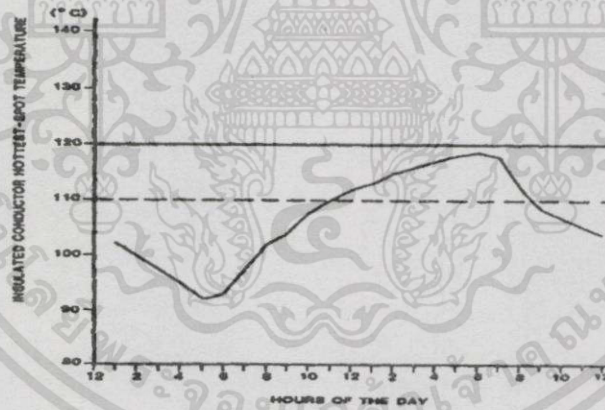
$$\text{Equivalent continuous load} = 0.29\sqrt{L_{d1}^2 + L_{d2}^2 + \dots - L_{d12}^2} \quad (2.8)$$

#### 2.4.4 การแบ่งประเภทวัฏจักรโหลดปกติและโหลดเกินปกติของหม้อแปลง

ในช่วงวัฏจักรที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลด (โดยปกติจะพิจารณาที่ 1 วัน) โดยปกติบางช่วงเวลาอาจเป็นโหลดปกติที่ไม่เกินพิกัดหม้อแปลง หรือบางช่วงเวลาอาจจะเป็นโหลดฉุกเฉิน ช่วงเวลายาวนานก็อาจเป็นไปได้ จาก[3] ได้มีการแบ่งประเภทวัฏจักรโหลดและผลกระทบที่เกิดขึ้นบนหม้อแปลง อันเนื่องจากการต่อโหลดตามวัฏจักรต่าง ๆ

##### 2.4.4.1 วัฏจักรโหลดปกติ

เงื่อนไขกระแสโหลดที่เกิดขึ้นอาจจะสูงกว่าพิกัดหม้อแปลงที่อุณหภูมิแวดล้อมต่ำกว่าปกติ หรืออุณหภูมิแวดล้อมรอบ ๆ หม้อแปลงอาจสูงขึ้นกว่าเดิมที่กระแสต่ำกว่าพิกัด ซึ่งการโหลดนี้มีค่าเท่า ๆ กับ กระแสที่พิกัดที่อุณหภูมิแวดล้อมปกติ จะถือว่าเป็นวัฏจักร โหลดปกติ ซึ่งอายุการใช้งานจะถือว่าอยู่ที่ช่วงอายุปกติ ในIEEE ได้สมมติไว้ที่ 20 ปี แต่ถ้าวัฏจักรโหลดที่เกิดขึ้นมากกว่าเงื่อนไข ก็จะทำให้อายุการใช้งานหม้อแปลงสั้นลง หรือค่าอายุสูญเสียมากขึ้น ซึ่งสามารถแสดงได้วัฏจักร โหลดปกติดังรูปที่ 2.11



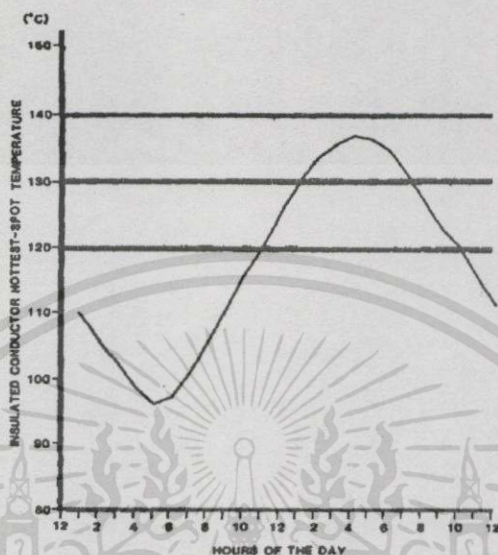
รูปที่ 2.11 แสดงตัวอย่างการต่อโหลดแบบวัฏจักร โหลดปกติ

##### 2.4.4.2 วัฏจักรโหลดฉุกเฉินช่วงเวลายาวนาน

เงื่อนไขโหลดในระบบจะต้องไม่ถูกต่อก่อนที่อุณหภูมิในหม้อแปลงถึงสภาวะคงตัว ซึ่งเหตุการณ์นี้นาน ๆ จะเกิดขึ้นครั้งหนึ่ง แต่อาจเกิดขึ้นในช่วง 1 สัปดาห์หรือ 1 เดือนหลาย ๆ ครั้ง ซึ่งวัฏจักร โหลดแบบนี้สามารถนำไปคำนวณหาค่าสูญเสียในหม้อแปลงได้ แต่จะไม่คำนึงถึงการเบรคดาวช้อนเนื่องจากความร้อนหรือการลดลงของค่าความแข็งแรงของไดอิเล็กตริก ผลกระทบที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดความเสื่อมสภาพทางความร้อนของฉนวนตัวนำ ซึ่งถ้าเกิดด้วยระยะเวลายาวนาน ก็จะส่งผลให้อายุการใช้งานสั้นลง ค่าความต้านทานที่หน้าสัมผัสของ Tap changer จะเพิ่มมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

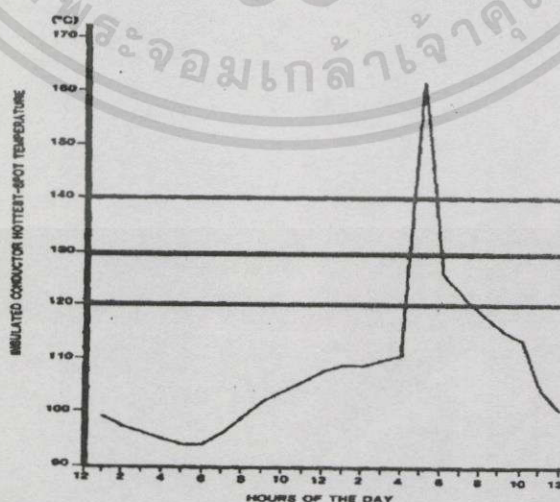
ขึ้นเมื่อกระแสและความร้อนสูงขึ้น โดยความร้อนจะแผ่ออกที่บริเวณตัวนำใกล้ ๆ กับตัวเปลี่ยนแทป (Tap changer) วัสดุวงแหวนในหม้อแปลงอาจจะเปราะมากที่ที่อุณหภูมิสูง ๆ ขึ้น ซึ่งสามารถแสดง วัฏจักร โหลดถูกเดินช่วงเวลายาวนาน ได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงตัวอย่างวัฏจักร โหลดถูกเดินช่วงเวลายาวนาน

#### 2.4.4.3 วัฏจักรโหลดถูกเดินช่วงเวลาสั้น ๆ

เป็นเงื่อนไขการต่อโหลดที่ไม่ปกติ ซึ่งโหลดที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่ามาก ๆ อาจจะทำให้เกิดเหตุการณ์นี้หนึ่งครั้งหรือมากกว่า ซึ่งจะทำให้จุดร้อนสุดที่ตัวนำมีค่าสูงขึ้นมา ค่าความแข็งแรงของ ใคโอเล็กตริกของน้ำมันจะลดลงชั่วคราว ณ บริเวณที่เกิดฟองก๊าซในบริเวณนั้น ฟองก๊าซอาจจะเกิดขึ้นที่กระดาษฉนวน เมื่อเกิดอุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุดเหนือค่าอุณหภูมิที่จุดวิกฤตอย่างทันทีทันใด



รูปที่ 2.13 แสดงวัฏจักร โหลดถูกเดินช่วงเวลาสั้น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งค่าอุณหภูมินี้ประมาณ  $140^{\circ}\text{C}$  ถึง  $160^{\circ}\text{C}$  สำหรับหม้อแปลงที่มีความชื้นปกติ ฟองก๊าซสามารถเกิดที่ผิวของส่วนที่เป็นโลหะหนัก โดยความร้อนนี้เกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลหรือเกิดจากน้ำมันหม้อแปลงอิมตัวยิ่งยวด และสิ่งที่ต้องคำนึงอันเนื่องมาจากความร้อนก็คืออุปกรณ์ต่อร่วมกับหม้อแปลง เช่น บุชชิ่ง, สายเคเบิล, รีแอกเตอร์, หม้อแปลงกระแส เป็นต้น ซึ่งสามารถแสดงวัฏจักรโหลดฉุกเฉินช่วงเวลาสั้น ๆ ได้ดังรูปที่ 2.13

การต่อโหลดที่สูงกว่าขีดจำกัดของแผ่นป้ายชื่อตามมาตรฐาน IEC [7] ได้แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 แสดงขีดจำกัดของกระแสและอุณหภูมิในการโหลดในสภาวะมากกว่าปกติหม้อแปลง

ชนิดของการโหลด		หม้อแปลง จำหน่าย	หม้อแปลง ขนาดกลาง	หม้อแปลง ขนาดใหญ่
<b>วัฏจักรโหลดปกติ</b>				
กระแส	(P.U.)	1.5	1.5	1.5
อุณหภูมิจุดร้อนสุด	( $^{\circ}\text{C}$ )	140	140	120
อุณหภูมิน้ำมันด้านบน	( $^{\circ}\text{C}$ )	105	105	105
<b>วัฏจักรโหลดฉุกเฉินช่วงเวลายาวๆ</b>				
กระแส	(P.U.)	1.8	1.5	1.3
อุณหภูมิจุดร้อนสุด	( $^{\circ}\text{C}$ )	150	140	130
อุณหภูมิน้ำมันด้านบน	( $^{\circ}\text{C}$ )	115	115	115
<b>วัฏจักรโหลดฉุกเฉินช่วงเวลาสั้นๆ</b>				
กระแส	(P.U.)	2.0	1.8	1.5
อุณหภูมิจุดร้อนสุด	( $^{\circ}\text{C}$ )	*	160	160
อุณหภูมิน้ำมันด้านบน	( $^{\circ}\text{C}$ )	*	115	115

**หมายเหตุ \*** ปกติในทางปฏิบัติไม่สามารถควบคุมช่วงเวลาระหว่างที่เกิดโหลดฉุกเฉินของหม้อแปลงจำหน่ายได้ เมื่อจุดร้อนสุดมีอุณหภูมิมากกว่า  $140^{\circ}\text{C}$  ถึง  $160^{\circ}\text{C}$  จะทำให้เกิดฟองอากาศ ซึ่งเป็นอันตรายกับความแข็งแรงของไดอิเล็กตริกในหม้อแปลง

## 2.5 ส่วนประกอบต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อความเย็นหม้อแปลง

ในการทำงานประจำวันของหม้อแปลง อุณหภูมิบรรยากาศที่ระดับความสูง และอุณหภูมิของหม้อแปลง อาจจะมีค่าอุณหภูมิที่มีความแตกต่างกันมากกว่าขนาดกฎเกณฑ์ที่สมมติฐาน สิ่งต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลอาจจะแยกได้ดังต่อไปนี้

### 2.5.1 อิทธิพลของความสูงที่มีผลกับการไหลของหม้อแปลง

จาก[1]ค่าความหนาแน่นของอากาศที่ลดลงอันเนื่องด้วยระดับความสูงเพิ่มมากขึ้น อุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลงจะขึ้นอยู่กับอากาศ ซึ่งสามารถแบ่งการทำงานของหม้อแปลงได้ดังนี้

#### 2.5.1.1 การทำงานที่ระดับพิกัดของหม้อแปลง

หม้อแปลงอาจจะทำงานได้ที่พิกัดที่ระดับความสูงมากกว่า 1000 เมตร (3300 ฟุต) โดยปราศจากอุณหภูมิที่เกินขีดจำกัด โดยจะต้องไม่ให้ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ตัวระบายความร้อนไม่สูงเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 แสดงค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ของค่าอุณหภูมิเฉลี่ย ของตัวระบายความร้อนที่หม้อแปลงทำงานที่พิกัด

1000 เมตร (3,300ฟุต)	2000 เมตร (6,600ฟุต)	3000 เมตร (9,900ฟุต)	4000 เมตร (13,200ฟุต)
30 °C	28 °C	25 °C	23 °C

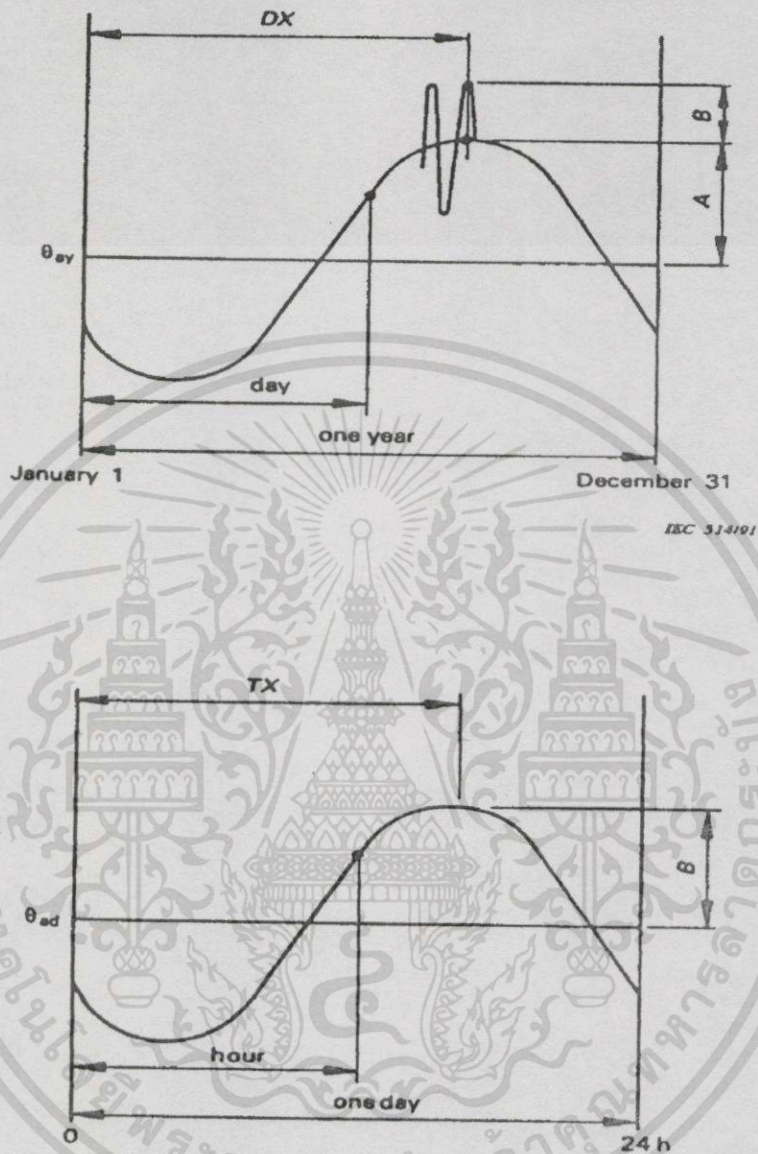
#### 2.5.1.2 การทำงานที่ต่ำกว่าพิกัดของหม้อแปลง

หม้อแปลงอาจมีการทำงานที่ความสูงมากกว่า 1000 เมตร (3300 ฟุต) โดยที่อุณหภูมิตัวระบายความร้อนสูงเกินกว่าขีดจำกัด ดังนั้นการไหลของหม้อแปลงจำเป็นจะต้องลดพิกัดของหม้อแปลงลง โดยจะพิจารณาที่ 0.4 % ต่อระยะความสูง 100 เมตร(330 ฟุต)

### 2.5.2 อิทธิพลเนื่องจากอุณหภูมิแวดล้อมขณะทำการต่อโหลด

อุณหภูมิบรรยากาศเป็นตัวประกอบที่สำคัญ ในการกำหนดค่าความสามารถในการรับภาระของหม้อแปลง ดังนั้นในการต่อ โหลดหม้อแปลงจำเป็นต้องพิจารณาอุณหภูมิแวดล้อมร่วมด้วย จาก[7] ได้มีการหาค่าอุณหภูมิแวดล้อมแบบฟังก์ชันไซน์สองชั้น(Double sinusoidal ) ดังรูปที่ 2.14 และสมการที่ 2.9

$$\Theta_a = \Theta_{ay} + A_{year} \cdot \cos \left[ \frac{2\pi}{365} (\text{day} - DX) \right] + B_{day} \cdot \cos \left[ \frac{2\pi}{24} (\text{hour} - TX) \right] \quad (2.9)$$



รูปที่ 2.14 แสดงนิยามของพารามิเตอร์ สำหรับอุณหภูมิแวดล้อมแบบฟังก์ชันชานส์สองชั้น  
หมายเหตุ จากรูปที่ 2.14 และสมการที่ 2.9  $A = A_{\text{year}}$

$$B = B_{\text{day}}$$

## 2.6 อายุของฉนวนโดยพิจารณาจากความร้อน

อายุของฉนวนหรือความเสื่อมสภาพของฉนวน ขึ้นกับฟังก์ชันของอุณหภูมิและเวลา ในการพิจารณาที่ฟังก์ชันของอุณหภูมิ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เกิดขึ้นตามตำแหน่งต่าง ๆ ของฉนวนจะเป็นลักษณะที่แตกต่างกัน ส่วนการทำงานที่จุดร้อนสุด(hottest spot)นั้น จะได้รับความเสื่อมสภาพมาก เพราะฉะนั้นในการศึกษาอายุของฉนวนมักเป็นการพิจารณาผลกระทบของอายุที่เกิดขึ้นจากการพิจารณาอุณหภูมิที่จุดร้อนสุด

ในการแนะนำสมมติฐานของค่าความเสื่อมสภาพของฉนวนจาก[1,9] ซึ่งเป็นความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและเวลา ตามทฤษฎีสมการของArrhenius ได้กล่าวไว้ว่าที่อายุของฉนวนจะมีฟังก์ชันเหมือนกับลอการิทึม ดังสมการที่ 2.10

$$\text{Log}_{10} \text{life}(\text{hour of life}) = A + \frac{B}{T} \quad (2.10)$$

ดังนั้น จะได้อายุการใช้งาน หน่วยชั่วโมง คือ

$$\text{hour of life} = 10^{\left(A + \frac{B}{T}\right)}$$

และส่วนกลับของอายุการใช้งานคืออายุที่สูญเสียแสดงดังสมการที่ 2.11

$$\text{อายุที่สูญเสีย(Loss of Life)} = 10^{-\left(A + \frac{B}{T}\right)} \quad (2.11)$$

เมื่อ

$$T = \Theta_{hs} + 273$$

โดยที่

ที่หม้อแปลงมีขนาด 500 kVA และต่ำกว่า [1,9]

สำหรับระบบมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉลี่ยของขดลวด  $65^{\circ}\text{C}$

$$A = -11.269 \quad B = 6328.8$$

สำหรับระบบมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉลี่ยของขดลวด  $55^{\circ}\text{C}$

$$A = -11.968 \quad B = 6328.8$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่หม้อแปลงมีขนาดมากกว่า 500 kVA ถึง 100 MVA [2]

สำหรับระบบมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉลี่ยของขดลวด  $65^{\circ}\text{C}$

$$A = -30.834 \quad B = 16054.0$$

สำหรับระบบมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉลี่ยของขดลวด  $55^{\circ}\text{C}$

$$A = -32.543 \quad B = 1654.0$$

ที่หม้อแปลงมีขนาดมากกว่า 100 MVA [3]

สำหรับระบบมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉลี่ยของขดลวด  $65^{\circ}\text{C}$

$$A = -13.391 \quad B = 6972.15$$

จากสมการที่ 2.11 เมื่อพิจารณาในช่วงระยะเวลา  $t$  จะได้ดังสมการที่ 2.12

$$\text{อายุที่สูญเสีย (Loss of Life)} = t \times 10^{-\left(A + \frac{B}{T}\right)} \quad (2.12)$$

จากสมการที่ 2.12 จะใช้ได้เฉพาะที่ค่า  $T(\Theta_{hs} + 273)$  ของเวลา  $t$  เพียงค่าเดียว แต่ในสภาพความเป็นจริงระดับของค่า  $T(\Theta_{hs} + 273)$  จะมีหลายค่าในช่วงเวลาทั้งหมดที่พิจารณา ดังนั้น จะสามารถหาค่าอายุที่สูญเสียรวมดังสมการที่ 2.13

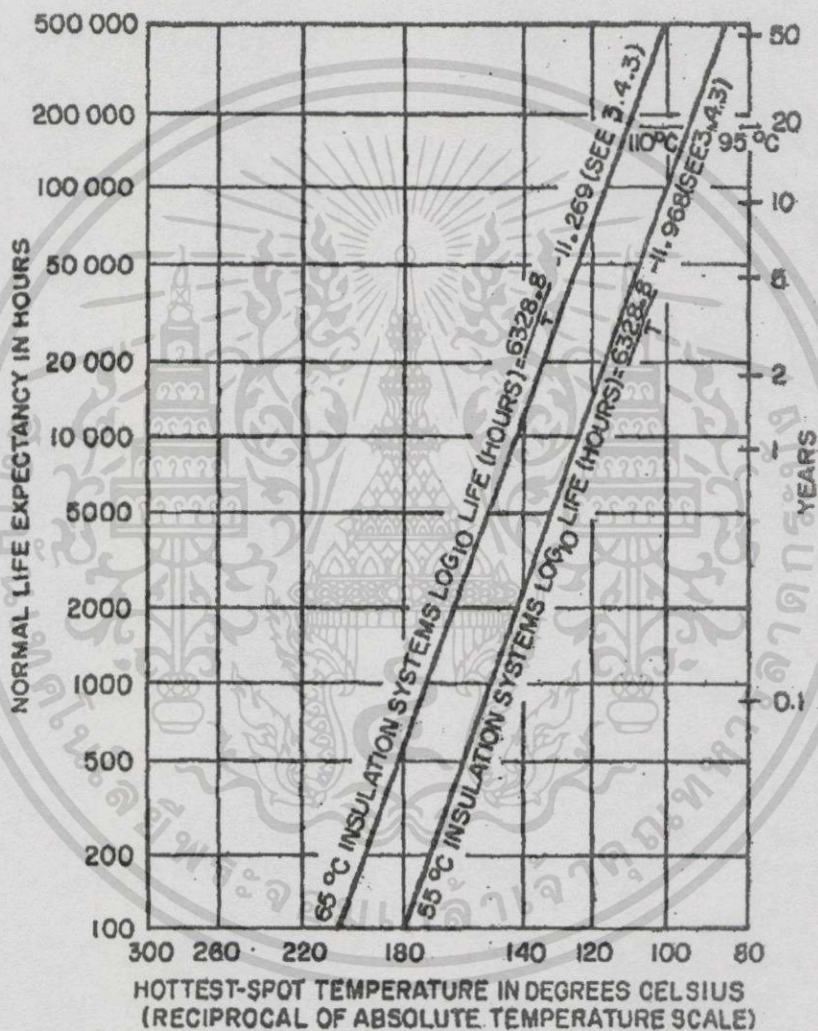
$$\text{อายุที่สูญเสียรวม (Total Loss of Life)} = \sum_{t=1}^{t=n} 10^{-\left(A + \frac{B}{T_t}\right)} \quad (2.13)$$

ดังนั้นจะสามารถคำนวณหาอายุการใช้งานของหม้อแปลงได้จากส่วนกลับของอายุที่สูญเสียรวมดังสมการที่ 2.14

$$\text{อายุการใช้งานรวม (Total Life)} = \frac{1}{\text{Total Loss of Life}} = \frac{1}{\left( \sum_{t=1}^{t=n} 10^{-\left(A + \frac{B}{T_t}\right)} \right)} \quad (2.14)$$

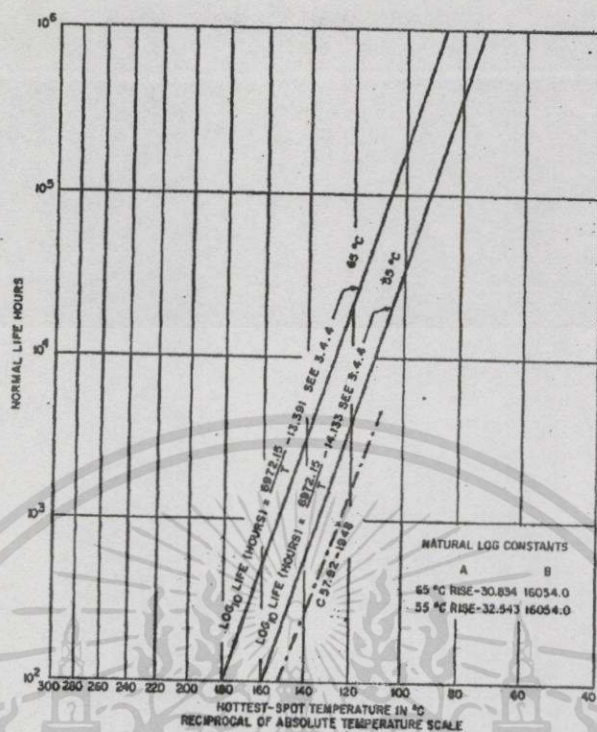
### ค่าอายุการใช้งานของหม้อแปลงที่

- ขนาด 500 kVA และต่ำกว่า แสดงดังรูปที่ 2.15
- ขนาดมากกว่า 500 kVA ถึง 100 MVA แสดงดังรูปที่ 2.16
- ขนาดมากกว่า 100 MVA แสดงดังรูปที่ 2.17

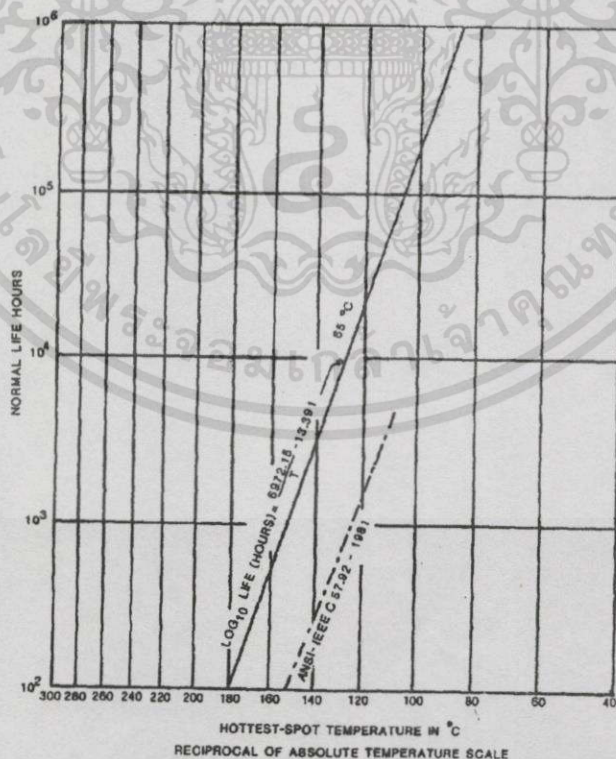


รูปที่ 2.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิจุดร้อนสุดกับอายุการใช้งานของหม้อแปลง ที่หม้อแปลงมีขนาด 500 kVA และต่ำกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิจุดร้อนที่สุดกับอายุการใช้งานของหม้อแปลง ที่หม้อแปลงมีขนาดมากกว่า 500 kVA ถึง 100 MVA



รูปที่ 2.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิจุดร้อนที่สุดกับอายุการใช้งานของหม้อแปลง ที่หม้อแปลงมีขนาดมากกว่า 100 MVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก Montsinger[7-9,17] ได้กล่าวไว้ที่ช่วงอุณหภูมิ  $80^{\circ}\text{C}$  ถึง  $140^{\circ}\text{C}$  ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นประมาณ  $6^{\circ}\text{C}$  จะทำให้ค่าพิกัดอายุสัมพัทธ์(V)ลดลงครึ่งหนึ่ง โดยที่อุณหภูมิที่  $98^{\circ}\text{C}$  จะให้ค่าพิกัดอายุสัมพัทธ์(V) มีค่าเท่ากับ 1 ดังสมการที่ 2.15

$$V = \frac{\text{ageing rate at } \Theta_h}{\text{ageing rate at } 98^{\circ}\text{C}} = 2^{(\Theta_h - 98)/6} \quad (2.15)$$

ดังนั้น

$$\Theta_h = 98 + 19.93 \log_{10} V \quad (2.16)$$

เมื่อ อายุการใช้งานของหม้อแปลง ( $t_{\text{age}}$ ) เป็นส่วนกลับของพิกัดอายุสัมพัทธ์(V)

ดังนั้น

$$t_{\text{age}} = \frac{1}{V}$$

เมื่อกำหนดให้ค่าพิกัดอายุสัมพัทธ์(V) เท่ากับ 1 จะให้ค่าอายุการใช้งานของหม้อแปลง ( $t_{\text{age}}$ ) เท่ากับ 24 ชั่วโมง(1วัน)

ดังนั้น

$$t_{\text{age}} = \frac{1}{V} \times 24$$

หรือ

$$t_{\text{age}} = 24 \times 10^{\frac{(98 - \Theta_h)}{19.93}} \quad (2.17)$$

ซึ่งค่าต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ของพิกัดอายุสัมพัทธ์, อุณหภูมิจุดร้อนสุดและช่วงเวลาอายุการใช้งาน

จุดร้อนสุด ( $\Theta_h$ )	พิกัดอายุสัมพัทธ์ (V)	อายุการใช้งาน ( $t_{\text{age}}$ ), ชั่วโมง
98	1.0	24
104	2.0	12
110	4.0	6
116	8.0	3
122	16.0	1.5
128	32.0	0.75
134	64.0	0.375
140	128.0	0.1875

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในแต่ละช่วงเวลาที่พิจารณาเช่นช่วง 1 วัน อาจจะมีค่าจุก้อนสุดเกิดขึ้นหลาย ๆ ค่า ดังนั้นก็จะทำให้เกิดค่าพิคกอายุสัมพัทธ์ได้หลายๆค่าเช่นเดียวกัน ดังนั้นเมื่อต้องทราบค่าพิคกอายุสัมพัทธ์รวมโดยกำหนดให้ชื่อว่ค่าอายุสูญเสียสัมพัทธ์(L) จะแสดงดังสมการที่ 2.18

$$L = \frac{1}{t} \int_{t_1}^{t_2} V dt \quad (2.18)$$

หรือ

$$L = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V \quad (2.19)$$

เพราะฉะนั้นจะได้ค่าช่วงเวลาการใช้งานรวม( $t_{age}$ ) ของหม้อแปลง ดังสมการที่ 2.20

$$t_{age} = \frac{24}{L} = \frac{24}{\left( \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V \right)} \quad (2.20)$$

## 2.7 สมการอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลง ตามมาตรฐาน IEC และ IEEE

ในขณะที่หม้อแปลงทำงานนั้นไม่ว่าจะระยะไร้ภาระหรือมีการต่อโหลดก็ตาม จะส่งผลทำให้เกิดความร้อนขึ้นตามส่วนต่าง ๆ ของหม้อแปลง ความร้อนที่เกิดขึ้นจะมีค่าที่แตกต่างกัน การพิจารณาค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจะพิจารณาที่ลวดค้วนำและอุณหภูมิน้ำมันหม้อแปลงซึ่งความร้อนตำแหน่งดังกล่าวจะมีค่าสูงกว่าที่อื่น ๆ ดังนั้นผู้ผลิตหม้อแปลงเมื่อต้องการทราบสมรรถนะทางความร้อนของหม้อแปลงที่ออกแบบสร้าง สามารถที่จะกระทำได้โดยการทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบยังทำให้รู้ถึงพารามิเตอร์จำเพาะต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับหม้อแปลงได้อีกด้วย ซึ่งค่าพารามิเตอร์จำเพาะที่ได้จากการทดสอบนี้สามารถนำไปทำนายอุณหภูมิขณะใช้งานในสภาวะปกติหรือเกินพิคก, วางแผนการจ่ายโหลดหม้อแปลง, การป้องกันหม้อแปลงและอุปกรณ์ต่อร่วมกับหม้อแปลง ซึ่งวิธีการทดสอบแสดงดัง[4, 11, 12, 19, 32] และสมการต่าง ๆ ได้ทำการสรุปเปรียบเทียบระหว่างมาตรฐานIEC [7-8] กับมาตรฐานIEEE [1-3] จะแสดงดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 แสดงการเปรียบเทียบสมการที่ใช้ในการคำนวณของมาตรฐาน IEC กับ IEEE

สมการที่	IEC	IEEE
2.21	$\Theta_{wr} = \Theta_{w2} - \Theta_a$	$\Theta_{wr} = \Theta_{w2} - \Theta_a$
2.22	$\Theta_{w2} = \frac{R_{t2}}{R_{t1}} (k + \Theta_{w1}) - k$	$\Theta_{w2} = \frac{R_{t2}}{R_{t1}} (k + \Theta_{w1}) - k$
2.23	เมื่อ $\Theta_{gr} = H \cdot g_r$ $g_r = \Theta_{wr} - \Theta_{imr}$ $\Theta_{imr} = \frac{\Theta_{ir} + \Theta_{br}}{2}$	เมื่อเป็นการออกแบบ Average winding rise 65 °C A =15 Average winding rise 55 °C A =10
2.24	$\tau_0$ จากในตารางที่ 2.9	$\tau_0 = C \frac{\Theta_{or}}{P_r}$ และ $\tau = \tau_0 \frac{\left(\frac{\Theta_{ou}}{\Theta_{or}}\right) - \left(\frac{\Theta_{oi}}{\Theta_{or}}\right)}{\left(\frac{\Theta_{ou}}{\Theta_{or}}\right)^{1/x} - \left(\frac{\Theta_{oi}}{\Theta_{or}}\right)^{1/x}}$ เมื่อ $C = 0.06 \times (\text{น้ำหนักของแกนเหล็กและคอยล์}) + 0.04 \times (\text{น้ำหนักแท่ง และ fitting (ปอนด์)}) + 1.33 \times (\text{จำนวนแกลลอนของน้ำมัน})$ หรือ $\tau_0$ ได้จากการพิจารณาช่วงเวลา 63% ของการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนที่จุดเริ่มต้น 0 °C หรือ $\tau_0$ หากจากค่าตารางที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 (ต่อ)

2.25	( $\tau_{hs}$ ไม่ได้พิจารณาเพราะเป็นช่วงเวลาเพียงไม่กี่นาที)	$\tau_{hs}$ ได้จากการประมาณ[1]เพียง 5-7 นาที
2.26	x (oil exponential) จากตารางที่ 2.9	n(oil exponential) จากตารางที่ 2.10
2.27	y(winding exponential)จากตารางที่ 2.9	mหรือ2n (oil exponential) จากค่าตารางที่ 2.10
2.28	$R = \frac{\text{Onload loss}}{\text{Noload loss}}$ หรือจากตารางที่ 2.9	$R = \frac{\text{Onload loss}}{\text{Noload loss}}$ หรือจากค่าสมมติฐานในตาราง 2.10
2.29	$\Theta_{or} = \text{Top oil temp} - \Theta_a$	$\Theta_{or} = \text{Top oil temp} - \Theta_a$
2.30	<p>สภาวะคงตัว</p> <p>ON cooling</p> $\Theta_h = \Theta_a + \Theta_{or} \left[ \frac{1+RK^2}{1+R} \right]^x + H.g_r.K^y$ <p>OF cooling</p> $\Theta_h = \Theta_a + \Theta_{br} \left[ \frac{1+RK^2}{1+R} \right]^x + H.g_r.K^y$ <p>+2<math>[\Theta_{imr} - \Theta_{br}]K^y</math></p> <p>OD cooling (for K&gt;1)</p> $\Theta'_h = \Theta_h + 0.15(\Theta_h - \Theta_{hr})$	<p>สภาวะคงตัว</p> <p>Rated 500 kVA and Less</p> $\Theta_h = \Theta_a + \Theta_{or} \left[ \frac{1+RK^2}{1+R} \right]^n + \Theta_{gr}.K^{2n}$ <p>500 kVA up to 100 MVA</p> $\Theta_h = \Theta_a + \Theta_{or} \left[ \frac{1+RK^2}{1+R} \right]^n + \Theta_{gr}.K^m$ <p>More over 100 MVA</p> $\Theta_h = \Theta_a + \Theta_{or} \left[ \frac{1+RK^2}{1+R} \right]^n + \Theta_{gr}.K^m$
2.31	<p>สภาวะคงตัว</p> $\Theta_{gu} = H.g_r.K^y$	<p>สภาวะคงตัว</p> $\Theta_{gu} = \Theta_{gr} K^{2n}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 (ต่อ)

2.32	<p style="text-align: center;"><u>สภาวะคงตัว</u></p> $\Theta_{ou} = \Theta_{or} \left[ \frac{1 + RK^2}{1 + R} \right]^x$	<p style="text-align: center;"><u>สภาวะคงตัว</u></p> $\Theta_{ou} = \Theta_{or} \left[ \frac{1 + RK^2}{1 + R} \right]^n$
2.33	<p style="text-align: center;"><u>สภาวะชั่วขณะ</u></p> $\Theta_{ot} = (\Theta_{ou} - \Theta_{oi}) \left( 1 - e^{-t/\tau_0} \right) + \Theta_{oi}$	<p style="text-align: center;"><u>สภาวะชั่วขณะ</u></p> $\Theta_{ot} = (\Theta_{ou} - \Theta_{oi}) \left( 1 - e^{-t/\tau} \right) + \Theta_{oi}$
2.34	<p style="text-align: center;"><u>สภาวะชั่วขณะ</u></p> <p style="text-align: center;">( <math>\Theta_{gt}</math> ไม่ได้พิจารณาเพราะเป็นช่วงเวลาที่ เพียงไม่กี่นาที )</p>	<p style="text-align: center;"><u>สภาวะชั่วขณะ</u></p> $\Theta_{gt} = (\Theta_{gu} - \Theta_{gi}) \left( 1 - e^{-t/\tau_{hs}} \right) + \Theta_{gi}$

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของมาตรฐาน IEC[7] และ IEEE [2] ได้กำหนดไว้ดังตารางที่ 2.9 และตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.9 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณของมาตรฐาน IEC

	หม้อแปลง จำหน่าย	หม้อแปลงกำลังขนาดกลางและขนาดใหญ่			
		ONAN	ON..	OF..	OD..
Oil exponent	x	0.8	0.9	1.0	1.0
Winding exponent	y	1.6	1.6	1.6	2.0
Loss ratio	R	5	6	6	6
Hot-spot factor	H	1.1	1.3	1.3	1.3
Oil time constant $\tau_0$ (hours)		3.0	2.5	1.5	1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.10 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณของมาตรฐาน IEEE

		OA or OW	FA 133% Or Less	Effective Cooling Mode		
				FA**over 133%	Non-Directed FOA or FOW	Directed FOA or FOW
Oil exponent	n	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0
Winding exponent	m	0.8	0.8	0.8	0.8	1.0
Loss ratio	R	3.2	4.5	6.5	6.5	6.5
Oil time constant $\tau_0$ (h)		3.0	2.0	1.25	1.25	1.25

## 2.8 อุณหภูมิหม้อแปลงในสภาวะมีฮาร์โมนิก

ในสภาวะโหลดที่ใช้อยู่ในปัจจุบันนี้ ได้มีโหลดประเภทไม่เป็นเชิงเส้นมากขึ้น สิ่งส่งผลกระทบต่อ ทำให้หม้อแปลงมีอุณหภูมิสูงมากขึ้น ทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงสั้นลง จาก [30] ได้มีการหาค่า  $\Theta_{gu}$  ดังสมการที่ 2.35 และหาค่า  $\Theta_{ou}$  ดังสมการที่ 2.36

$$\Theta_{gu} = \Theta_{gr} \cdot K^{2n} [F_{(p,n)}]^n \quad (2.35)$$

เมื่อ

$$K = \frac{S}{S_N}$$

$$\Theta_{ou} = \Theta_{or} \left[ \frac{(P_{ecw} + P_C + P_{tank})}{(P_{ecw\_R} + P_{C\_R} + P_{tank\_R})} \right]^n \quad (2.36)$$

จากวิธีการหาค่าอุณหภูมิหม้อแปลงจาก [30] ในทางปฏิบัติแล้วค่อนข้างจะกระทำได้ยาก สาเหตุเพราะวิธีการนี้ จำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างหม้อแปลง ยิ่งถ้าเป็นหม้อแปลงที่ผ่านการใช้งานแล้ว หรือหม้อแปลงที่ผู้ใช้ไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ ก็จะไม่สามารถคำนวณหาค่าอุณหภูมิของหม้อแปลงได้เลย ซึ่งพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณของ [30] แสดงดังตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าอายุที่สูญเสียและอายุการใช้งาน  
หม้อแปลง

ลำดับที่	พารามิเตอร์
1	กำลังสูญเสียขณะไร้ภาระ
2	กำลังสูญเสียขณะมีโหลด
3	กำลังสูญเสียปลิกย่อย
4	อุณหภูมิครีออนสุดที่มากกว่าน้ำมันด้านบน
5	อุณหภูมิน้ำมันด้านบน
6	ค่าเวลาความร้อนของน้ำมันคงตัว
7	ค่าเวลาความร้อนของขดลวดคงตัว
8	ชนิดของการระบายความร้อน
9	ชนิดของแกนเหล็ก
10	น้ำหนักของแกนเหล็ก
11	ความยาวของแกนเหล็ก
12	ความสูงของช่องหน้าต่างระหว่างแกนเหล็ก
13	ความหนาของแกนเหล็ก
14	Steimetz Cosfficient
15	ความต้านทานของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ
16	ประเภทของขดลวดตัวนำ
17	น้ำหนักของลวดตัวนำ
18	จำนวนรอบของขดลวดตัวนำ
19	จำนวนเส้นลวดที่ต่อขนานกัน
20	ลักษณะของขดลวด(กลม, แบน)
21	ความสูงของลวดตัวนำ(ลวดแบน)
22	ความกว้างของลวดตัวนำ(ลวดแบน)
23	ระยะห่างของขดลวด
24	น้ำหนักของถัง
25	น้ำหนักของน้ำมัน
26	ฟังก์ชันการกระจายสนามแม่เหล็ก ที่จุดร้อนสุดตามแนวขวาง
27	ฟังก์ชันการกระจายสนามแม่เหล็ก ที่จุดร้อนสุดตามแนวยาว
28	ตัวประกอบ ค่าสูญเสียปลิกย่อย ตามแนวขวางของขดลวดปฐมภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.11 (ต่อ)

29	ตัวประกอบ ค่าสูญเสียปลิกย่อย ตามแนวยาวของขดลวดปฐมภูมิ
30	ตัวประกอบ ค่าสูญเสียปลิกย่อย ตามแนวขวางของขดลวดทุติยภูมิ
31	ตัวประกอบ ค่าสูญเสียปลิกย่อย ตามแนวยาวของขดลวดทุติยภูมิ

ด้วยสาเหตุดังที่กล่าวมา จะเห็นว่าพารามิเตอร์ที่ร่วมพิจารณาคอนข้างมีจำนวนมาก ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์นี้จะนำวิธีการจาก[33] มาปรับปรุงแก้ไข เพื่อช่วยลดปัญหาดังกล่าวจากวิธีการของ[30] จาก[33]ได้แสดงให้เห็นว่า สำหรับหม้อแปลงที่มีการระบายความร้อนแบบ OA อุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนจะเป็นอัตราส่วนของค่าสูญเสียที่มีฮาร์โมนิกร่วมด้วยต่อค่าสูญเสียที่พิกัดหม้อแปลงยกกำลัง 0.8 ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 2.37

$$\Theta_{ou} = \Theta_{or} \left[ \frac{P_T}{P_{T\_R}} \right]^{0.8} \quad (2.37)$$

ค่าสูงสุดต่อหน่วยของค่าสูญเสียกระแสไหลวน เมื่อพิจารณาในขดลวดแรงดันสูง จะมีค่า 2.0 % ของค่าสูญเสีย  $I^2 R_{dc}$  (ohmic-loss) และสมมติค่าสูญเสียกระแสไหลวนที่จุดร้อนสุดมีค่าเป็น 4 เท่าของค่าเฉลี่ยของค่าสูญเสียกระแสไหลวน ดังนั้นค่าความหนาแน่นของค่าสูญเสียกระแสไหลวนที่จุดร้อนสุด(Hottest spot) มีค่าเท่ากับ 8 เปอร์เซ็นต์ของค่าสูญเสีย  $I^2 R_{dc}$  ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่าอุณหภูมิที่จุดร้อนสุดที่มากกว่าน้ำมันด้านบน ดังสมการที่ 2.38

$$\text{Hottest-spot over top oil} = \left[ \frac{1 + [(K - \text{factor}) \times 0.08]}{1 + 0.08} \right]^{0.8} \Theta_{gr} \quad (2.38)$$

จากสมการที่ 2.38 เป็นการทดสอบที่  $I^2 R_{dc}$  ที่พิกัด แต่ในสภาพความเป็นจริงค่าโหลดอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงได้ ดังนั้นสามารถปรับเป็นสมการที่ 2.39

$$\text{Hottest-spot over top oil} = \left[ \frac{\left( \frac{(I_{rms})^2 R_{dc}}{(I_{rms\_R})^2 R_{dc}} \right) + [(K - \text{factor}) \times 0.08]}{1 + 0.08} \right]^{0.8} \Theta_{gr} \quad (2.39)$$

เมื่อกำหนดให้

$$P_{dc\_}(p.u.) = \frac{(I_{rms}^2)R_{dc}}{(I_{rms\_R})^2 R_{dc}} = \frac{P_{dc}}{P_{dc\_R}} \quad (2.40)$$

ดังนั้นสามารถเปลี่ยนสมการที่ 2.39 เป็นดังสมการที่ 2.41

$$\text{Hottest-spot over top oil} = \left[ \frac{P_{dc\_}(p.u.) + [(K - \text{factor}) \times 0.08]}{1 + 0.08} \right]^{0.8} \cdot \Theta_{gr} \quad (2.41)$$

หมายเหตุ รายละเอียดของ ตัวประกอบ K จะกล่าวในบทต่อไป

ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้นำเสนอวิธีการหาค่ากำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนที่ขดลวด ( $P_{ecw}$ ) โดยวิธีการแยกทดสอบหาค่าสูญเสียที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งจะแสดงรายละเอียดดังบทที่ 3

จาก[33] ได้สมมติค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนที่จุดร้อนสุด (Hottest-spot) มีค่าเป็น 4 เท่า ของค่าเฉลี่ยของค่าสูญเสียกระแสไหลวนที่ขดลวด ดังสมการที่ 2.42

$$P_{ecw\_H} = 4 \times P_{ecw\_R} \quad (2.42)$$

ดังนั้นจะสามารถปรับสมการที่ 2.41 เป็นดังสมการที่ 2.44

$$\text{Hottest-spot over top oil} = \left[ \frac{\left[ (I_{rms})^2 \cdot R_{dc} \right] + \left[ \left( \frac{P_{ecw}}{P_{ecw\_R}} \right) \times (P_{ecw\_H}) \right]}{\left[ (I_{rms\_R})^2 \cdot R_{dc} \right] + (P_{ecw\_H})} \right]^{0.8} \cdot \Theta_{gr} \quad (2.43)$$

และสามารถเขียนอยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังสมการที่ 2.44

$$\text{Hottest-spot over top oil} = \left[ \frac{\left[ (I_{rms})^2 \cdot R_{dc} \right] + (4 \times P_{ecw})}{\left[ (I_{rms\_R})^2 \cdot R_{dc} \right] + (4 \times P_{ecw\_R})} \right]^{0.8} \cdot \Theta_{gr} \quad (2.44)$$

เมื่อเปลี่ยน  $P_{ecw\_H}$  เป็นค่าต่อหน่วย (Per-Unit) จะได้สมการที่ 2.43

$$P_{ecw\_H} \text{ (p.u.)} = \frac{4 \times P_{ecw\_R}}{P_{dc\_R}} \quad (2.45)$$

จากสมการที่ 2.43 สามารถเปลี่ยนอยู่ในรูปต่อหน่วยได้ดังสมการที่ 2.46

$$\text{Hottest-spot over top oil} = \frac{\left[ I^2 R_{dc\_} \text{ (p.u.)} + \left[ \left( \frac{P_{ecw}}{P_{ecw\_R}} \right) \times (P_{ecw\_H} \text{ (p.u.)}) \right] \right]^{0.8}}{1 + P_{ecw\_H} \text{ (p.u.)}} \cdot \Theta_{gr} \quad (2.46)$$

### บทที่ 3

## ทฤษฎีและการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของหม้อแปลง

### 3.1 ข้อควรพิจารณาทั่ว ๆ ไปที่เกี่ยวกับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า

จาก[5] ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในหม้อแปลง(Total loss,  $P_T$ ) สามารถได้แบ่งเป็น

1. ค่าความสูญเสียขณะไร้ภาระ (No load loss,  $P_C$ )
2. ค่าความสูญเสียขณะมีภาระ (On Load loss, Impedance loss,  $P_{LL}$ )

ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.1

$$P_T = P_C + P_{LL} \quad (3.1)$$

แต่ว่าค่าความสูญเสียขณะมีภาระแบ่งย่อยได้เป็นค่าความสูญเสียเนื่องจากลวดตัวนำ  $I^2 R_{dc}$  และค่าความสูญเสียปลิกย่อย(Stray loss) ซึ่งค่าสูญเสียปลิกย่อยนี้ ได้จากการนำค่าความสูญเสียขณะมีโหลดลบออกจากค่าความสูญเสียในลวดตัวนำ ค่า  $P_{LL}$  สามารถหาได้ดังสมการที่ 3.2

$$P_{LL} = I_{rms}^2 R_{dc} + P_{stray} \quad (3.2)$$

ค่าความสูญเสียปลิกย่อยสามารถให้คำจำกัดความว่าเป็นความสูญเสียเนื่องจากฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าในขดลวด , ถัง หรือถังห่อหุ้ม เป็นต้น ดังนั้นค่าความสูญเสียปลิกย่อย(stray loss) แบ่งย่อยได้เป็นความสูญเสียปลิกย่อยในขดลวด (Winding stray loss) และความสูญเสียปลิกย่อยอื่น ๆ นอกเหนือจากขดลวด(Stray loss in components other the winding) หรือ  $P_{OSL}$  ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.3

$$P_{stray} = P_{ecw} + P_{osl} \quad (3.3)$$

### 3.2 รายละเอียดต่าง ๆ ของค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียแต่ละแบบ

#### 3.2.1 ค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็ก(core Loss)

จาก[34] ค่ากระแสกระตุ้นที่เป็นส่วนที่สร้างค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ซึ่งทำให้เกิดแม่เหล็กในแกนเหล็ก และเป็นส่วนที่กำหนดค่ากำลังไฟฟ้าให้กับวงจรแม่เหล็ก ซึ่งจะเปลี่ยนไปเป็นค่าพลังงานในสนามแม่เหล็ก บางส่วนของพลังงานนี้จะเกิดการสูญเสียไปในรูปความร้อนในแกน

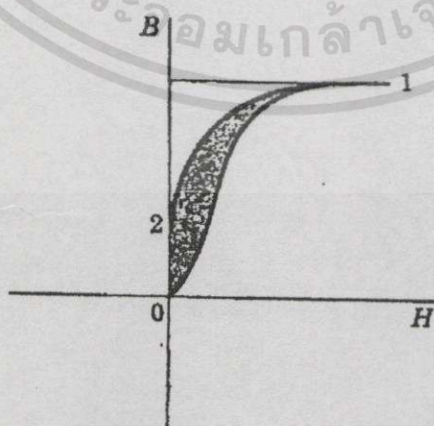
เหล็กและพลังงานส่วนที่เหลือจะอยู่ในรูปของกำลังงานทางไฟฟ้าเสมือนที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสลับไปมาของพลังงานสะสมในสนามแม่เหล็กในลักษณะการรับพลังงานและคายพลังงานกับแหล่งจ่าย ดังนั้นในวงจรแม่เหล็กขณะที่ใช้งานจะเกิดการสูญเสียเนื่องมาจากการเปลี่ยนรูปพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานแม่เหล็ก เรียกว่าการสูญเสียในแกนเหล็ก(core loss) ซึ่งประกอบไปด้วยการสูญเสีย 2 ส่วน ได้แก่ การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส(hysteresis loss) และการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน(eddy current loss) แสดงดังสมการที่ 3.4

$$P_c = P_{hys} + P_{ec} \quad (3.4)$$

การสูญเสียในแกนเหล็กของวงจรแม่เหล็กทุกชนิดจะถูกจ่ายทิ้งออกมาเป็นรูปพลังงานความร้อนซึ่งเป็นกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กภายในเวลาแต่ละรอบจะประกอบไปด้วยการสูญเสียจากฮิสเทอรีซิสและการสูญเสียจากกระแสไหลวนในสารแม่เหล็ก กำลังสูญเสียนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารแม่เหล็กที่ใช้ต่าง ๆ เช่น ความถี่ของระบบไฟฟ้า ส่วนผสมอัตราส่วนของซิลิกอน ความหนาแน่นของแผ่นเหล็ก เป็นต้น ซึ่งสามารถแยกค่าการสูญเสียในแกนเหล็กได้ดังนี้

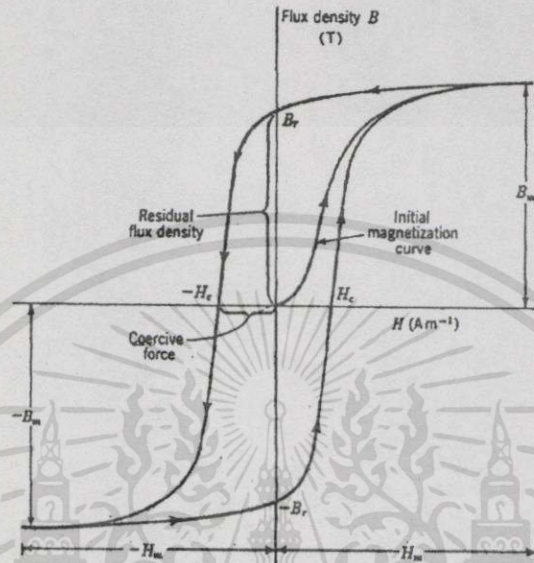
### 3.2.1.1 การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส

ถ้าวงจรแม่เหล็กประกอบขึ้นจากสารแม่เหล็กที่มีความสัมพันธ์ B-H ไม่เป็นเส้นตรง ขณะที่เพิ่มสนามแม่เหล็กจากค่าศูนย์ไปตามเส้นกราฟ 0-1 ดังรูปที่ 3.1 พื้นที่ระหว่างเส้นกราฟ 0-1 กับแกน B จะเป็นพลังงานที่จ่ายให้กับวงจรแม่เหล็ก ซึ่งเป็นพลังงานที่สะสมขณะเพิ่มสนามแม่เหล็กขึ้น ขณะที่ลดสนามแม่เหล็กลงตามเส้นกราฟ 1-2 จะมีการคายพลังงานออกมาเท่ากับพื้นที่ระหว่างเส้นกราฟ 1-2 กับแกน B (ซึ่งไม่ใช่แนวเดียวกับเส้นกราฟ 0-1) ความแตกต่างของพื้นที่ (พื้นที่ส่วนที่แรเงา 0-1-2-0) จะเป็นพลังงานที่สูญเสียไปในรูปของความร้อน



รูปที่ 3.1 แสดงการสูญเสียจากฮิสเทอรีซิส

เมื่อวงจรมแม่เหล็กถูกเพิ่มหรือลดสนามแม่เหล็กจาก  $B$  ไปเป็น  $-B$  สลับไปมา พลังงานที่สูญเสียไปในรูปของความร้อนจากฮิสเทอรีซิสจะขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ใช้งานและชนิดของสารแม่เหล็ก ซึ่งวงฮิสเทอรีซิสสามารถแสดงดังรูปที่ 3.2 และสมการค่าการสูญเสียจากฮิสเทอรีซิส (จากการทดลองโดย Steinmetz) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.5



รูปที่ 3.2 แสดงวงฮิสเทอรีซิส

$$P_{\text{hys}} = k_h \cdot f \cdot B_{\text{max}}^\sigma \tag{3.5}$$

(3.5)

เมื่อ

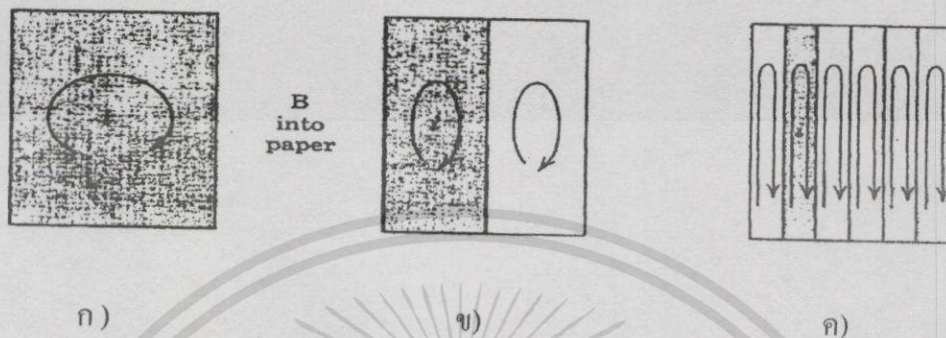
$$k_h = \eta \cdot V_{ol}$$

### 3.2.1.2 การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน

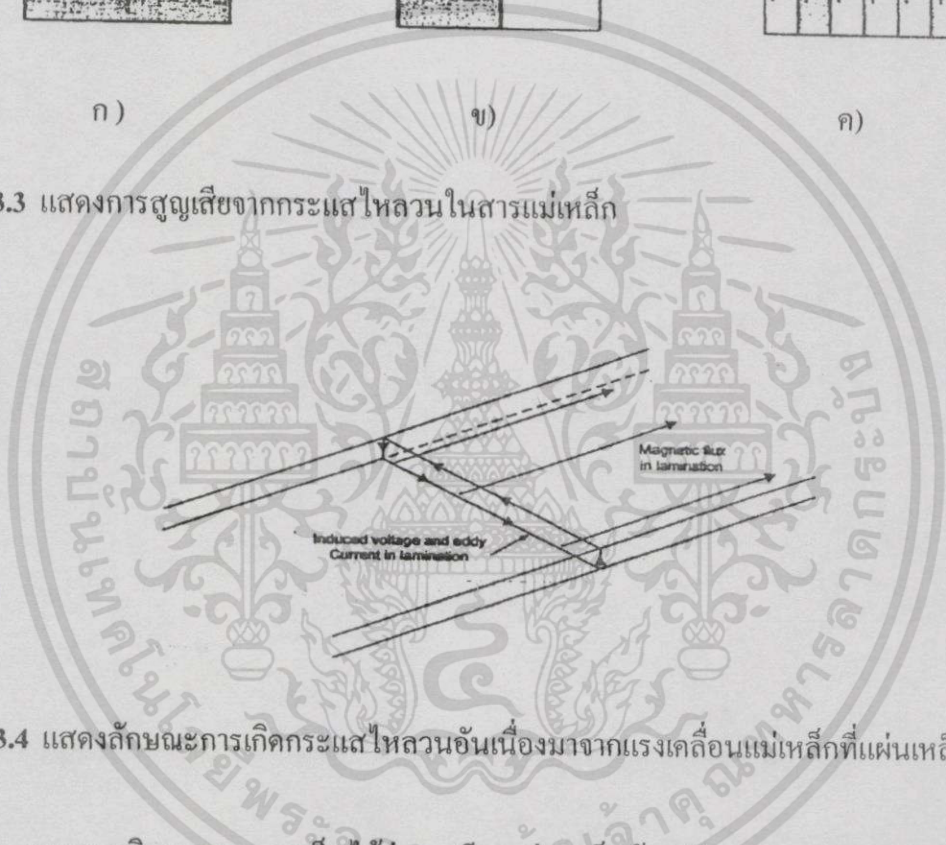
การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในสารแม่เหล็กเกิดขึ้นจากค่าการสูญเสียในรูปของ  $i^2R$  ซึ่งเกิดจากกระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นภายในสารแม่เหล็กเอง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก จากรูปที่ 3.3 ก เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับวงจรมแม่เหล็กจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นในแกนเหล็ก เส้นแรงแม่เหล็กจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดตามเวลาค่าความถี่ของระบบไฟฟ้าทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแกนเหล็ก เป็นผลทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำไหลวนภายในแกนเหล็ก ทำให้เกิดการสูญเสียในรูปของความร้อน ถ้าพิจารณารูปที่ 3.3 ข เป็นการใช้แผ่นเหล็ก 2 แผ่นเรียงซ้อนกันแทนที่จะเป็นแผ่นเหล็กตัน ดังนั้นจะเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแต่ละแผ่นเป็นครึ่งหนึ่งเมื่อเทียบกับกรณีแผ่นเหล็กตัน และความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นเหล็กแต่ละแผ่นจะมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้นหนึ่งเท่า จากรูป 3.3 ค สามารถให้เห็นถึงการเกิดกระแสไหลวนในแผ่นเหล็กบางอันเนื่องมาจากแรงเคลื่อนแม่เหล็กได้ ส่วนรูปที่ 3.4 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการเกิดกระแสไหลวนอันเนื่องมาจากแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่แผ่นเหล็กบาง



รูปที่ 3.3 แสดงการสูญเสียจากกระแสไหลวนในสารแม่เหล็ก



รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะการเกิดกระแสไหลวนอันเนื่องมาจากแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่แผ่นเหล็กบาง

จากการพิจารณา จะเห็นได้ว่าการเรียงแผ่นเหล็กซ้อนกันสามารถลดการสูญเสียจากกระแสไหลวนได้ ดังนั้นในการสร้างวงจรแม่เหล็กจึงนิยมทำเป็นแผ่นเหล็กบางเรียงซ้อนกัน(thin laminations) โดยแต่ละแผ่นจะถูกเคลือบด้วยฉนวนไฟฟ้า การสูญเสียจากกระแสไหลวนสามารถแสดงดังสมการที่ 3.6

$$P_{cc} = k_c \cdot f^2 \cdot B_{max}^2 \tag{3.6}$$

### 3.2.2 กำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงของขดลวด ( $I^2 R_{dc}$ )

การใช้ไฟฟ้ากระแสตรงนั้น จะถือว่าค่ากระแสที่ไหลในสายตัวนำจะเฉลี่ยการนำกระแสไฟฟ้าเท่าๆกันตามพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ โดยค่าความต้านทานกระแสตรง ( $R_{dc}$ ) จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวนำนั้น ๆ เป็นสำคัญ ซึ่งสามารถแสดงดังสมการที่ 3.7

$$R_{dc} = \frac{\rho \cdot L_{inc} \cdot T_{um}}{A_{rea}} \quad (3.7)$$

ดังนั้น เมื่อหาค่าความต้านทานของขดลวดแรงดันต่ำและขดลวดแรงดันสูงได้ ก็สามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานของลวดตัวนำได้ดังสมการที่ 3.8

$$P_{dc} = I_p^2 R_{p(d.c)} + I_s^2 R_{s(d.c)} \quad (3.8)$$

### 3.2.3 กำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับของขดลวด ( $I^2 R_{ac}$ )

จาก[34] ในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ จะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “สกินเอฟเฟค (Skin effect)” ซึ่งผลของการเกิดสกินเอฟเฟคที่เกิดขึ้นนี้ จะส่งผลทำให้เปรียบเสมือนว่ามีพื้นที่หน้าตัดของตัวนำที่ใช้งานให้กระแสผ่านได้น้อยลง ทำให้ค่ารีซิสแตนซ์กระแสสลับ ( $R_{ac}$ ) จะมีค่ามากกว่ารีซิสแตนซ์กระแสตรง ( $R_{dc}$ ) ของสายเสมอ ดังนั้นค่าความต้านทานจริงขณะใช้งานที่เกิดจากผลของสกินเอฟเฟค เรียกว่า “ค่าความต้านทานประสิทธิผล (effective resistance), ( $R_{eff}$ )” หรือที่เรียกว่าค่าความต้านทานกระแสสลับ ( $R_{ac}$ ) ที่ความถี่ไฟฟ้าใช้งานหนึ่ง ๆ นั้นเอง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.9

$$R_{eff} = R_{ac} = \frac{P_{loss}}{|I_{rms}|^2} \quad (3.9)$$

และค่าอัตราส่วนความต้านทานสกินเอฟเฟค สามารถแสดงดังสมการที่ 3.10

$$\text{Skin-Effect resistance ratio} = \frac{R_{ac}}{R_{dc}} = \frac{\text{effective ac resistance}}{\text{dc resistance}} \quad (3.10)$$

ซึ่งค่าอัตราส่วนนี้ จะมีค่าประมาณเท่ากับ 1 สำหรับสายพื้นที่หน้าตัดขนาดเล็กที่ไม่ใช่ตัวนำสารแม่เหล็ก(magnetic material) และใช้งานที่ความถี่พื้นฐานที่ 50 Hz แต่ค่าอัตราส่วนนี้จะมีค่าเพิ่มมากยิ่งขึ้น เมื่อตัวนำมีพื้นที่หน้าตัดขนาดใหญ่หรือเป็นตัวนำสารแม่เหล็กที่ดีหรือใช้งานที่ความถี่สูง

โดยที่ค่าอัตราส่วนของสกินเอฟเฟค-ความต้านทาน(Skin-Effect resistance ratio); ( $R_{ac}/R_{dc}$ ) ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างค่าความต้านทานกระแสสลับกับค่าความต้านทานกระแสตรงที่อุณหภูมิเดียวกัน จะเพิ่มมากยิ่งขึ้นตามค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็ก(permeability;  $\mu$ ) พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ(cross-section area of the conductor ; A) และความถี่ของระบบ (frequency ; Hz)

วิธีการประมาณค่า [Approximate Methods]

เป็นวิธีการหาค่าความต้านทานประสิทธิผลโดยการประมาณ จากการพิจารณาค่า  $mr$  อย่างหยาบ ๆ ซึ่งจะช่วยในการคำนวณได้สะดวกและรวดเร็วขึ้น

สำหรับตัวนำทองแดง สามารถหาค่า  $mr$  โดยการประมาณได้จาก

$$mr = 0.3\sqrt{fA} \quad (3.11)$$

เมื่อ A เป็นพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ ในหน่วย ตารางนิ้ว  
หรือ

$$mr = 11.8\sqrt{fA} \quad (3.12)$$

เมื่อ A เป็นพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ ในหน่วย ตารางเมตร

นั่นคือ สำหรับค่า  $mr$  จาก 0 ถึง 3 จะได้ค่า  $R_{eff}$  โดยประมาณ ได้ดังสมการที่ 3.13

$$R_{eff} = R_{dc} \left[ \frac{\left[ 1 + \frac{mr^4}{48} \right]^{\frac{1}{2}} + 1}{2} \right] \quad (3.13)$$

และสำหรับค่า  $mr$  ที่มากกว่า 3 สามารถแสดงได้ดังสมการ 3.14

$$R_{eff} = R_{dc} \left[ \frac{mr}{2\sqrt{2}} + 0.26 \right] \quad (3.14)$$

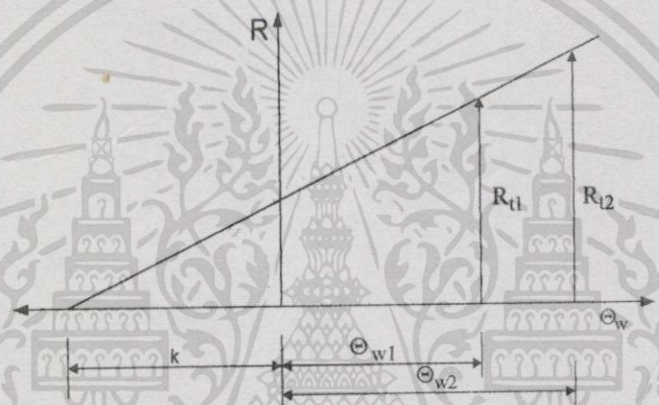
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น ค่ากำลังไฟฟ้ากระแสสลับของลวดตัวนำในหม้อแปลง สามารถแสดงได้ดัง สมการที่ 3.15

$$P_{ac} = I_p^2 R_{p(a.c)} + I_s^2 R_{s(ac)} \quad (3.15)$$

### 3.2.4 อุณหภูมิของตัวนำที่มีผลกับค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย

เมื่อค่ากำลังไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ  $I^2 R$  ซึ่งพบว่า ค่าความต้านทานของสารที่นำมาใช้เป็นตัวนำ จะมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากอุณหภูมิอีกด้วย และในช่วงอุณหภูมิปกติ การเปลี่ยนแปลงจะเป็นเส้นตรง(Linear) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 เมื่อให้ค่าความต้านทาน(R) อยู่ในแกนตั้งและค่าอุณหภูมิ( $\Theta_w$ ) อยู่ในแกนนอน จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 3.5 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของลวดตัวนำกับความต้านทานไฟฟ้า

จาก IEEE[1] หรือ IEC[7-8] จะสามารถแปลงเป็นสมการที่ 3.16

$$\frac{R_{t2}}{R_{t1}} = \frac{k + \Theta_{w2}}{k + \Theta_{w1}} \quad (3.16)$$

ค่าของ  $k$  เป็นอุณหภูมิที่ทำให้วัสดุแต่ละชนิดมีค่าความต้านทานเป็นศูนย์ เป็นค่าคงที่ โดยขึ้นอยู่กับชนิดของตัวนำ เช่น

$k = 234.5$  เมื่อเป็น annealed copper of 100% conductivity

$k = 241.7$  เมื่อเป็น hard-draw copper of 97.3% conductivity

$k = 228$  เมื่อเป็น hard-draw aluminum of 61% conductivity

ถ้าให้

$$\alpha_0 = \frac{1}{k}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย

$\alpha_0 = 0.00426$  unit per ที่  $0^\circ\text{C}$  สำหรับ annealed copper

$\alpha_0 = 0.0041$  unit per ที่  $0^\circ\text{C}$  สำหรับ hard-draw copper

$\alpha_0 = 0.00438$  unit per ที่  $0^\circ\text{C}$  สำหรับ hard-draw aluminum

$\alpha_0 = 0.00657$  unit per ที่  $0^\circ\text{C}$  สำหรับ hard-draw aluminum

$\alpha_0 = 0.00657$  unit per ที่  $0^\circ\text{C}$  สำหรับ iron

ดังนั้นจากสมการที่ 3.14 จะได้

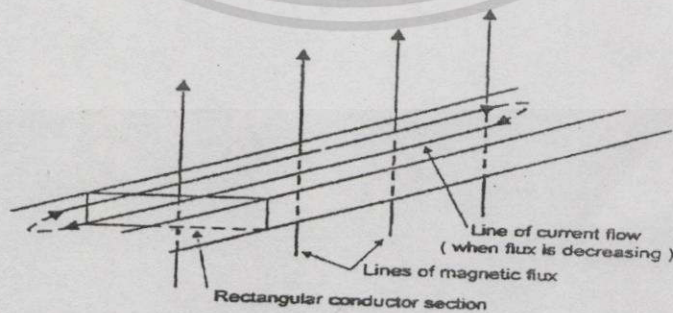
$$\frac{R_{t2}}{R_{t1}} = \frac{\frac{1}{\alpha_0} + \Theta_{w2}}{\frac{1}{\alpha_0} + \Theta_{w1}}$$

ซึ่งจะได้สมการของความต้านทานที่อุณหภูมิใด ๆ ดังสมการที่ 3.17

$$R_t = R_{t0}(1 + \alpha_0 \Theta_w) \quad (3.17)$$

### 3.2.5 กำลังสูญเสียจากกระแสไหลวนในขดลวดเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กรั่วไหล (leakage field)

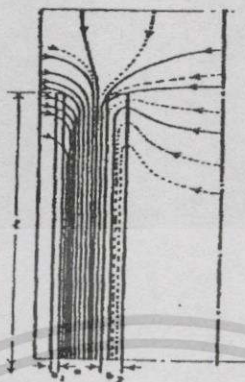
กำลังสูญเสียจากกระแสไหลวนในขดลวดเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กรั่วไหลจะขึ้นอยู่กับลักษณะการพันขดลวด, ขนาดของตัวนำ, จำนวนตัวนำ แรงดันที่เกิดขึ้นในตัวนำต่าง ๆ จะมีขนาดไม่เท่ากัน ซึ่งแรงดันนี้จะทำให้เกิดกระแสไหลวนที่ตัวนำ ซึ่งกระแสไหลวนนี้จะทำให้เกิดค่ากำลังสูญเสียดังกล่าวจะแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงการเกิดกระแสไหลวนในขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

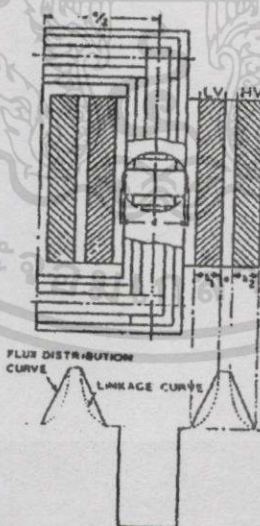
การประมาณค่ารีแอกแตนซ์รั่ว ซึ่งเป็นการประมาณการกระจายของเส้นแรงแม่เหล็กรั่ว และผลของเส้นแรงแม่เหล็กที่มีต่อขดลวดแรงดันสูงและแรงดันต่ำแสดงดังภาพที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงไดอะแกรมการกระจายของเส้นแรงแม่เหล็กรั่ว

สนามแม่เหล็กรั่วจากภาพ ประกอบด้วยสนามแม่เหล็ก 2 ส่วน ดังนี้

1. สนามแม่เหล็กในร่องน้ำมัน(oil duct) ระหว่างขดลวดแรงดันสูงและขดลวดแรงดันต่ำ มีค่าคงที่ และมีความเข้มสม่ำเสมอ (uniform) โดยมีเส้นแรงแม่เหล็กไปตามแนวตั้ง(longitudinal flux)
2. สนามแม่เหล็กที่มีเส้นแรงแม่เหล็กคดโค้งขดลวด (flux linking) โดยมีความเข้มลดลงเป็นเชิงเส้น (linearly) จากค่าสูงสุดจนกระทั่งเป็นศูนย์ที่พื้นผิวภายนอกและภายในของขดลวดแรงดันสูงและแรงดันต่ำ ดังแสดงในภาพที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงไดอะแกรมเส้นแรงแม่เหล็กรั่วของหม้อแปลงชนิดคอร์

พิจารณาจากภาพ เปอร์เซนต์รีแอกแตนซ์รั่วระหว่างขดลวดแรงดันสูงและแรงดันต่ำ สามารถคำนวณได้จากสมการ 3.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X = \left\{ \frac{2 \pi \mu_0 I_{mt} AT}{IE_t} \right\} \times \left[ a + \frac{(b_1 + b_2)}{3} \right] \quad (3.18)$$

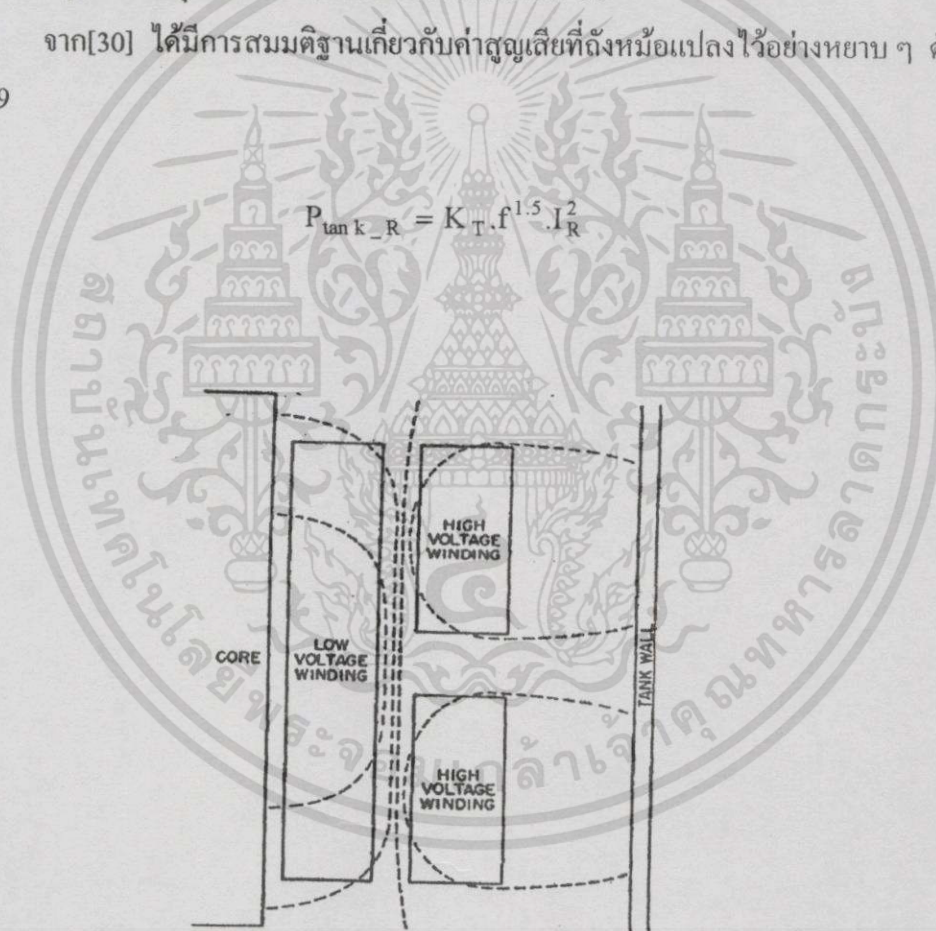
### 3.2.6 กำลังไฟฟ้าสูญเสียปลีกย่อยอันเนื่องมาจากเส้นแรงแม่เหล็กปลีกย่อย (stray flux)

#### ในอุปกรณ์จับยึดโครงสร้างหม้อแปลง

กำลังสูญเสียส่วนนี้ส่วนนี้เกิดขึ้นในส่วนที่เป็นอุปกรณ์ที่เป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก รั่ว เช่น ถัง, น๊อตยึดประกอบ โครงสร้างหม้อแปลง, แคลมป์ยึด, ตรีบระบายความร้อน, ถังพักน้ำมัน เป็นต้น การคำนวณหาค่าค่าสูญเสียปลีกย่อยนี้ค่อนข้างจะยากลำบากมาก เพราะจะต้องคำนึงถึงรูปร่างของโครงสร้าง, ความต้านทาน(resistivity)ของวัสดุ และค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็ก(permeability)ของวัสดุร่วมด้วย โดยยกตัวอย่างดังภาพที่ 3.9

จาก[30] ได้มีการสมมติฐานเกี่ยวกับค่าสูญเสียที่ถึงหม้อแปลงไว้อย่างหยาบ ๆ ดังสมการที่ 3.19

$$P_{\tan k_R} = K_T \cdot f^{1.5} \cdot I_R^2 \quad (3.19)$$



รูปที่ 3.9 แสดงเส้นปะเป็นการแสดงทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กรั่วตามแนวรัศมีของขดลวดแบบขดลวดไม่สมมาตร ไปยังผนังถังหม้อแปลงและส่วนอื่น ๆ

สำหรับการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในขดลวด และการสูญเสียปลั๊กย่อย สามารถหาได้จากการปฏิบัติและทดลอง โดยกำหนดเป็นแฟคเตอร์ของการสูญเสีย  $I_{rms}^2 R$  ในขดลวด ( $\xi$ ) มีค่าประมาณ 8% ของการสูญเสีย  $I^2 R$  ในขดลวด ดังนั้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดขณะมีโหลดคำนวณจากสมการที่ 3.20

$$P_{LL} = I_{rms}^2 R_{d.c} + (\xi \cdot I_{rms}^2 R_{dc}) \quad (3.20)$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดของหม้อแปลงจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ โดยอ้างอิงที่อุณหภูมิเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส

### 3.3 การพิจารณาค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะมีฮาร์โมนิก

#### 3.3.1 ค่าความสูญเสียต่อหน่วย (Per unit)

จาก[5] กระแสไฟฟ้าไหลคมีค่าความเกี่ยวข้องเป็นอย่างมากที่ทำให้เกิดความร้อนเกินในขดลวด จะเป็นความสะดวกที่จะพิจารณาความหนาแน่นของความสูญเสียในขดลวดบนพื้นฐานต่อหน่วย (PU)

ดังนั้น สมการที่ 3.2 ถัดที่พิกัด (rated) และทำให้อยู่ในรูป Per Unit หรือ P.U. จะได้ผลลัพธ์ดังสมการที่ 3.21

$$P_{LL\_R}(p.u.) = 1 + P_{ecw\_R}(p.u.) + P_{OSL\_R}(p.u.) \quad (3.21)$$

กำหนดให้ความสูญเสียของกระแสไหลวน ภายใต้เงื่อนไขพิกัด (rated) ของขดลวดหม้อแปลง หรือส่วนของขดลวดที่กระแสฮาร์โมนิก สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.22

$$P_{ecw} = P_{ecw\_R} \sum_{h=1}^{h=\max} \left[ \frac{I_h}{I_R} \right]^2 \cdot h^2 \quad (3.22)$$

สมการที่ 3.20 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปต่อหน่วย (P.U.) ได้ดังสมการที่ 3.23

$$P_{ecw}(p.u.) = P_{ecw\_R}(p.u.) \sum_{h=1}^{h=\max} [I_h(p.u.)]^2 \cdot h^2 \quad (3.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสูญเสีย  $I^2R$  ที่พิกัดโหลด 1 หน่วย หรือ 1 P.U. ตามนิยามนั้นจะเปลี่ยนไปเมื่อกระแสโหลดไม่เป็นชานซ์ ถ้ากระแสโหลดประสิทธิผล ( $I_{rms}$ ) ที่ไม่เป็นชานซ์มีค่าต่างกันออกไปจากค่า 1 P.U. ค่ากระแสโหลดประสิทธิผล ( $I_{rms}$ ) สามารถหาได้ดังสมการที่ 3.24

$$I_{rms}^2 = \sum_{h=1}^{h=\max} (I_h)^2 \quad (3.24)$$

เขียนในรูปต่อหน่วย ดังสมการที่ 3.25

$$[I_{rms} (p.u.)]^2 = \sum_{h=1}^{h=\max} [I_h (p.u.)]^2 \quad (3.25)$$

### 3.3.2 การคำนวณความเทียบเท่าความสามารถของหม้อแปลงโดยใช้ข้อมูลที่ออกแบบ ความสูญเสียของกระแสไหลวน

ความสูญเสียของกระแสไหลวนในช่วงของความหนาแน่นของความสูญเสียสูงสุด ซึ่งกำหนดในระบบ 50 Hz หรือ 60 Hz ที่กระแสพิกัด โดยผู้ผลิตหม้อแปลงจะกำหนดค่า  $P_{OSL\_R}$  มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นสามารถแสดงดังสมการที่ 3.26

$$P_{LL\_R} (p.u.) = 1 + P_{ecw\_R} (p.u.) \quad (3.26)$$

และจะได้ค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลดต่อหน่วย ดังสมการที่ 3.27

$$P_{LL} (p.u.) = 1 + P_{ecw} (p.u.) \quad (3.27)$$

แทนค่าจากสมการที่ 3.23 ลงในสมการที่ 3.27 จะได้ดังสมการที่ 3.28

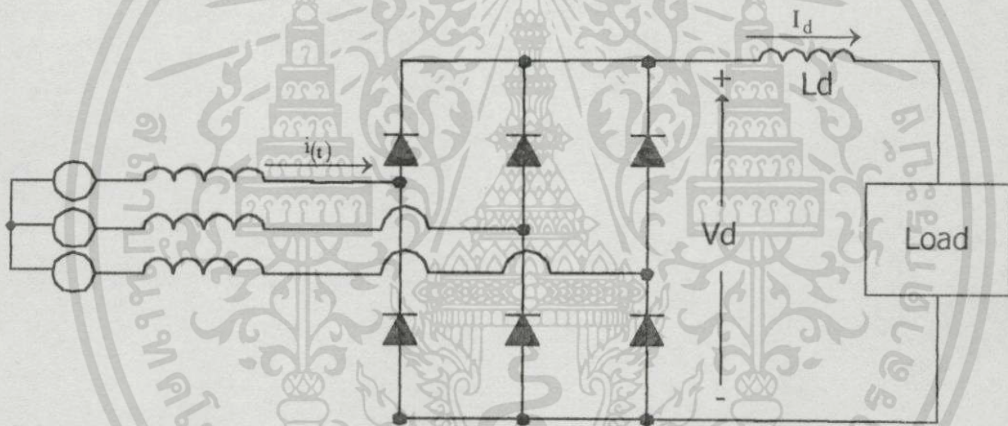
$$P_{LL} (p.u.) = 1 + P_{ecw} (p.u.) \sum_{h=1}^{h=\max} [I_h (p.u.)]^2 \cdot h^2 \quad (3.28)$$

ค่าต่อหน่วย (P.U.) ของกระแสไม่เป็นชานซ์ จะทำให้ผลลัพธ์การคำนวณในสมการที่ 3.28 เท่ากับค่าออกแบบของความหนาแน่นการสูญเสียในย่านนี้มีค่าสูญเสียสูงกว่าค่าที่ความถี่พื้นฐานที่การทำงานกระแสพิกัด ซึ่งจะได้ค่ากระแสสูงสุดต่อหน่วย ซึ่งมีค่าเท่ากับ THDF ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.29

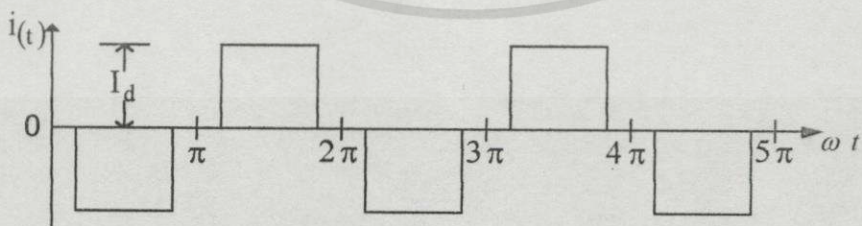
$$\text{Derating} = \text{THDF} = I_{\max} (\text{p.u.}) = \sqrt{\frac{P_{\text{LL-R}} (\text{p.u.})}{P_{\text{LL}} (\text{p.u.})}} = \frac{\sqrt{2}}{\text{CF}} = \sqrt{2} \times \left( \frac{\text{RMS}}{\text{PEAK}} \right) \quad (3.29)$$

### 3.4 ความผิดเพี้ยนของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเมื่อโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

จาก[36, 37] โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้กันมากในปัจจุบันได้แก่โหลดที่ได้รับไฟผ่านเรกติไฟายเออร์มา ชนิดของเรกติไฟเออร์ที่จะใช้ในการทดสอบในวิทยานิพนธ์นี้เป็นแบบบริดจ์ 3 เฟส 6 พัลส์ ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โหลดซึ่งรับไฟรวมทั้งระบบการเรกติไฟายนั้นจะมีผลต่อแหล่งจ่ายไฟหรือเป็นจะเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของวงจรทางด้านกระแสตรงมาก ความเหนี่ยวนำที่ต่ออยู่นั้นจะทำให้สัญญาณกระแสตรงเรียบมากขึ้น และค่าความผิดเพี้ยนจากขายน้ของกระแสกลับเนื่องจากการใช้เรกติไฟายเออร์และตัวเหนี่ยวนำที่มีขนาดใหญ่แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงวงจรการต่อเรกติไฟเออร์ 3 เฟส 6 พัลส์ ร่วมกับโหลดความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำขนาดใหญ่



รูปที่ 3.11 แสดงสัญญาณของวงจรเรกติไฟเออร์ 3 เฟส 6 พัลส์ ร่วมกับโหลดความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำขนาดใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.11 กระแสสลับมีลักษณะเป็นแบบคลื่นสแควร์ ซึ่งเป็นคลื่นที่ผิดเพี้ยนจากคลื่นไซน์ ซึ่งเมื่อแยกคลื่นออกโดยใช้หลักการวิเคราะห์ฟูรีเยร์ จะได้คั้งสมการที่ 3.30

$$i_a = I_1 \left( \cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t - \frac{1}{17} \cos 17\omega t + \frac{1}{19} \cos 19\omega t - \dots \right) \quad (3.30)$$

เมื่อ

$$I_1 = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d$$

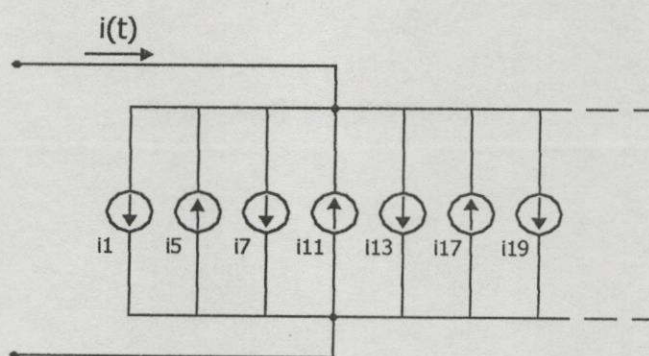
จากรูปของคลื่นของกระแสที่ได้สามารถบอกถึงลำดับฮาร์โมนิกได้ว่าจะมีค่าเท่ากับสมการที่ 3.31 ซึ่งสามารถแสดงอันดับและขนาดของฮาร์โมนิกได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 และสามารถเขียนเป็นวงจรมุมดังรูปที่ 3.12 ซึ่งเป็นช่วงเวลา  $t = 0^+$

$$h = 6M \pm 1 \quad (3.31)$$

ตารางที่ 3.1 แสดงอันดับและขนาดของฮาร์โมนิกที่อันดับต่าง ๆ สัญลักษณ์ของวงจรรคคิไฟเออร์ 3 เฟส 6 พัลส์ ร่วมกับโหลดความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำขนาดใหญ่

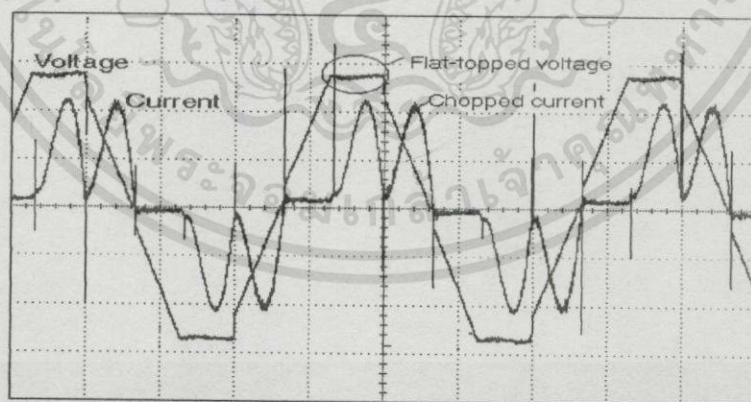
ฮาร์โมนิก	ขนาด (per unit)
ความถี่ปกติ (fundamental)	1
5	00.2
7	0.142
11	0.091
13	0.077
17	0.0589
19	0.0526

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 แสดงวงจรสมมูลแทนกระแสฮาร์โมนิกของเรกติฟายเออร์แบบ 3 เฟส 6 พัลส์

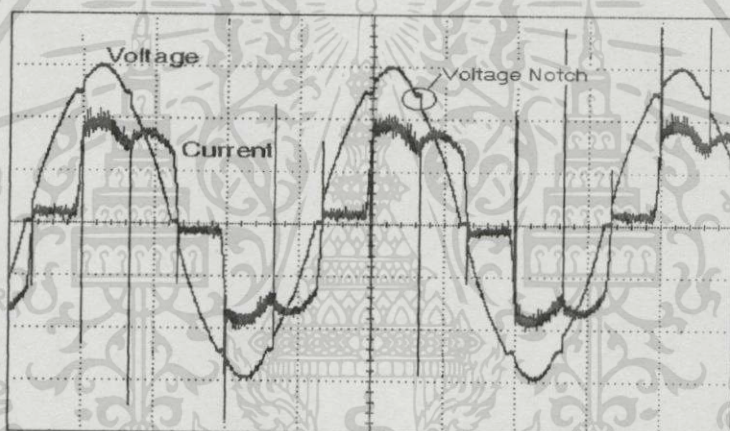
ในกรณีที่ต้องการให้สัญญาณกระแสทางด้านโหลดมีสัญญาณที่เรียบขึ้น โดยการนำตัวเก็บประจุมาต่อขนานโหลดนั้น กระแสไฟสลับทางด้านขาเข้าวงจรเรกติฟายเออร์จะไหลได้เฉพาะช่วงที่แรงดันไฟฟ้าสูงสุดเท่านั้นในช่วงครึ่งไซเคิล จะทำให้เกิดสัญญาณกระแสทางด้านขาเข้าวงจรเรกติฟายเออร์เป็นกระแสแบบตัด(chopped current) และสัญญาณแรงดันไฟสลับขาเข้าวงจรเรกติฟายเออร์จะมีค่าความผิดเพี้ยนจากสัญญาณชาน์เกิดขึ้น ซึ่งลักษณะรูปคลื่นนี้จะมียอดแบนราบ(Flat-topped) สาเหตุเพราะกระแสไหลได้เฉพาะช่วงของครึ่งไซเคิลที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของแหล่งจ่ายขาเข้าวงจรเรกติฟายเออร์มีค่ามากกว่าแรงดันไฟตรงที่โหลดตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ ถ้าตัวเก็บประจุมีขนาดค่าความจุมากก็จะทำให้กระแสไฟตรงที่โหลดนั้นราบเรียบยิ่งขึ้น และสัญญาณกระแสสลับทางด้านขาเข้าวงจรเรกติฟายเออร์มีความกว้างที่แคบแต่จะมีขนาดที่สูงขึ้น ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.13



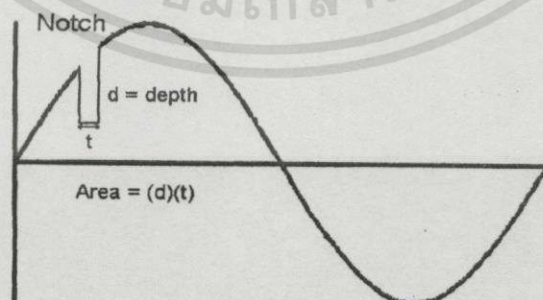
รูปที่ 3.13 แสดงสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแสทางเข้าวงจรเรกติฟายเออร์ 3 เฟส 6 พัลส์ เมื่อโหลดเป็นตัวความต้านทานและตัวเก็บประจุ(D.C.)ต่อขนานกัน

ในกรณีที่ไม่ได้มีการใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเพื่อทำให้กระแสไฟตรงเรียบนั้น ทางด้านกระแสสลับจากแหล่งจ่ายไฟก็มีค่าความผิดเพี้ยนจากฮาร์โมนิก (distortion) น้อย ถ้าเป็นวงจรเรกติไฟเออร์แบบเฟสเดียว เมื่อจ่ายโหลดที่เป็นตัวต้านทานเพียงอย่างเดียวตัวสัญญาณกระแสสลับก็ไม่มีค่าความผิดเพี้ยนเกิดขึ้น ค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณฮาร์โมนิกที่แหล่งจ่ายเนื่องจากการใช้เรกติไฟเออร์ที่มากที่สุดก็คือสัญญาณ 3 เฟส ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.14

ค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณฮาร์โมนิกของสัญญาณที่แหล่งจ่ายไฟอันเนื่องมาจากวงจรไทรริสเตอร์ ก็มีสาเหตุอีกประการหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า คอมมูเตชันนอช (commutation notch) ซึ่งจะเกิดขึ้นทุกๆ ครั้ง ไซเคิลในแต่ละเฟสของเรกติไฟเออร์ 3 เฟส แบบ 6 พัลส์ ซึ่งช่วงกว้างของเวลาที่เกิดรอยบากของสัญญาณแรงดัน แสดงได้ดังรูปที่ 3.15 ซึ่งช่วงเวลาที่เกิดรอยบากนี้ได้มีรายละเอียดใน IEEE 519 [6]



รูปที่ 3.14 แสดงสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแสทางเข้าวงจรเรกติไฟเออร์ 3 เฟส 6 พัลส์ เมื่อโหลดเป็นตัวความต้านทาน



รูปที่ 3.15 แสดงการเกิดโวลต์เตจ นอช ในช่วงขณะคอมมิวเตชัน

การหาค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณต่าง ๆ จะสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

1. Total Harmonic Voltage Distortion (THD<sub>v</sub>) หรือ Distortion Voltage Factor (DF<sub>v</sub>)

คือค่าที่บอกว่าแรงดันที่พิจารณาผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นแรงดันอุดมคติมากน้อยเพียงใด หรือค่าแรงดันที่พิจารณามีส่วนประกอบของแรงดันฮาร์โมนิกอยู่เท่าใด ซึ่งสามารถแสดงดังสมการที่ 3.32

$$\text{THD}_v = \text{DF}_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100\% \quad (3.32)$$

2. Total Harmonic Current Distortion (THD<sub>i</sub>) หรือ Distortion Current Factor (DF<sub>i</sub>)

คือค่าที่บอกว่ากระแสที่พิจารณาผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นกระแสอุดมคติมากน้อยเพียงใด หรือค่ากระแสที่พิจารณามีส่วนประกอบของกระแสฮาร์โมนิกอยู่เท่าใด ซึ่งสามารถแสดงดังสมการที่ 3.33

$$\text{THD}_i = \text{DF}_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100\% \quad (3.33)$$

### 3.5 หม้อแปลงพิกัด เค-แฟคเตอร์ (K-Factor Rated Transformer)

Underwriters Laboratory (UL) และผู้ผลิตหม้อแปลงได้กำหนดวิธีการกำหนดพิกัด เรียกว่า K-Factor สำหรับหม้อแปลงที่แบบแห้งแล้ว พิกัดดังกล่าวจะเป็นตัวชี้ถึงความเหมาะสมในการใช้กับกระแสโหลดประเภทไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ (Non-sinusoidal load currents) ค่า K-Factor สัมพันธ์กับความสามารถในการรับโหลดประเภทไม่เป็นเชิงเส้น โดยหม้อแปลงไม่ร้อนเกินพิกัดอุณหภูมิที่กำหนดไว้ วิธี K-Factor อยู่บนพื้นฐานของค่าความสูญเสียที่คาดเดาไว้ได้ โดยกำหนดวิธีการคำนวณในรูปอย่างง่าย ๆ ค่าตัวประกอบที่ขีดจำกัดมีความสัมพันธ์กับความร้อนเกินที่เกิดจากความสูญเสียของกระแสไหลวนในขดลวด

ค่า K-factor ได้ถูกกำหนดบนพื้นฐานต่อหน่วย (P.U.) ดังสมการที่ 3.34

$$K - \text{Factor} = \frac{\sum_{h=1}^{h=\max} [I_h (\text{p.u.})]^2 \cdot h^2}{\sum I_h^2} = \frac{\sum f_h^2 \cdot h^2}{\sum f_h^2} = \frac{\sum I_h^2 \cdot h^2}{I_{\text{rms}}^2} \quad (3.34)$$

เมื่อ

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (3.35)$$

พิกัดมาตรฐานของพิกัด K-Factor คือ 4, 9, 13, 20, 30, 40 และ 80 กระแสในสมการที่ 3.34 ได้กำหนดไว้บนพื้นฐานต่อหน่วย เพื่อที่ว่าผลรวมของผลคูณของกระแสแต่ละตัวคูณกับตัวเลขฮาร์โมนิก แล้วยกกำลังของผลคูณจะมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นสำหรับโหลดแบบเชิงเส้น K-Factor มีค่าเป็น 1 เสมอไป

สำหรับโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่กำหนดให้ ถ้าทราบกระแสฮาร์โมนิกแต่ละตัว ก็สามารถคำนวณ K-Factor ได้ และนำไปเปรียบเทียบกับค่า K-Factor ที่แผ่นป้ายชื่อหม้อแปลง (Nameplate) ของหม้อแปลงที่ใช้งาน ตราบใดที่ค่า K-Factor ที่โหลดมีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่าที่ K-Factor ของหม้อแปลง หม้อแปลงตัวที่ใช้งานนั้น ไม่จำเป็นต้องสัดพิกัดตัวเอง

ตัวอย่างการคำนวณหา K-Factor จากข้อมูลกำหนดให้ วงจรเรกติไฟเออร์แบบควบคุม (Controlled Rectifier) มีฮาร์โมนิกดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงลำดับฮาร์โมนิกกับขนาดของฮาร์โมนิก

ลำดับฮาร์โมนิก	ขนาดกระแส (%)
Fundamental	100
5	20.0
7	14.2
11	9.1
13	7.7

ดังนั้น

$$\text{ผลรวมของกระแสประสิทธิผล} = \sqrt{100^2 + 20^2 + 14.2^2 + 9.1^2 + 7.7^2} = 104$$

ดังนั้น

$$\text{K-Factor} = \left(\frac{100}{104}\right)^2 + \left[\left(\frac{20}{104}\right)^2 \cdot 5^2\right] + \left[\left(\frac{14.2}{104}\right)^2 \cdot 7^2\right] + \left[\left(\frac{9.1}{104}\right)^2 \cdot 11^2\right] + \left[\left(\frac{7.7}{104}\right)^2 \cdot 13^2\right] = 4.62$$

จะเห็นว่า พิกัดมาตรฐาน K-Factor ที่จะเลือกคือ 13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก[25-27] ได้มีการสำรวจค่า K-factor ของโหลดที่มีใช้ในปัจจุบันดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงผลสรุป ค่า K-factor ของโหลดชนิดต่าง ๆ

Load	K - factor
Incandescent lighting	K-1
Electric resistance heating	K-1
Motor(without solid state drives)	K-1
Control transformer/electro magnetic control drives	K-1
Motor-generators (without solid state drive)	K-1
Distribution transformers	K-1
Electric-discharge lighting	K-4
UPS w/ optional input filtering	K-4
Welders	K-4
Induction heating equipment	K-4
PLCs and solid state controls(other than variable speed drives)	K-4
Telecommunications equipment (e.g. PBX)	K-13
UPS without input filtering	K-13
Multiwire receptacle circuits in general care areas of heat care facilities and classroom of schools etc.	K-13
Multiwire receptacle circuits supplying inspection or testing equipment on an assembly or production line	K-13
Main-frame computer loads	K-20
Solid state motor drives (variable speed drive)	K-20
Multiwire receptacle circuit in critical care areas and operating/recovery rooms of hospitals	K-20
Multiwire receptacle circuit in industrial , medical ,and educational laboratories	K-30
Multiwire receptacle circuit in commercial office spaces	K-30
Small main frames (mini and micro)	K-30
Other loads identified as producing very high amounts of harmonics	K-40

เมื่อ UL ได้มีการกำหนดค่า ดัชนีของพิกัดโหลด K (INDEX OF LOAD K-RATINGS,  $I_{LK}$ ) จุดประสงค์เพื่อต้องการออกแบบแหล่งจ่ายให้มีความสามารถในการรับโหลดมีฮาร์โมนิกร่วมอยู่ด้วย ซึ่งจะคำนึงถึงการทำงานที่อุณหภูมิของแหล่งจ่ายไม่เกินค่าที่จำกัดไว้ ได้แสดงค่าความสัมพันธ์ของ พิกัด K-Factor กับดัชนีของพิกัดโหลด K ไว้ดังตารางที่ 3.4

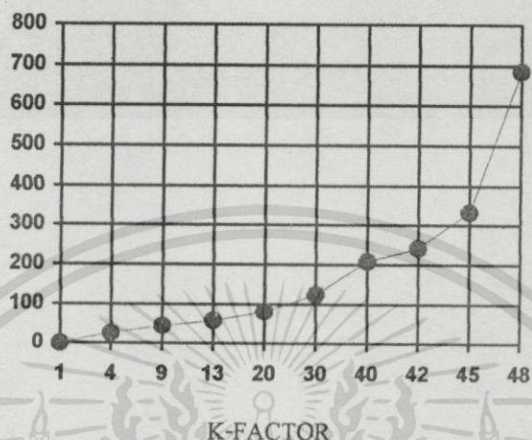
ตารางที่ 3.4 แสดงพิกัด K-Factor และดัชนีของพิกัดโหลด K

K-FACTOR	$I_{LK}$	K-FACTOR	$I_{LK}$	K-FACTOR	$I_{LK}$
K-1	0.0	K-17	70.71	K-33	141.42
K-1.5	10.60	K-17.5	72.37	K-33.5	144.80
K-2	14.59	K-18	74.05	K-34	148.32
K-2.5	17.96	K-18.5	75.75	K-34.5	152.00
K-3	20.85	K-19	77.46	K-35	155.84
K-3.5	23.44	K-19.5	79.19	K-35.5	159.86
K-4	25.82	K-20	80.94	K-36	164.08
K-4.5	28.04	K-20.5	82.72	K-36.5	168.52
K-5	30.15	K-21	84.52	K-37	173.21
K-5.5	32.16	K-21.5	86.34	K-37.5	178.15
K-6	34.10	K-22	88.19	K-38	183.40
K-6.5	35.97	K-22.5	90.07	K-38.5	188.98
K-7	37.80	K-23	91.99	K-39	194.94
K-7.5	39.58	K-23.5	93.93	K-39.5	201.31
K-8	41.32	K-24	95.92	K-40	208.17
K-8.5	43.03	K-24.5	97.94	K-40.5	215.57
K-9	44.72	K-25	100.00	K-41	223.61
K-9.5	46.39	K-25.5	102.11	K-41.5	232.38
K-10	48.04	K-26	104.26	K-42	242.02
K-10.5	49.67	K-26.5	106.46	K-42.5	252.68
K-11	51.30	K-27	108.71	K-43	264.58
K-11.5	52.92	K-27.5	111.02	K-43.5	277.98
K-12	54.52	K-28	113.39	K-44	293.24
K-12.5	56.13	K-28.5	115.82	K-44.5	310.91
K-13	57.74	K-29	118.32	K-45	331.66
K-13.5	59.34	K-29.5	120.89	K-45.5	356.57
K-14	60.94	K-30	123.54	K-46	387.30
K-14.5	62.55	K-30.5	126.28	K-46.5	426.61
K-15	64.17	K-31	129.10	K-47	479.58
K-15.5	65.79	K-31.5	132.02	K-47.5	556.78
K-16	67.42	K-32	135.04	K-48	685.57
K-16.5	69.06	K-32.5	138.17	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำค่าความสัมพันธ์ของ พิกัด K-Factor กับดัชนีของพิกัดโหลด K นำมาทำการเขียนกราฟ จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3.16

## INDEX



รูปที่ 3.16 แสดงความสัมพันธ์ของ พิกัด K-Factor กับดัชนีของพิกัดโหลด K

ตัวอย่าง การประยุกต์นำค่าของ พิกัด K-Factor กับดัชนีของพิกัดโหลด K ไปใช้งาน แสดงได้ดังนี้ เมื่อต้องการออกแบบระบบไฟฟ้ากำลัง โดยมีรายการโหลดต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.5 จะต้องเลือกหม้อแปลงที่มีค่า K-Factor เท่าใด

ตารางที่ 3.5 แสดงตัวอย่างการคำนวณหาค่า KVA- $I_{LK}$  จากโหลดต่าง ๆ

รายการของโหลด	ขนาด(kVA)	$I_{LK}$	$(KVA \times I_{LK}) = KVA - I_{LK}$
Discharge lighting	7.0	25.82	180.74
Receptacle circuits	2.0	123.54	247.08
Main fram computers	5.0	80.94	404.70
Motor w/drive	0.5	80.94	40.47
Motor w/o drive	1.5	0.00	0.00
Total	16.0	-	872.99

เมื่อ

$$\begin{aligned} \text{Average } I_{LK} &= (\text{Total KVA} - I_{LK}) / \text{Total kVA} \\ &= 872.99 / 16 \\ &= 54.56 \end{aligned}$$

จากตาราง 3.4 ที่  $I_{LK} = 54.56$  ไม่มี ดังนั้นจะเลือกให้มีค่ามากกว่าจะได้  $I_{LK} = 57.74$

ซึ่งให้ค่า K-Factor ที่ 13 ดังนั้นการออกแบบระบบจะต้องเลือกหม้อแปลงที่มีค่า K-Factor = 13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 วิธีการทดสอบหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียแบบต่าง ๆ

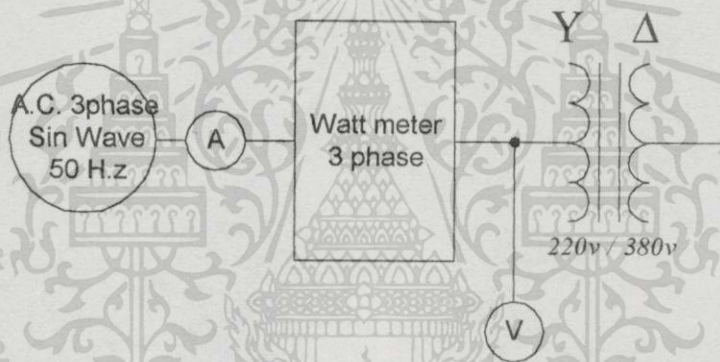
ในการทดสอบหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของแต่ละวิธี ซึ่งจะแยกกล่าวได้ดังต่อไปนี้

#### 3.6.1 การทดสอบหาค่ากำลังสูญเสียโดยวิธีการเปิดวงจรและลัดวงจร

การทดสอบหาค่ากำลังสูญเสียแบบนี้เป็นวิธีที่ประหยัดไม่เสียค่าใช้จ่ายมากนัก การหาสูญเสียรวม ( $P_T$ ) ซึ่งเกิดจากการทดสอบได้จาก 2 ขั้นตอน

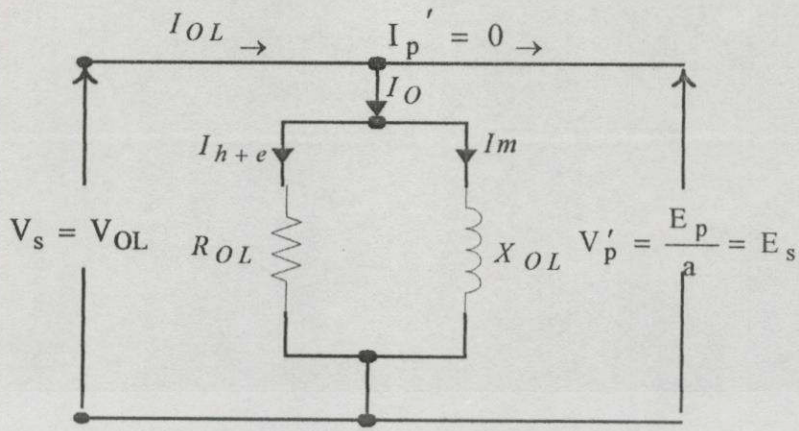
##### 3.6.1.1 โดยการเปิดวงจรหรือตอนที่หม้อแปลงไม่มีภาระ (Open circuit, No load test)

จุดประสงค์ของการทดสอบนี้ก็เพื่อหาส่วนสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก(Core loss) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 แสดงวงจรเส้นเดียวของหม้อแปลง 3 เฟส ขณะทดสอบแบบเปิดวงจร

การทดสอบนี้อาจจะวัดหรือเปิดวงจรทางด้านใดด้านหนึ่งก็ได้ จากรูปนี้เป็นการติดตั้งเครื่องมือวัดต่าง ๆ ทางด้านแรงดันต่ำและเปิดวงจรทางด้านแรงดันสูง สาเหตุก็เพื่อสะดวกกับการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าและเครื่องมือวัดที่จะทำการทดสอบที่มีระดับแรงดันต่ำได้ ในขณะที่ทำการทดสอบนั้นจะทำการจ่ายค่าแรงดันไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงที่ระดับพิกัดของหม้อแปลง จากการทดสอบจะเห็นว่าค่าแรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของทางด้านแรงต่ำมีค่าน้อยมาก ฉะนั้นจึงอาจจะตัดทิ้งไปได้ และอาจเขียนวงจรสมมูลขณะทำการทดสอบนี้ได้ดังรูปที่ 3.18 ซึ่งเป็นวงจรสมมูลทั้งหมดที่คิดอยู่ทางด้านแรงดันต่ำเท่านั้น

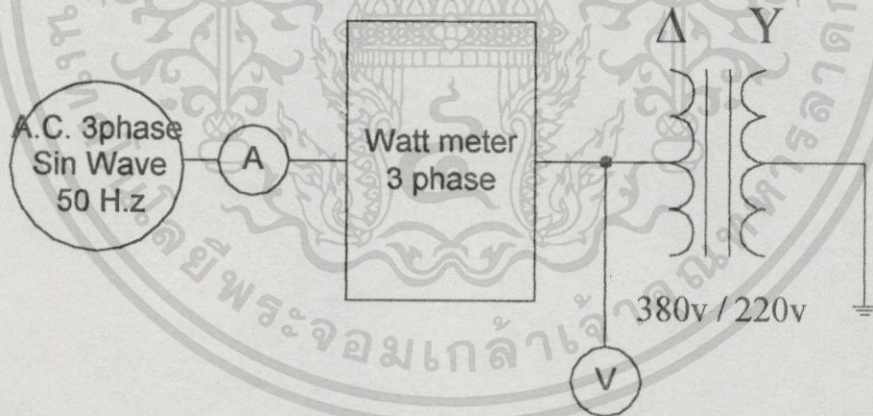


รูปที่ 3.18 แสดงวงจรสมมูลของหม้อแปลงขณะทดสอบแบบเปิดวงจร

จากรูปวงจรสมมูลจะเห็นได้ว่าค่ากำลังสูญเสียที่วัดได้จากวัตต์มิเตอร์นั้นก็คือค่าสูญเสียที่แกนเหล็ก(Core loss,  $P_C$ )

2. โดยการตัดวงจรหม้อแปลง (Short circuit , impedance loss test)

จุดประสงค์ของการทดสอบนี้ ก็เพื่อหาส่วนสูญเสียขณะที่มีหม้อแปลงมีการะ (Loss loss ,  $P_{LL}$ ) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.19

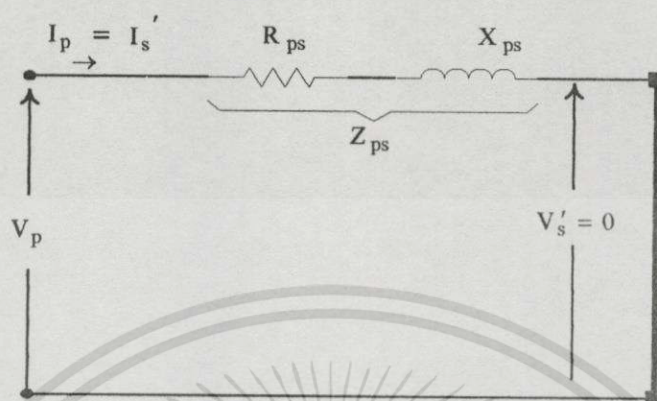


รูปที่ 3.19 แสดงวงจรเส้นเดียวของหม้อแปลง 3 เฟส ขณะทดสอบแบบลัดวงจร

การทดสอบนี้อาจจะวัดหรือเปิดวงจรทางด้านใดด้านหนึ่งก็ได้ จากรูปนี้เป็นการติดตั้งเครื่องมือวัดต่าง ๆ ทางด้านแรงดันสูงและลัดวงจรทางด้านแรงดันต่ำ ในขณะที่ทำการทดสอบนั้นจะปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายจนกระทั่งไฟฟ้าวัดที่พิกัด ค่าแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายจะมีค่าประมาณ 5-10 % ของแรงดันไฟฟ้าที่พิกัดของหม้อแปลง ดังนั้นจึงทำให้เส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องขดลวดทั้งสองด้านมีค่าต่ำ ฉะนั้นค่าสูญเสียในแกนเหล็กจึงมีค่าน้อยมากอาจจะตัดทิ้งไปได้ เพราะฉะนั้นอาจจะกล่าวได้ว่าค่าสูญเสียที่อ่านได้จากวัตต์มิเตอร์เป็นค่าสูญเสียขณะหม้อแปลงมีการะ ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นค่าสูญเสียอันเนื่องมาจากลวดตัวนำของขดลวดทั้งสองด้าน และอาจเขียนวงจรสมมูลขณะทำการทดสอบนี้ได้ดังรูปที่ 3.20 ซึ่งเป็นวงจรสมมูลทั้งหมดที่คิดอยู่ทางด้านแรงดันสูงเท่านั้น



รูปที่ 3.20 แสดงวงจรสมมูลของหม้อแปลงขณะทดสอบแบบลัดวงจร

จากรูปวงจรสมมูลจะเห็นได้ว่าค่ากำลังสูญเสียทั้งหมดที่วัดได้จากวัตต์มิเตอร์นั้นก็คือค่าสูญเสียอันเนื่องมาจากความต้านทานประสิทธิผลของลวดตัวนำทั้งสองด้าน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.36

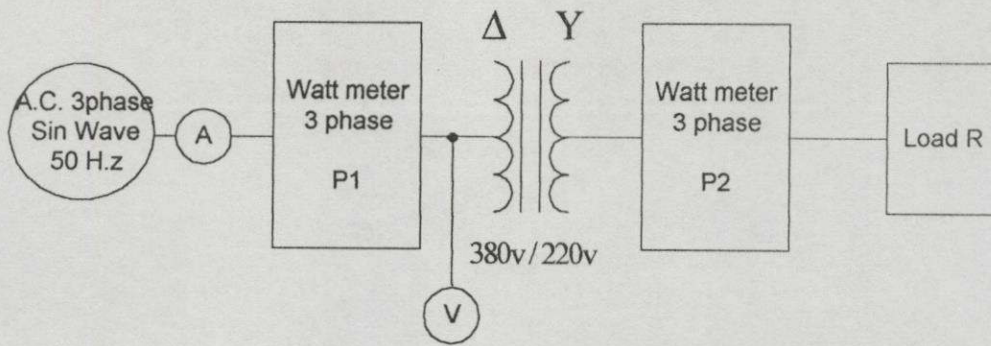
$$P_{LL} = I_p^2 \cdot R_{ps} \quad (3.36)$$

เมื่อ

$$R_{ps} = R_p + R_s \quad (3.37)$$

### 3.6.2 การทดสอบหาค่ากำลังสูญเสียโดยวิธีการใช้โหลดจริง

การทดสอบแบบนี้จะเป็นการทดสอบที่สามารถหาค่าสูญเสียรวมของหม้อแปลงได้ถูกต้อง แต่มีข้อเสียอยู่ตรงที่ว่าจะต้องใช้โหลดในการทดสอบ ซึ่งทำให้เสียค่าใช้จ่ายจำนวนมาก การทดสอบนี้จะต้องจ่ายค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่พิกัดของหม้อแปลง ในทางปฏิบัติไม่สามารถใช้กับหม้อแปลงที่มีขนาดมาก ๆ เพราะไม่สะดวกกับการจัดหาโหลด และมีความอันตรายอันตรรกกับการทดสอบได้ รูปวงจรการทดสอบและสมการจะสามารถแสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 แสดงวงจรเส้นเดียวของหม้อแปลง 3 เฟส ขณะทดสอบแบบใช้โหลดจริง

ค่าสูญเสียรวมที่ทดสอบได้ แสดงดังต่อไปนี้

$$P_T = P_1 - P_2$$

ดังนั้น

$$P_{LL} = P_T - P_C$$

### 3.6.3 การทดสอบหาค่ากำลังสูญเสียโดยวิธีการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเบ็ททูเบ็ท

จาก[4] ในกรณีที่ไม่สามารถทดสอบหาค่าสูญเสียโดยวิธีใช้โหลดจริงได้นั้น ก็ยังมีวิธีที่ช่วยให้สามารถหาค่าสูญเสียได้ ซึ่งจะใช้วิธีแบบเบ็ททูเบ็ท วิธีนี้จำเป็นต้องใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่คุณสมบัติเหมือนกันจำนวน 2 ตัว ร่วมกับหม้อแปลงแบบนุสเตอร์ ข้อดีของการทดสอบแบบนี้และแบบใช้โหลดจริง นอกจากจะสามารถหาค่าสูญเสียหรือค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงแล้ว ยังเหมาะสำหรับการหาค่าอุณหภูมิต่าง ๆ ของหม้อแปลงขณะที่หม้อแปลงทำงานได้อย่างถูกต้อง รูปวงจรสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.22

จากรูปที่ 3.22 เป็นการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านสตาตร์ 2 ตัวขนานกับแหล่งจ่ายไฟฟ้า การทดสอบทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักที่พิกัดของหม้อแปลงทางด้านสตาตร์ ทำการเปิดสวิตซ์ ค่าที่อ่านจากวัตต์มิเตอร์(P1) จะเป็นค่าสูญเสียที่แกนเหล็ก( $P_C$ )จากหม้อแปลงทั้ง 2 ตัวรวมกัน ส่วนทางด้านเคลด้าจะต่อขึ้นด้วยหม้อแปลงแบบนุสเตอร์ซึ่งเป็นหม้อแปลงช่วย หม้อแปลงนุสเตอร์นี้จะมีคุณสมบัติที่จ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูง จำนวนขดลวดไม่มากนัก แต่มีขนาดลวดตัวนำที่ใหญ่ ซึ่งมีความสามารถในการปรับกระแสไฟฟ้าที่ระดับเปอร์เซนต์ต่าง ๆ ของหม้อแปลงหลักได้ เมื่อปรับกระแสไฟฟ้าทางด้านเคลด้าที่ระดับพิกัดกระแสไฟฟ้าทางด้านเคลด้า นั้น ค่าที่อ่าน

จากวัตต์มิเตอร์ P2 หลังจากการปิดสวิตช์จะเป็นค่าสูญเสียขณะมีโหลด( $P_{LL}$ ) ที่พิจารณาาร่วมกันของหม้อแปลงหลัก 2 ตัว และหม้อแปลงช่วย 1 ตัว ซึ่งจะแสดงต่อไปนี้

$$P_c \text{ ของหม้อแปลงหลักแต่ละตัว} = \frac{P_1}{2}$$

ค่าสูญเสียขณะมีโหลดทั้งหมดจะมีค่า

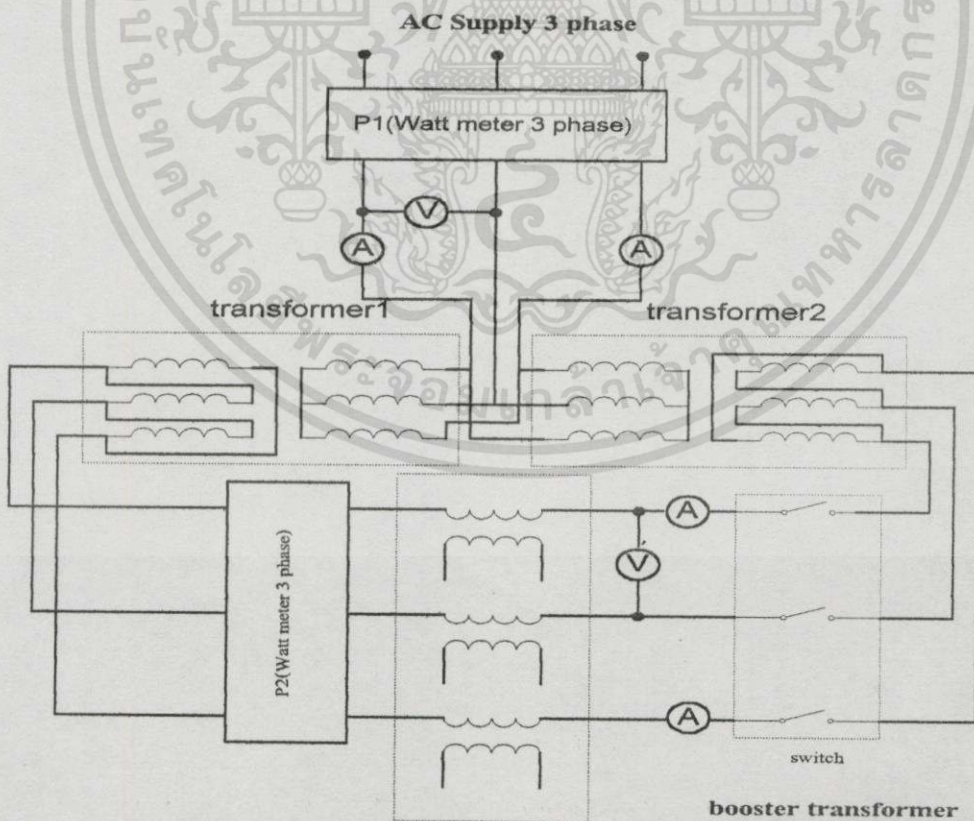
$$P_{LL} \text{ ทั้งหมด} = P_2$$

ค่าสูญเสียของหม้อแปลงบูสเตอร์เมื่อเปรียบเทียบกับหม้อแปลงหลักแล้วจะมีค่าน้อยมาก จึงสามารถที่จะไม่นำมาพิจารณา เพราะฉะนั้นเมื่อต้องการทราบค่า  $P_{LL}$  ของหม้อแปลงหลักแต่ละตัวจะมีค่าดังนี้

$$P_{LL} \text{ ของหม้อแปลงหลักแต่ละตัว} = \frac{P_2}{2}$$

เพราะฉะนั้นจะได้ว่า

$$P_T \text{ ของหม้อแปลงหลักแต่ละตัว} = \frac{P_1}{2} + \frac{P_2}{2}$$

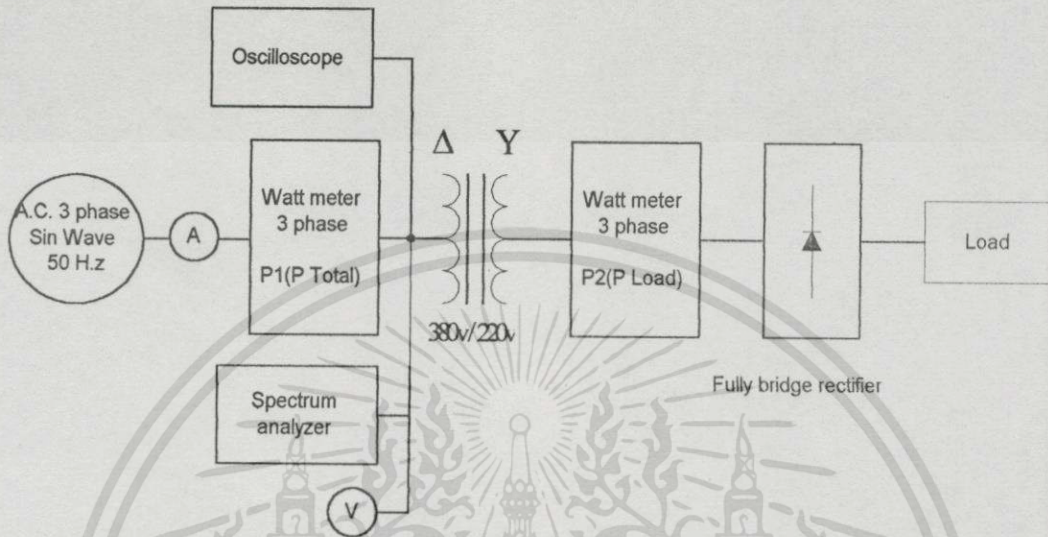


รูปที่ 3.22 แสดงวงจรของหม้อแปลง 3 เฟส 2 ตัว ต่อแบบเบ็ททุเบ็ท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.4 การทดสอบหาค่าสูญเสียของโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

ในทางปฏิบัติการทดสอบหาค่ากำลังสูญเสียของ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น สามารถต่อวงจรเครื่องมือวัดที่แสดงได้ดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 แสดงวงจรการทดสอบต่อเรกติไฟเออร์ 3 เฟสร่วมกับ โหลด

ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบวัดค่ากำลังสูญเสียของ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น ได้จากสมการต่อไปนี้

$$P_T = P_1 - P_2$$

เมื่อ

$$P_{LL} = P_T - P_C$$

### 3.6.5 การทดสอบหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยวิธีการแยกหาแต่ละความถี่ฮาร์โมนิก

จาก[31] การทดสอบแบบแยกเฉพาะฮาร์โมนิกนี้ จะทำการวัดวงจรหม้อแปลงทางค่านำไฟแล้วป้อนกระแสไฟฟ้าสัญญาณชานน์(rms)ที่ความถี่ฮาร์โมนิกต่าง ๆ จุดประสงค์เพื่อต้องการหาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานประสิทธิผลที่ความถี่ฮาร์โมนิกเทียบกับลำดับฮาร์โมนิก ซึ่งจะสามารถทำให้ทราบค่าสูญเสียในหม้อแปลงขณะมีโหลดได้ดังสมการที่ 3.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{LL} = P_l \left( \sum [I_h (\text{p.u.})]^2 \cdot K_n \right) \quad (3.38)$$

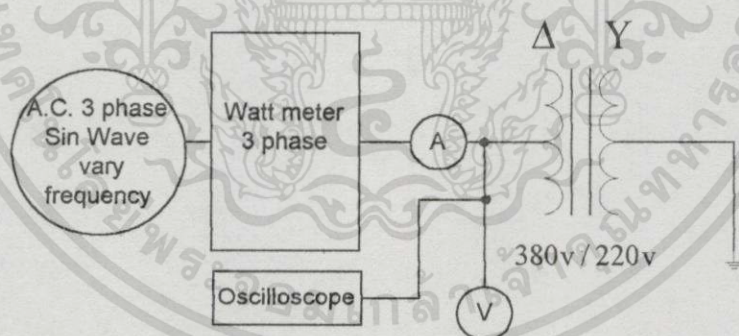
เมื่อ

$$K_n = \frac{R_{en}}{R_{el}} \quad (3.39)$$

จากรูปที่ 3.13 และรูปที่ 3.14 จะเห็นว่าคลื่นแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายจะประมาณเป็นรูปคลื่นไซน์ เพราะฉะนั้นการพิจารณาแรงดันฮาร์โมนิกทางด้านแหล่งจ่ายนั้นมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกระแสฮาร์โมนิก เพราะฉะนั้นจะละเลยไม่นำมาพิจารณา ดังนั้นค่าสูญเสียขณะมีโหลดและค่าสูญเสียรวมที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงจะได้อิงสมการต่อไปนี้

$$P_T = P_c + P_{LL}$$

การทดสอบหาค่าสูญเสียขณะมีโหลดที่ความถี่ไฟฟ้าต่าง ๆ โดยการลัดวงจรทางขดทุติยภูมิแสดงดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 แสดงวงจรการทดสอบหาค่าสูญเสียขณะมีโหลดที่ความถี่ไฟฟ้าต่าง ๆ โดยการลัดวงจรทางขดทุติยภูมิของหม้อแปลง

## เครื่องมือสนับสนุนในการทดสอบ

### 4.1 ทฤษฎีวงจรอินเวอร์เตอร์

จาก[14] วงจรอินเวอร์เตอร์เป็นวงจรที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่ปรับได้ทั้งความถี่และโวลต์เตจ ลักษณะอินเวอร์เตอร์ที่จะใช้ในการทดสอบนี้จะสามารถปรับความถี่ตั้งแต่ 150 Hz ถึง 1 kHz และปรับระดับแรงดันได้ถึง 400 โวลต์

#### 4.1.1 ส่วนประกอบของอินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ จะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือวงจรหลัก(main circuit), วงจรทริกเกอร์(trigger circuit)

##### 1. วงจรหลัก

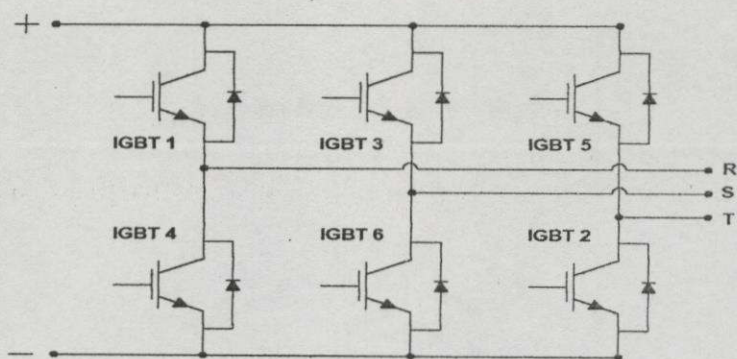
ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ในวงจรจะประกอบด้วย IGBT, ไดโอด, คาปาซิเตอร์

##### 2. วงจรทริกเกอร์

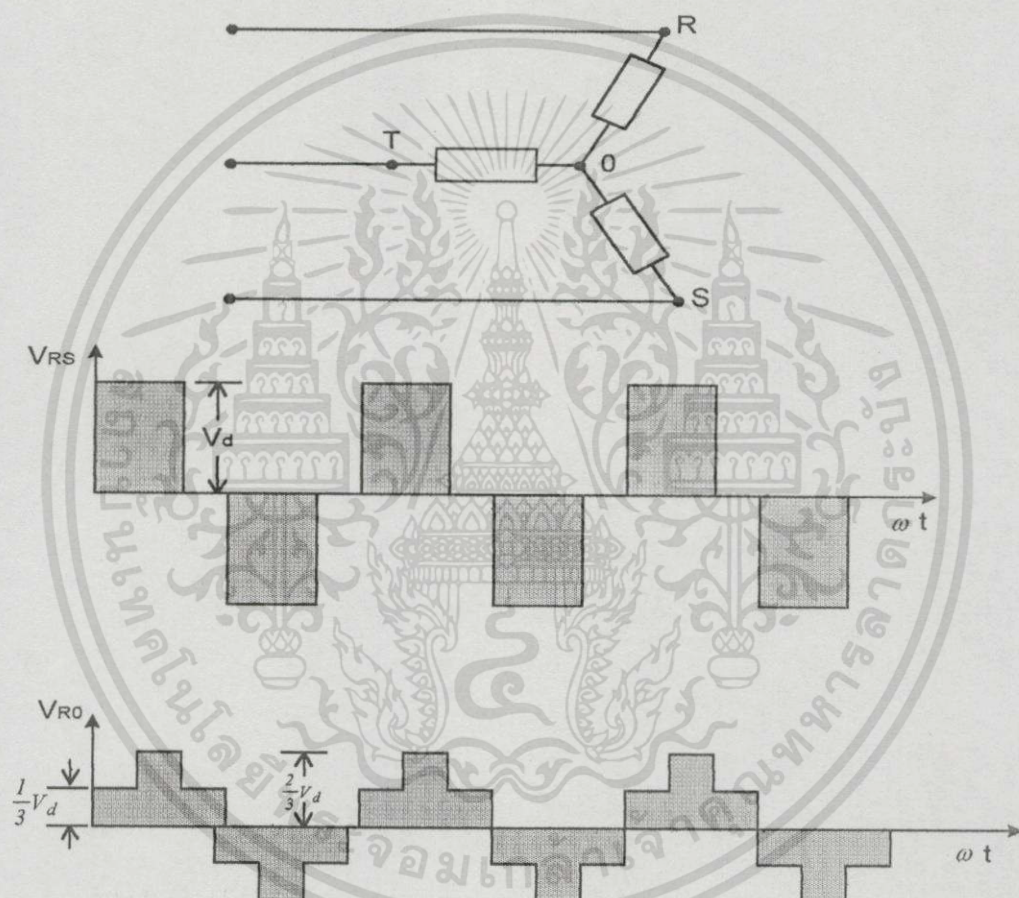
ทำหน้าที่ควบคุมให้ IGBT แต่ละตัวในวงจรหลักทำงานตามลำดับ(sequence) ที่กำหนดไว้ โดยวงจรทริกเกอร์สร้างสัญญาณกระตุ้น(trigger signal) สำหรับ IGBT แต่ละตัวและมีลำดับของสัญญาณตามที่กำหนดเอาไว้แล้วป้อนเข้าที่ขาเกตของIGBT ซึ่งจะทำให้IGBT ทำงานตามลำดับที่ต้องการ

#### 4.1.2 วงจรอินเวอร์เตอร์พื้นฐาน

วงจรอินเวอร์เตอร์พื้นฐานสามเฟสที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับโหลดนั้น คือวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสแบบบริดจ์ (three-phase bridge inverter circuit) ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจะประกอบด้วย IGBT จำนวน 6 ตัว, feedback หรือ free wheeling diode 6 ตัว ต่อกับ โหลด(load) สมดุลย์สามเฟส แหล่งจ่ายไฟตรง(Vd) ป้อนกระแสตรงผ่านดีซีบัส(DC. Bus) P และ N ขั้วเอาต์พุต R, S และ T สามารถต่อเข้ากับขั้วบวกและลบของดีซีบัสสลับไปมาโดยการนำกระแสของ IGBT ซึ่งจะถูกนำกระแสเป็นช่วง ๆ ดังรูป4.2 ทำให้ได้เอาต์พุตกระแสสลับสามเฟส ลำดับการนำกระแสของ IGBT จะเริ่มจาก IGBT1, IGBT2, IGBT3.....จนถึง IGBT6 เป็นการครบ 1 ไซเคิลของเอาต์พุต แสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งจะเรียกวงจรอินเวอร์เตอร์นี้ว่า วงจรอินเวอร์เตอร์แบบ 6 ขั้น(six step inverter) เอาต์พุตโวลต์เตจของอินเวอร์เตอร์สามารถเปลี่ยนความถี่ได้โดยการปรับความถี่ของสัญญาณกระตุ้น



รูปที่ 4.1 แสดงรูปวงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 4.2 แสดงเอาต์พุตกระแสระดับสามเฟส

	T					
mode	1	2	3	4	5	6
IGBT1	■					
IGBT2				■	■	
IGBT3			■			
IGBT4		■		■	■	
IGBT5					■	■
IGBT6		■				

รูปที่ 4.3 แสดงลำดับการนำกระแสของ IGBT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะ รูปคลื่นแรงดัน แสดงได้ด้วยการวิเคราะห์ ฟูริเยร์ แสดงดังสมการที่ 4.1

$$V_{RS} = \frac{2\sqrt{3}}{77} V_d \left( \sin \omega t - \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t - \frac{1}{11} \sin 11\omega t + \frac{1}{13} \sin 13\omega t - \dots \right) \quad (4.1)$$

สามารถประมาณค่าได้ดังสมการที่ 4.2

$$V_{rms} \approx 0.816V_d \quad (4.2)$$

#### 4.1.3 การควบคุมความถี่

ความถี่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะขึ้นกับอัตราการทริกให้ IGBT นำกระแส อัตราการทริกนี้สามารถปรับได้จากภาคออสซิลเลเตอร์(oscillator) ซึ่งทำหน้าที่ส่งสัญญาณคล็อกไปให้ วงจรเกท (gate) ของ IGBT เพื่อควบคุมการสร้างพัลส์ (pulse) ที่ใช้ในการทริก IGBT แต่ละตัวในวงจรหลัก ให้เป็นไปตามลำดับการทำงานของอินเวอร์เตอร์

#### 4.1.4 การควบคุมโวลต์เดจ

ซึ่งจะมีการควบคุมได้ 3 วิธี

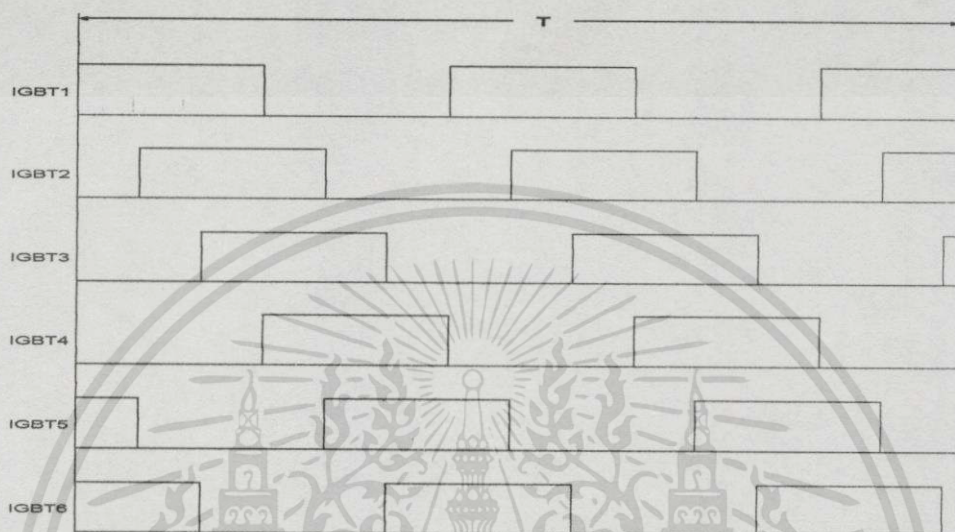
1. การควบคุมเอาต์พุตทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์
2. การควบคุมคิซีโวลต์เดจทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ มีวิธีที่ใช้คือ
  - ออโต้ทรานฟอเมอร์
  - เร็คติไฟเออร์ ที่มีการควบคุมมุมเฟส
  - เร็คติไฟเออร์ และ คิซี ซอปเปอร์
3. การควบคุมโดยการสวิทซ์ (switching) ภายในวงจรอินเวอร์เตอร์
  - การควบคุมมุมเฟสแรงดัน
  - พัลส์วิดมอดูเลชัน (PWM)

สำหรับวงจรที่ใช้ในการทดสอบนี้ จะเป็นแบบปรับระดับแรงดันด้วยออโต้ ทรานฟอเมอร์

#### 4.1.5 การสร้างวงจรทริกเกอร์

วงจรทริกเกอร์ (Trigger circuit) มีความสำคัญมากเพราะจะควบคุมการทำงานของ IGBT ทุกตัวในวงจรหลักให้เป็นไปตามลำดับการทำงานของมันจะผิดพลาดไม่ได้ เพราะถ้าเกิดการผิดพลาดแล้ว นอกจากวงจรหลักจะไม่ให้เอาต์พุตเป็นไปตามความต้องการแล้ว ยังจะทำให้เกิดการลัดวงจรอย่างรุนแรง ทำให้เกิดการเสียหายแก่อุปกรณ์ต่างๆ โดยเฉพาะ IGBT ดังนั้นวงจรทริกเกอร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

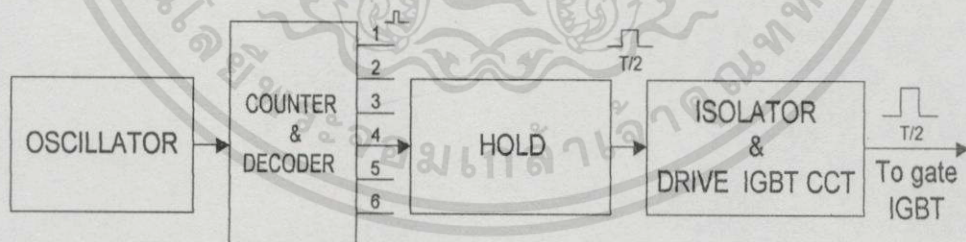
จะต้องมีการทำงานอย่างแน่นอนเชื่อถือได้ (high reliability) วงจรทรานซิสเตอร์ควบคุมการทำงาน IGBT ได้โดยการป้อนสัญญาณทรานซิสเตอร์พัลส์ (pulse) เข้าที่ขาเกต (gate) ของ IGBT ตัวที่ต้องการให้นำกระแส จากลำดับการทำงานของ IGBT ในรูปที่ 4.3 ลักษณะของสัญญาณทรานซิสเตอร์ควรเป็น ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งเราสามารถปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ได้โดยการเปลี่ยนแปลงคาบเวลา (period)



รูปที่ 4.4 แสดงลำดับการทำงานของ IGBT

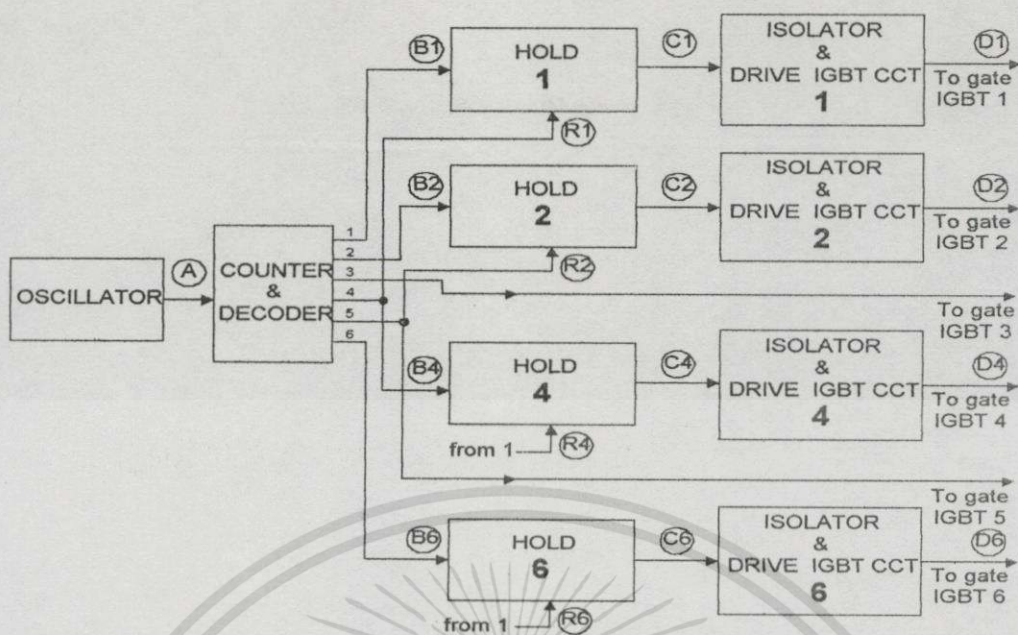
#### 4.1.5.1 ลักษณะของวงจรทรานซิสเตอร์และการทำงาน

จากเหตุต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น จะสามารถออกแบบวงจรทรานซิสเตอร์ให้เป็นไปตามความต้องการได้ดังบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.5

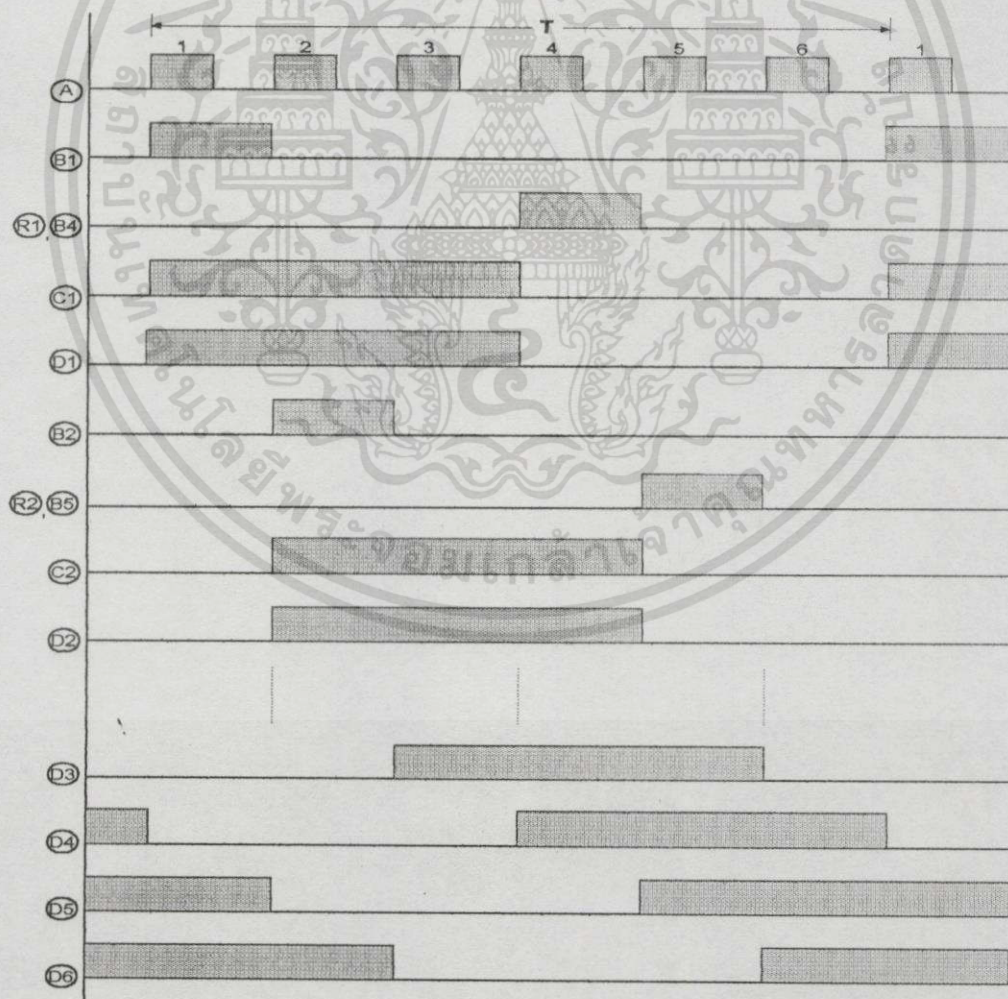


รูปที่ 4.5 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรทรานซิสเตอร์

จากรูปที่ 4.5 สามารถสร้างวงจรทรานซิสเตอร์ที่ใช้งานได้จริง ๆ ดังบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.6 โดยมีรูปร่างสัญญาณ ณ จุดต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรทริกเกอร์ที่สร้างขึ้น



รูปที่ 4.7 แสดงสัญญาณ ณ จุดต่างๆ ของรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อไปจะกล่าวถึงการทำงานของวงจรถริกเกอร์ โดยอาศัยบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.6 เป็นหลักคู่กับรูปร่างสัญญาณตามจุดต่าง ๆ ในรูปที่ 4.7

### 1. ออสซิลเลเตอร์

เป็นวงจระอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์(Astable Multivibrator circuit) ทำหน้าที่ผลิตสัญญาณคล็อก(clock signal) ค้าง A ซึ่งมีคูตีไซเคิล 50%

### 2. เคานเตอร์ & ดีโคเดอร์

เป็นแบบเครื่องมือนับ 6 วงแหวน(6 Ring Counter) โดยรับสัญญาณคล็อก A มานับและถอดรหัส ทำให้ได้เอาท์พุททั้ง 6 ค้างสัญญาณ B1, B2,.....,B6

### 3. โฮลค

เป็น ดี ฟลิป-ฟลอป (D-flip-flop) จะทำหน้าที่ส่งสัญญาณข้อมูล "1" ออกไปทางเอาท์พุท เช่น สัญญาณ CI เมื่อได้รับพัลส์ B1 และจะรีเซท(reset) ตัวมันเองเป็น "0" เมื่อได้รับสัญญาณรีเซท R1 ซึ่งเป็นสัญญาณเดียวกัน B4

จากการที่มีการโฮลค ข้อมูล "1" เอาไว้ จะเป็นผลให้มีสัญญาณทริกเกอร์ เช่น D1 ตลอดช่วงที่ IGBT1 นำกระแส การดึงเอาสัญญาณคล็อก B4 มาเป็นสัญญาณรีเซท R1 ให้แก่ โฮลค 1 มีข้อดี คือ IGBT1 และ IGBT4 จะได้รับสัญญาณทริกเกอร์ที่ไม่พร้อมกันอย่างเค็ดขาด จึงทำให้วงจรถริกเกอร์มีความเชื่อถือได้สูง(high reliability)

#### 4.1.5.2 การคำนวณและการสร้างวงจรถริกเกอร์

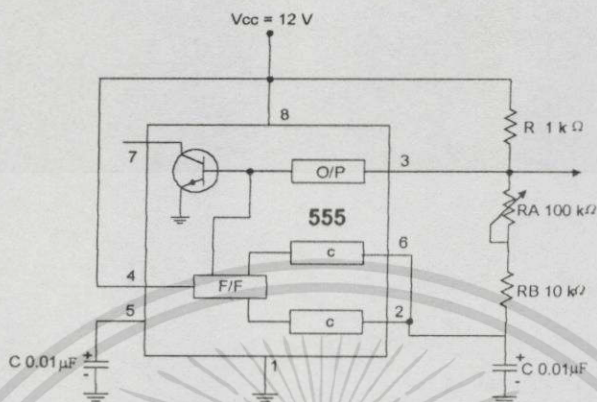
เมื่อเราได้ศึกษาถึงลักษณะของวงจรถริกเกอร์แล้ว ต่อไปจะเป็นการคำนวณหาค่าอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ความต้านทาน ตัวเก็บประจุ รวมทั้งการเลือกอุปกรณ์พวกเซมิคอนดักเตอร์มาใช้ในการสร้างวงจรถริกเกอร์

##### 1) ออสซิลเลเตอร์

เลือกไอซีเบอร์ 555 มาเป็นตัวกำเนิดสัญญาณคล็อก โดยใช้งานเป็นแบบอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ ดังรูปที่ 4.8 การทำงานของวงจรถริกเกอร์ได้ดังนี้

คาปาซิเตอร์ C ได้รับการประจุ(charge) ผ่านความต้านทาน R ซึ่งปรับค่าได้โดยได้รับการประจุจากเอาท์พุทของไอซี(ขา 3) ซึ่งขณะนี้อยู่ในสภาวะสูง (high state) เมื่อแรงดันคร่อม C มีค่าสูงกว่า  $\frac{2}{3} V_{cc}$  แล้วจะทำให้วงจรเปรียบเทียบกับจุดที่ต่อกับขา 6 ทำงานไปกระตุ้นให้ฟลิปฟลอปเปลี่ยนสภาวะทำให้ได้เอาท์พุทสภาวะต่ำ (low state) C ก็จะคายประจุ (discharge) ผ่าน R ตัวเดิม เมื่อแรงดันคร่อม C มีค่าต่ำกว่า  $\frac{2}{3} V_{cc}$  วงจรเปรียบเทียบกับจุดที่ต่อกับขา 2 จะทำงานไปกระตุ้นให้ฟลิปฟลอปเปลี่ยนสภาวะทำให้ได้เอาท์พุทสภาวะสูง C ก็จะได้รับประจุผ่าน R อีก วงจรก็จะ

ทำงานช้า ๆ เช่นนี้เรื่อยไป เกิดเป็นสัญญาณคล็อกที่มีควิตซ์ไซเคิล (duty cycle) 50% เพราะว่า C ได้ รับการประจุและคายประจุผ่านความต้านทานตัวเดียวกัน ความถี่ของเอาต์พุตคำนวณได้จากสมการที่ 4.3



รูปที่ 4.8 แสดงวงจรออสซิลเลเตอร์แบบคิกโคต

$$f = \frac{1}{1.4RC} \quad (4.3)$$

R เป็น ความต้านทาน, โอห์ม

C เป็น คาปาซิเตอร์, ฟาร์ด

เนื่องจาก ต้องการให้เอาต์พุตของวงจรทริกเกอร์มีความถี่ในช่วง 150-1 kHz และวงจร Counter & Decoder เป็นวงจรหาร 6 ดังนั้นความถี่ที่ผลิตควรอยู่ในช่วง 900-6 kHz

เลือก  $C = 0.01 \mu\text{F}$

ที่ความถี่ต่ำสุด

$$R = \frac{1}{(1.4)(0.01 \times 10^{-6})(900)} = 79.365 \text{ k}\Omega$$

ที่ความถี่สูงสุด

$$R = \frac{1}{(1.4)(0.01 \times 10^{-6})(6000)} = 11.9 \text{ k}\Omega$$

ใช้  $R_A = 100 \text{ k}\Omega$

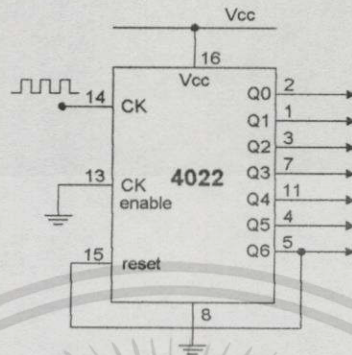
ใช้  $R_B = 10 \text{ k}\Omega$

## 2) เกานเตอร์ & ดีโคดเดอร์

เลือกใช้ไอซีเบอร์ 4022 ซึ่งเป็น 8 เกานเตอร์ นำมาดัดแปลงให้ทำงานแบบเครื่องมือนับ 6 วงแหวนได้ โดยต่อสัญญาณจาก Q6 มีสัญญาณพัลส์ออกมา ไอซีจะรีเซตตัวมันเองให้นับ 1 ใหม่ โดยจะให้สัญญาณพัลส์ออกมาที่ Q0 เมื่อมีสัญญาณพัลส์ที่ Q6 จากนั้นก็นับสัญญาณคล็อกที่เข้ามา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

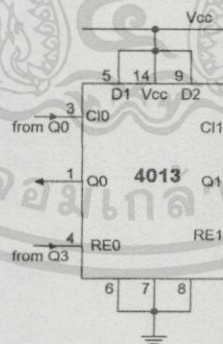
แล้วถอดรหัสออกมาที่เอาต์พุต Q1 , Q2,.....Q5 เป็นเช่นนี้เรื่อย ๆ ไป ทำให้เราได้วงจรถานเตอร์ & โคคเคอร์แบบเครื่องมือนับ 6 วงแหวนตามต้องการ การเปลี่ยนแปลงสถานะของเอาต์พุตทั้งหมด จะทำงานเมื่อได้รับสัญญาณทริกทางบวก(positive going edge)ของคล็อก แสดงวงจรดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แสดงวงจรเครื่องมือนับ 6 วงแหวน

### 3) โฮลค

โดยนำ ดี ฟลิป-ฟลอป มาใช้งาน โดยใช้เบอร์ 4013 ซึ่งจะทำงานเมื่อได้รับสัญญาณทางบวกเป็นการสอดคล้องกับภาคเกานเตอร์&ดีโคคเคอร์ ภายในไอซี 4013 ประกอบด้วย ดี ฟลิป-ฟลอป 2 ตัว ดังนั้นในภาคโฮลค จึงใช้ไอซีทั้งหมด 3 ตัว การทำงานเริ่มด้วยการต่อขา คาต้า (ขา 5 และ 9) ไว้กับ Vcc เพื่อให้ D เป็น "1" เมื่อมีสัญญาณคล็อกเข้ามาที่ CIO (ขา 3) เอาต์พุตของ ดี-ฟลิป-ฟลอป จะเปลี่ยนสถานะตาม คาต้า คือ Q0 เปลี่ยนสถานะเป็น "1" และวงจรีเซตตัวเองให้เป็น "0" เมื่อได้รับสัญญาณคล็อกเข้าที่ขา รีเซท(ขา5) แสดงวงจรดังรูปที่ 4.10



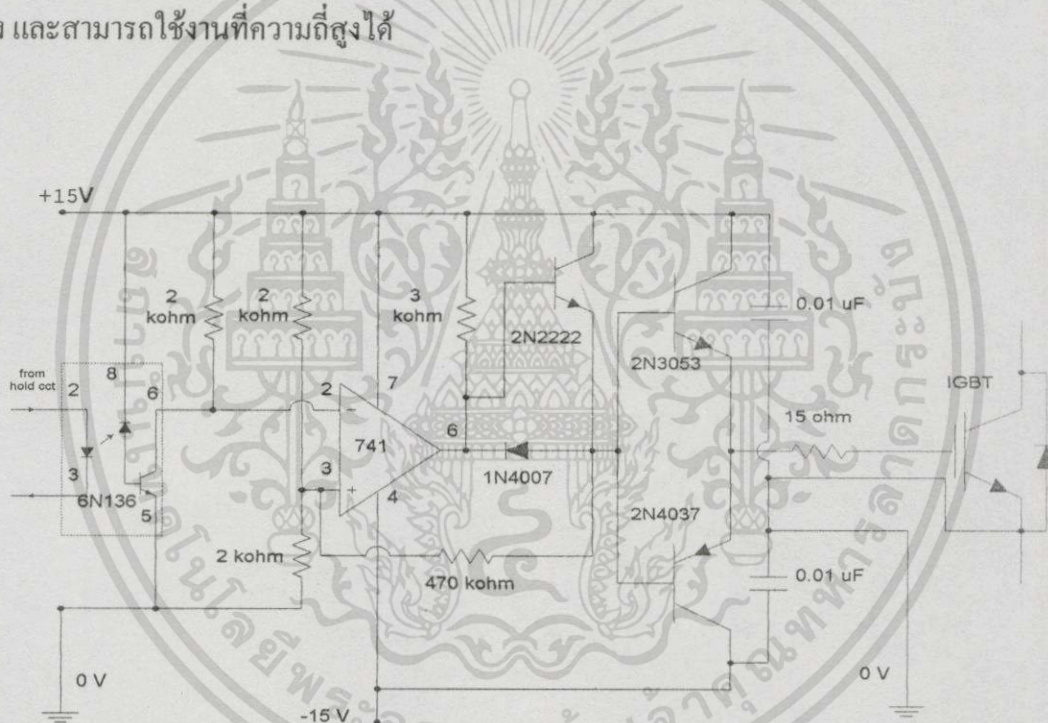
รูปที่ 4.10 แสดงวงจรโฮลค

### 4) วงจรขั้วเกทของไอจีบีที

วงจรถับเกทมีหน้าที่ในการจับเกทไอจีบีทีให้เกิดการสวิตช์ในวงจรกำลัง 3 เฟสอินเวอร์เตอร์ โดยมีทั้งหมด 6 ชุด อันเนื่องจากไอจีบีทีมี 6 ตัว

ไอจีบีทีไม่ต้องการกระแสในการขับเคลื่อน เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ควบคุมด้วยแรงดัน แต่ในขณะที่นำกระแสและหยุดนำกระแส จะเกิดกระแสขับเคลื่อนเป็นสัญญาณพัลส์สั้น ๆ เนื่องมาจากอินพุทคาปาซิแตนซ์ โดยปกติแล้วไอจีบีทีจะหยุดนำกระแสโดยการตั้งค่าแรงดันตกคร่อมเกตมิเตอร์ ( $V_{GE}$ ) เป็นศูนย์ แต่จะเป็นการดีกว่าที่จะควบคุมไอจีบีทีให้หยุดนำกระแส โดยใช้ค่าแรงดันตกคร่อมเป็นลบ

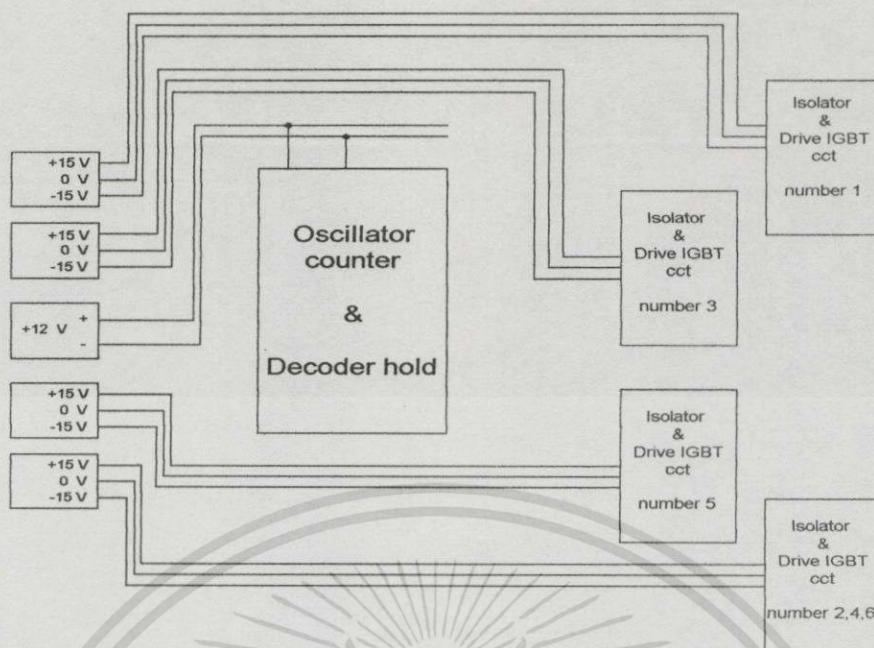
จากรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าการแยกกราวด์ระหว่างวงจรควบคุมและวงจรกำลัง เพื่อป้องกันการรบกวนและอันตรายจากไฟแรงดันสูง ซึ่งมาจากวงจรกำลัง โดยจะใช้อปโตไอโซเลเตอร์เบอร์ 6N136 ซึ่งสามารถป้องกันสัญญาณรบกวนได้เป็นอย่างดี และสามารถใช้งานได้ดีที่ความเร็วสูง เอาท์พุทจากอปโตไอโซเลเตอร์จะผ่านวงจรบัฟเฟอร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์ เพื่อเพิ่มกระแสที่ใช้ในการอัดและคายประจุของค่าความจุภายในเกตของไอจีบีที ซึ่งจะช่วยให้ใช้เวลาในการสวิตช์สั้นลง และสามารถใช้งานที่ความถี่สูงได้



รูปที่ 4.11 แสดงวงจรขับเคลื่อนของไอจีบีที

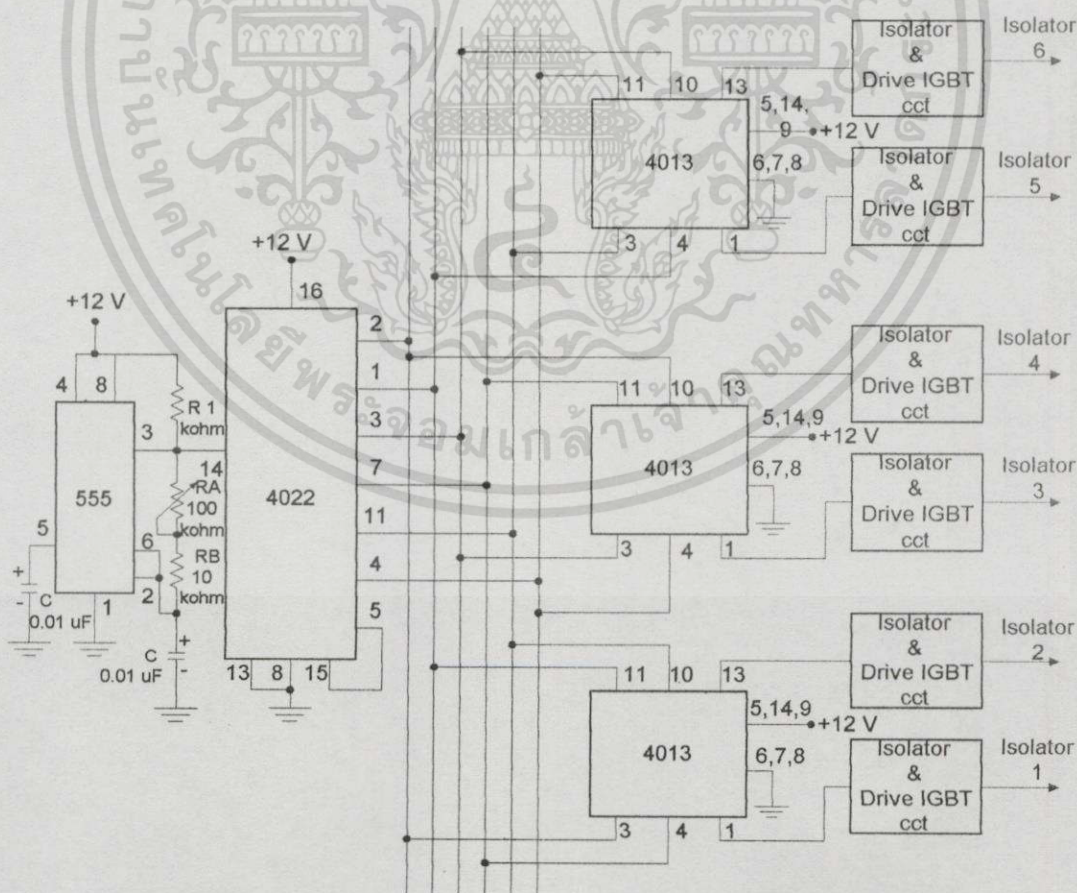
### 5) ภาคแหล่งจ่ายของวงจรควบคุม

จะมีแหล่งจ่ายที่ต้องใช้อยู่ 2 ระดับ ระดับที่ 1 เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ +12 โวลต์ เพื่อนำไปใช้กับวงจรกำเนิดสัญญาณ, วงจรเครื่องมืออื่น 6 วงแหวน, วงจร โสตค ส่วนระดับที่ 2 เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ +15, 0, -15 โวลต์ เพื่อนำไปใช้กับวงจรขับเคลื่อน IGBT แสดงวงจรดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แสดงวงจรแหล่งจ่ายของวงจรควบคุมและวงจรขับเคลื่อน IGBT

วงจรควบคุมของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อน IGBT แสดงดังรูปที่ 4.13



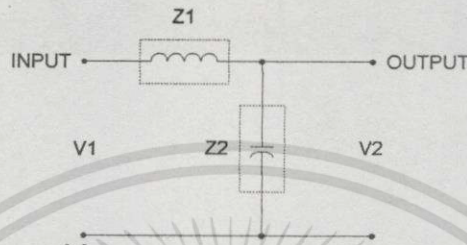
รูปที่ 4.13 แสดงวงจรควบคุมของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.1.6 วงจรกรองความถี่

### 4.1.6.1 ทฤษฎีวงจรกรองความถี่

จาก[13] ในวงจรกรองความถี่ฮาร์โมนิกที่เอาต์พุต ของวงจรขายนั้เวฟอินเวอร์เตอร์ จะใช้วงจรกรองความถี่อย่างง่าย แบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน( Low pass Filter ) ซึ่งจะประกอบด้วย L และ C ตามรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แสดงวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

ค่า L และ C ของวงจรกรองความถี่ผ่าน จะมีผลต่อระบบขายนั้เวฟอินเวอร์เตอร์โดยที่ค่า L ที่ค่ามาก และค่า C น้อย จะทำให้โวลต์เดจเร็กกูเลชันของคลื่นรูปขายนั้เวฟอินเวอร์เตอร์ไม่ดี แต่เป็นการลดโวลต์ของอินเวอร์เตอร์ ขณะที่ใช้ค่า L เล็ก ๆ และค่า R มาก ๆ จะทำให้โวลต์เดจเร็กกูเลชันดี แต่เป็นการเพิ่มภาระโวลต์ให้กับอินเวอร์เตอร์

จากวงจรกรองความถี่แสดงดังรูปที่ 4.14 ค่าอิมพีแดนซ์ของ L และ C หาจากสมการต่อไปนี้

$$Z_L = j\omega \cdot L \quad (4.4)$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega \cdot C} \quad (4.5)$$

โดยที่  $V_i$  เป็นแรงดันอินพุต ซึ่งประกอบด้วยแรงดันคลื่นพื้นฐานและองค์ประกอบฮาร์โมนิกต่าง ๆ ส่วน  $V_o$  เป็นเอาต์พุตของวงจรกรองความถี่ ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าวงจรกรองความถี่ จะทำหน้าที่เหมือนวงจรแบ่งแรงดันที่ลดอันดับฮาร์โมนิกที่  $n$  ตามสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} f(n) &= \frac{V_o(n)}{V_i(n)} \\ &= \frac{Z_2(n)}{Z_2(n) + Z_1(n)} \\ &= \frac{1}{1 + (Z_1(n)/Z_2(n))} \\ f(n) &= \frac{1}{1 + (Z_1(n) \cdot Y_2(n))} \end{aligned} \quad (4.6)$$

จากสมการของ  $f_n$  จะเห็นว่าวงจรความถี่ที่ดี หรือออกแบบได้เหมาะสมแล้ว จะทำให้เรีกูเลขชี้กำลัง หรือลดแรงดันคลื่นพื้นฐานเพียงเล็กน้อย หรือกล่าวได้ว่า

$$f_1 = 1$$

หรือที่แรงดันไฟฟ้าคลื่นพื้นฐาน

$$Z_{1(n)} \cdot Y_{2(n)} = 0$$

ขณะที่สามารถลดอันดับฮาร์โมนิกที่  $n$  ได้มาก ๆ หรือ  $f(n) \ll 1$  ทำให้เข้าใกล้ศูนย์ เมื่อ  $n > 1$

$$Z_{1(n)} \cdot Y_{2(n)} = \alpha$$

การคำนวณหาค่า  $L$  และ  $C$  ในวงจรความถี่ ต้องอาศัยสมการ (4.4), (4.5), (4.6) เพื่อให้ได้ค่า  $L$  และ  $C$  ที่เหมาะสมและน้อยที่สุด (Optimum) โดยที่อินเวอร์เตอร์ยังคงมีรูปคลื่นเอาต์พุต และค่าแรงดันเรีกูเลขชี้กำลัง

#### 4.1.6.2 หลักการคำนวณหาค่า $L$ และ $C$ เพื่อใช้ในวงจรความถี่ผ่าน

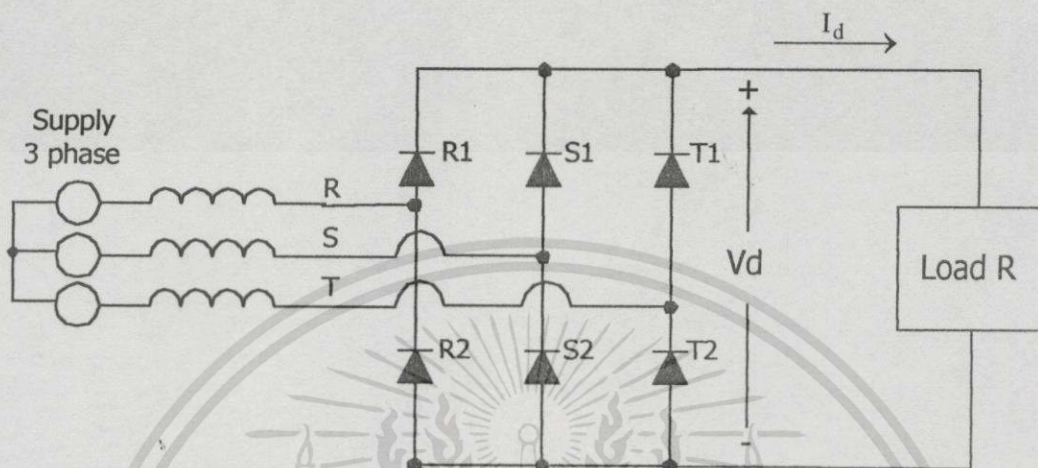
ข้อกำหนด  $V_i$  เป็นลักษณะสัญญาณสี่เหลี่ยมแบบควอซี ซึ่งประกอบด้วยลำดับฮาร์โมนิก  $6M \pm 1$  ดังนั้นจะกำหนดให้วงจรความถี่ขึ้นที่ความถี่ คัท-ออฟ ที่ฮาร์โมนิกที่ 5 ขึ้นไป และใช้สมการที่ 4.6 ดังนั้น ค่า  $L$  และ  $C$  ที่ใช้ในวงจรทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงการเลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ

Fundamental frequency(Hz)	L (mH)	C ( $\mu$ F)
150	50	100
250	50	50
350	40	50
450	20	50
550	20	50
650	5	33.3
750	5	33.3
850	5	25
950	5	25

## 4.2 วงจรเรกติฟายเออร์เต็มคลื่น 3 เฟส (Three-phase Full Wave Bridge)

จาก[20] การแปลงกระแสสลับ 3 เฟสเป็นกระแสตรง ในลักษณะของวงจรบริดจ์แบบเต็มคลื่นนั้น จะมีข้อดีก็คือจะมีรีปเปิลที่น้อย ซึ่งรูปแบบการต่อวงจรแสดงดังรูปที่ 4.15

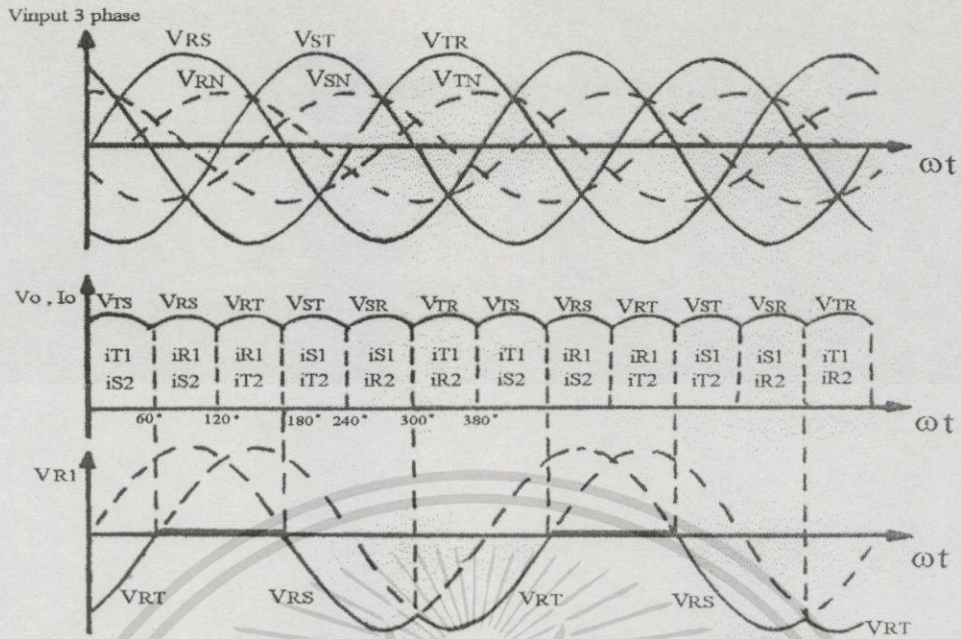


รูปที่ 4.15 แสดงวงจรเรกติฟายเออร์เต็มคลื่น 3 เฟส 6 พัลส์

จากรูป 4.15 เป็นวงจรเรกติฟายเออร์เต็มคลื่น 3 เฟสแบบควบคุมไม่ได้ อุปกรณ์ที่ใช้จะเป็นไดโอดทั้งหมด(6 ตัว) มุมเริ่มนำกระแสไฟฟ้าของไดโอดแต่ละตัวจะอยู่ที่มุม 0 องศา แรงดันเอาต์พุตจะไม่สามารถควบคุมได้ นอกจากนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางอินพุตเท่านั้น ซึ่งจะแสดงช่วงมุมการนำกระแสของไดโอดแต่ละตัวได้ดังตารางที่ 4.2 และดังรูปที่ 4.16

ตารางที่ 4.2 แสดงช่วงมุมการนำกระแสของไดโอดแต่ละตัว

ไดโอด	ช่วงการนำกระแสสำหรับ $\alpha=0$ องศา
R1	$60^\circ-180^\circ$
R2	$240^\circ-360^\circ$
S1	$180^\circ-300^\circ$
S2	$360^\circ-120^\circ$
T1	$300^\circ-420^\circ$
T2	$120^\circ-240^\circ$



รูปที่ 4.16 แสดงช่วงการนำกระแส, แรงดันเอาต์พุท และแรงดันตกคร่อมไดโอด

## บทที่ 5

# การทดสอบหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและอุณหภูมิหม้อแปลง

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษากำลังไฟฟ้าสูญเสียของหม้อแปลงอันเนื่องมาจากกระแสฮาร์โมนิก และอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมันเมื่อมีการทดสอบในเงื่อนไขต่าง ๆ เช่น ในเงื่อนไขโดยวิธีการัดวงจร, ใช้โหลดเป็นแบบเชิงเส้นและใช้โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น รวมถึงอายุที่สูญเสียและอายุการใช้งานของหม้อแปลง ซึ่งการทดสอบนี้ได้ใช้หม้อแปลงมีคุณสมบัติดังตารางที่ 5.1

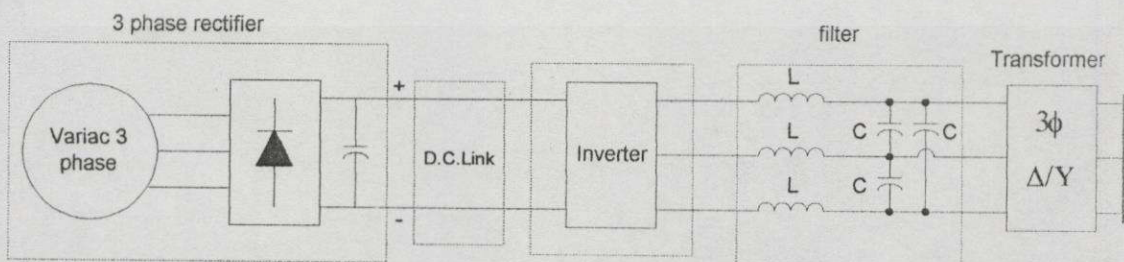
ตารางที่ 5.1 แสดงคุณสมบัติหม้อแปลงแบบแช่น้ำมันที่ใช้ทดสอบ

Maximum VA = 10 kVA	Frequency = 50 Hz
Vector Dyn11	Class A
High Volt = 380 V	Type ONAN
Low Volt = 220 V	No Load Loss = 77 W
Load Loss = 350 W	Total Loss = 427 W
Average Winding Temp. rise Guarantee = 65 °C	Top-Oil Temp. rise Guarantee = 60 °C
Weight of core = 43 kg	Volume of Oil = 35 litre
Weight of tank and fitting = 49 kg	Weight of winding (H.V. + L.V.) = 14 kg

### 5.1 การทดสอบและผลการทดสอบ

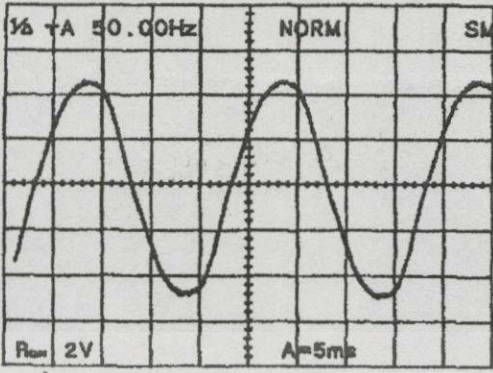
#### 5.1.1 การทดสอบหาค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลดที่ความถี่ฮาร์โมนิกต่าง ๆ

การทดสอบจะใช้อินเวอร์เตอร์ที่ให้สัญญาณเอาต์พุตรูปขายนัน โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีขนาดและความถี่ฮาร์โมนิกต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 5.1 โดยอุณหภูมิด้านบนของน้ำมันช่วงระหว่างการทดสอบมีค่าประมาณ 30-31 °C ซึ่งผลการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 5.2 - 5.11

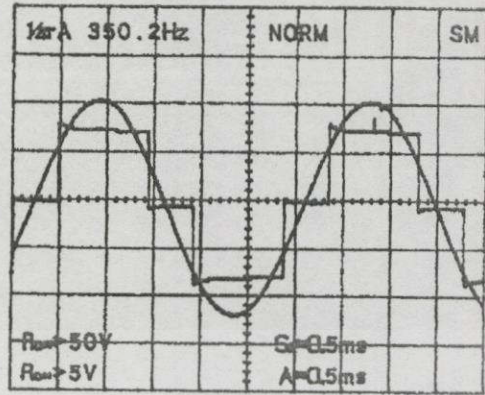


รูปที่ 5.1 แสดงวงจรการทดสอบหาค่ากำลังสูญเสียของหม้อแปลงที่ความถี่ฮาร์โมนิกต่าง ๆ

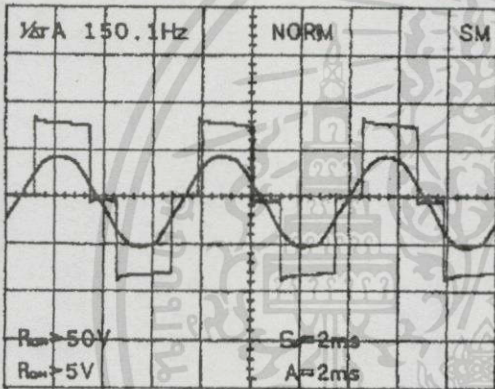
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



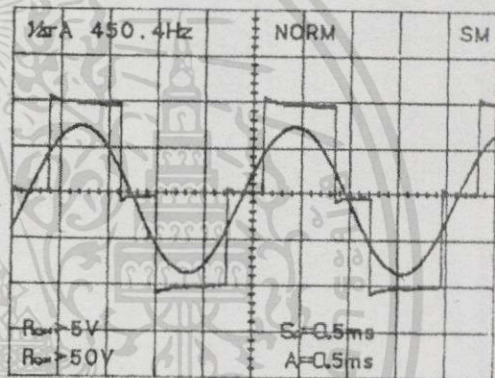
รูปที่ 5.2 แสดงคลื่นแรงดันสัญญาณขาเข้า  
ทางขาเข้าขดลวดแรงดันสูง ที่  
ความถี่ 50Hz



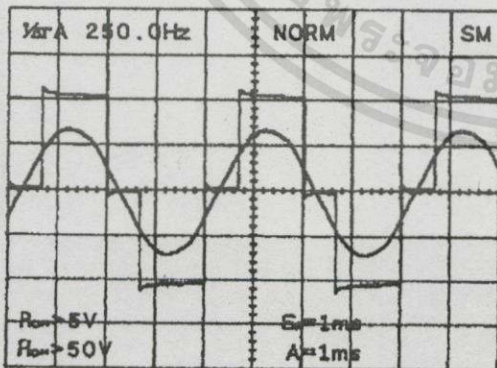
รูปที่ 5.5 แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้า  
ฟิลเตอร์และขาออกฟิลเตอร์ ที่  
ความถี่ 350Hz



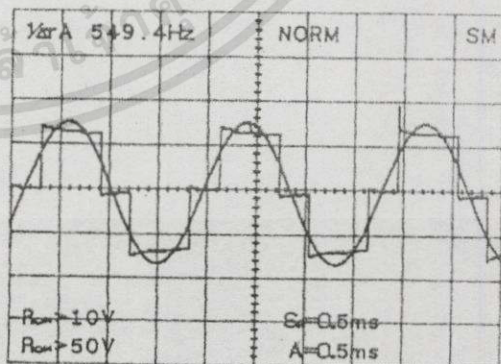
รูปที่ 5.3 แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้า  
ฟิลเตอร์และขาออกฟิลเตอร์ ที่  
ความถี่ 150Hz



รูปที่ 5.6 แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้า  
ฟิลเตอร์และขาออกฟิลเตอร์ ที่  
ความถี่ 450Hz

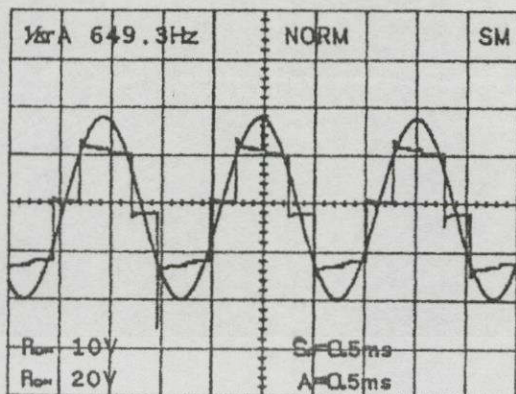


รูปที่ 5.4 แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้า  
ฟิลเตอร์และขาออกฟิลเตอร์ ที่  
ความถี่ 250Hz

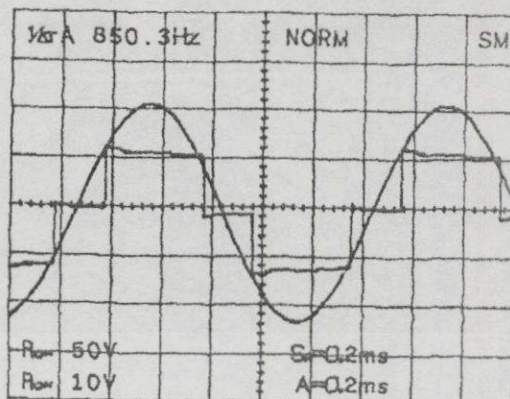


รูปที่ 5.7 แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้า  
ฟิลเตอร์และขาออกฟิลเตอร์ ที่  
ความถี่ 550Hz

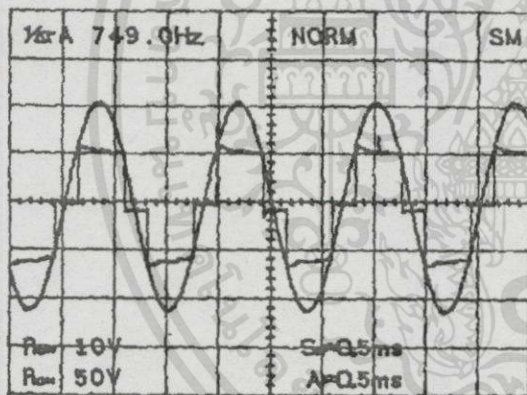
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



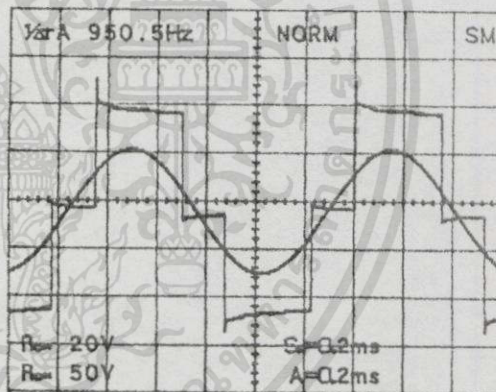
รูปที่ 5.8 แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้า  
ฟิลเตอร์และขาออกฟิลเตอร์ ที่  
ความถี่ 650Hz



รูปที่ 5.10 แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้า  
ฟิลเตอร์และขาออกฟิลเตอร์ ที่  
ความถี่ 850Hz



รูปที่ 5.9 แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้า  
ฟิลเตอร์และขาออกฟิลเตอร์ ที่  
ความถี่ 750Hz



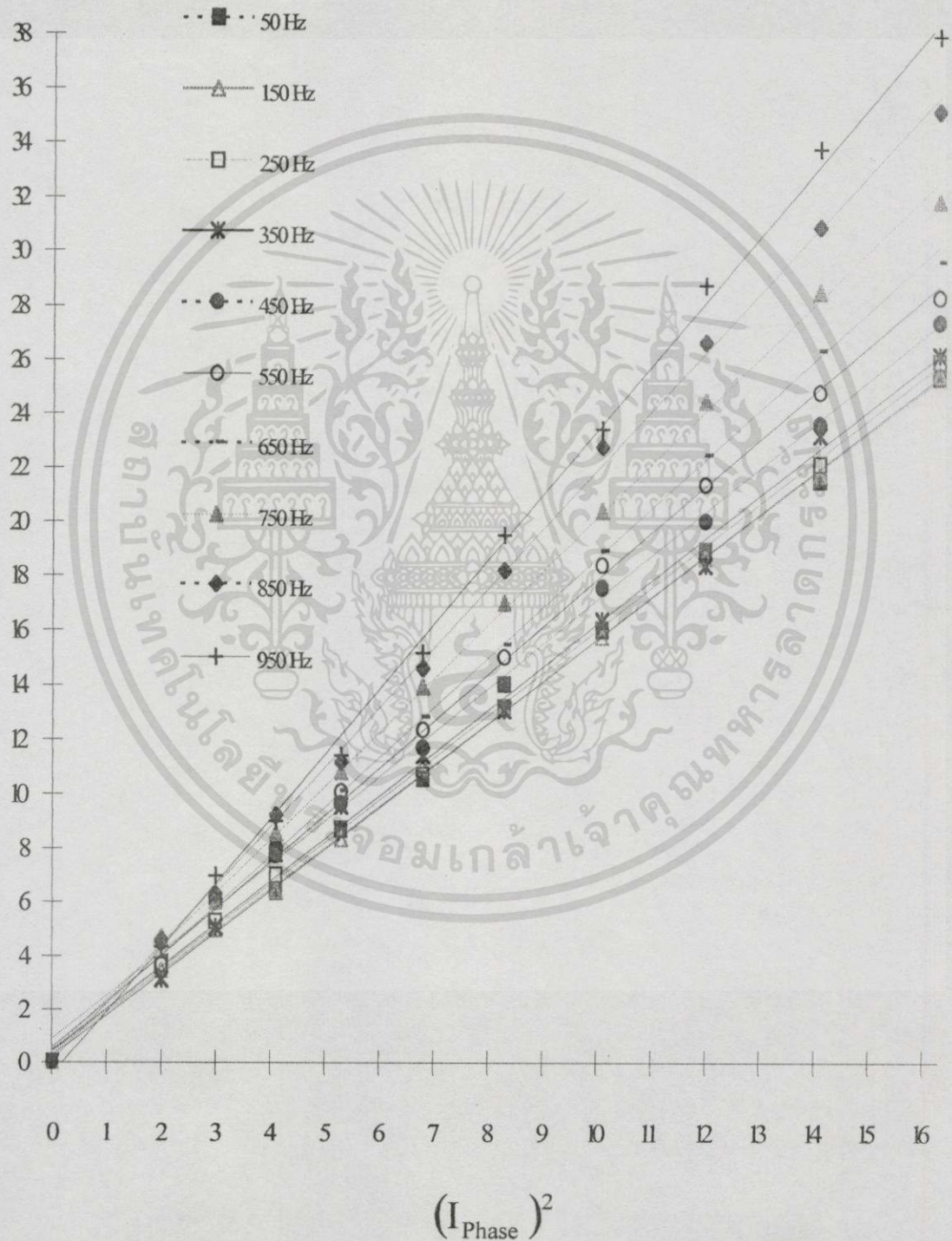
รูปที่ 5.11 แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้า  
ฟิลเตอร์และขาออกฟิลเตอร์ ที่  
ความถี่ 950Hz

หมายเหตุ

- สัญญาณขาเข้าฟิลเตอร์ คือ คลื่นสี่เหลี่ยม
- สัญญาณขาออกฟิลเตอร์ คือ คลื่นซายน้

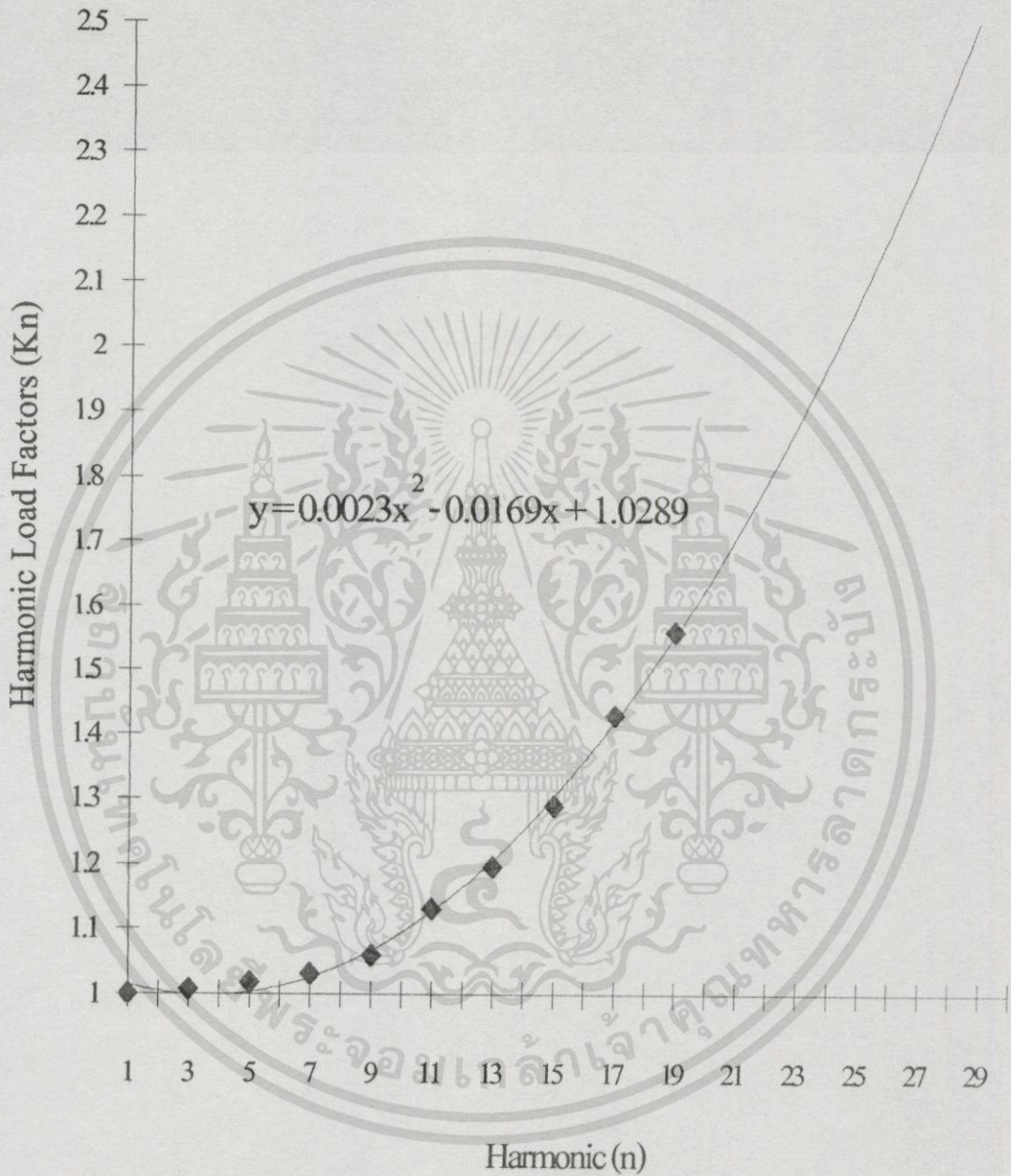
จากผลการทดสอบในการหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดต่อ  $(I_{Phase})^2$  ที่กระแสฮาร์โมนิกต่าง ๆ ดังรูปที่ 5.12 ซึ่งได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังตารางที่ 5.2 และหาความสัมพันธ์ของลำดับฮาร์โมนิกต่าง ๆ เทียบกับ Harmonic Load Factor ( $K_n$ ) ดังรูปที่ 5.13

Watt/Phase



รูปที่ 5.12 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียของโหลดตัวนำต่อค่า  $(I_{Phase})^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ของค่า Harmonic Loss Factor (Kn) ต่อค่าลำดับฮาร์โมนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 แสดงผลลัพธ์ต่าง ๆ จากการทดสอบหาค่ากำลังสูญเสียที่ความถี่ฮาร์โมนิกต่าง ๆ

ลำดับฮาร์โมนิก	สมการจากการทดสอบ	$R_{eq(ac)} (\Omega/\text{phase})$	$K_n$
1	$P = 1.526(I^2) + 0.2160$	1.526	1
3	$P = 1.537(I^2) + 0.0956$	1.537	1.007
5	$P = 1.553(I^2) + 0.2802$	1.553	1.018
7	$P = 1.574(I^2) + 0.2871$	1.574	1.032
9	$P = 1.617(I^2) + 0.7310$	1.617	1.06
11	$P = 1.726(I^2) + 0.3756$	1.726	1.131
13	$P = 1.825(I^2) + 0.1786$	1.825	1.196
15	$P = 1.969(I^2) + 0.2096$	1.969	1.29
17	$P = 2.182(I^2) - 0.1839$	2.182	1.43
19	$P = 2.380(I^2) - 0.7097$	2.380	1.56

จากผลการทดสอบจะ ได้ความสัมพันธ์ของ Harmonic Load Factor ต่อลำดับฮาร์โมนิกคือ

$$y = 0.0023x^2 - 0.0169x + 1.0289 \quad (5.1)$$

เมื่อ

y หมายถึง Harmonic Load Factor

x หมายถึง ลำดับของฮาร์โมนิก

### 5.1.2 วิธีการทดสอบและผลการทดสอบหาอุณหภูมิหม้อแปลงที่เงื่อนไขต่าง ๆ

#### 5.1.2.1 เงื่อนไขของการทดสอบอุณหภูมิหม้อแปลง

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ตั้งเงื่อนไขของการทดสอบอุณหภูมิหม้อแปลงไว้ดังต่อไปนี้

1. ทดสอบโดยวิธีการลัดวงจรทางขดทุติยภูมิ วงจรดังรูปที่ 5.14 โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ระดับค่าสูญเสียรวม (427 วัตต์/3 เฟส)
2. ทดสอบโดยวิธีการใช้โหลดเป็นเชิงเส้น(ลวดความร้อน, หลอดอินแคนเดสเซนต์) วงจรดังรูปที่ 5.15 โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่พิกัดหม้อแปลง ซึ่งมีข้อมูลดังตารางที่ 5.3 สัญญาณแรงดันและกระแสสามารถแสดงดังรูปที่ 5.17, 5.18

จากการทดสอบ

$$V_1 \approx V_{rms} \approx 380 \text{ V/line} \approx 380 \text{ V/phase}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$I_1 = 15.03 \text{ A/line} \approx 8.678 \text{ A/phase}$$

$$I_{\text{rms}} = 15.15 \text{ A/line} \approx 8.75 \text{ A/phase}$$

ซึ่งการทดสอบไม่สามารถปรับค่า  $I_{\text{rms}}$  ให้เท่ากับ  $I_{\text{rms}}$  ที่พิกัดของหม้อแปลง (15.2 A/line หรือ 8.776 A/phase) ได้ อันเนื่องมาจากโหลดที่ใช้เป็นแหล่งความร้อนและโหลดอินแดนเตสเซนส์ ดังนั้นผลลัพธ์ของอุณหภูมิหม้อแปลงที่ได้จากการทดสอบเมื่อโหลดเชิงเส้นจะเกิดจากประมาณให้

$$I_{\text{rms}} (\text{จากการทดสอบ}) \approx I_{\text{rms}} (\text{พิกัดหม้อแปลง}) = 15.2 \text{ A/line} \approx 8.776 \text{ A/phase}$$

3. ทดสอบโดยวิธีการใช้โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (ชุดเรกติไฟเออร์ แบบ 6 คลื่น, ลวดความร้อน, โหลดอินแดนเตสเซนส์และตัวภาซิคเตอร์) วงจรคั้งรูปที่ 5.16 โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่พิกัดและปรับโหลดให้กระแสไฟฟ้าคลื่นพื้นฐานที่ 50Hz ให้มีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่คลื่นพื้นฐาน 50Hz เมื่อเป็นการทดสอบโหลดเชิงเส้น โดยข้อจำกัดวิธีการนี้จะต้องปรับค่า %THD<sub>v</sub> ทางขลลวดทุติยภูมิหม้อแปลงไม่เกิน 5% [6] ดังนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าคลื่นพื้นฐาน ( $V_1$ ) จะประมาณเท่ากับค่าแรงดันไฟฟ้าประสิทธิผล ( $V_{\text{rms}}$ ) ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 5.4 ซึ่งสัญญาณแรงดันและกระแสสามารถแสดงคั้งรูปที่ 5.19 ถึง 5.32

จากผลการทดสอบ

$$I_1 = 15.22 \text{ A/line} \approx 8.887 \text{ A/phase}$$

$$I_{\text{rms}} = 17.11 \text{ A/line} \approx 9.880 \text{ A/phase}$$

เปรียบเทียบผลการทดสอบ

$$\text{เมื่อทดสอบโดยใช้โหลดเชิงเส้น} \quad I_1 = 15.03 \text{ A/line}$$

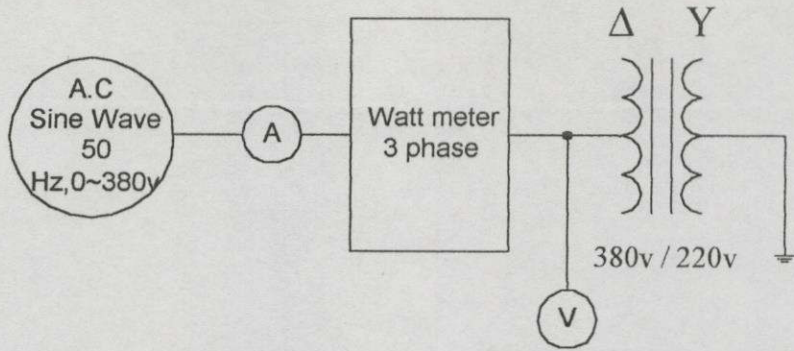
$$\text{เมื่อทดสอบโดยใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้น} \quad I_1 = 15.22 \text{ A/line}$$

จะเห็นว่าค่า  $I_1$  จากการทดสอบไม่สามารถปรับให้มีค่าเท่ากันได้ สาเหตุอันเนื่องจากการใช้โหลดแหล่งความร้อนและโหลดอินแดนเตสเซนส์ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะประมาณให้

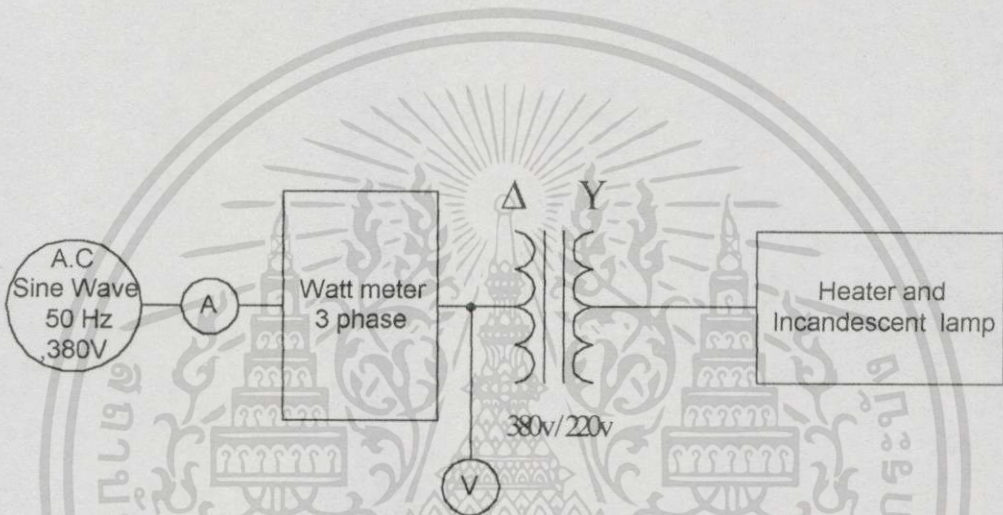
$$I_1 (\text{จากการทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น}) \approx I_1 (\text{จากการทดสอบแบบโหลดไม่เป็นเชิงเส้น}) \approx$$

$$I_{\text{rms}} (\text{พิกัดหม้อแปลง}) = 15.2 \text{ A/line} \approx 8.776 \text{ A/phase}$$

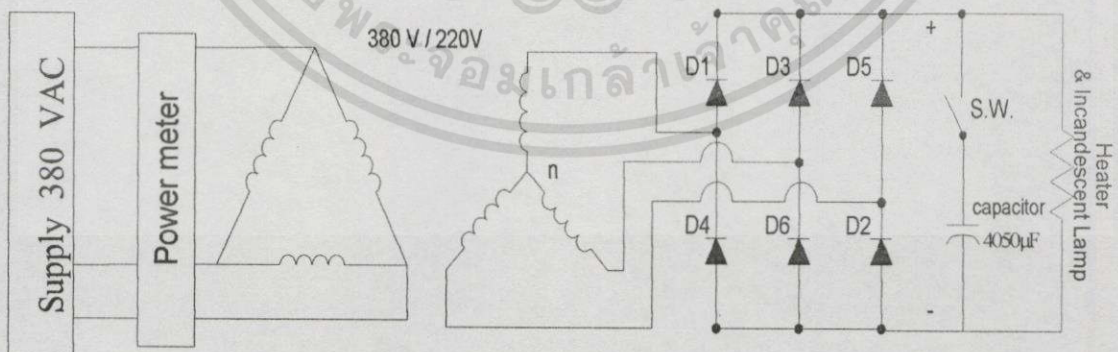
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 แสดงวงจรการทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม โดยวิธีการลัดวงจรทางขดลวดทุติยภูมิ



รูปที่ 5.15 แสดงวงจรการทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม โดยวิธีการใช้โหลดแบบเชิงเส้น



รูปที่ 5.16 แสดงวงจรการทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม โดยวิธีการใช้โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น

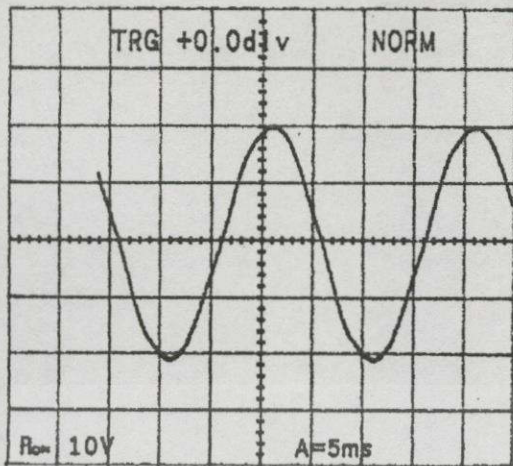
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 แสดงการทดสอบหาค่าต่าง ๆ ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเมื่อเป็นโหลดเรียงกันที่ประมาณค่าพิกัดหม้อแปลง

ลำดับ	I Load ต่อ I rated ของหม้อแปลง (%)	ชนิดโหลด	เวลา (ชั่วโมง)	THDV (%)	Vrms (Volt)	DC (%)	Order											
							1	3	5	7	9	11	13	15	17	19		
						(% / Volt)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1.	100	ลวดความร้อน+ หลอดอินแคนดัม	9	2.1	382.3	0	100	0	0.7	1.3	0	0	0.2	0	0	0	0	0
							1	3	5	7	9	11	13	15	17	19		
							(% / Amp) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%)</td> </td></td></td></td></td></td></td></td></td></td>	(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%)</td> </td></td></td></td></td></td></td></td></td>	(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%)</td> </td></td></td></td></td></td></td></td>	(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%)</td> </td></td></td></td></td></td></td>	(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%)</td> </td></td></td></td></td></td>	(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%)</td> </td></td></td></td></td>	(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%)</td> </td></td></td></td>	(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%)</td> </td></td></td>	(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%)</td> </td></td>	(%) <td>(%) <td>(%)</td> </td>	(%) <td>(%)</td>	(%)
				2.1	15.15	6.1	100	15.03	1.7	1.1	0	0.1	0	0	0	0	0	0

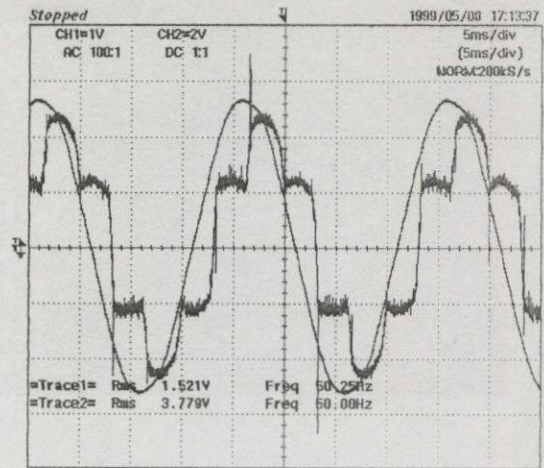
ตารางที่ 5.4 แสดงค่าขนาดต่าง ๆ ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเมื่อเป็นโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

ลำดับ	I Load ต่อ I rated ของหม้อแปลง (%)	ชนิดโหลด	เวลา (ชั่วโมง)	THDV (%)	Vrms (Volt)	DC (%)	Order												
							1	3	5	7	9	11	13	15	17	19			
						(% / Volt)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
1.	112.57	1.เร็กติไฟเยอร์ 2.ลวดความร้อน+ หลอดอินแคนดัม 3.คาปาซิเตอร์ 4050 $\mu$ F	9	2.2	382.5	0	100	0.2	2.1	0.7	0	0.1	0	0	0.1	0	0	0	0
							1	3	5	7	9	11	13	15	17	19			
							(% / Amp) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%)</td> </td></td></td></td></td></td></td></td></td></td>	(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%)</td> </td></td></td></td></td></td></td></td></td>	(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%)</td> </td></td></td></td></td></td></td></td>	(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%)</td> </td></td></td></td></td></td></td>	(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%)</td> </td></td></td></td></td></td>	(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%)</td> </td></td></td></td></td>	(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%)</td> </td></td></td></td>	(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%)</td> </td></td></td>	(%) <td>(%) <td>(%) <td>(%)</td> </td></td>	(%) <td>(%) <td>(%)</td> </td>	(%) <td>(%)</td>	(%)	
				51.4	17.11	5.3	100	15.22	46.2	20.7	0.1	6.2	3.8	0.1	2.8	1.5	1.5	1.5	



รูปที่ 5.17 แสดงสัญญาณแรงดันทางขดลวด

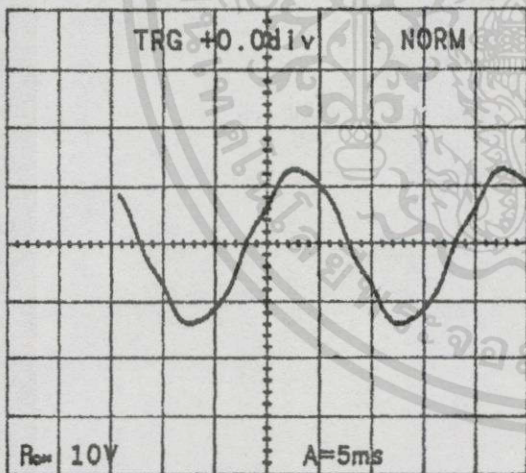
แรงดันสูง เมื่อโหลดหม้อแปลงเป็น  
โหลดเชิงเส้น



=Filter=      =Offset=      =Record Length=      =Trigger=  
Smoothing : ON    CH1 : -----      Main : 10K      Mode : AUTO  
BW : FULL      CH2 : 0.00V      Zoom : 100      Type : EDGE CH1 f  
Delay : 0.0ns  
Hold Off : MINIMUM

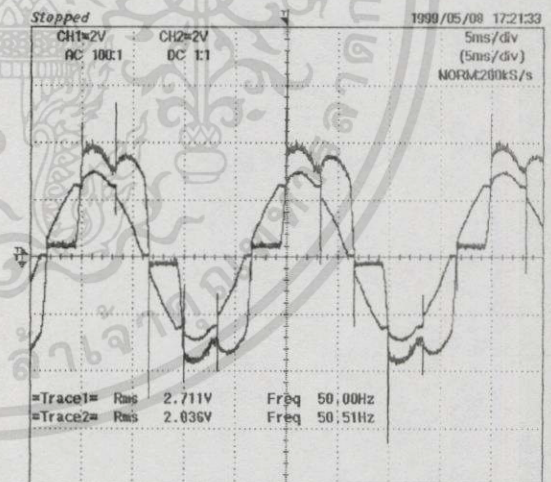
รูปที่ 5.19 แสดงสัญญาณกระแสและแรงดัน

ทางขดลวดแรงดันสูง เมื่อไม่ใส่ตัว  
เก็บประจุ ที่  $I_{pri}$  ประมาณ 100 %  
Trace1 = กระแสไฟฟ้า อัตราส่วน 1:10  
Trace2 = แรงดันไฟฟ้า อัตราส่วน 1:100



รูปที่ 5.18 แสดงสัญญาณกระแสทางขดลวด

แรงดันสูง เมื่อโหลดหม้อแปลงเป็น  
โหลดเชิงเส้น

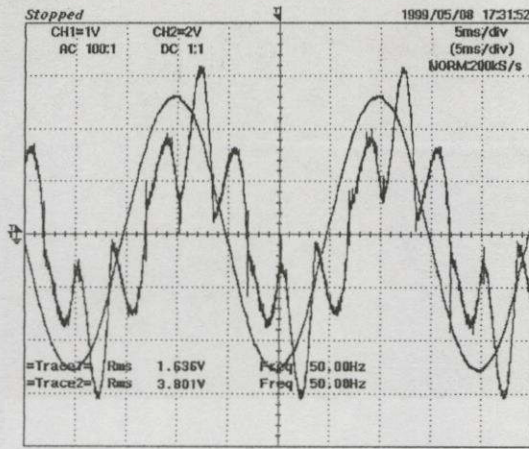


=Filter=      =Offset=      =Record Length=      =Trigger=  
Smoothing : ON    CH1 : -----      Main : 10K      Mode : AUTO  
BW : FULL      CH2 : 0.00V      Zoom : 100      Type : EDGE CH1 f  
Delay : 0.0ns  
Hold Off : MINIMUM

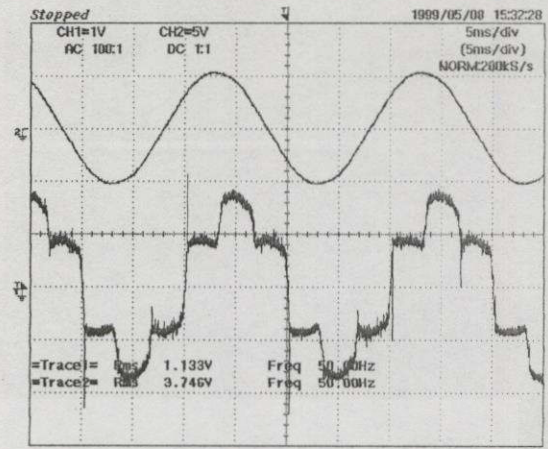
รูปที่ 5.20 แสดงสัญญาณกระแสและแรงดัน

ทางขดลวดแรงต่ำ เมื่อไม่ใส่ตัวเก็บ  
ประจุที่  $I_{sec}$  ประมาณ 100 %  
Trace1 = กระแสไฟฟ้า อัตราส่วน 1:10  
Trace2 = แรงดันไฟฟ้า อัตราส่วน 1:100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



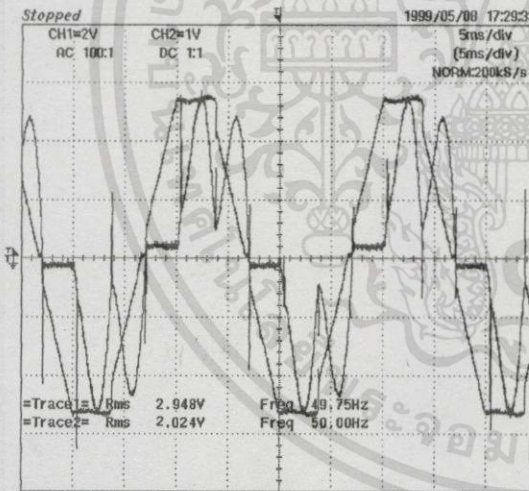
=Filter= Smoothing : ON BW : FULL  
 =Offset= CH1 : ----- CH2 : 0.00V  
 =Record Length= Main : 10K Zoom : 100  
 =Trigger= Mode : AUTO Type : EDGE CH1  $\uparrow$  Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM



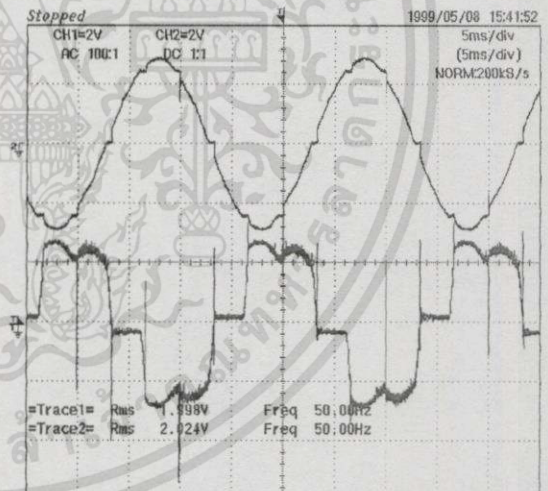
=Filter= Smoothing : ON BW : FULL  
 =Offset= CH1 : ----- CH2 : 0.00V  
 =Record Length= Main : 10K Zoom : 100  
 =Trigger= Mode : AUTO Type : EDGE CH1  $\uparrow$  Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

รูปที่ 5.21 แสดงสัญญาณกระแสและแรงดันทางขดลวดแรงดันสูง เมื่อใส่ตัวเก็บประจุที่  $I_{pri}$  ประมาณ 110 %  
 Trace1 = กระแสไฟฟ้า อัตราส่วน 1:10  
 Trace2 = แรงดันไฟฟ้า อัตราส่วน 1:100

รูปที่ 5.23 แสดงสัญญาณกระแสและแรงดันทางขดลวดแรงสูง เมื่อไม่ใส่ตัวเก็บประจุที่  $I_{pri}$  ประมาณ 75 %  
 Trace1 = กระแสไฟฟ้า อัตราส่วน 1:10  
 Trace2 = แรงดันไฟฟ้า อัตราส่วน 1:100



=Filter= Smoothing : ON BW : FULL  
 =Offset= CH1 : ----- CH2 : 0.00V  
 =Record Length= Main : 10K Zoom : 100  
 =Trigger= Mode : AUTO Type : EDGE CH1  $\uparrow$  Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

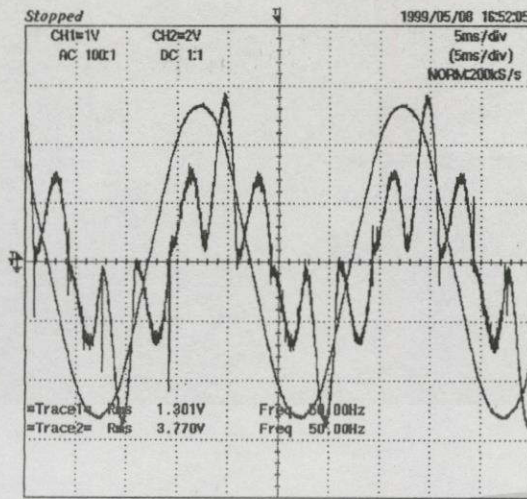


=Filter= Smoothing : ON BW : FULL  
 =Offset= CH1 : ----- CH2 : 0.00V  
 =Record Length= Main : 10K Zoom : 100  
 =Trigger= Mode : AUTO Type : EDGE CH1  $\uparrow$  Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

รูปที่ 5.22 แสดงสัญญาณกระแสและแรงดันทางขดลวดแรงต่ำ เมื่อใส่ตัวเก็บประจุที่  $I_{sec}$  ประมาณ 110 %  
 Trace1 = กระแสไฟฟ้า อัตราส่วน 1:10  
 Trace2 = แรงดันไฟฟ้า อัตราส่วน 1:100

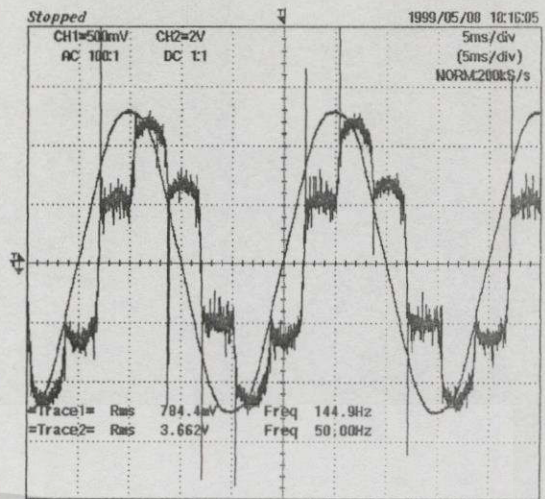
รูปที่ 5.24 แสดงสัญญาณกระแสและแรงดันทางขดลวดแรงต่ำ เมื่อไม่ใส่ตัวเก็บประจุที่  $I_{sec}$  ประมาณ 75 %  
 Trace1 = กระแสไฟฟ้า อัตราส่วน 1:10  
 Trace2 = แรงดันไฟฟ้า อัตราส่วน 1:100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



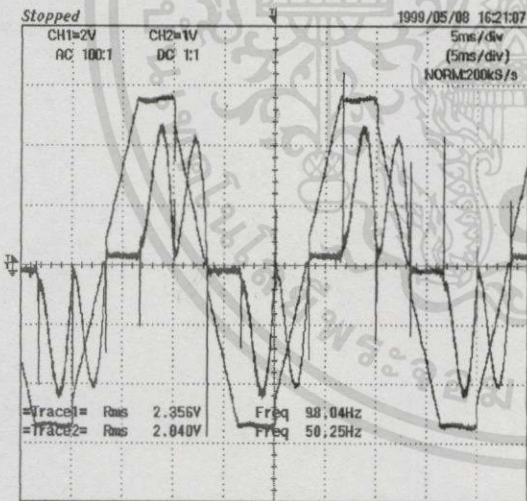
=Filter= Smoothing : ON BW : FULL  
 =Offset= CH1 : ----- CH2 : 0.00V  
 =Record Length= Main : 10K Zoom : 100  
 =Trigger= Mode : AUTO Type : EDGE CH1 f Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

รูปที่ 5.25 แสดงสัญญาณกระแสและแรงดันทางขดลวดแรงสูง เมื่อใส่ตัวเก็บประจุที่  $I_{pri}$  ประมาณ 86 %  
 Trace1 = กระแสไฟฟ้า อัตราส่วน 1:10  
 Trace2 = แรงดันไฟฟ้า อัตราส่วน 1:100



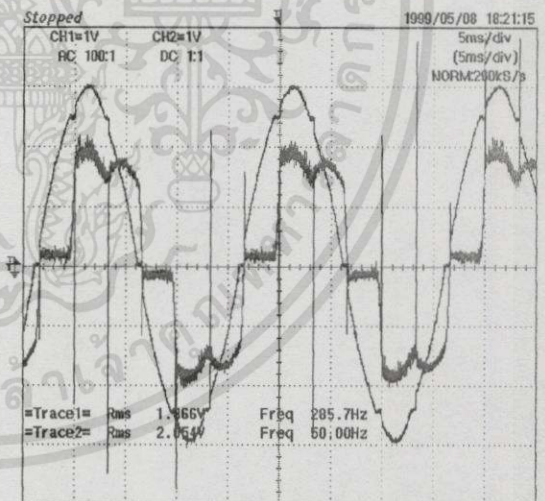
=Filter= Smoothing : ON BW : FULL  
 =Offset= CH1 : ----- CH2 : 0.00V  
 =Record Length= Main : 10K Zoom : 100  
 =Trigger= Mode : AUTO Type : EDGE CH1 f Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

รูปที่ 5.27 แสดงสัญญาณกระแสและแรงดันทางขดลวดแรงดันสูง เมื่อไม่ใส่ตัวเก็บประจุที่  $I_{pri}$  ประมาณ 52 %  
 Trace1 = กระแสไฟฟ้า อัตราส่วน 1:10  
 Trace2 = แรงดันไฟฟ้า อัตราส่วน 1:100



=Filter= Smoothing : ON BW : FULL  
 =Offset= CH1 : ----- CH2 : 0.00V  
 =Record Length= Main : 10K Zoom : 100  
 =Trigger= Mode : AUTO Type : EDGE CH1 f Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

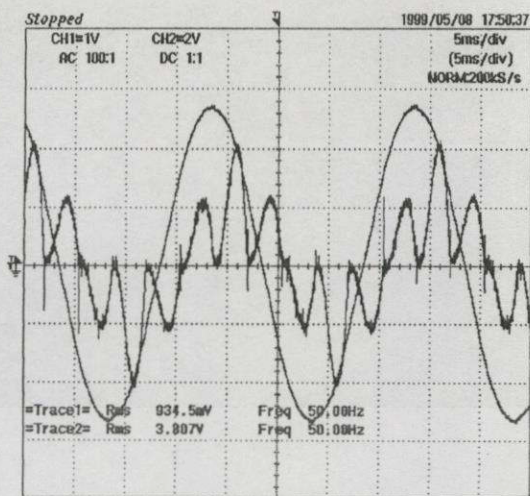
รูปที่ 5.26 แสดงสัญญาณกระแสและแรงดันทางขดลวดแรงดันต่ำ เมื่อใส่ตัวเก็บประจุที่  $I_{sec}$  ประมาณ 86 %  
 Trace1 = กระแสไฟฟ้า อัตราส่วน 1:10  
 Trace2 = แรงดันไฟฟ้า อัตราส่วน 1:100



=Filter= Smoothing : ON BW : FULL  
 =Offset= CH1 : ----- CH2 : 0.00V  
 =Record Length= Main : 10K Zoom : 100  
 =Trigger= Mode : AUTO Type : EDGE CH1 f Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

รูปที่ 5.28 แสดงสัญญาณกระแสและแรงดันทางขดลวดแรงดันต่ำ เมื่อไม่ใส่ตัวเก็บประจุที่  $I_{sec}$  ประมาณ 52 %  
 Trace1 = กระแสไฟฟ้า อัตราส่วน 1:10  
 Trace2 = แรงดันไฟฟ้า อัตราส่วน 1:100

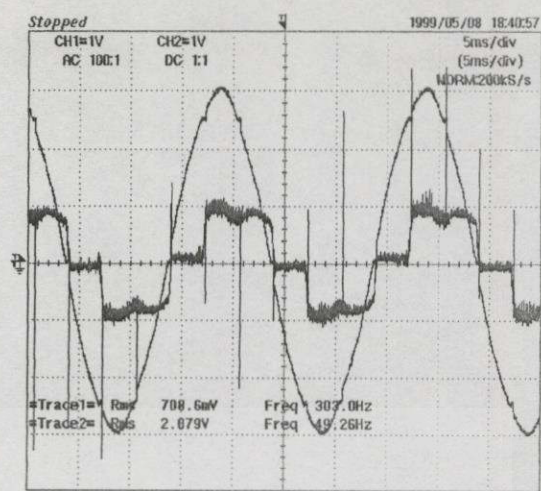
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Filter: Smoothing: ON, BW: FULL  
 Offset: CH1: -----, CH2: 0.00V  
 Record Length: Main: 10K, Zoom: 100  
 Trigger: Mode: AUTO, Type: EDGE CH1, Delay: 0.0ns, Hold Off: MINIMUM

รูปที่ 5.29 แสดงสัญญาณกระแสและแรงดันทางขดลวดแรงดันสูง เมื่อใส่ตัวเก็บประจุที่  $I_{pri}$  ประมาณ 62 %

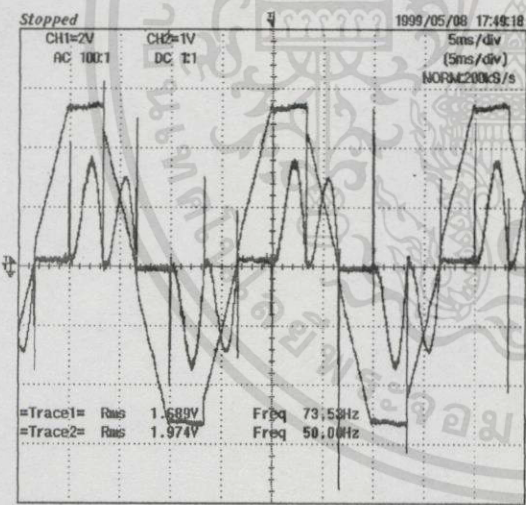
Trace1 = กระแสไฟฟ้า อัตราส่วน 1:10  
 Trace2 = แรงดันไฟฟ้า อัตราส่วน 1:100



Filter: Smoothing: ON, BW: FULL  
 Offset: CH1: -----, CH2: 0.00V  
 Record Length: Main: 10K, Zoom: 100  
 Trigger: Mode: AUTO, Type: EDGE CH1, Delay: 0.0ns, Hold Off: MINIMUM

รูปที่ 5.31 แสดงสัญญาณกระแสและแรงดันทางขดลวดแรงดันต่ำ เมื่อไม่ใส่ตัวเก็บประจุที่  $I_{sec}$  ประมาณ 26 %

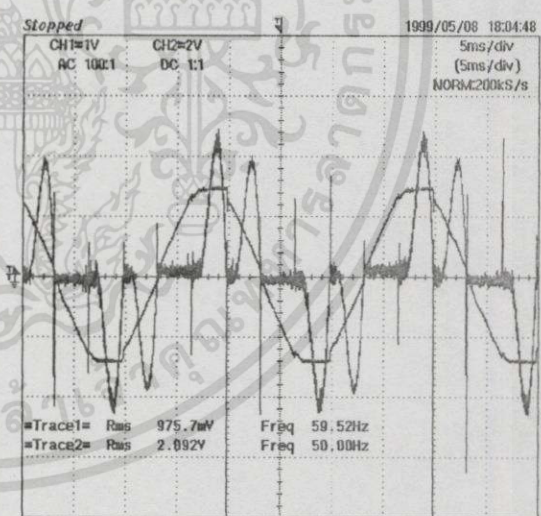
Trace1 = กระแสไฟฟ้า อัตราส่วน 1:10  
 Trace2 = แรงดันไฟฟ้า อัตราส่วน 1:100



Filter: Smoothing: ON, BW: FULL  
 Offset: CH1: -----, CH2: 0.00V  
 Record Length: Main: 10K, Zoom: 100  
 Trigger: Mode: AUTO, Type: EDGE CH1, Delay: 0.0ns, Hold Off: MINIMUM

รูปที่ 5.30 แสดงสัญญาณกระแสและแรงดันทางขดลวดแรงดันต่ำ เมื่อใส่ตัวเก็บประจุที่  $I_{sec}$  ประมาณ 52 %

Trace1 = กระแสไฟฟ้า อัตราส่วน 1:10  
 Trace2 = แรงดันไฟฟ้า อัตราส่วน 1:100



Filter: Smoothing: ON, BW: FULL  
 Offset: CH1: -----, CH2: 0.00V  
 Record Length: Main: 10K, Zoom: 100  
 Trigger: Mode: AUTO, Type: EDGE CH1, Delay: 0.0ns, Hold Off: MINIMUM

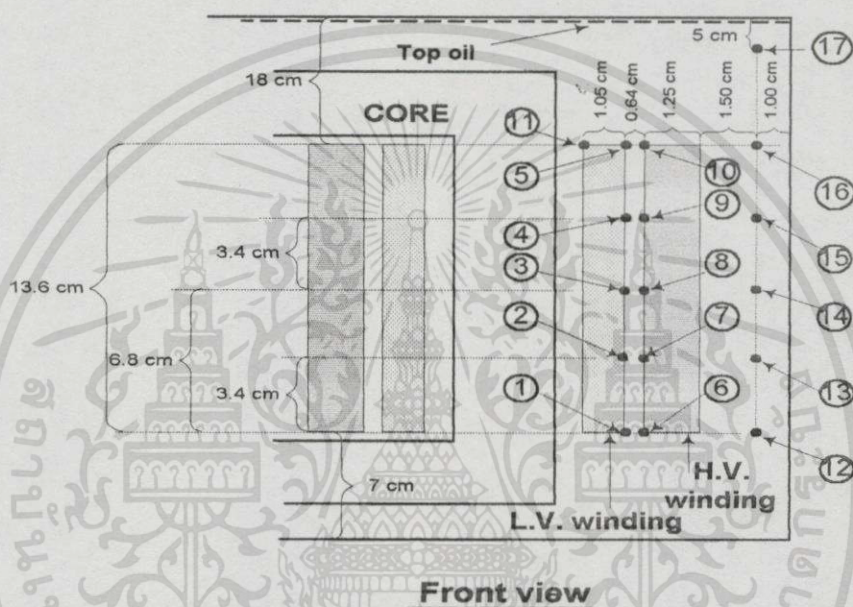
รูปที่ 5.32 สัญญาณกระแสและแรงดันทางขดลวดแรงดันต่ำ เมื่อใส่ตัวเก็บประจุที่  $I_{sec}$  ประมาณ 36 %

Trace1 = กระแสไฟฟ้า อัตราส่วน 1:10  
 Trace2 = แรงดันไฟฟ้า อัตราส่วน 1:100

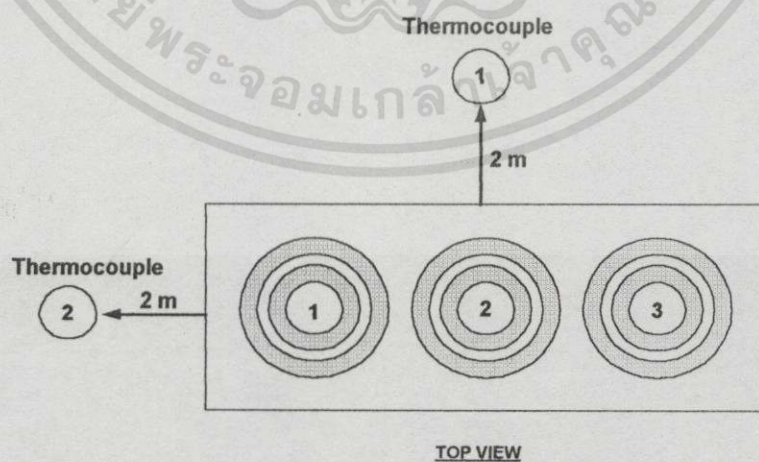
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจะติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลที่ตำแหน่งของขดลวดปฐมภูมิ, ทูตียภูมิและบริเวณน้ำมันเป็นจำนวน 17 ตำแหน่งแสดงดังรูปที่ 5.33 และติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล 2 ตำแหน่ง เพื่อวัดอุณหภูมิแวดล้อมแสดงดังรูปที่ 5.34

ขั้นตอนการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลงแสดงดัง[11,19] ซึ่งผลการทดสอบอุณหภูมิทั้ง 3 เงื่อนไขสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.35 ถึง 5.55 และการเขียนกราฟหาค่าความต้านทาน ณ จุดตัดไฟฟ้างดังรูปที่ 5.56 ถึง 5.61 และผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิจากที่ตำแหน่งเดียวกันจากการทดสอบทั้ง 3 เงื่อนไขแสดงดังรูปที่ 5.62 ถึง 5.78

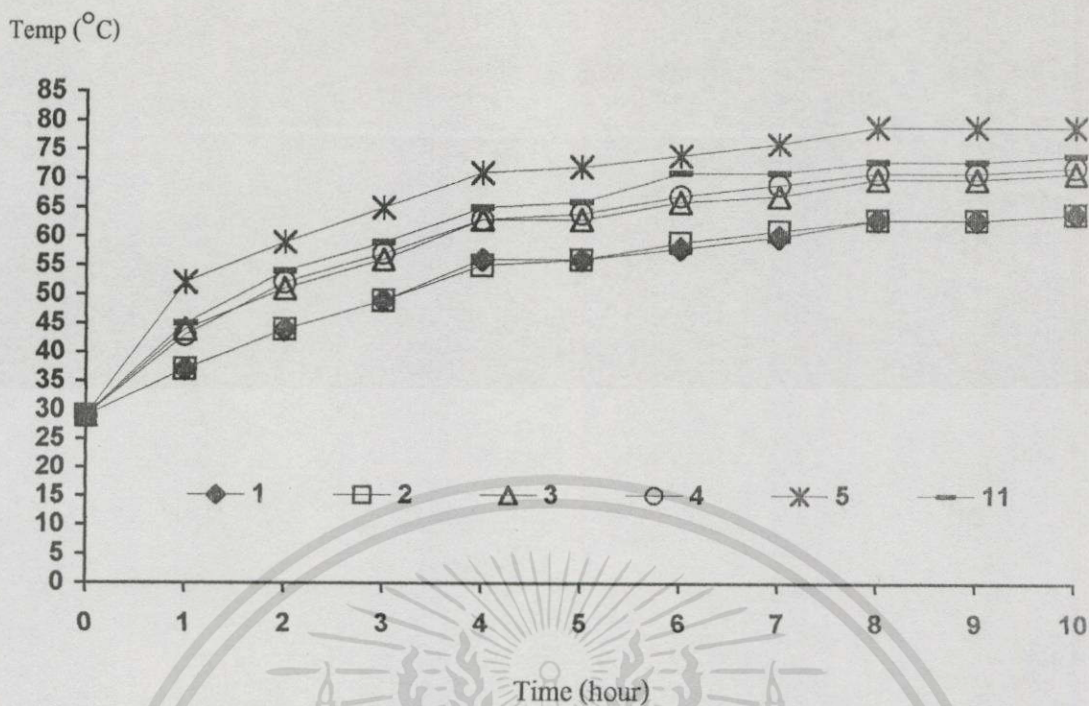


รูปที่ 5.33 แสดงการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน

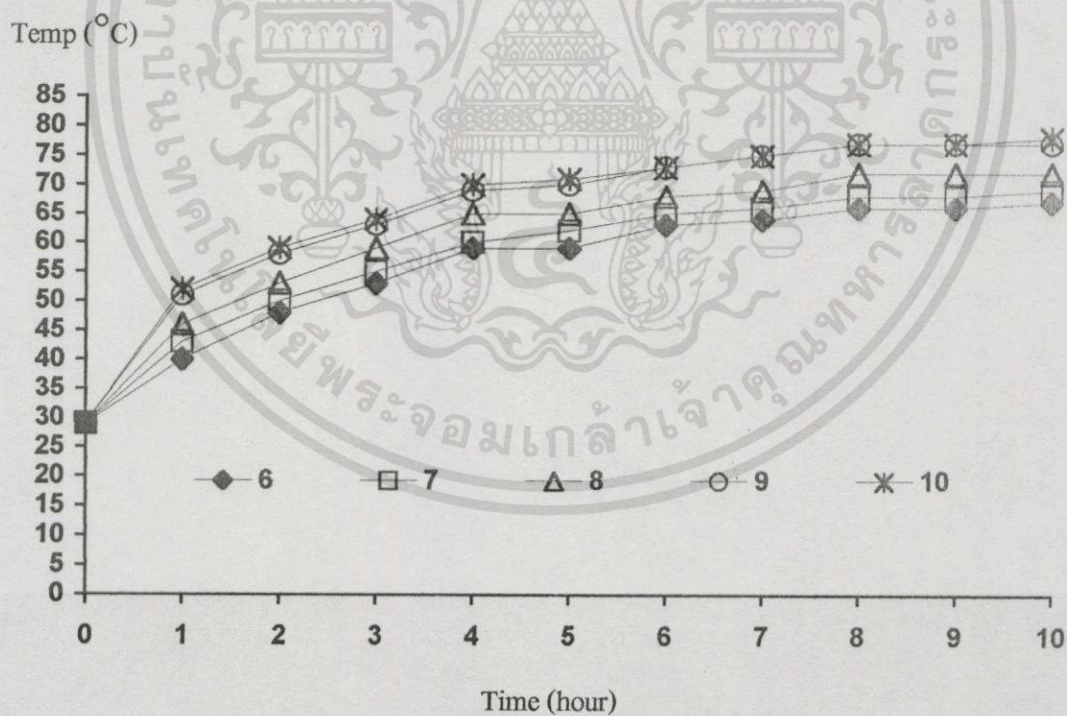


รูปที่ 5.34 แสดงการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิแวดล้อมรอบๆ หม้อแปลงที่ทดสอบ จำนวน 2 ตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

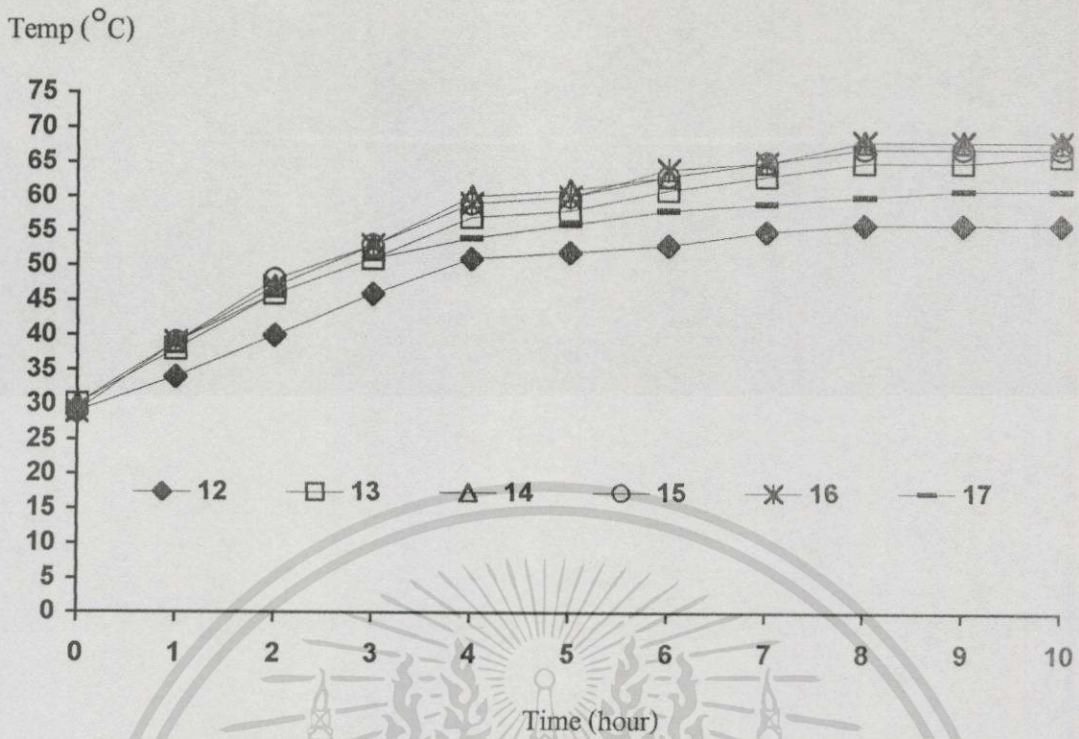


รูปที่ 5.35 แสดงผลของอุณหภูมิขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 1, 2, 3, 4, 5, 11 เมื่อเป็นการทดสอบแบบลัดวงจร

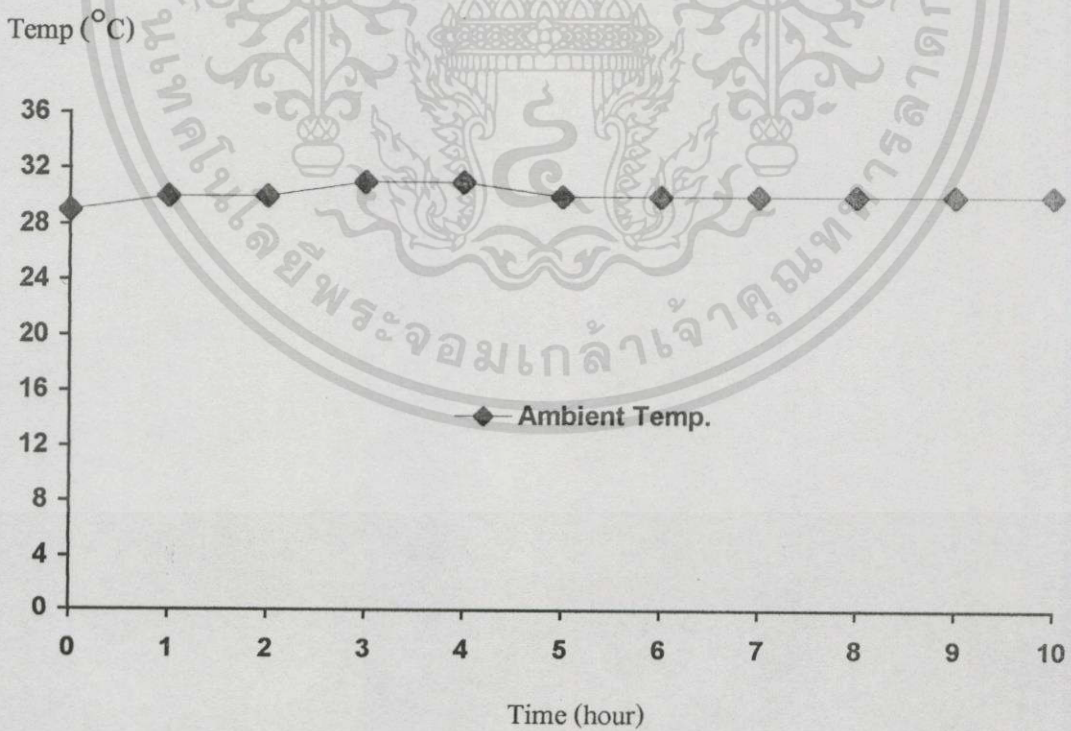


รูปที่ 5.36 แสดงผลของอุณหภูมิขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 6, 7, 8, 9, 10 เมื่อเป็นการทดสอบแบบลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

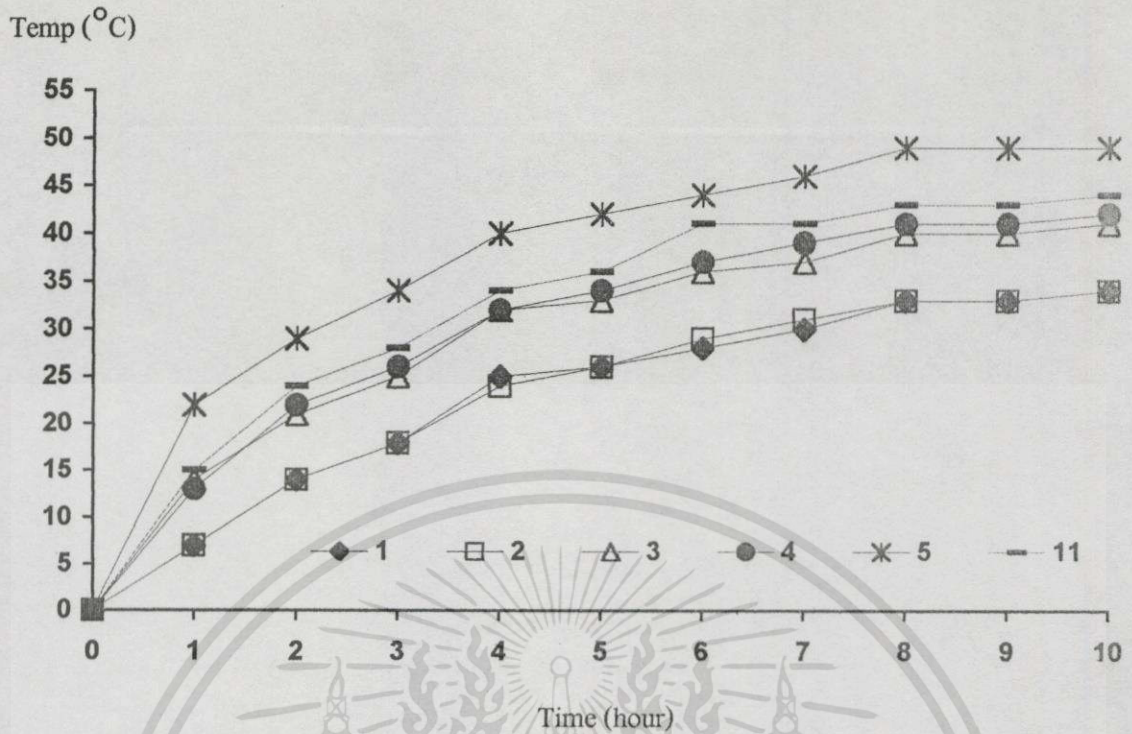


รูปที่ 5.37 แสดงผลของอุณหภูมิน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 12, 13, 14, 15, 16, 17 เมื่อเป็นการทดสอบแบบลัดวงจร

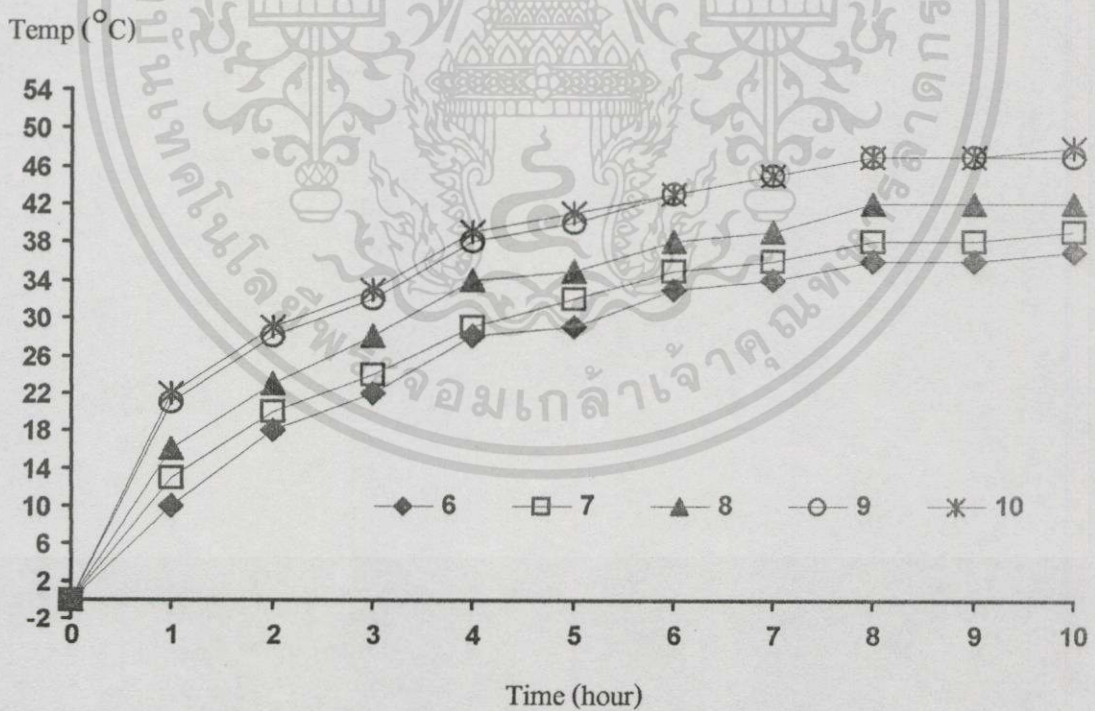


รูปที่ 5.38 แสดงผลของอุณหภูมิแวดล้อมขณะทำการทดสอบแบบลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

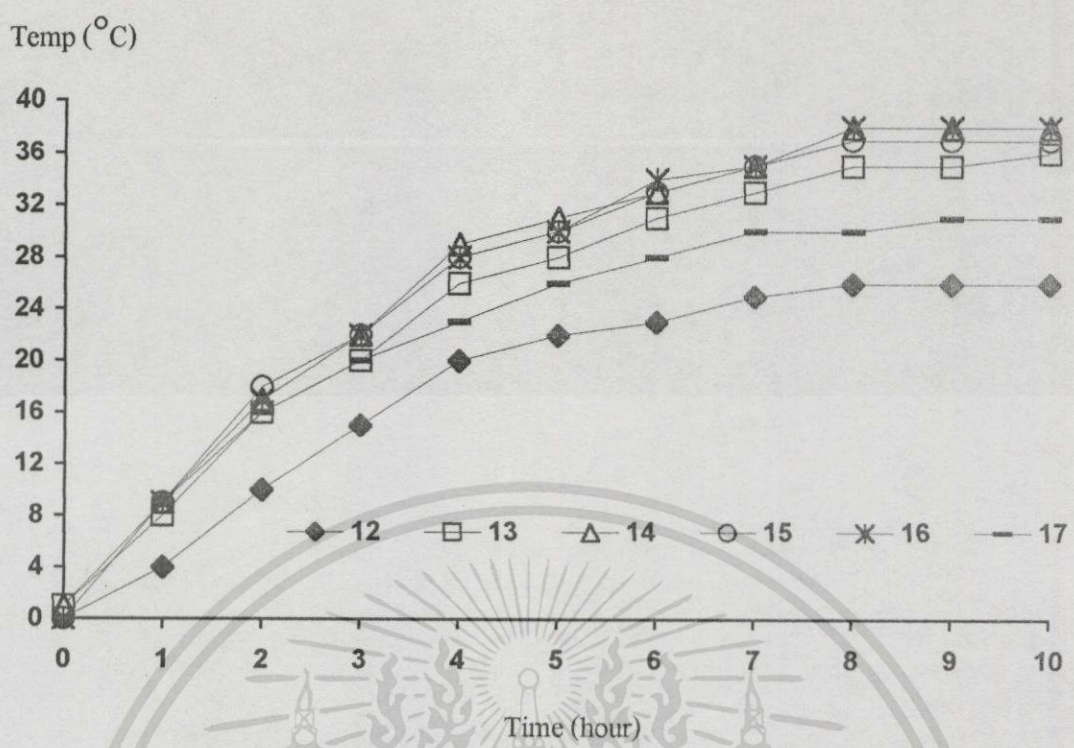


รูปที่ 5.39 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงค้ำต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 1, 2, 3, 4, 5, 11 เมื่อเป็นการทดสอบแบบสัควงจร

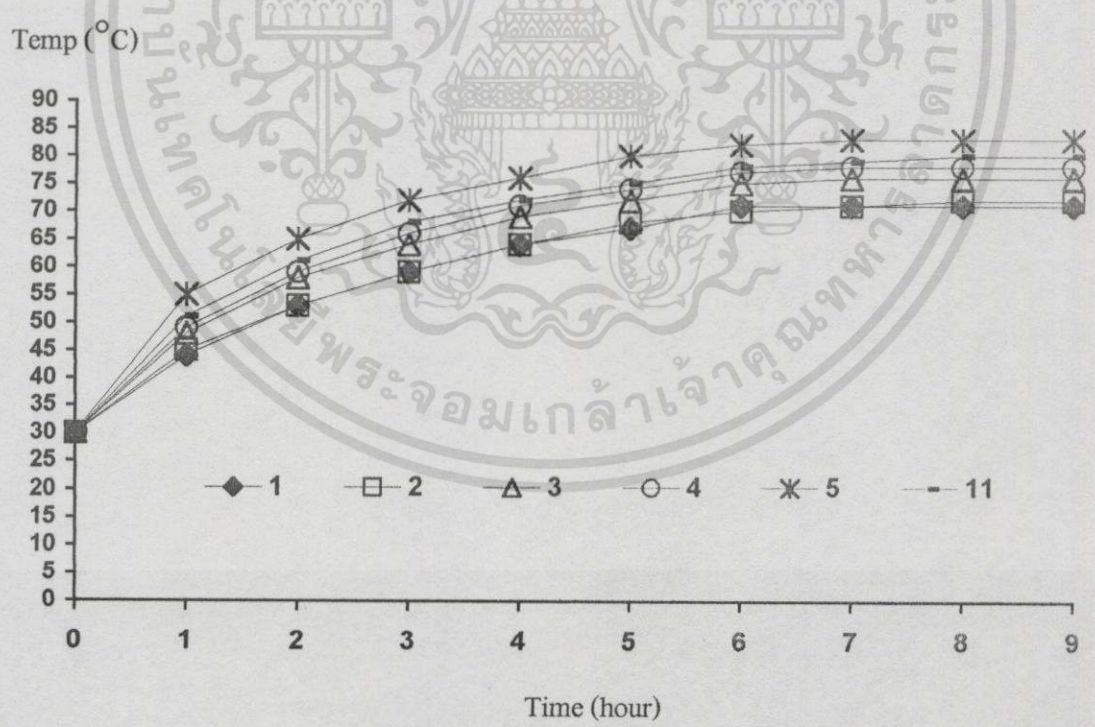


รูปที่ 5.40 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงค้ำสูง ณ ตำแหน่งที่ 6, 7, 8, 9, 10 เมื่อเป็นการทดสอบแบบสัควงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

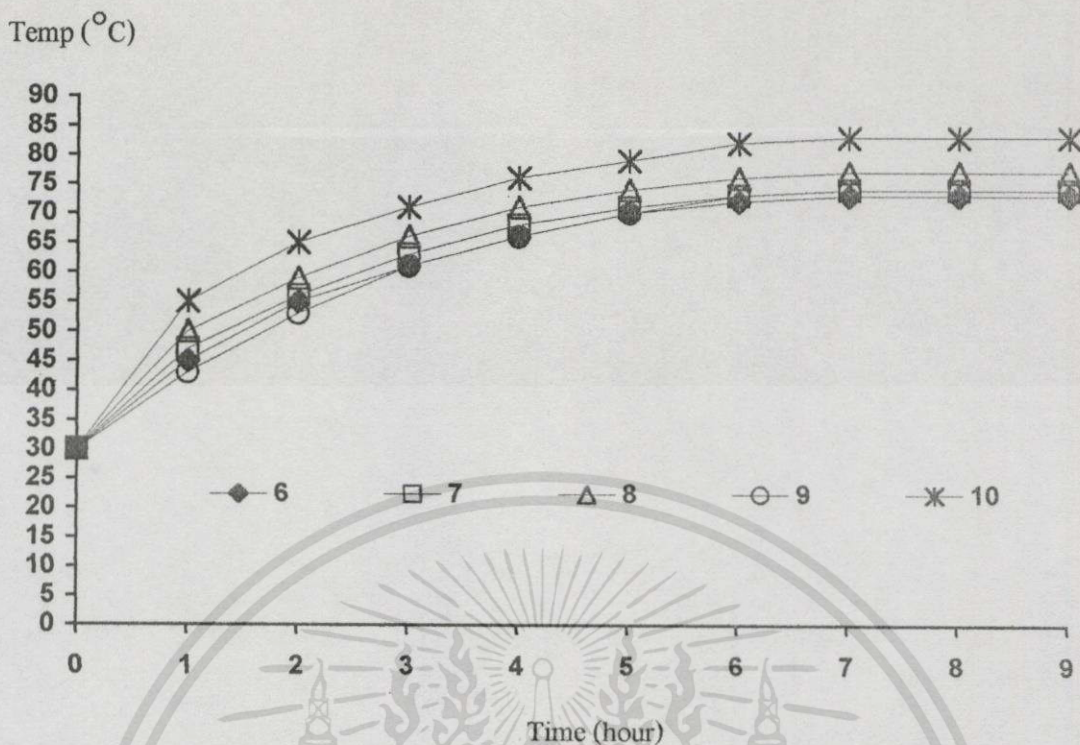


รูปที่ 5.41 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 12, 13, 14, 15, 16, 17 เมื่อเป็นการทดสอบแบบปลั้ววงจร

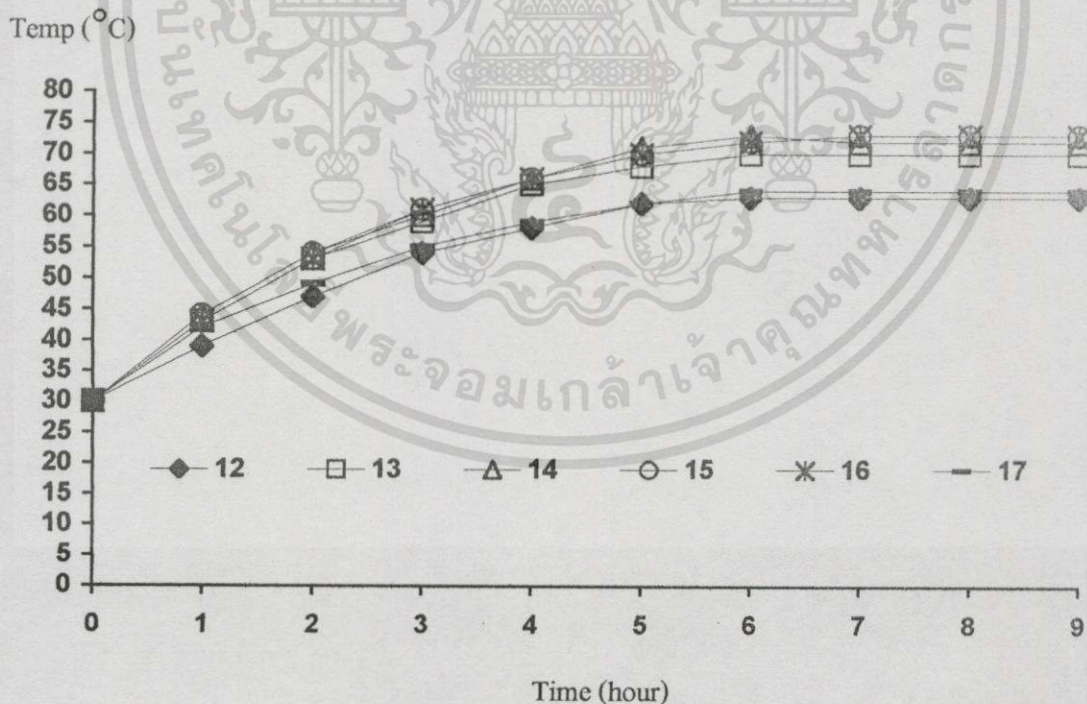


รูปที่ 5.42 แสดงผลของอุณหภูมิจลลวคแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 1, 2, 3, 4, 5, 11 เมื่อเป็นการทดสอบแบบโหลคเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

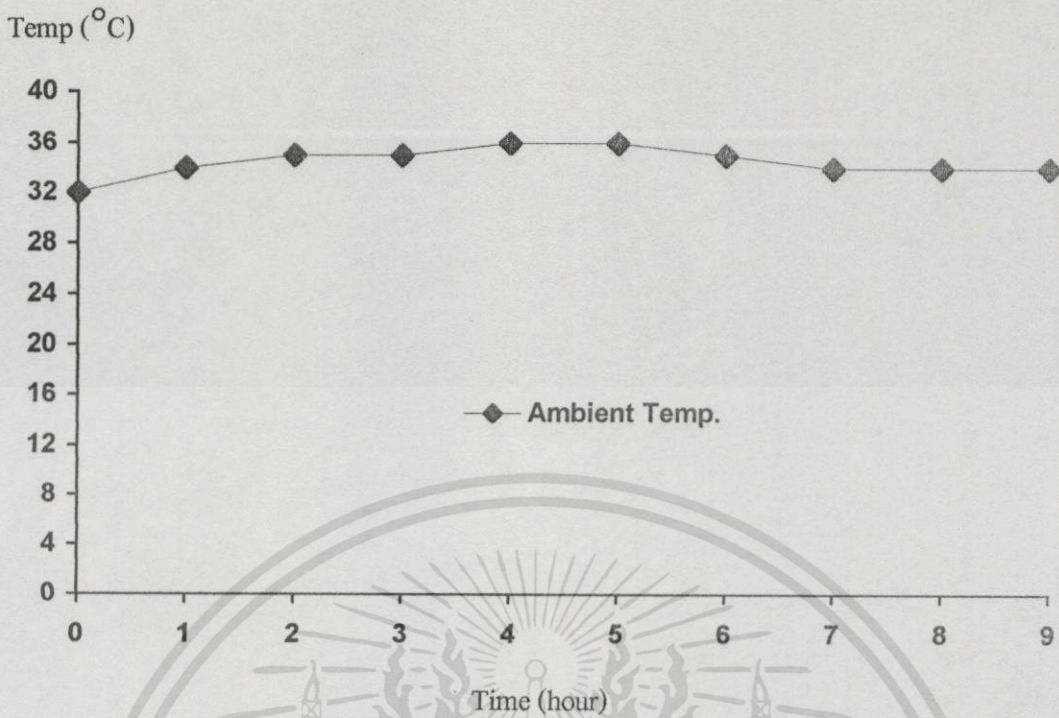


รูปที่ 5.43 แสดงผลของอุณหภูมิขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 6, 7, 8, 9, 10 เมื่อเป็นการทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น

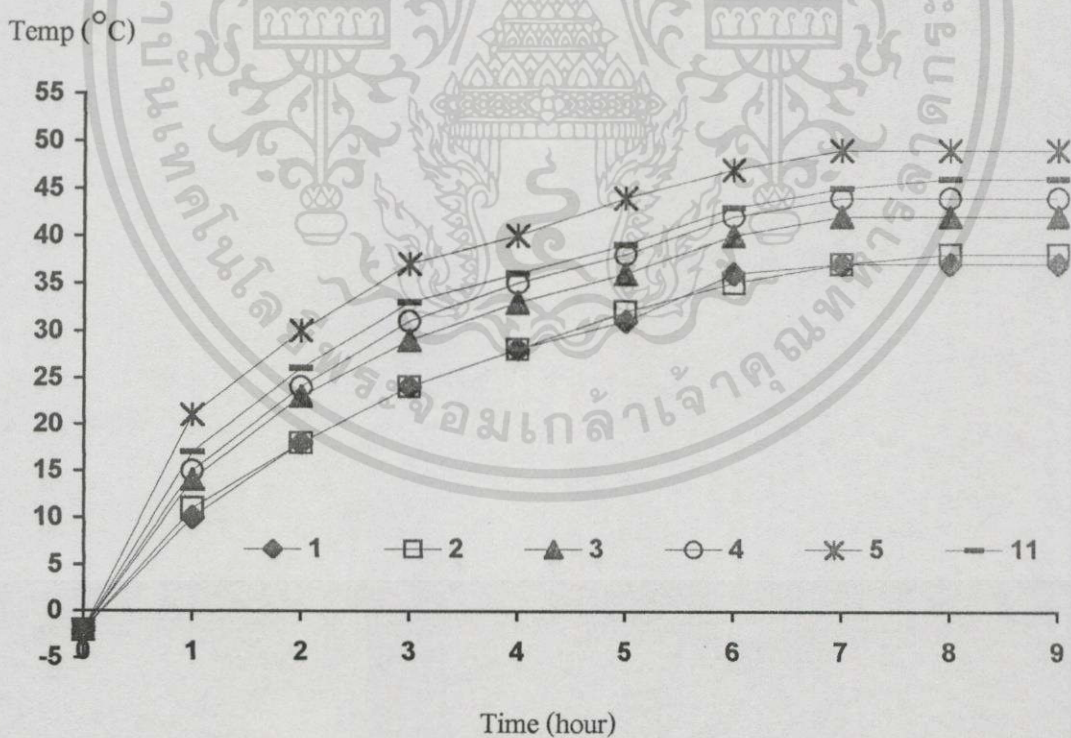


รูปที่ 5.44 แสดงผลของอุณหภูมิน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 12, 13, 14, 15, 16, 17 เมื่อเป็นการทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

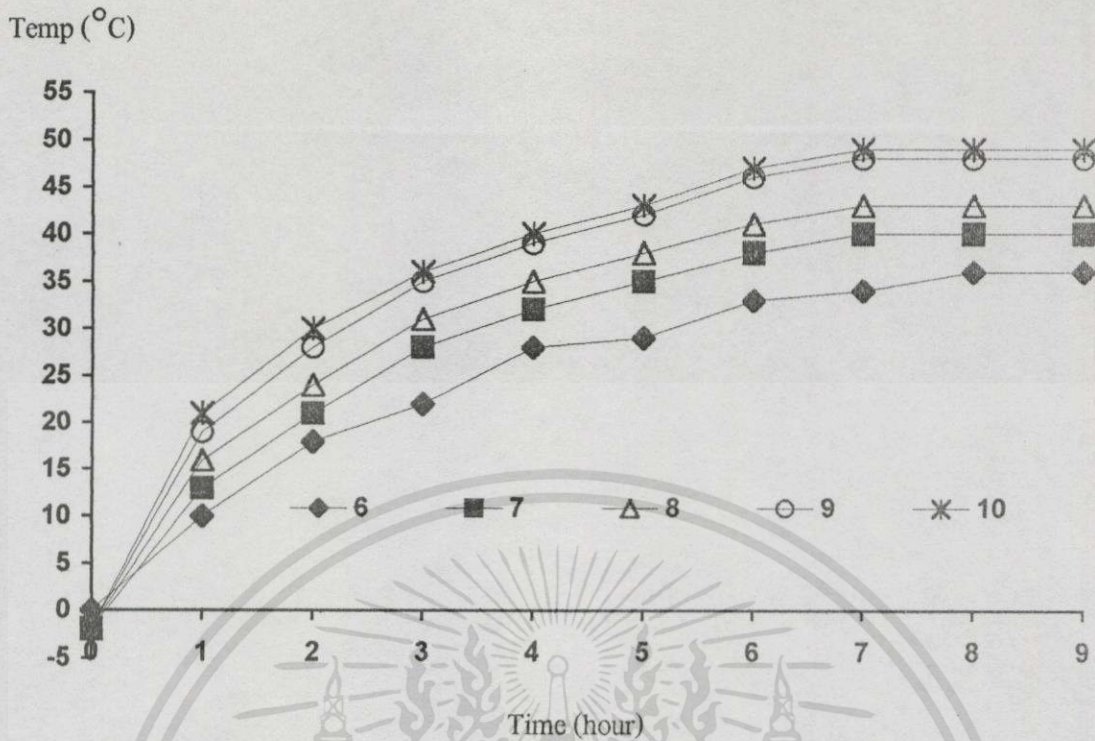


รูปที่ 5.45 แสดงผลอุณหภูมิแวดล้อมขณะทำการทดสอบ เมื่อเป็นการทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น

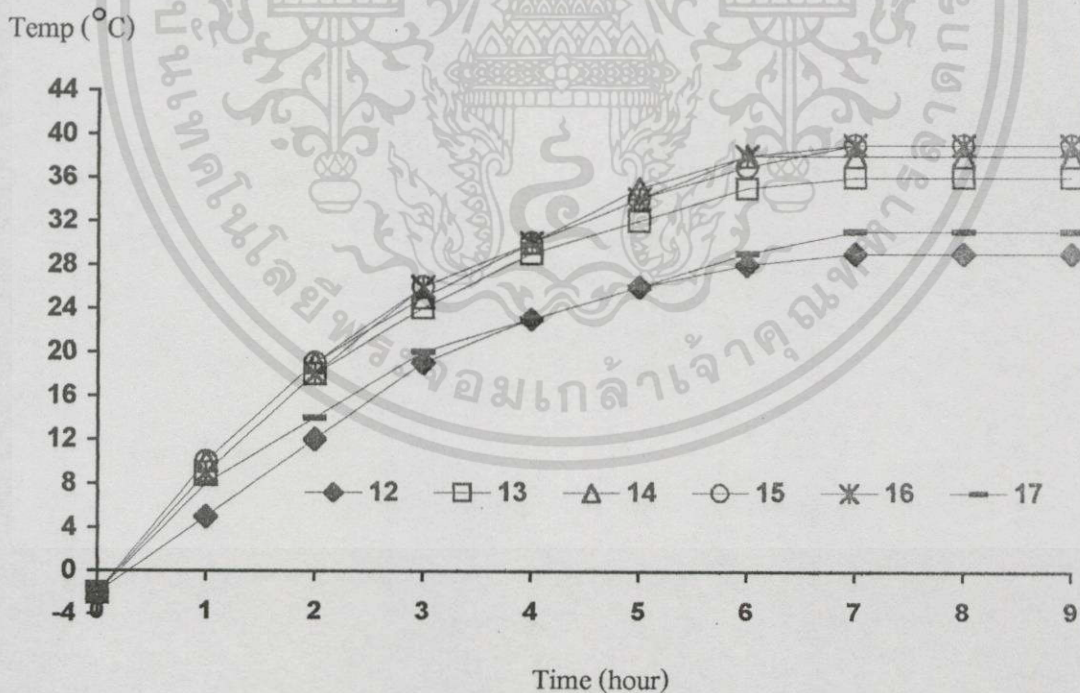


รูปที่ 5.46 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่ง ที่ 1, 2, 3, 4, 5, 11 เมื่อเป็นการทดสอบแบบ โหลดเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



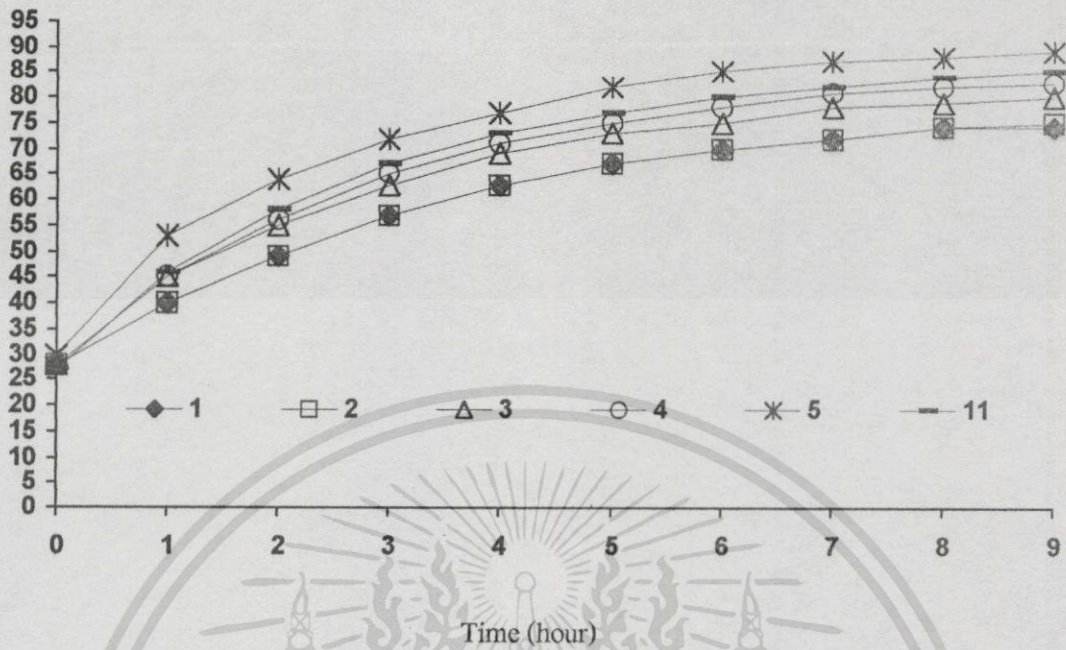
รูปที่ 5.47 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 6, 7, 8, 9, 10 เมื่อเป็นการทดสอบแบบโหลคเชิงเส้น



รูปที่ 5.48 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 12, 13, 14, 15, 16, 17 เมื่อเป็นการทดสอบแบบโหลคเชิงเส้น

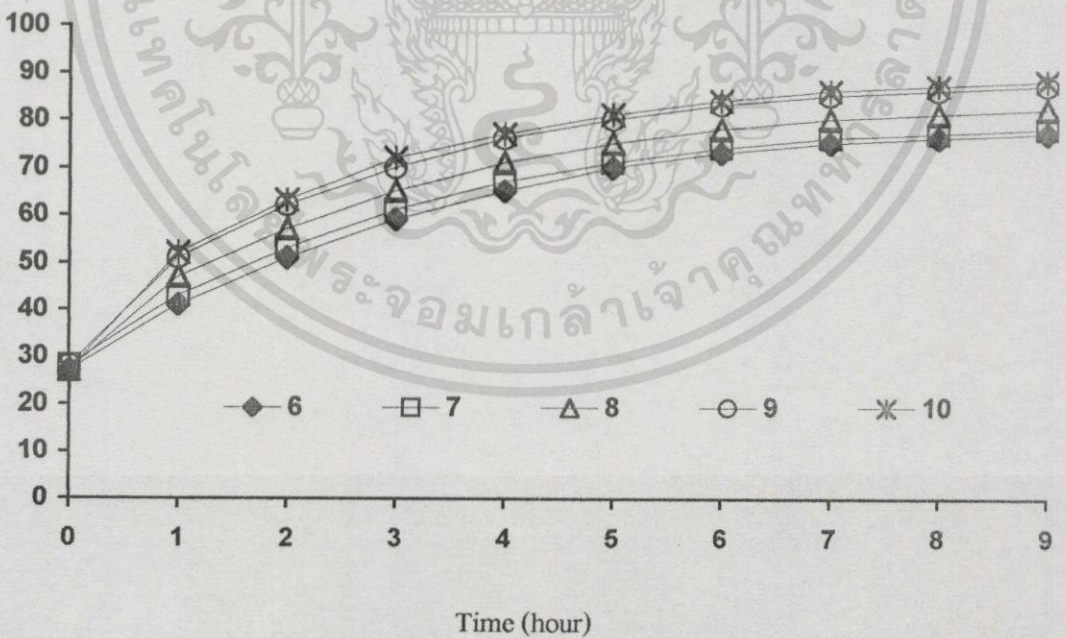
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะผิดใจทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temp (°C)



รูปที่ 5.49 แสดงผลของอุณหภูมิขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 1, 2, 3, 4, 5, 11 เมื่อเป็นการทดสอบแบบโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

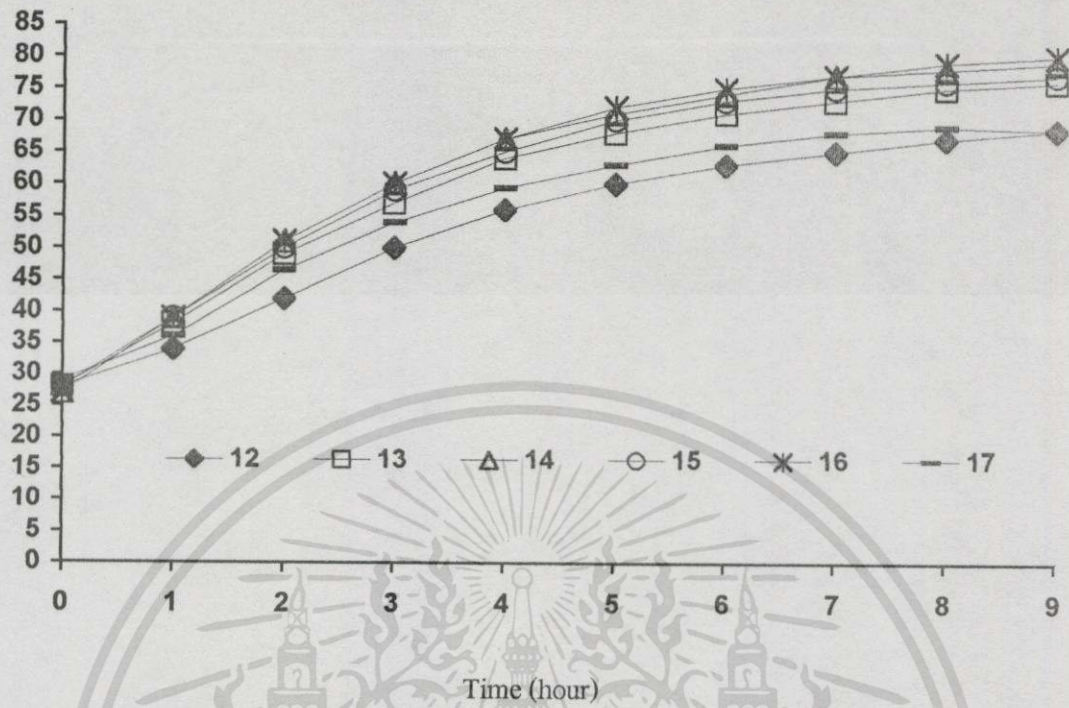
Temp (°C)



รูปที่ 5.50 แสดงผลของอุณหภูมิขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 6, 7, 8, 9, 10 เมื่อเป็นการทดสอบแบบโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

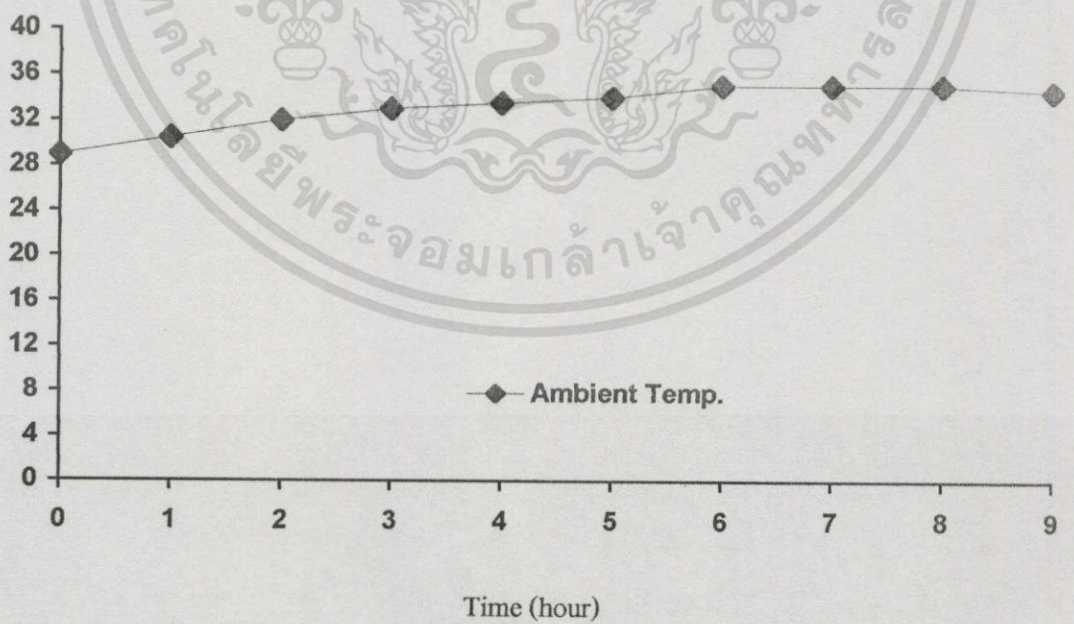
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temp (°C)



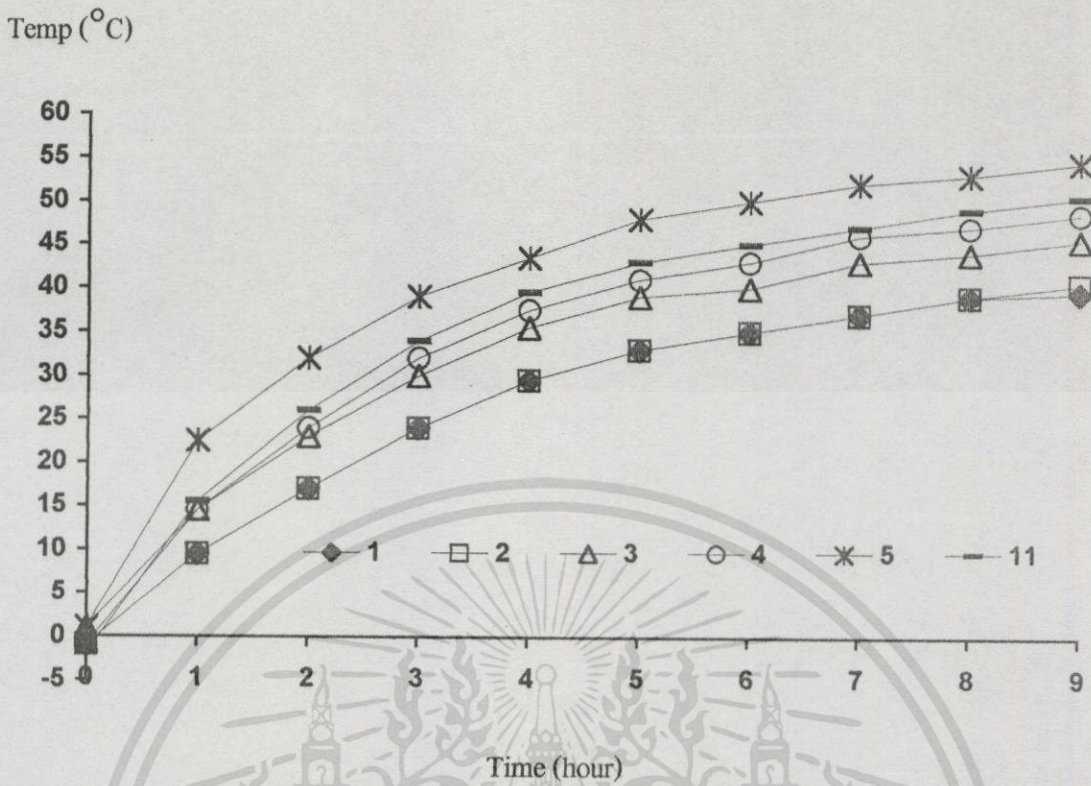
รูปที่ 5.51 แสดงผลของอุณหภูมิน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 12, 13, 14, 15, 16, 17 เมื่อเป็นการทดสอบแบบไหลคไม่เป็นเชิงเส้น

Temp (°C)

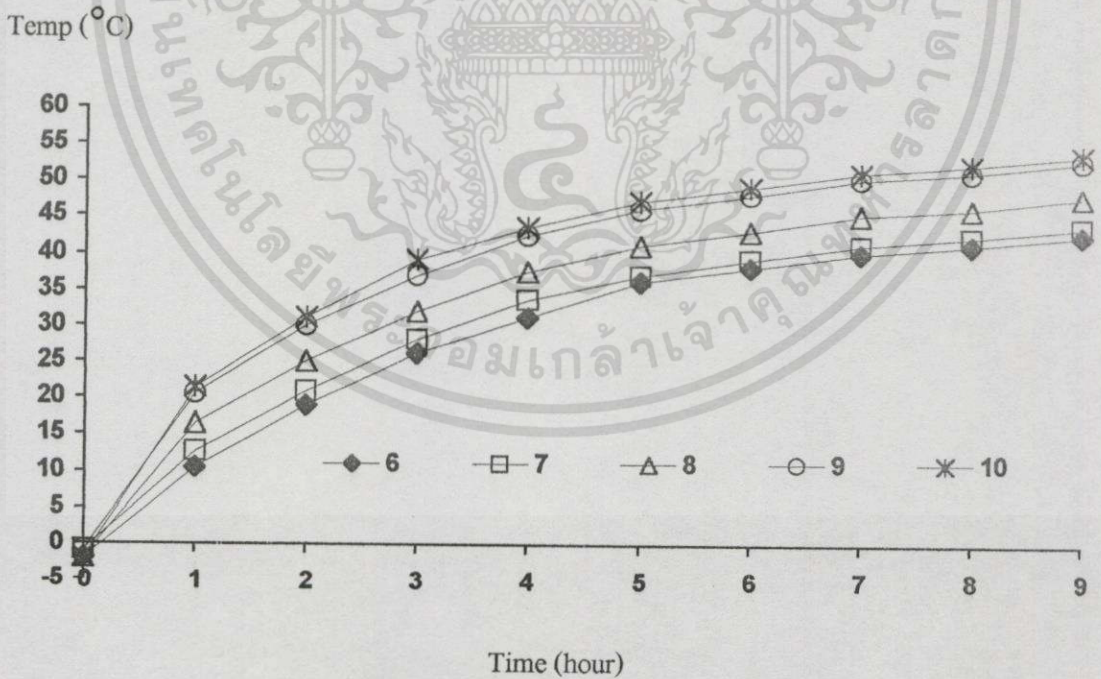


รูปที่ 5.52 แสดงผลอุณหภูมิแวดล้อมขณะทำการทดสอบแบบไหลคไม่เป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

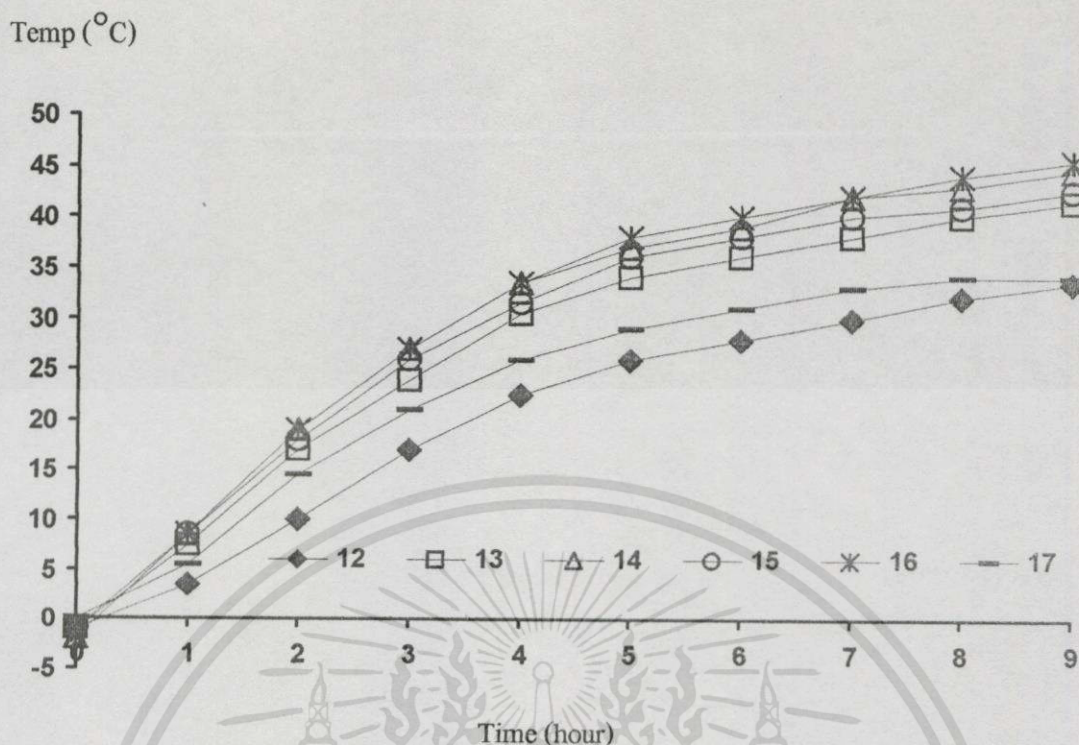


รูปที่ 5.53 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 1, 2, 3, 4, 5, 11 เมื่อเป็นการทดสอบแบบไหลไม่เป็นเชิงเส้น

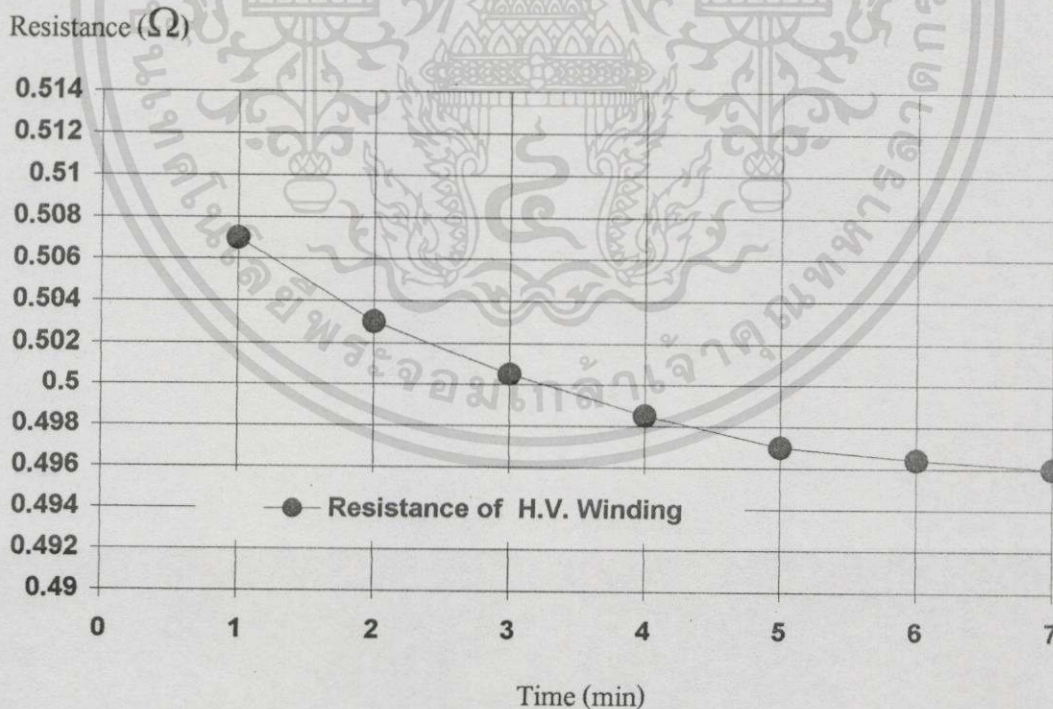


รูปที่ 5.54 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 6, 7, 8, 9, 10 เมื่อเป็นการทดสอบแบบไหลไม่เป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

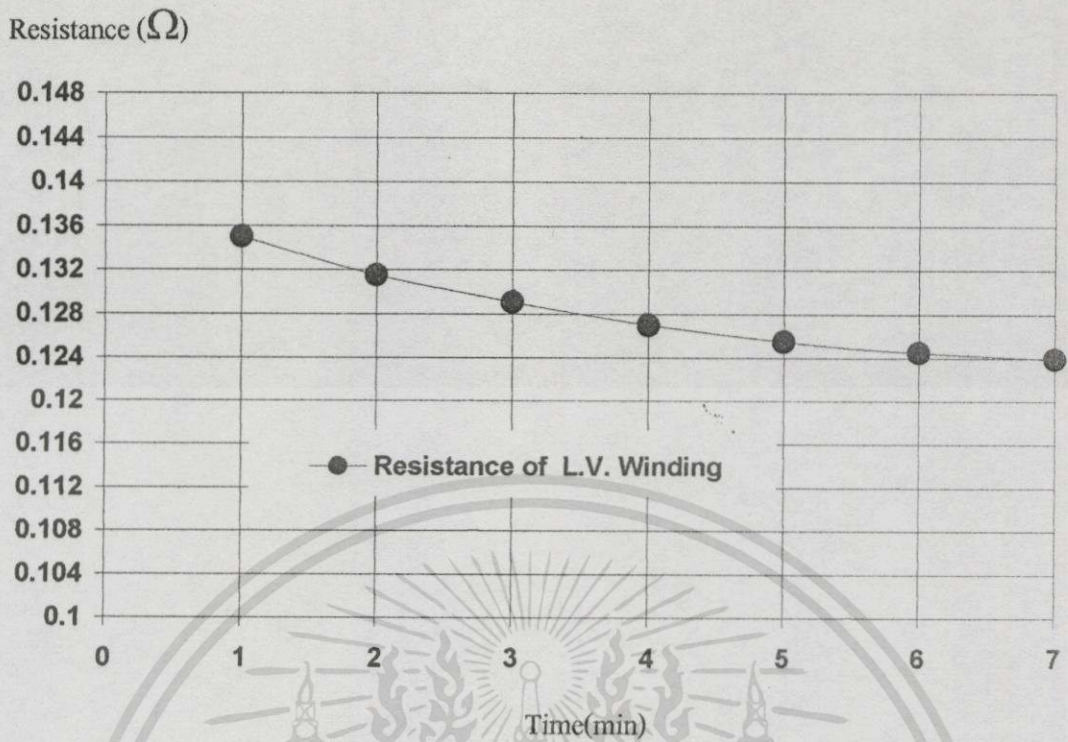


รูปที่ 5.55 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 12, 13, 14, 15, 16, 17 เมื่อเป็นการทดสอบแบบโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

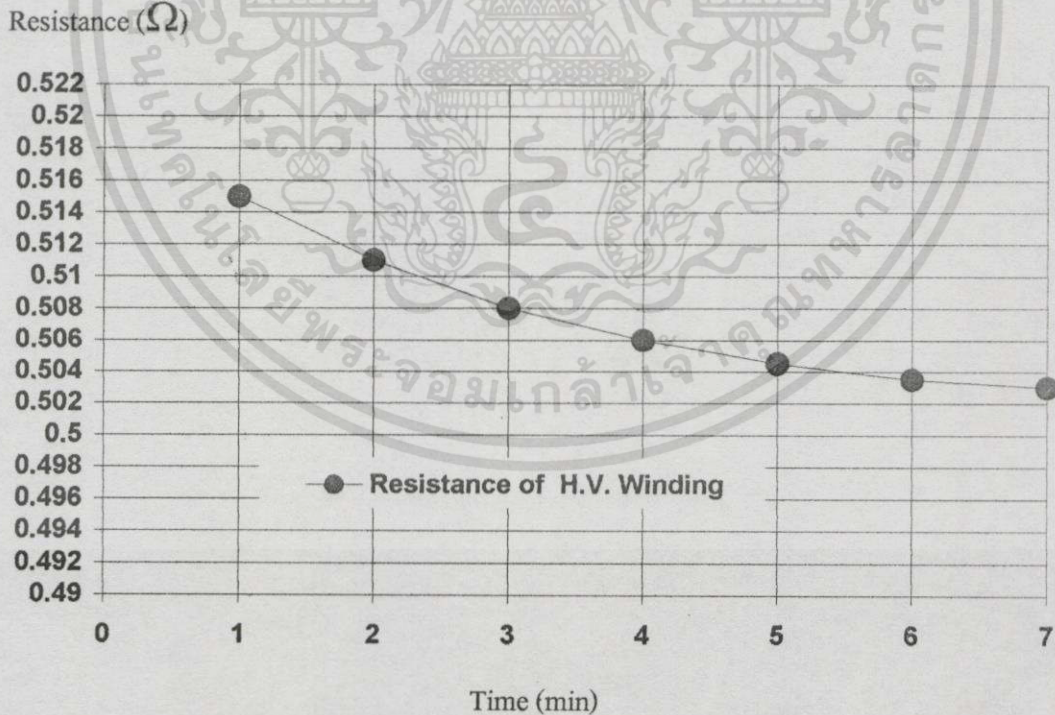


รูปที่ 5.56 แสดงผลของความต้านทานที่วัดได้ต่อช่วงเวลา หลังจากตัดกระแสไฟฟ้าของขดลวดแรงสูง โดยทดสอบแบบถ่วงวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

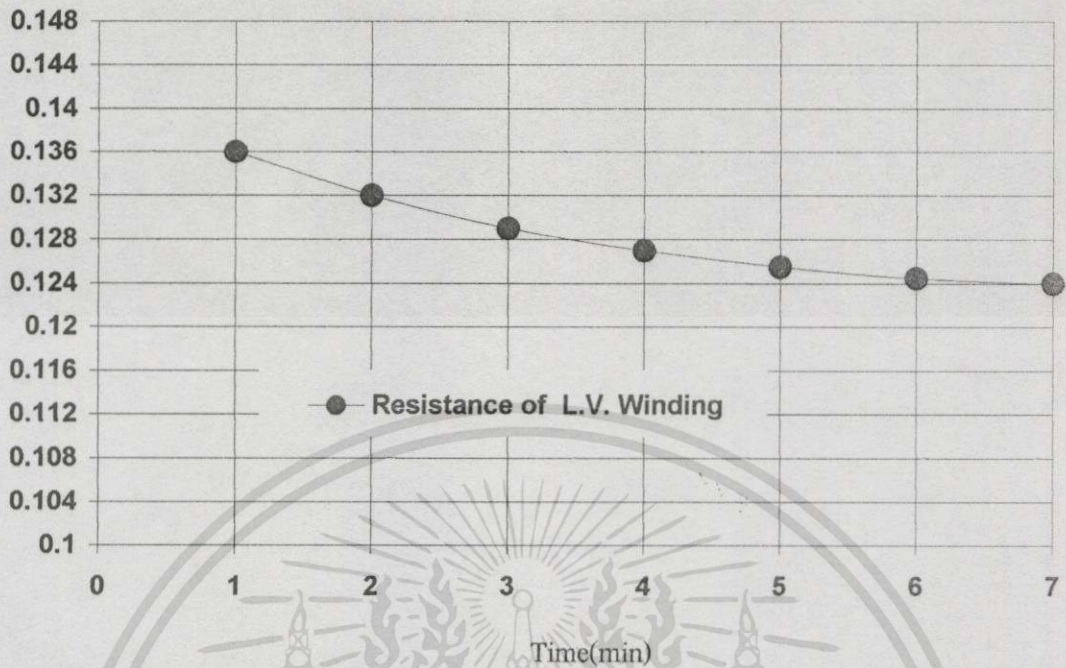


รูปที่ 5.57 แสดงผลของความต้านทานที่วัดได้ต่อช่วงเวลาหลังจากตัดกระแสไฟฟ้า ของขดลวดแรงดันต่ำ โดยทดสอบแบบลัดวงจร

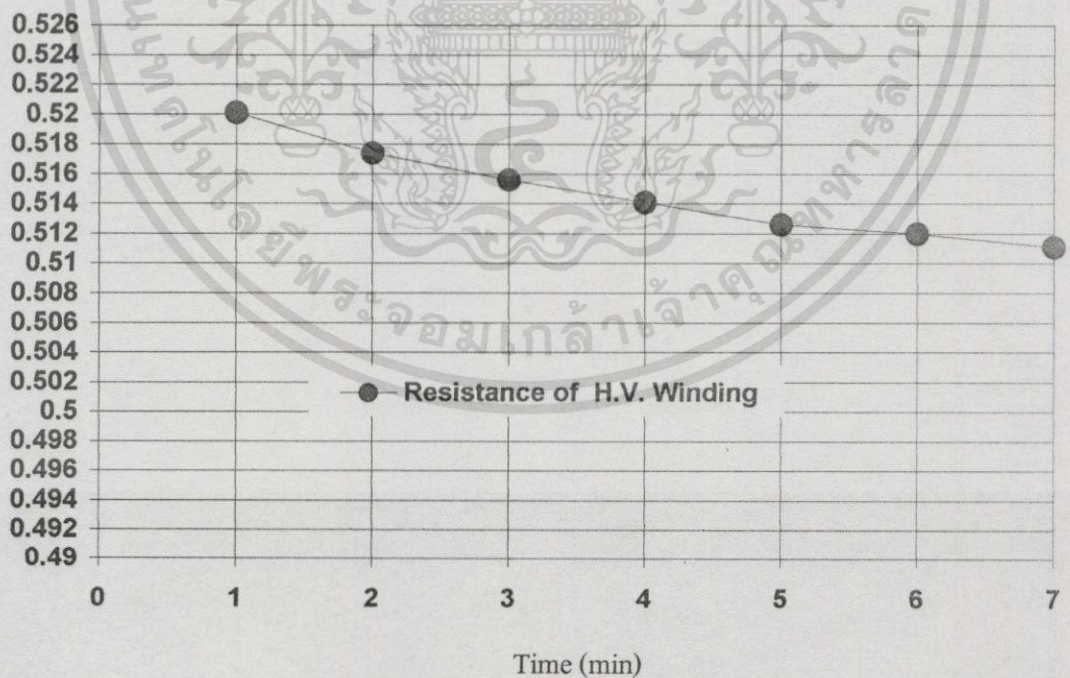


รูปที่ 5.58 แสดงผลของความต้านทานที่วัดได้ต่อช่วงเวลา หลังจากตัดกระแสไฟฟ้า ของขดลวดแรงสูง โดยทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

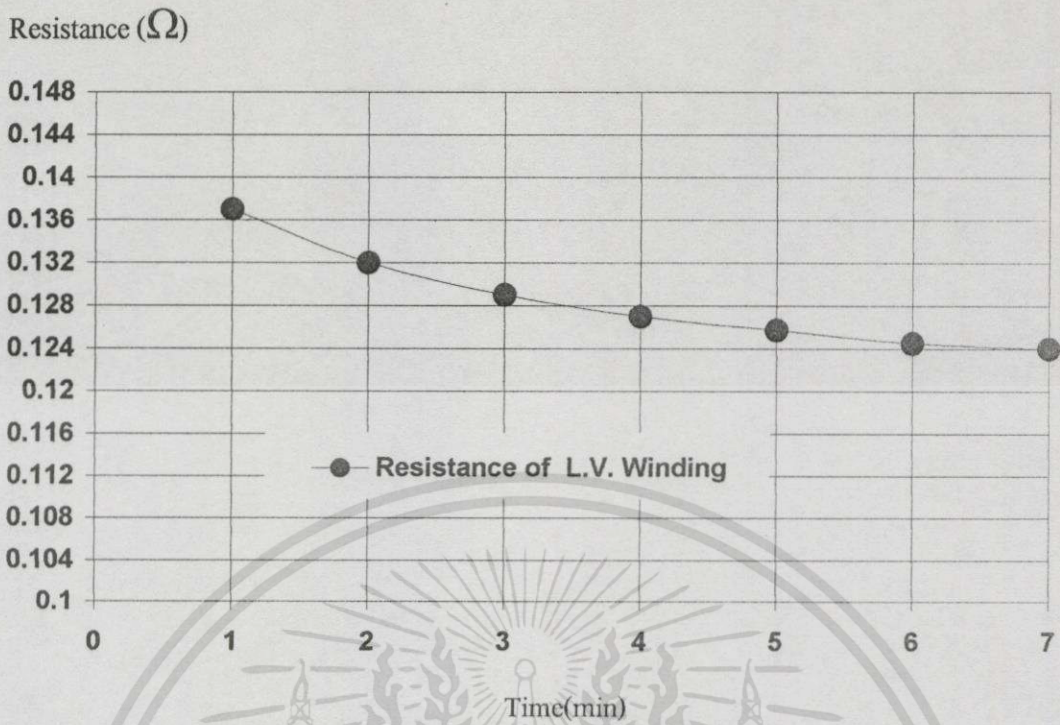
Resistance ( $\Omega$ )

รูปที่ 5.59 แสดงผลของความต้านทานที่วัดได้ต่อช่วงเวลาหลังจากตัดกระแสไฟฟ้า ของขดลวดแรงดันต่ำ โดยทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น

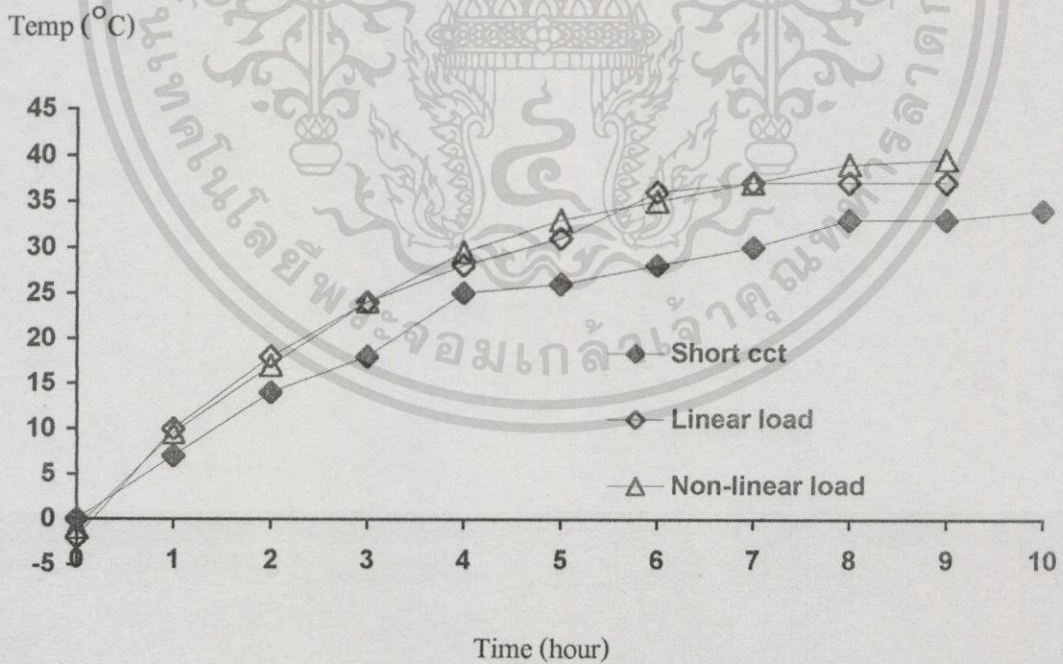
Resistance ( $\Omega$ )

รูปที่ 5.60 แสดงผลของความต้านทานที่วัดได้ต่อช่วงเวลาหลังจากตัดกระแสไฟฟ้า ของขดลวดแรงสูง โดยทดสอบแบบโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

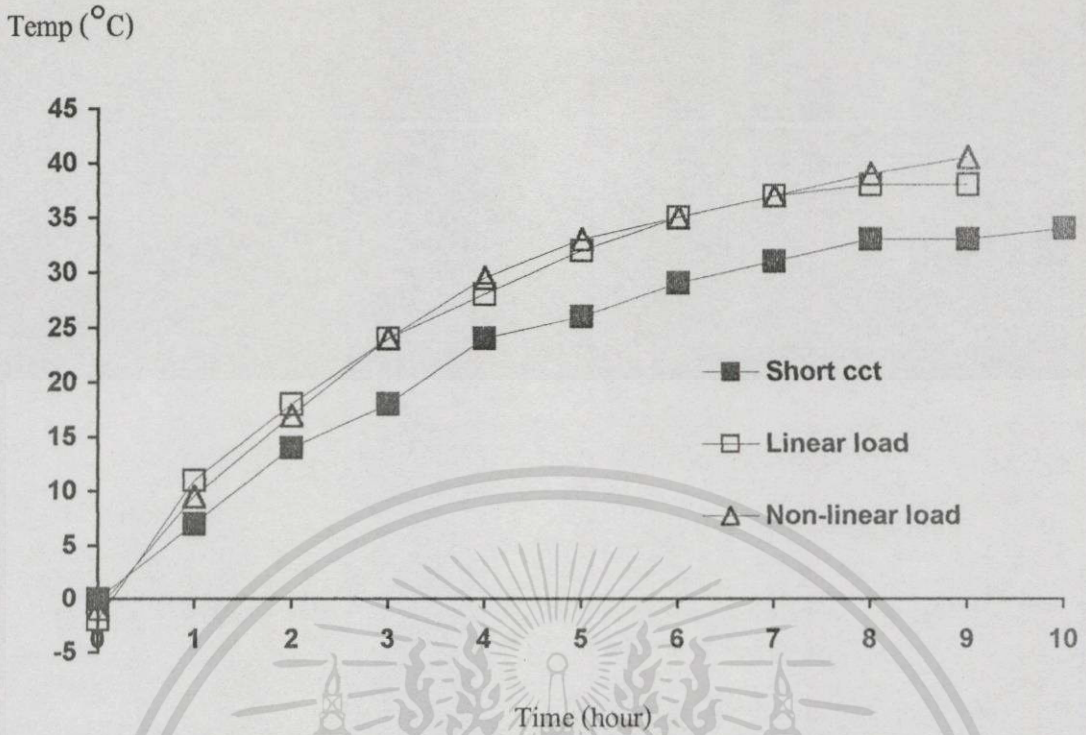


รูปที่ 5.61 แสดงผลของความต้านทานที่วัดได้ต่อช่วงเวลาหลังจากตัดกระแสไฟฟ้า ของขดลวดแรงดันต่ำ โดยทดสอบแบบไม่เป็นโหลดเชิงเส้น

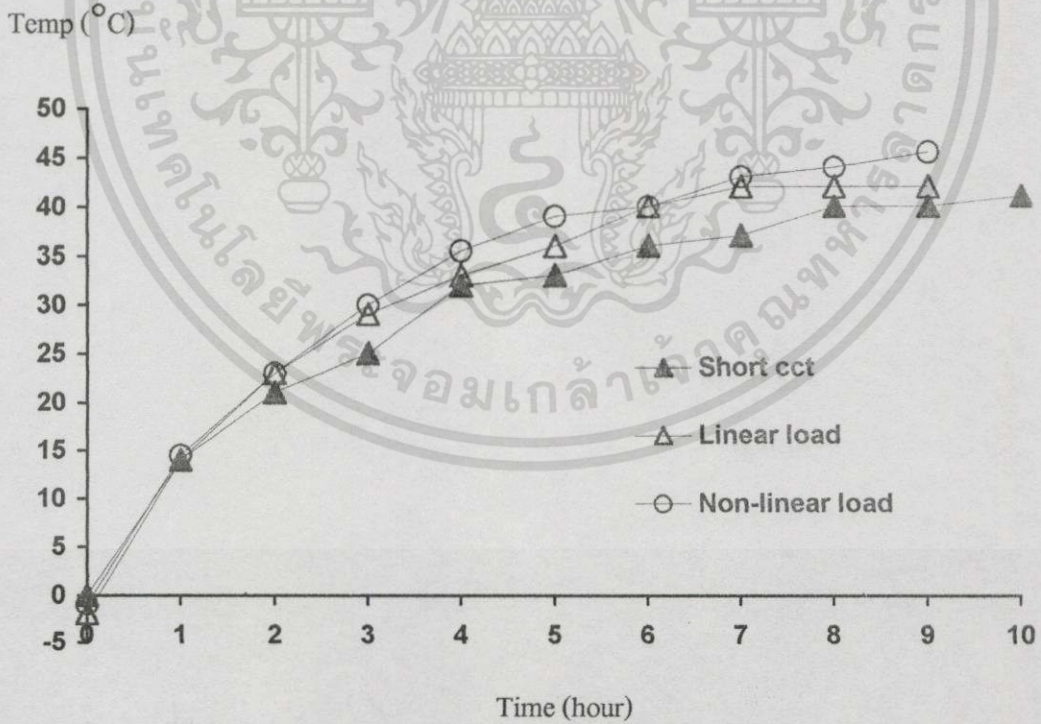


รูปที่ 5.62 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจร, โหลดเชิงเส้น และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

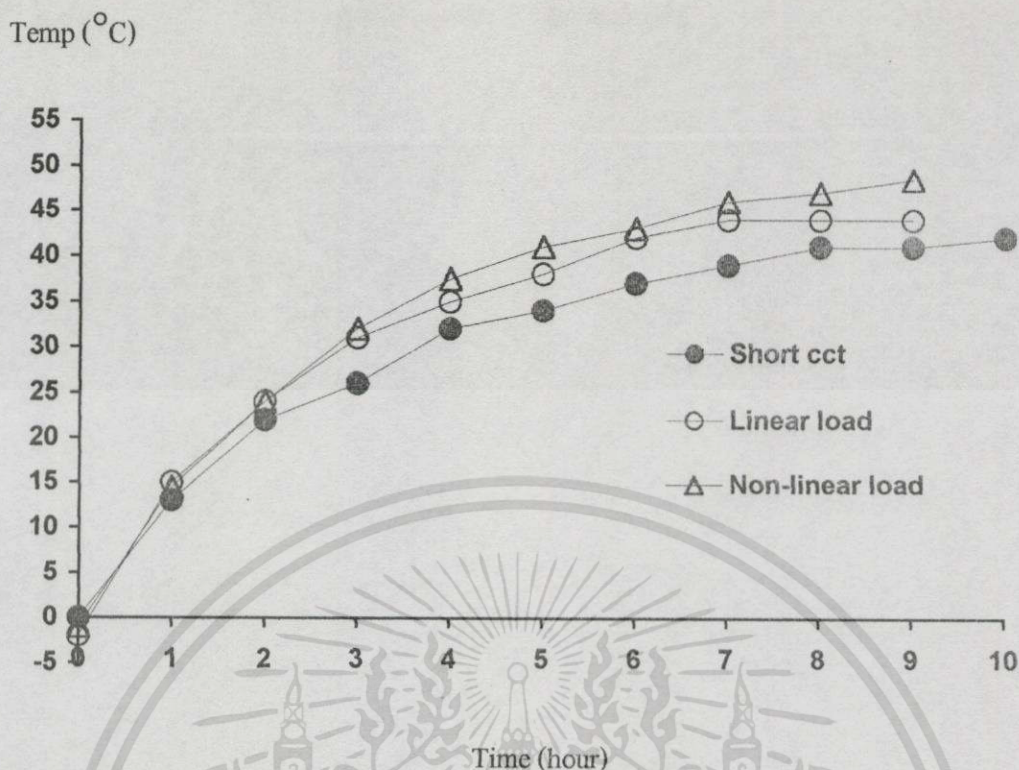


รูปที่ 5.63 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจร, โหลดเชิงเส้น และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น

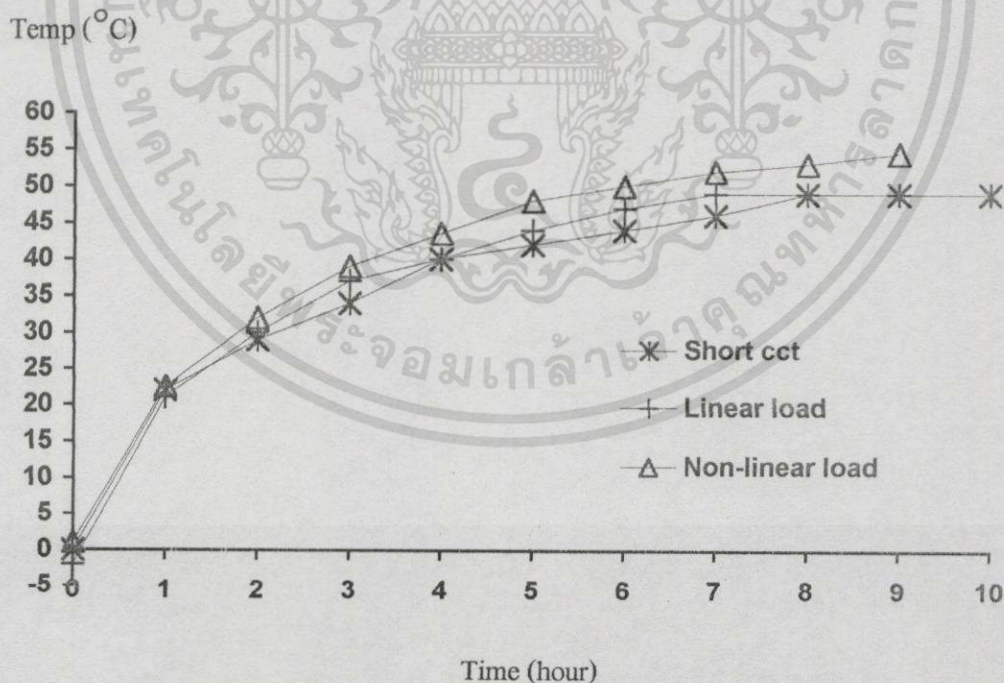


รูปที่ 5.64 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจร, โหลดเชิงเส้น และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

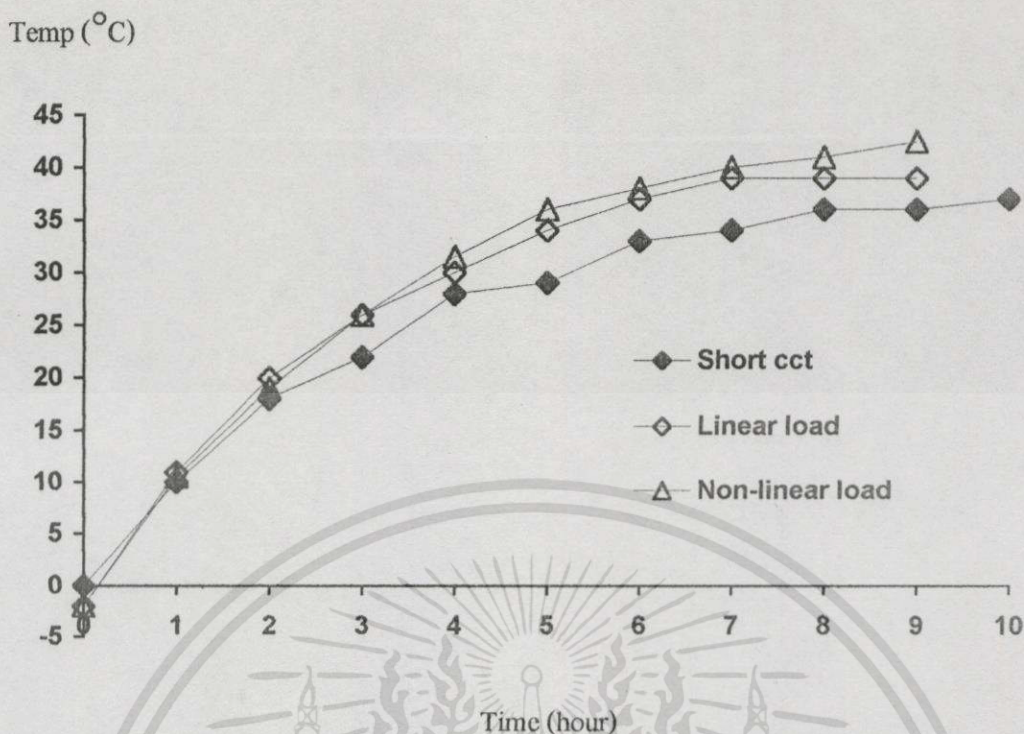


รูปที่ 5.65 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 4 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจร, โหลดเชิงเส้น และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น

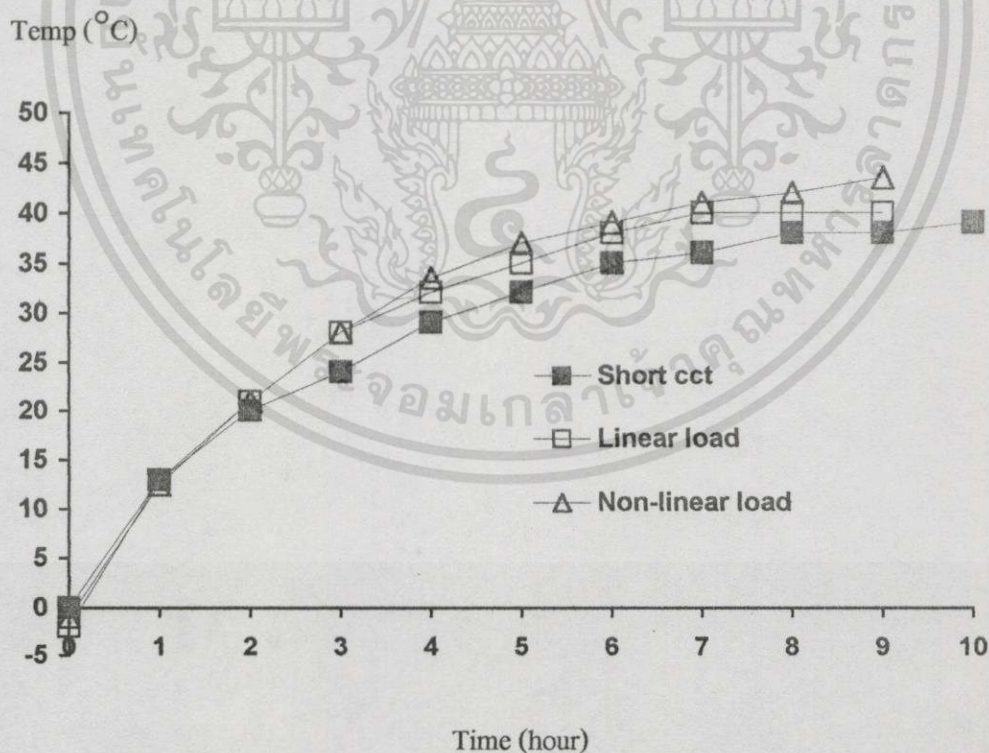


รูปที่ 5.66 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 5 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจร, โหลดเชิงเส้น และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

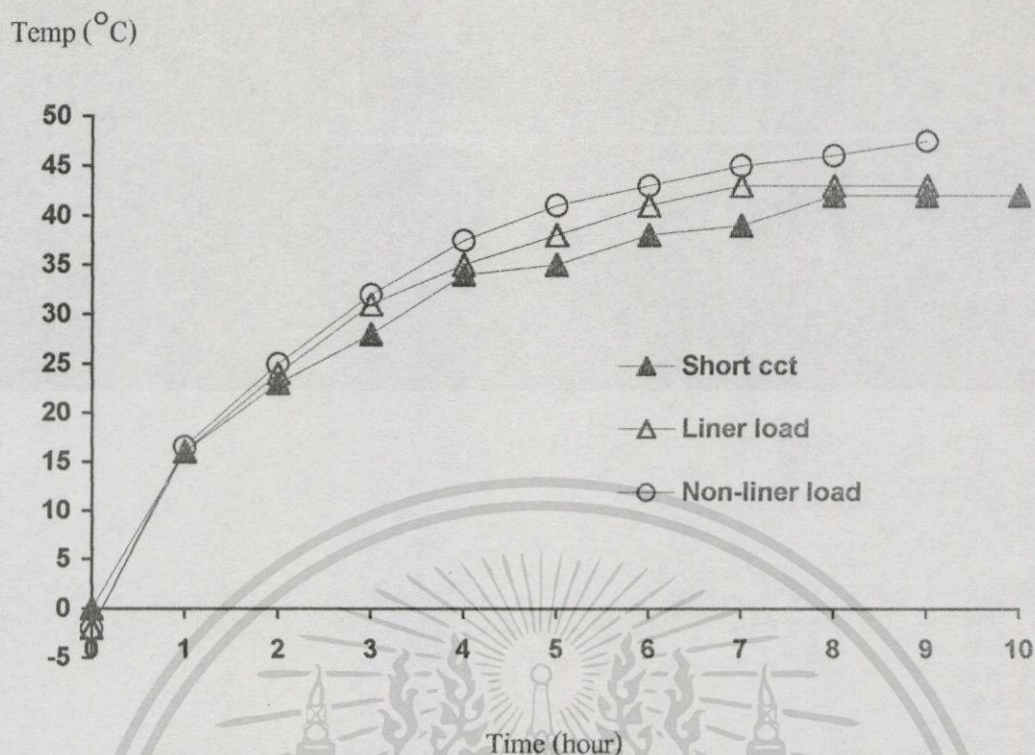


รูปที่ 5.67 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 6 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจร, โหลดเชิงเส้น และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น

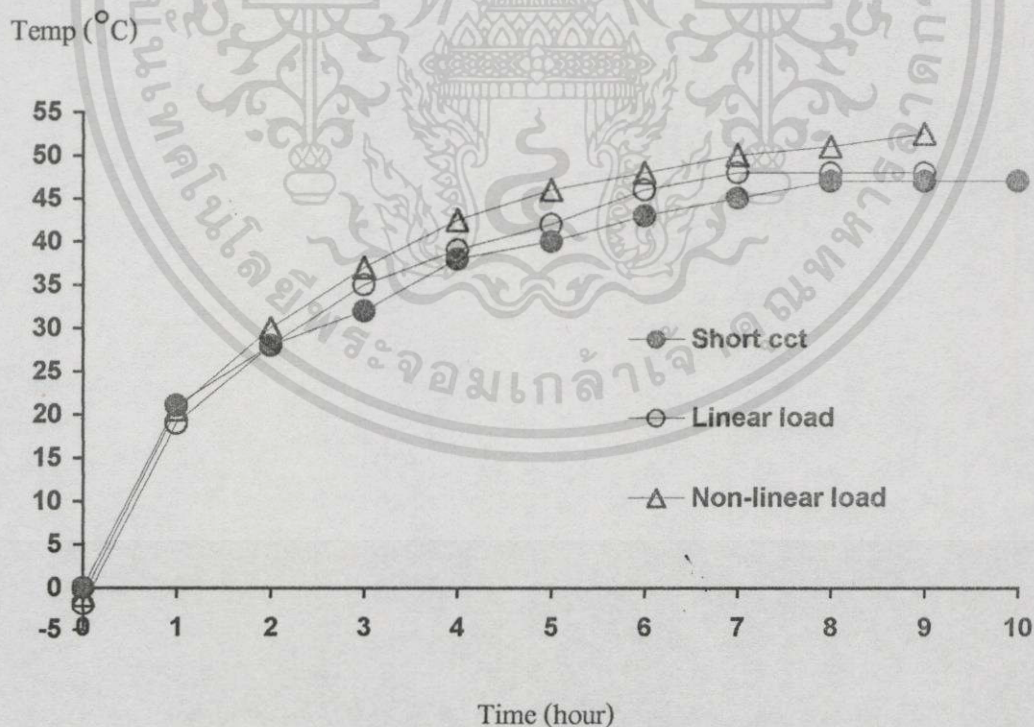


รูปที่ 5.68 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 7 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจร, โหลดเชิงเส้น และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

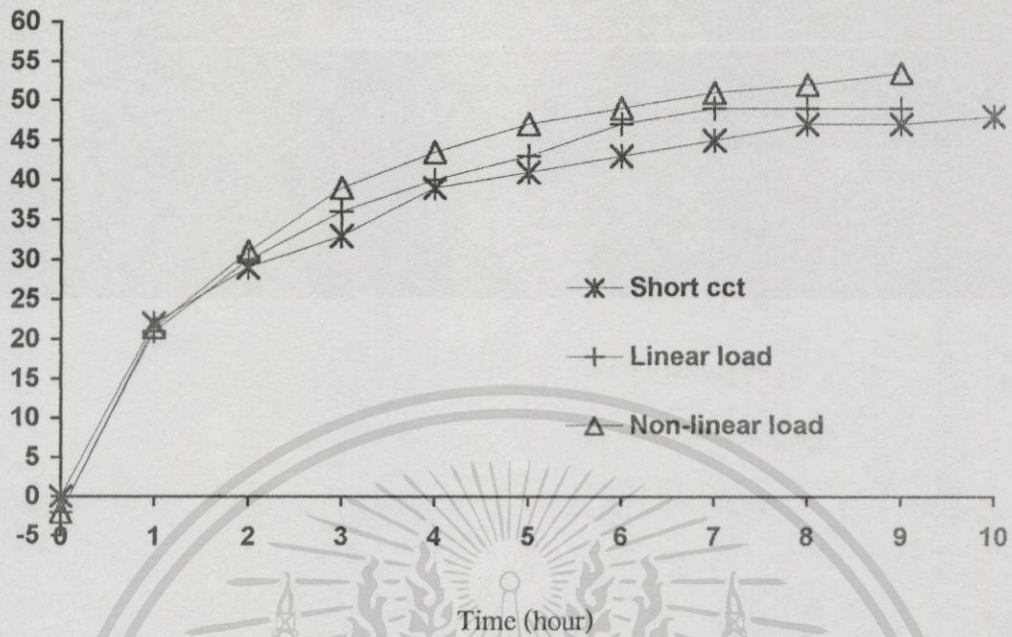


รูปที่ 5.69 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 8 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบถ่วงจร, โหลดเชิงเส้น และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น

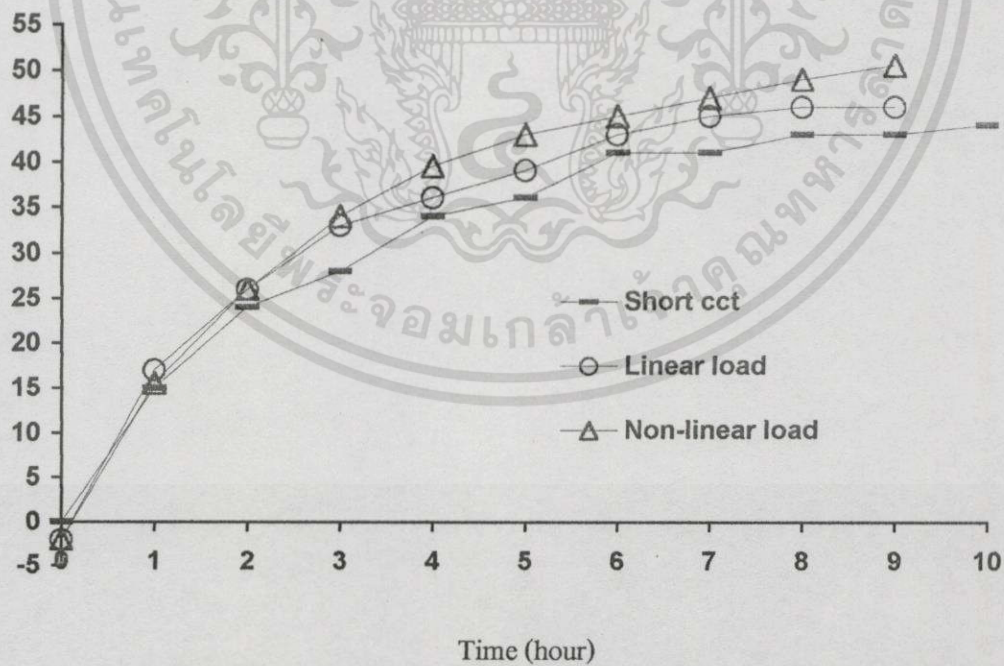


รูปที่ 5.70 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 9 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบถ่วงจร, โหลดเชิงเส้น และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

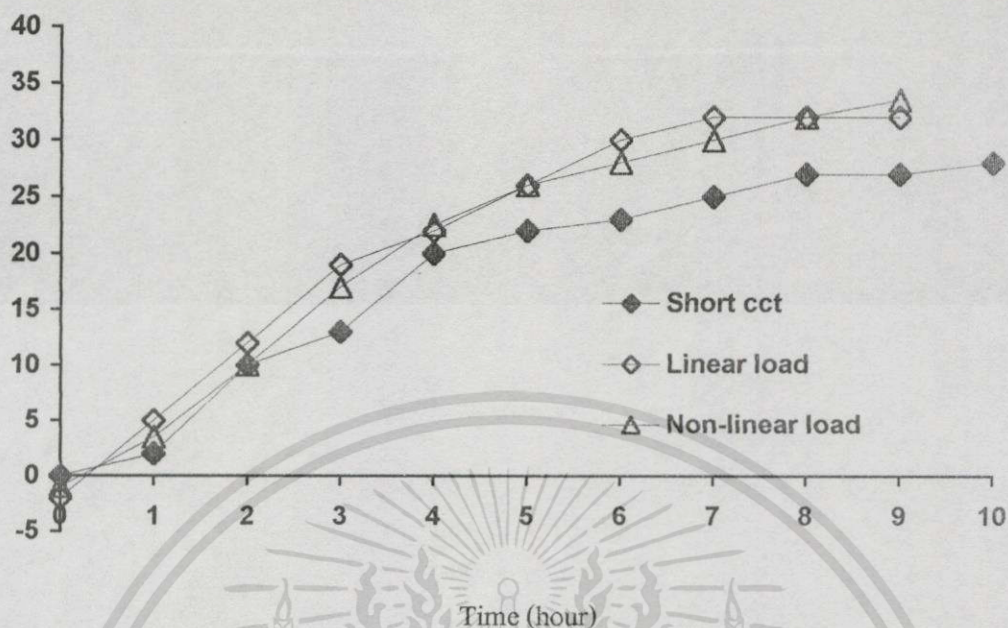
Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )

รูปที่ 5.71 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 10 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจร, โหลดเชิงเส้น และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น

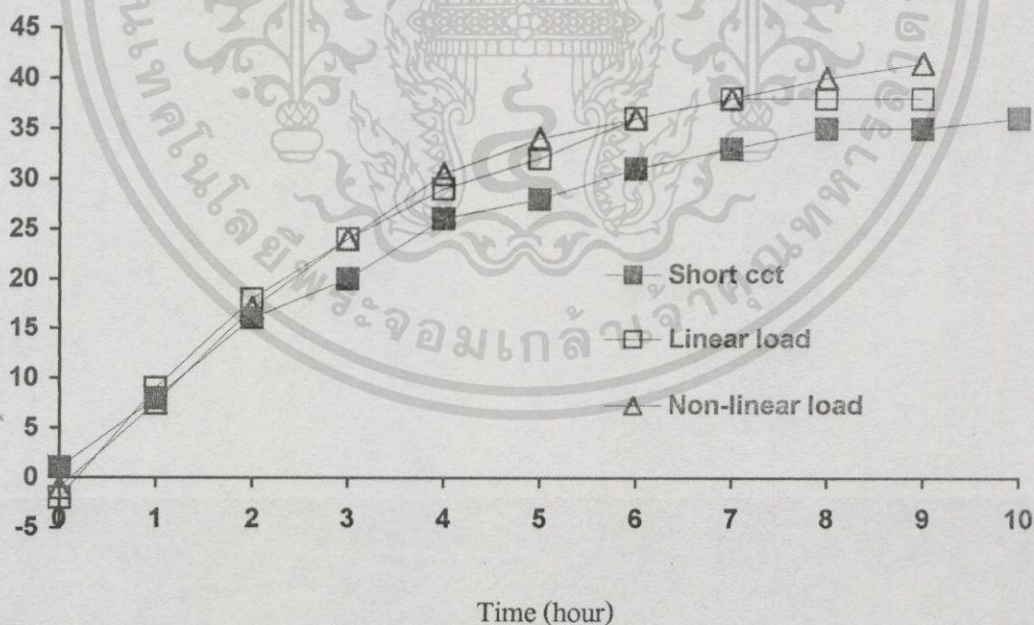
Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )

รูปที่ 5.72 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 11 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจร, โหลดเชิงเส้น และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

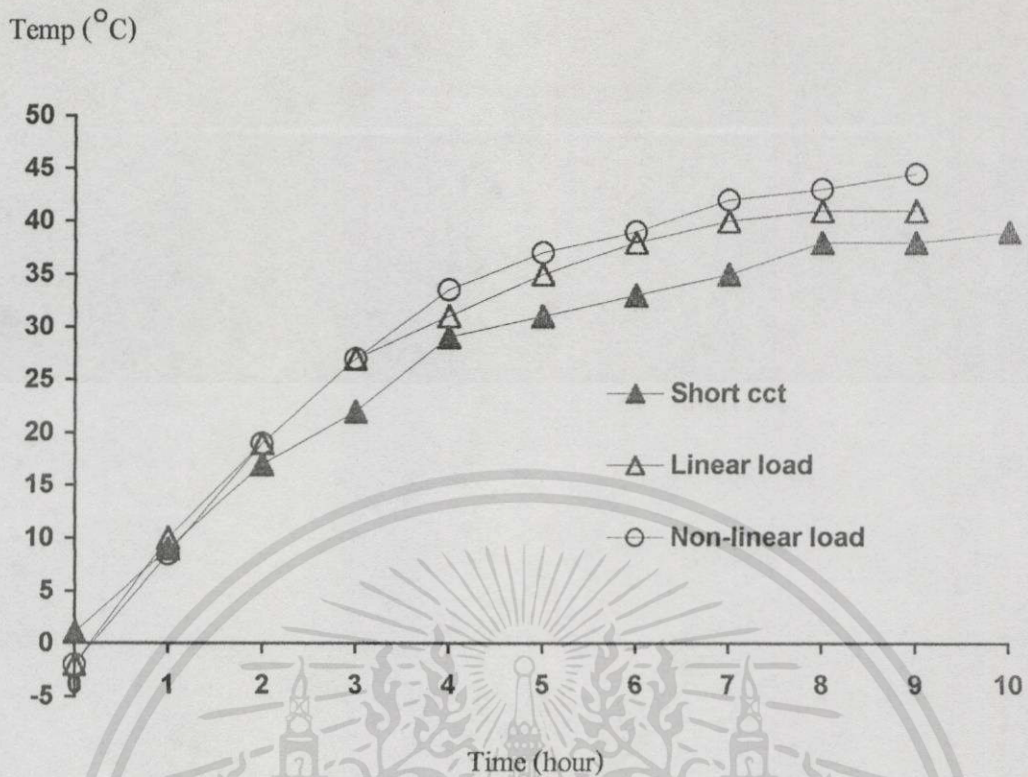
Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )

รูปที่ 5.73 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 12 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบ ถัดวงจร, โหลดเชิงเส้น และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น

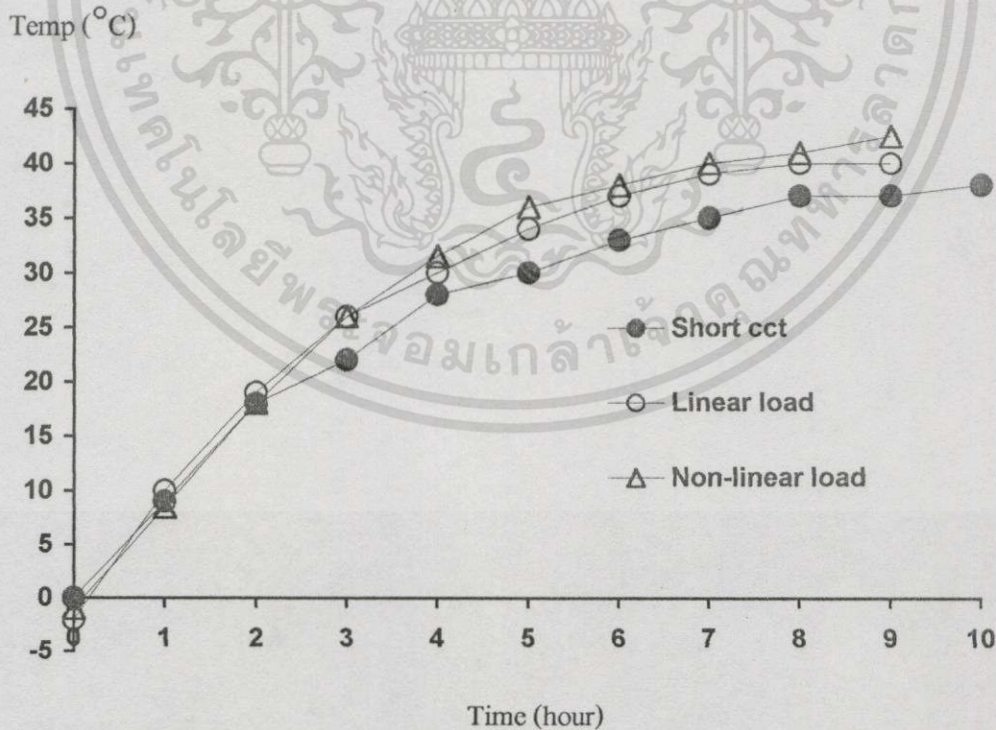
Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )

รูปที่ 5.74 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 13 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบ ถัดวงจร, โหลดเชิงเส้น และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

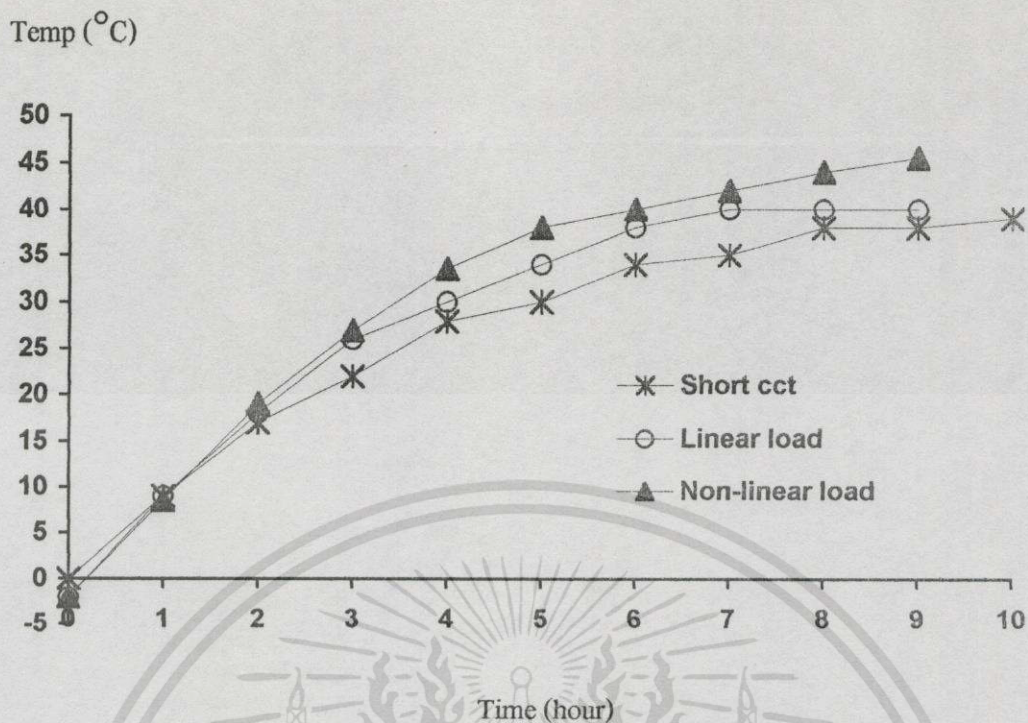


รูปที่ 5.75 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 14 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบ ลัดวงจร, โหลดเชิงเส้น และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น

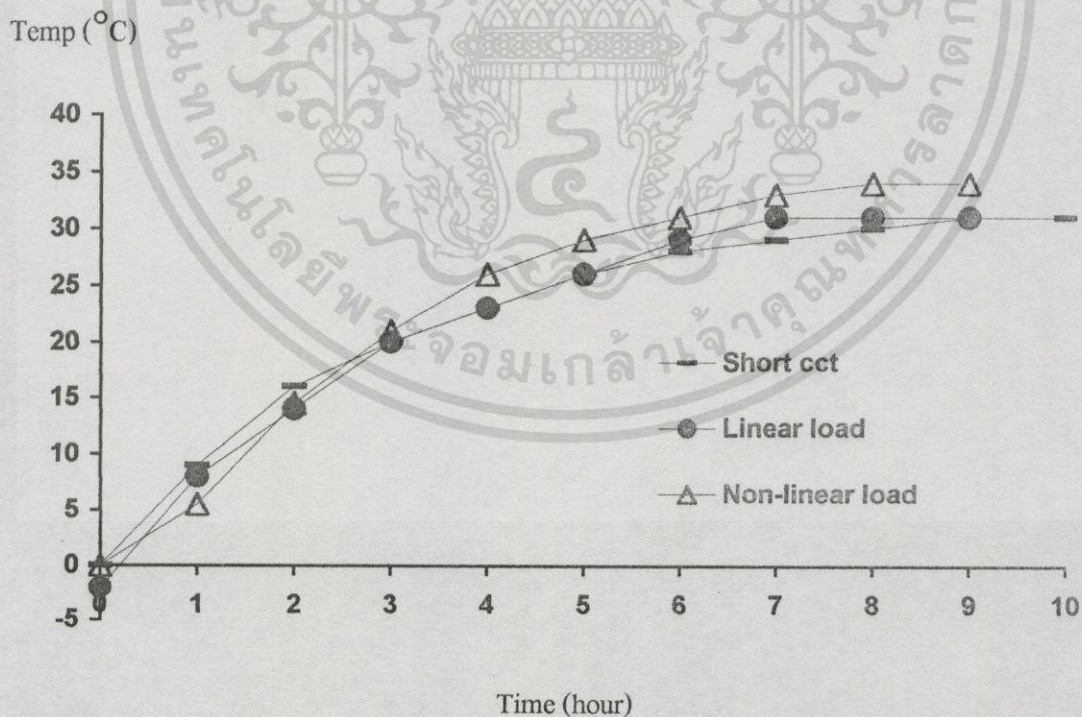


รูปที่ 5.76 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 15 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบ ลัดวงจร, โหลดเชิงเส้น และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.77 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 16 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบ ลัดวงจร, โหลดเชิงเส้น และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 5.78 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 17 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบ ลัดวงจร, โหลดเชิงเส้น และ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.2.2 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน (Top oil temperature rise)

จากผลการทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงทั้ง 3 เงื่อนไข สามารถแสดงดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 แสดงค่าการทดสอบหาค่าอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนที่ตำแหน่ง 17

-ค่าอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน( $\Theta_{or}$ ) โดยวิธีการถัดวงจร (ที่ กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวม 427 Watt)	31 °C
-ค่าอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน ( $\Theta_{or}$ ) โดยใช้โหลดเชิงเส้น (ที่ $I_{rms}$ ปรุวมฤมิ = 15.2 A/line)	31 °C
-ค่าอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน โดยใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้น (ที่ $I_1 \approx 15.2$ A/line , $I_{rms}$ ปรุวมฤมิ = 17.17 A/line)	34 °C

#### หมายเหตุ

อุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน = อุณหภูมิของน้ำมัน - อุณหภูมิแวดล้อม

ทดสอบโดยวิธีการถัดวงจร พิจารณาชั่ว โมงสุดท้ายของการทดสอบ(ชั่ว โมงที่ 10)

$$\Theta_{or} = \text{อุณหภูมิน้ำมันด้านบน(ตำแหน่ง17)} - \text{อุณหภูมิแวดล้อม} = 61\text{ }^{\circ}\text{C} - 30\text{ }^{\circ}\text{C} = 31\text{ }^{\circ}\text{C}$$

ทดสอบโดยใช้โหลดเชิงเส้น พิจารณาชั่ว โมงสุดท้ายของการทดสอบ(ชั่ว โมงที่ 9)

$$\Theta_{or} = \text{อุณหภูมิน้ำมันด้านบน(ตำแหน่ง17)} - \text{อุณหภูมิแวดล้อม} = 65\text{ }^{\circ}\text{C} - 34\text{ }^{\circ}\text{C} = 31\text{ }^{\circ}\text{C}$$

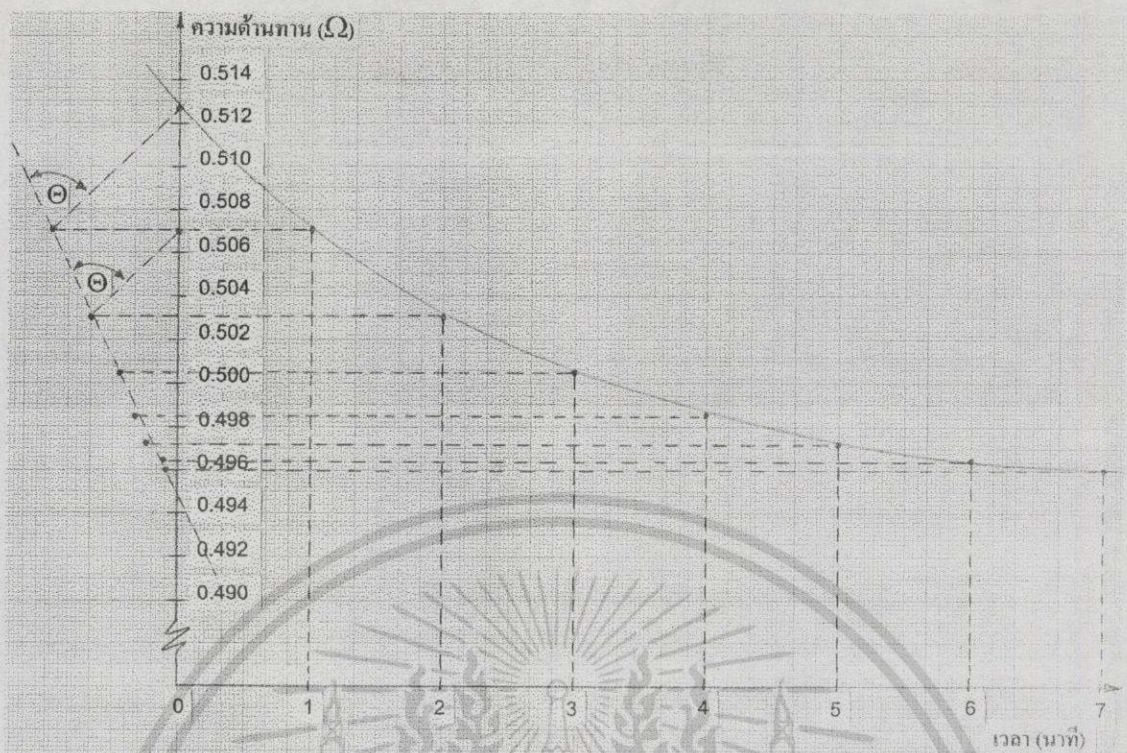
ทดสอบโดยใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้น พิจารณาชั่ว โมงสุดท้ายของการทดสอบ(ชั่ว โมงที่ 9)

$$\Theta_{or} = \text{อุณหภูมิน้ำมันด้านบน(ตำแหน่ง17)} - \text{อุณหภูมิแวดล้อม} = 68.5\text{ }^{\circ}\text{C} - 34.5\text{ }^{\circ}\text{C} = 34\text{ }^{\circ}\text{C}$$

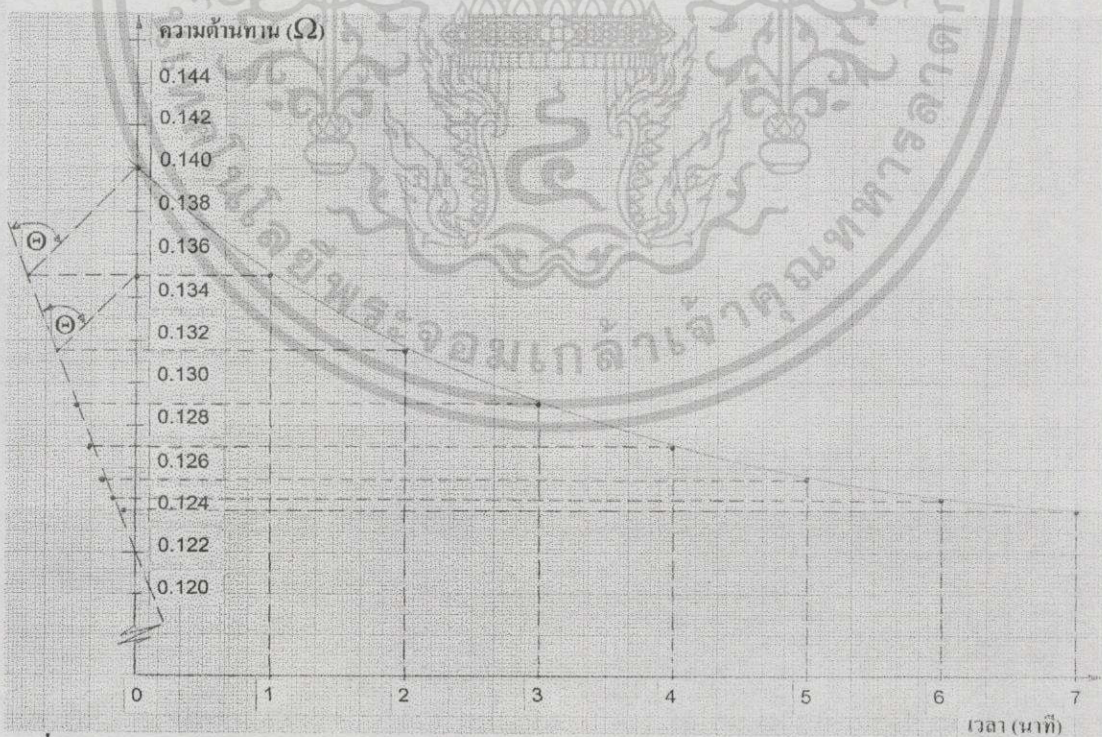
### 5.1.2.3 ผลของอุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของขดลวด (Average winding temperature rise)

จากผลการทดสอบหาค่าอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลงดังกล่าว สามารถหาค่าอุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของขดลวดทางด้านแรงดันสูงและแรงดันต่ำของหม้อแปลง จากรูปที่ 5.56 ถึง 5.61 นำไปเขียนกราฟหาค่าความต้านทานของลวดตัวนำ ณ เวลาตัดไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 5.79 ถึง 5.84 และสามารถแสดงค่าอุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของขดลวด ดังตารางที่ 5.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

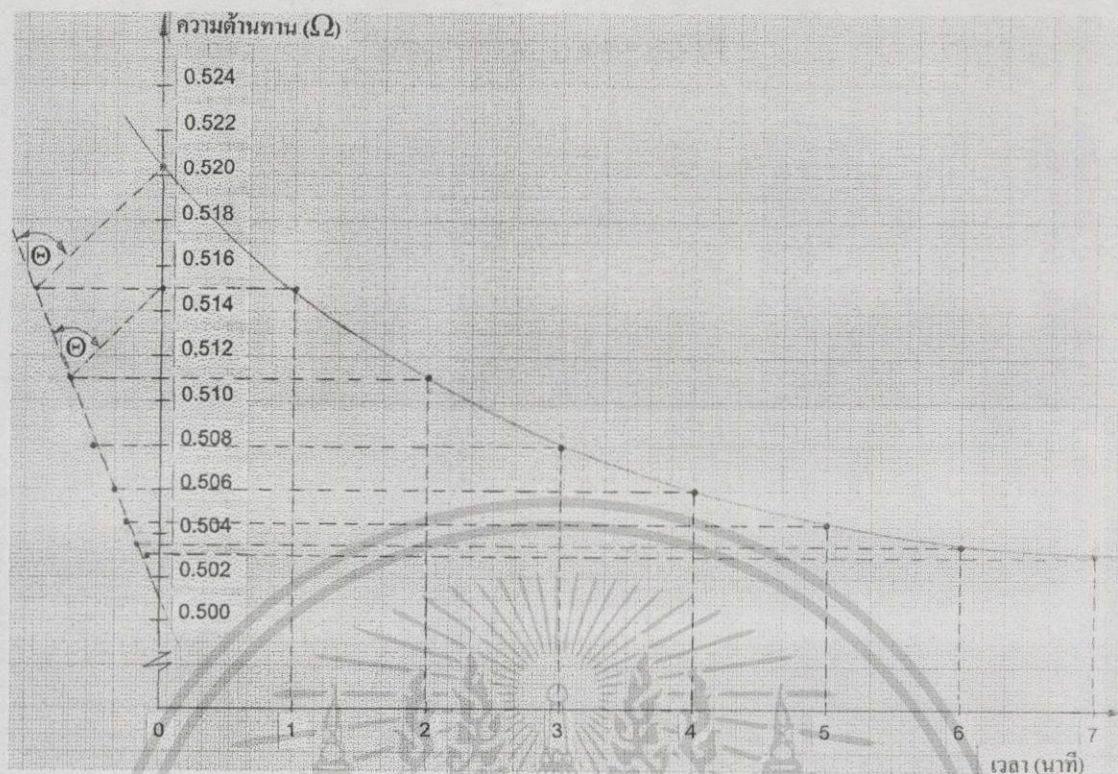


รูปที่ 5.79 แสดงการเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของลวดตัวนำต้านปรุุม  
ขณะตัดกระแสไฟฟ้า ที่พิกัดไหลต่อช่วงเวลา โดยวิธีการตัดวงจร

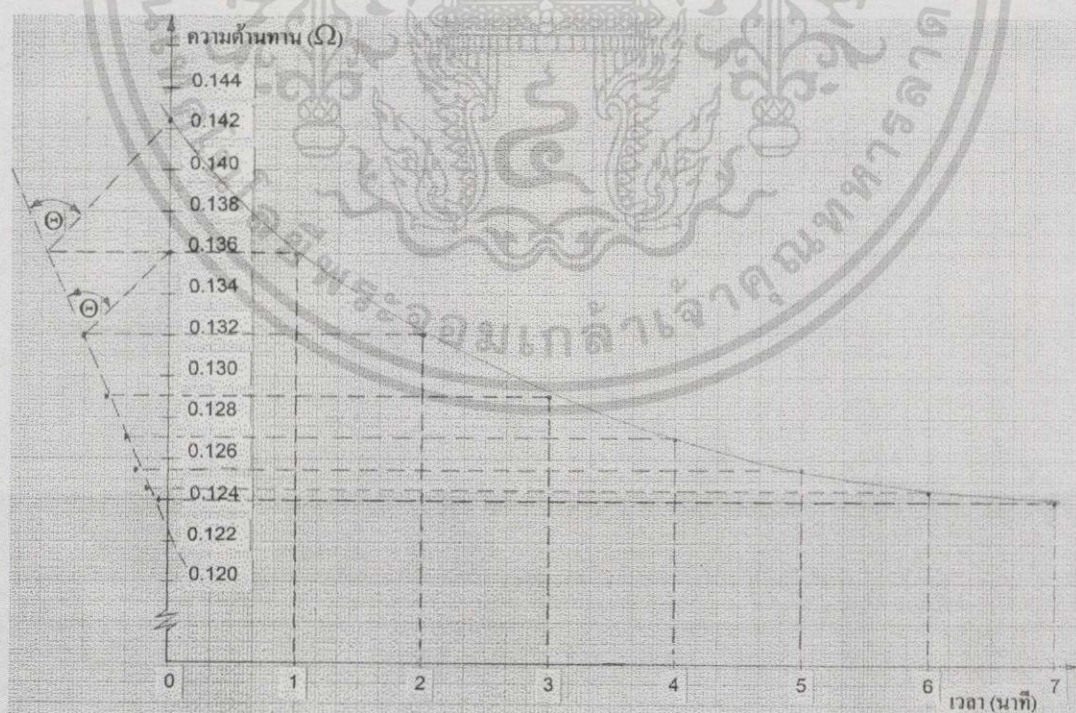


รูปที่ 5.80 แสดงการเขียนกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของลวดตัวนำต้านทุติยภูมิ  
ขณะตัดกระแสไฟฟ้า ที่พิกัดไหลต่อช่วงเวลา โดยวิธีการตัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

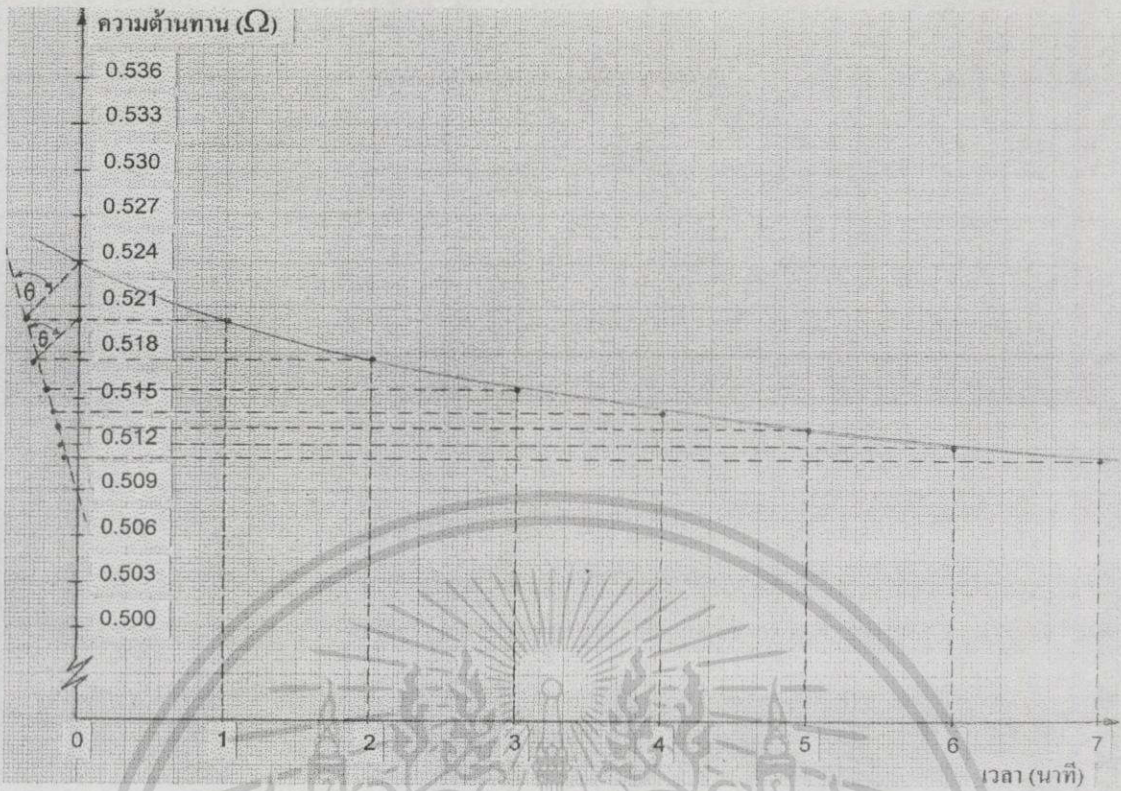


รูปที่ 5.81 แสดงการเขียนกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของลวดตัวนำด้านปฐมภูมิ ขณะตัดกระแสไฟฟ้า ที่พิกัดโหลดต่อช่วงเวลา โดยวิธีการใช้โหลดเชิงเส้น

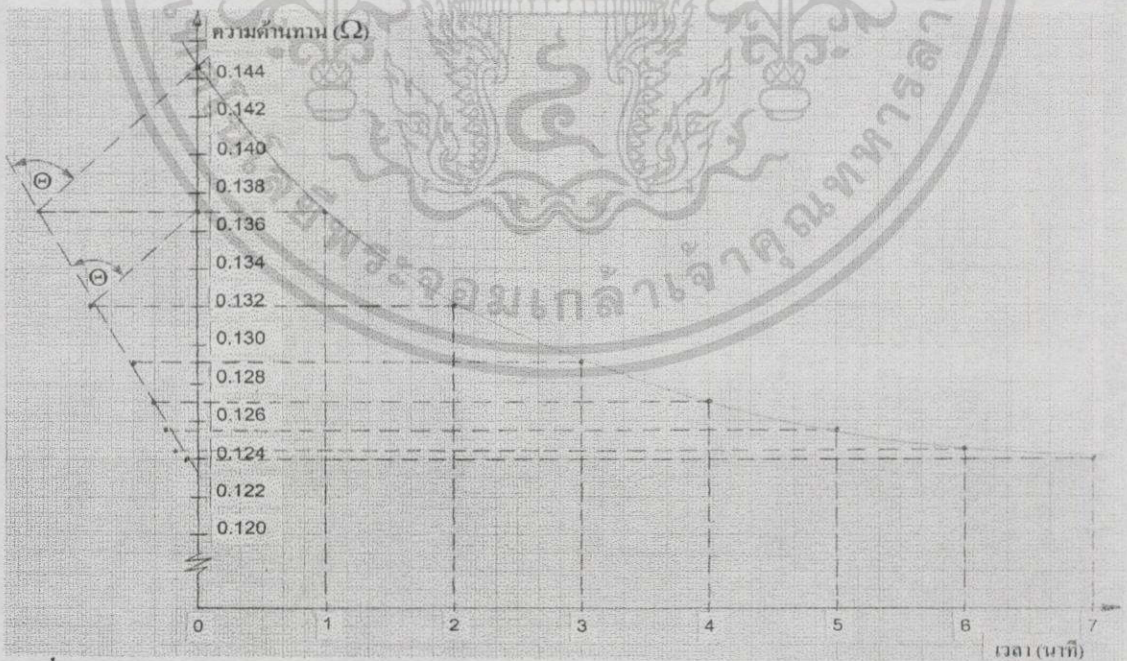


รูปที่ 5.82 แสดงการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของลวดตัวนำด้านทุติยภูมิ ขณะตัดกระแสไฟฟ้า ที่พิกัดโหลดต่อช่วงเวลา โดยวิธีการใช้โหลดเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.83 แสดงการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของลวดตัวนำด้านปฐมภูมิ ขณะตัดกระแสไฟฟ้าที่  $I_1$  พิกัดโหลด ต่อช่วงเวลา โดยวิธีการใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 5.84 แสดงการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของลวดตัวนำด้านทุติยภูมิ ขณะตัดกระแสไฟฟ้าที่  $I_1$  พิกัดโหลด ต่อช่วงเวลา โดยวิธีการใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6 แสดงค่าการคำนวณหาค่าอุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของขดลวด

ตำแหน่งทดสอบ	$\Theta_{w1}$ °C	$R_{t1}$ $\Omega$	$\Theta_{w2}$ °C	$R_{t2}$ $\Omega$	$\Theta_{wr}$ °C
ขดแรงดันต่ำ(ลัดวงจร)	31	0.1206	73.708	0.14	44.708
ขดแรงดันสูง(ลัดวงจร)	31	0.4417	73.677	0.5127	43.677
ขดแรงดันต่ำ(โหลดเชิงเส้น)	31	0.1206	79	0.1424	45
ขดแรงดันสูง(โหลดเชิงเส้น)	31	0.4417	78.3055	0.5204	45.3055
ขดแรงดันต่ำ(โหลดไม่เป็นเชิงเส้น)	31	0.1206	83.836	0.1446	49.336
ขดแรงดันสูง(โหลดไม่เป็นเชิงเส้น)	31	0.4417	80.409	0.5239	48.409

**หมายเหตุ**

ค่าความต้านทานที่ได้จากการทดสอบและจากการเขียนกราฟ เป็นค่าความต้านทานที่จุดต่อ ( $R_{terminal}$ ) ทางแรงดันสูงและแรงดันต่ำของหม้อแปลง

ทดสอบโดยใช้วิธีการลัดวงจร

$$\Theta_{wr} (L.V.) = \Theta_{w2} (L.V.) - \text{อุณหภูมิแวดล้อม} = 73.708^{\circ}\text{C} - 29^{\circ}\text{C} = 44.708^{\circ}\text{C}$$

$$\Theta_{wr} (H.V.) = \Theta_{w2} (H.V.) - \text{อุณหภูมิแวดล้อม} = 73.677^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C} = 43.677^{\circ}\text{C}$$

ทดสอบโดยใช้โหลดเชิงเส้น

$$\Theta_{wr} (L.V.) = \Theta_{w2} (L.V.) - \text{อุณหภูมิแวดล้อม} = 79^{\circ}\text{C} - 34^{\circ}\text{C} = 45^{\circ}\text{C}$$

$$\Theta_{wr} (H.V.) = \Theta_{w2} (H.V.) - \text{อุณหภูมิแวดล้อม} = 78.3055^{\circ}\text{C} - 33^{\circ}\text{C} = 45.3055^{\circ}\text{C}$$

ทดสอบโดยใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้น

$$\Theta_{wr} (L.V.) = \Theta_{w2} (L.V.) - \text{อุณหภูมิแวดล้อม} = 83.836^{\circ}\text{C} - 34.5^{\circ}\text{C} = 49.336^{\circ}\text{C}$$

$$\Theta_{wr} (H.V.) = \Theta_{w2} (H.V.) - \text{อุณหภูมิแวดล้อม} = 80.409^{\circ}\text{C} - 32^{\circ}\text{C} = 48.409^{\circ}\text{C}$$

ข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 5.6 เมื่อหม้อแปลงต่อลักษณะ  $\Delta/Y$   
ทางขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงต่อเป็น  $\Delta$  ดังนั้น

$$R_{\text{phase}} = \frac{3R_{\text{terminal}}}{2}$$

ทางขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงคือเป็น Y ดังนั้น

$$R_{\text{phase}} = \frac{R_{\text{terminal}}}{2}$$

และความต้านทานสมมูลเมื่อพิจารณาทางด้านขดปฐมภูมิคือ

$$R_{\text{eq / phase}} = R_{\text{Pri / phase}} + a^2 R_{\text{sec / phase}}$$

เมื่อ

$$a \approx \frac{V_{\text{primary(phase)}}}{V_{\text{secondary(phase)}}$$

ดังนั้นสามารถแสดงค่า  $R_{\text{eq(dc)}}$  ของการทดสอบทั้ง 3 เงื่อนไข ดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 แสดงค่าความต้านทานที่ทดสอบในเงื่อนไขต่าง ๆ ที่เวลาเริ่มต้นและเวลา ณ จุดตัดกระแส ไฟฟ้า

	ที่ $R_{t1}$ ( $\Omega/\text{phase}$ )	ที่ $R_{t2}$ ( $\Omega/\text{phase}$ )
$R_{dc}$ ขดลวดแรงดันต่ำ (ลัดวงจร)	0.0603	0.07
$R_{dc}$ ขดลวดแรงดันสูง (ลัดวงจร)	0.66255	0.76905
$R_{\text{eq(dc)}}$ (ลัดวงจร)	1.255	1.457
$R_{dc}$ ขดลวดแรงดันต่ำ (โหลดเชิงเส้น)	0.0603	0.0712
$R_{dc}$ ขดลวดแรงดันสูง (โหลดเชิงเส้น)	0.66255	0.7806
$R_{\text{eq(dc)}}$ (โหลดเชิงเส้น)	1.255	1.480
$R_{dc}$ ขดลวดแรงดันต่ำ (โหลดไม่เป็นเชิงเส้น)	0.0603	0.0723
$R_{dc}$ ขดลวดแรงดันสูง (โหลดไม่เป็นเชิงเส้น)	0.66255	0.786
$R_{\text{eq(dc)}}$ (โหลดไม่เป็นเชิงเส้น)	1.255	1.4962

#### 5.1.2.4 ผลของอุณหภูมิแตกต่างระหว่างน้ำมันกับขดลวดที่พิกัดโหลด ( $g_r$ )

ค่า ผลของอุณหภูมิแตกต่างระหว่างน้ำมันกับขดลวดที่พิกัดโหลด ( $g_r$ ) ที่ได้จากการทดสอบและการคำนวณของทั้ง 3 เงื่อนไข สามารถแสดงดังตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 แสดงผลของค่าการทดสอบและการคำนวณค่า  $g_r$  ในสภาวะทดสอบแบบลัดวงจร, โหลดเชิงเส้นและโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

ผลจากวิธีการทดสอบและคำนวณ	$g_r$ (H.V.) ( $^{\circ}\text{C}$ )	$g_r$ (L.V.) ( $^{\circ}\text{C}$ )
ทดสอบโดยวิธีการลัดวงจร	10	11
ทดสอบโดยใช้โหลดเชิงเส้น	10	10
ทดสอบโดยใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้น	8	9
จากการคำนวณ โดยใช้ข้อมูลพื้นฐานจากการทดสอบแบบลัดวงจร	11.677	12.708
จากการคำนวณ โดยใช้ข้อมูลพื้นฐานจากการทดสอบใช้โหลดเชิงเส้น	11.3055	11
จากการคำนวณ โดยใช้ข้อมูลพื้นฐานจากการทดสอบใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้น	8.909	8.936

หมายเหตุ

ทดสอบโดยใช้แบบลัดวงจร พิจารณาชั่วโมงที่ 10

$$g_r(\text{L.V.})_{\text{test}} = \text{อุณหภูมิขดลวดแรงดันต่ำ(ตำแหน่ง5)} - \text{อุณหภูมิน้ำมันด้านบน(ตำแหน่ง16)} \\ = 49^{\circ}\text{C} - 38^{\circ}\text{C} = 11^{\circ}\text{C}$$

$$g_r(\text{H.V.})_{\text{test}} = \text{อุณหภูมิขดลวดแรงดันสูง(ตำแหน่ง10)} - \text{อุณหภูมิน้ำมันด้านบน(ตำแหน่ง16)} \\ = 48^{\circ}\text{C} - 38^{\circ}\text{C} = 10^{\circ}\text{C}$$

$$g_r(\text{L.V.})_{\text{calculated}} = \Theta_{wr} - \frac{\Theta_{ir} + \Theta_{br}}{2} = 44.708 - \frac{38 + 26}{2} = 12.708^{\circ}\text{C}$$

$$g_r(\text{H.V.})_{\text{calculated}} = \Theta_{wr} - \frac{\Theta_{ir} + \Theta_{br}}{2} = 43.677 - \frac{38 + 26}{2} = 11.677^{\circ}\text{C}$$

ทดสอบโดยใช้แบบโหลดเชิงเส้น พิจารณาชั่วโมงที่ 9

$$g_r(\text{L.V.})_{\text{test}} = \text{อุณหภูมิขดลวดแรงดันต่ำ(ตำแหน่ง5)} - \text{อุณหภูมิน้ำมันด้านบน(ตำแหน่ง16)} \\ = 49^{\circ}\text{C} - 39^{\circ}\text{C} = 10^{\circ}\text{C}$$

$$g_r(\text{H.V.})_{\text{test}} = \text{อุณหภูมิขดลวดแรงดันสูง(ตำแหน่ง10)} - \text{อุณหภูมิน้ำมันด้านบน(ตำแหน่ง16)} \\ = 49^{\circ}\text{C} - 39^{\circ}\text{C} = 10^{\circ}\text{C}$$

$$g_r(\text{L.V.})_{\text{calculated}} = \Theta_{wr} - \frac{\Theta_{ir} + \Theta_{br}}{2} = 45 - \frac{39 + 29}{2} = 11^{\circ}\text{C}$$

$$g_r(\text{H.V.})_{\text{calculated}} = \Theta_{wr} - \frac{\Theta_{ir} + \Theta_{br}}{2} = 45.3055 - \frac{39 + 29}{2} = 11.3055^{\circ}\text{C}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบโดยใช้แบบโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ที่  $I_L(\text{rms}) = 17.11\text{A}$  และ  $I_1 = 15.22\text{A}$  ด้านปฐมภูมิ  
พิจารณาชั่วโมงที่ 9

$$\begin{aligned} \text{gr(L.V.)test} &= \text{อุณหภูมิขดลวดแรงดันต่ำ(ตำแหน่ง5)} - \text{อุณหภูมิน้ำมันด้านบน(ตำแหน่ง16)} \\ &= 54.5^\circ\text{C} - 45.5^\circ\text{C} = 9^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{gr(H.V.)test} &= \text{อุณหภูมิขดลวดแรงดันสูง(ตำแหน่ง10)} - \text{อุณหภูมิน้ำมันด้านบน(ตำแหน่ง16)} \\ &= 53.5^\circ\text{C} - 45.5^\circ\text{C} = 8^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\text{gr(L.V.)calculated} = \Theta_{w(\text{L.V.})} - \frac{\Theta_{\text{ir}} + \Theta_{\text{br}}}{2} = 49.336 - \frac{45.5 + 33.5}{2} = 9.836^\circ\text{C}$$

$$\text{gr(H.V.)calculated} = \Theta_{w(\text{H.V.})} - \frac{\Theta_{\text{ir}} + \Theta_{\text{br}}}{2} = 48.409 - \frac{45.5 + 33.5}{2} = 8.909^\circ\text{C}$$

จากการทดสอบและคำนวณหาค่า  $g_r$  ของขดลวดแรงดันสูงและแรงดันต่ำโดยวิธีการลด  
วงจรและใช้โหลดเชิงเส้น ผลลัพธ์ที่ได้ค่า  $g_r$  อยู่ในช่วง 10 - 12.708 ซึ่งการทดสอบนี้มีได้ติดตั้ง  
เทอร์โมคัปเปิลที่ทุก ๆ ตำแหน่งของลวดตัวนำ ดังนั้นบางตำแหน่งที่มีได้ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลอาจ  
มีอุณหภูมิสูงกว่าตำแหน่งที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลก็เป็นได้ และตำแหน่งที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลที่  
น้ำมันมิได้ติดตั้งที่ผนังด้านในของถังน้ำมัน และข้อผิดพลาดของเครื่องมือที่ใช้ทดสอบหาค่าความต้าน  
ทานของลวดตัวนำในช่วงตัดกระแสไฟฟ้ารวมถึงข้อผิดพลาดอื่นเนื่องจากการเขียนกราฟหาค่า  
ความต้านทาน ณ จุดตัดกระแสไฟฟ้า ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะหาค่า  $g_r$  โดยกำหนดให้มีค่าเพิ่ม  
ขึ้นอีกประมาณ 5-10 เปอร์เซ็นต์ของค่า  $g_r$  ที่ได้จากการทดสอบหรือการคำนวณ ซึ่งจะกำหนดให้  
 $g_r = 13.5$

#### 5.1.2.5 การเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มในแนวระดับของขดลวด และน้ำมัน

จากผลการทดสอบอุณหภูมิทั้ง 3 เงื่อนไข เมื่อนำผลของอุณหภูมิเพิ่มที่ตำแหน่งต่าง ๆ ที่  
ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลในแนวระดับของขดลวดแรงดันสูง, แรงดันต่ำ และน้ำมัน นำมาหาความ  
สัมพันธ์ของอุณหภูมิเพิ่มต่อระดับความสูง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.89 ถึง 5.90 และสมการ  
ที่ 5.2 ถึง 5.10

เมื่อทดสอบแบบลัดวงจร

-จากรูปที่ 5.39 ได้สมการอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ(y) ต่อความสูงของขดลวดแรงดันต่ำ(x)

$$Y = -4 \times 10^{-7} X^3 + 0.0005 X^2 + 0.0454 X + 33.541 \quad (5.2)$$

-จากรูปที่ 5.40 ได้สมการอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง(y) ต่อความสูงของขดลวดแรงดันสูง(x)

$$Y = -1 \times 10^{-5} X^3 + 0.0022 X^2 - 0.0148 X + 37.07 \quad (5.3)$$

-จากรูปที่ 5.41 ได้สมการอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน(y) ต่อความสูงของขดลวด(x)

$$Y = 2.5063 \ln(X) + 26.336 \quad (5.4)$$

เมื่อทดสอบแบบใช้โหลดเชิงเส้น

-จากรูปที่ 5.46 ได้สมการอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ(y) ต่อความสูงของขดลวดแรงดันต่ำ(x)

$$Y = 0.0881 X + 35.989 \quad (5.5)$$

-จากรูปที่ 5.47 ได้สมการอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง(y) ต่อความสูงของขดลวดแรงดันสูง(x)

$$Y = 0.1 X + 36.383 \quad (5.6)$$

-จากรูปที่ 5.48 ได้สมการอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน(y) ต่อความสูงของขดลวด(x)

$$Y = 2.0969 \ln(X) + 28.951 \quad (5.7)$$

เมื่อทดสอบแบบใช้โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น

-จากรูปที่ 5.53 ได้สมการอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ(y) ต่อความสูงของขดลวดแรงดันต่ำ(x)

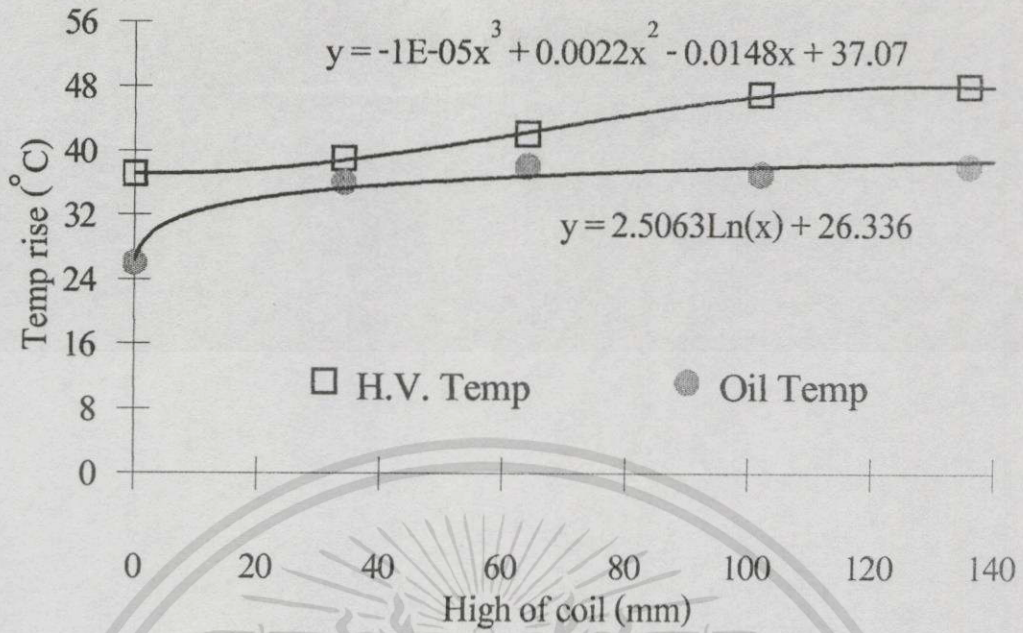
$$Y = 0.1147 X + 37.979 \quad (5.8)$$

-จากรูปที่ 5.54 ได้สมการอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง(y) ต่อความสูงของขดลวดแรงดันสูง(x)

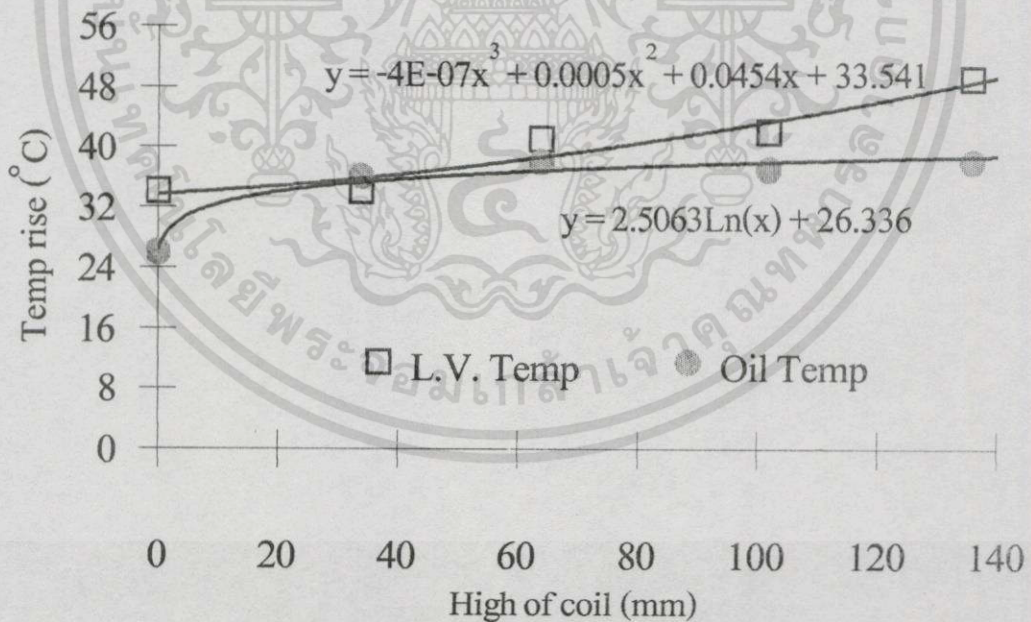
$$Y = 0.0942 X + 41.576 \quad (5.9)$$

-จากรูปที่ 5.55 ได้สมการอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน(y) ต่อความสูงของขดลวด(x)

$$Y = 2.302 \ln(X) + 33.542 \quad (5.10)$$

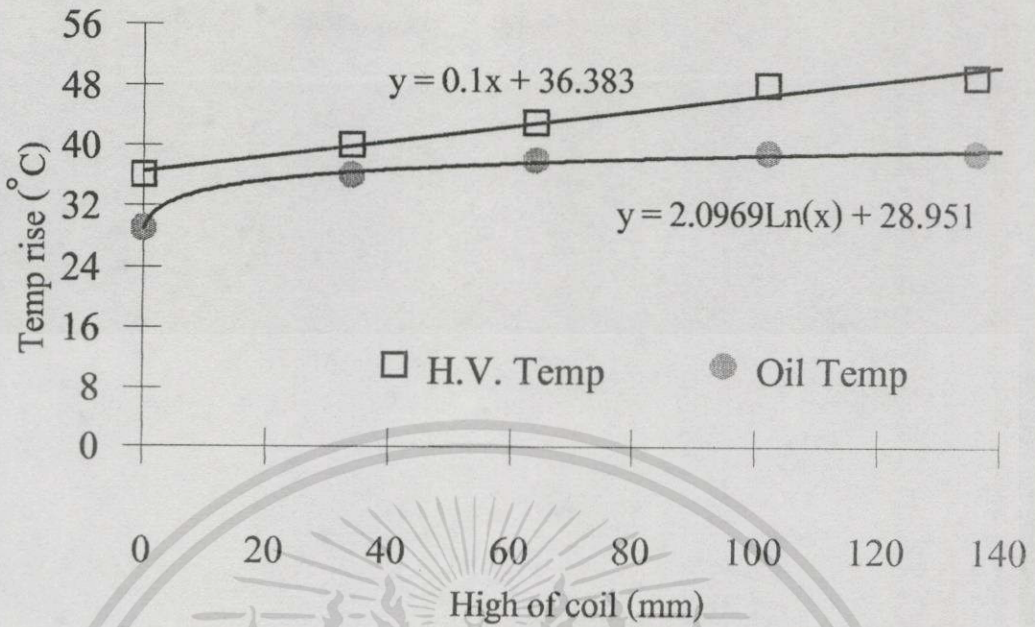


รูปที่ 5.85 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ระดับความสูงต่างๆ ของขดลวดแรงดันสูงและน้ำมันของ การทดสอบแบบลัดวงจร (ชั่ว โมงที่ 10)

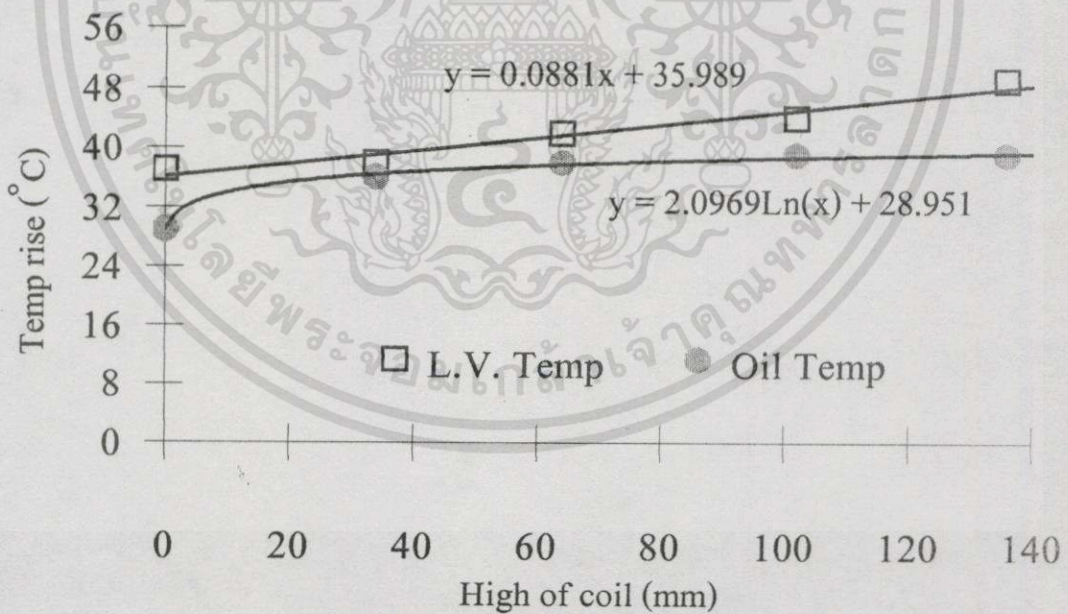


รูปที่ 5.86 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ระดับความสูงต่างๆ ของขดลวดแรงดันต่ำและน้ำมันของ การทดสอบแบบลัดวงจร (ชั่ว โมงที่ 10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

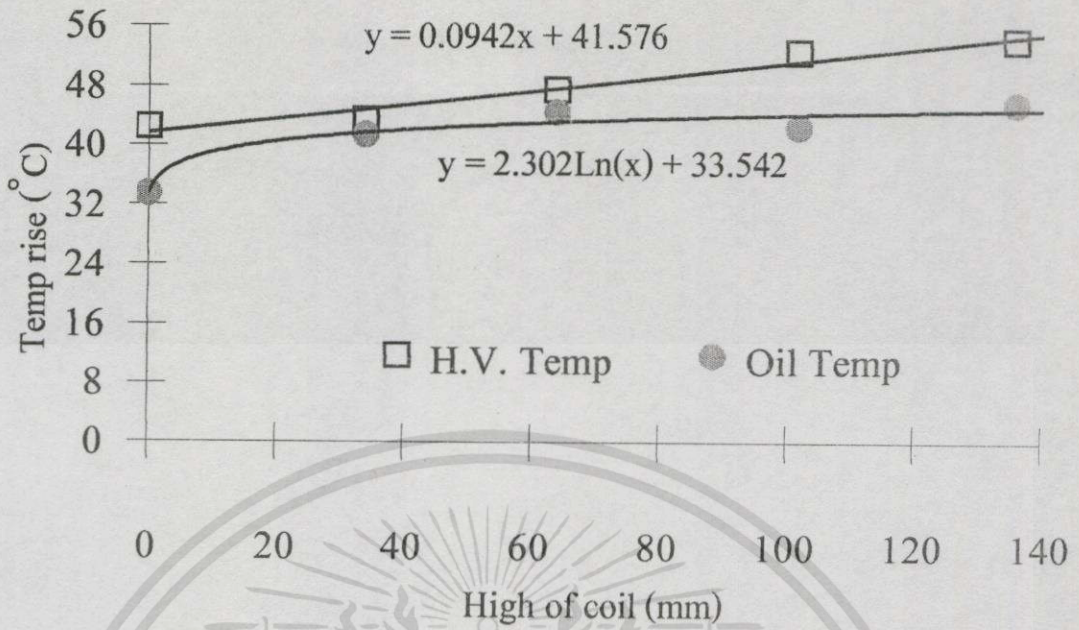


รูปที่ 5.87 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มที่ระดับความสูงต่างๆ ของขดลวดแรงดันสูงและน้ำมันของการทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น (ชั่วโมงที่ 9)

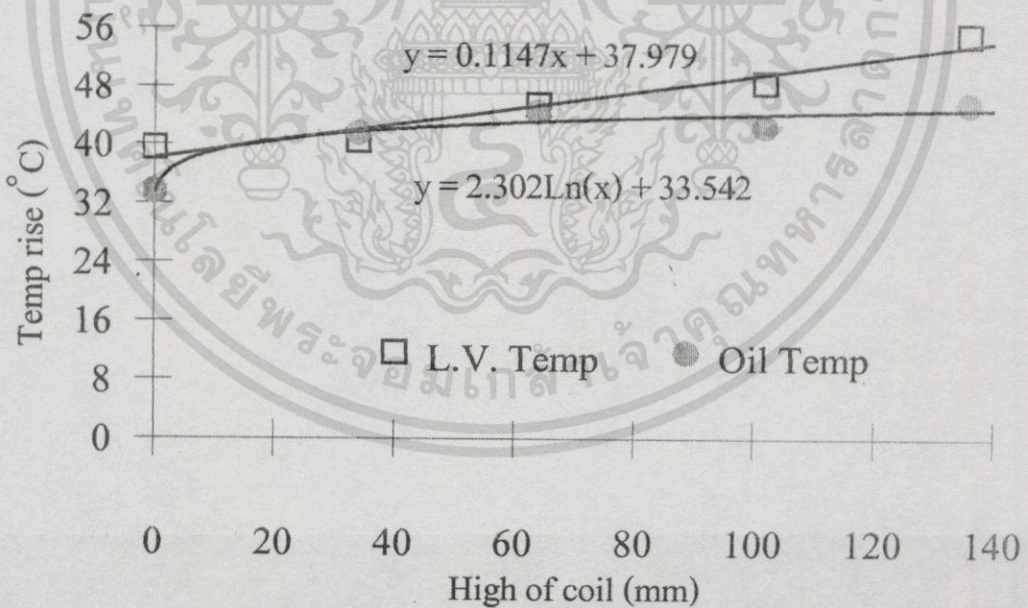


รูปที่ 5.88 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มที่ระดับความสูงต่างๆ ของขดลวดแรงดันต่ำและน้ำมันของการทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น (ชั่วโมงที่ 9)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.89 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มที่ระดับความสูงต่างๆ ของขดลวดแรงดันสูงและน้ำมันของการทดสอบแบบโหลดไม่เป็นเชิงเส้น (ชั่วโมงที่ 9)



รูปที่ 5.90 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มที่ระดับความสูงต่างๆ ของขดลวดแรงดันต่ำและน้ำมันของการทดสอบแบบโหลดไม่เป็นเชิงเส้น (ชั่วโมงที่ 9)

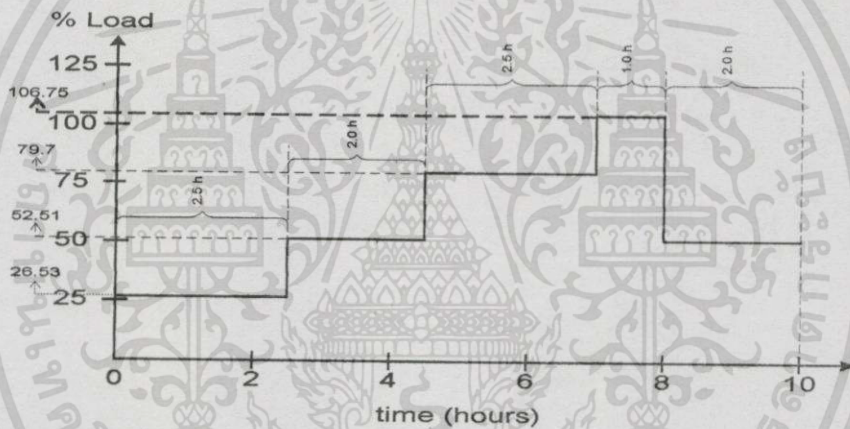
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.2.6 การทดสอบอุณหภูมิหม้อแปลงเมื่อโหลดเชิงเส้นและโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่หลายระดับ

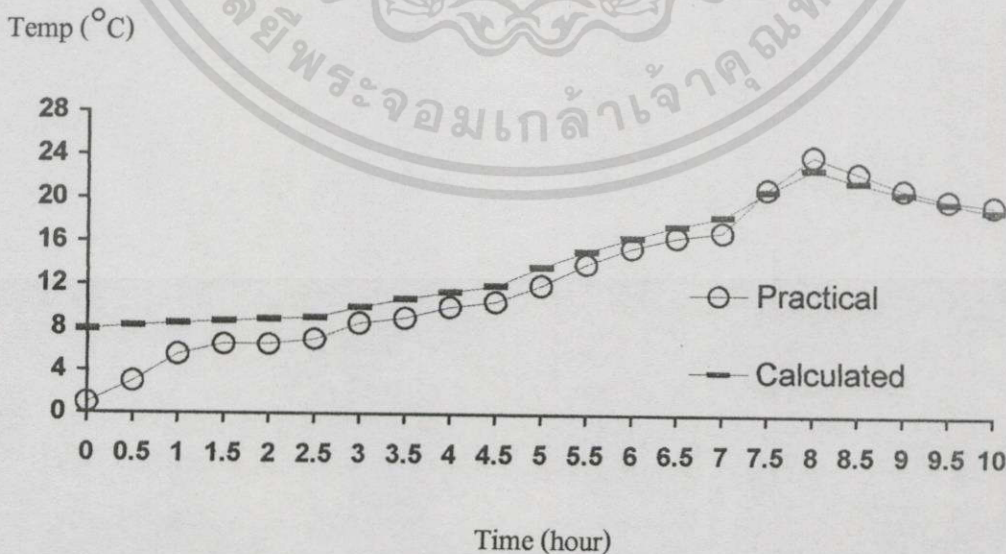
จากการทดสอบที่ผ่านมาเป็นการทดสอบของเงื่อนไขทั้ง 3 ที่ระดับโหลดของหม้อแปลงเพียงระดับเดียว แต่ในสภาพความเป็นจริงโหลดที่เกิดขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงหลายระดับในช่วงเวลา 1 วัน ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดสอบอุณหภูมิที่โหลดหลาย ๆ ระดับ ทั้งเงื่อนไขที่เป็นโหลดเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น

#### 1.) เมื่อโหลดเป็นเชิงเส้นและมีระดับหลายระดับ

การทดสอบนี้จะพิจารณาค่าแห่งที่ 5 และ 10 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีอุณหภูมิของลวดตัวนำสูงที่สุด และตำแหน่งที่ 17 ซึ่งเป็นตำแหน่งของอุณหภูมิน้ำมันด้านบน ซึ่งจะมีโหลดจริงแบบเชิงเส้น จำนวน 5 ระดับดังรูปที่ 5.91 และผลการทดสอบและการคำนวณตามมาตรฐาน IEC แสดงดังรูปที่ 5.92 ถึง 5.94

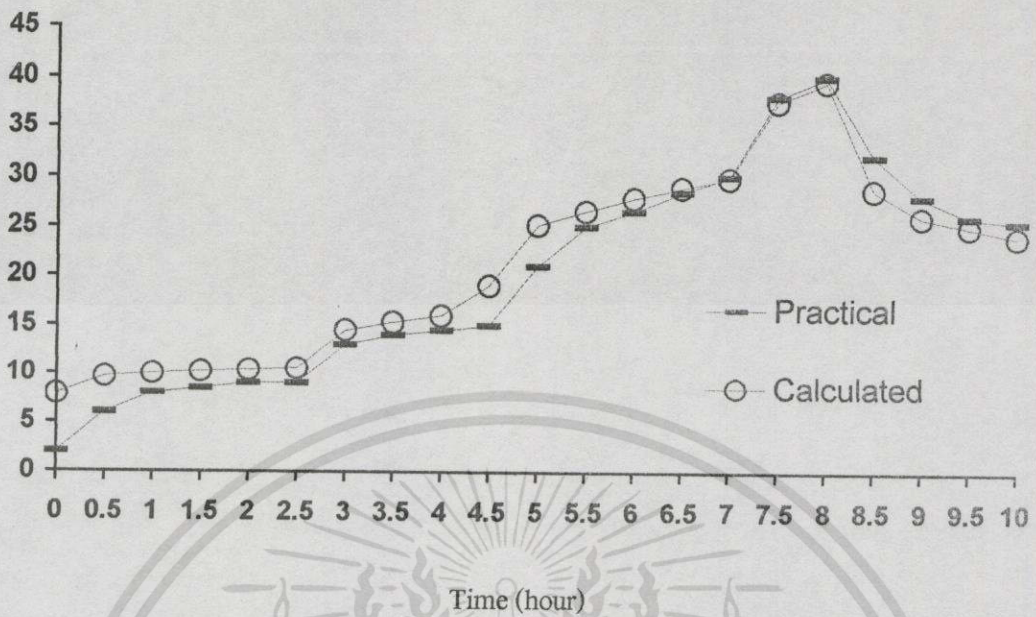


รูปที่ 5.91 แสดงการเปลี่ยนแปลงโหลด 5 ระดับ ในช่วงเวลา 10 ชั่วโมง

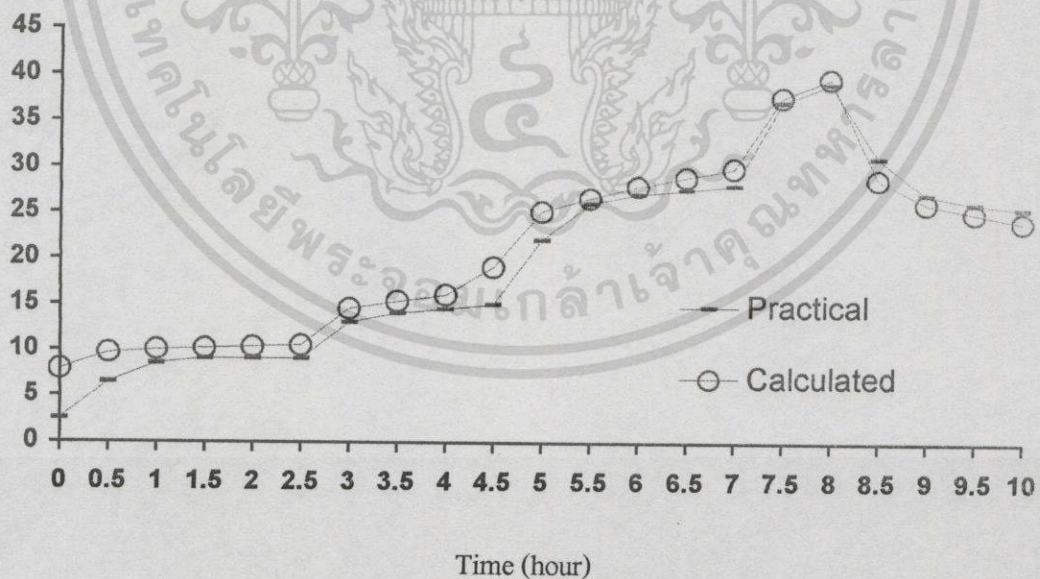


รูปที่ 5.92 แสดงผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการทำนาย ของอุณหภูมิน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )

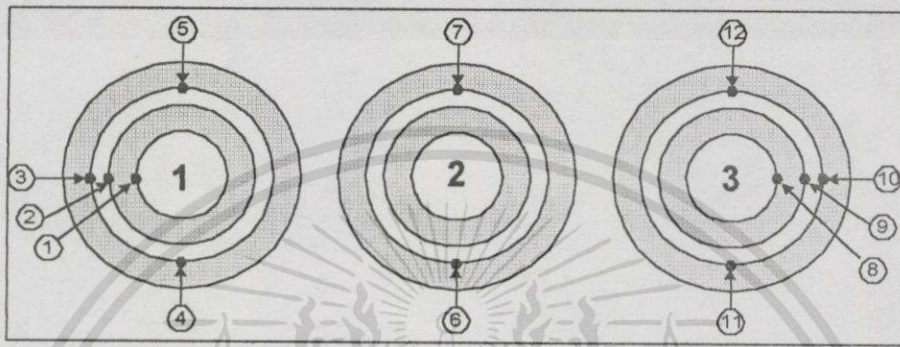
รูปที่ 5.93 แสดงผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการทำนาย ของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 5

Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )

รูปที่ 5.94 แสดงผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการทำนาย ของอุณหภูมิเพิ่มขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 10

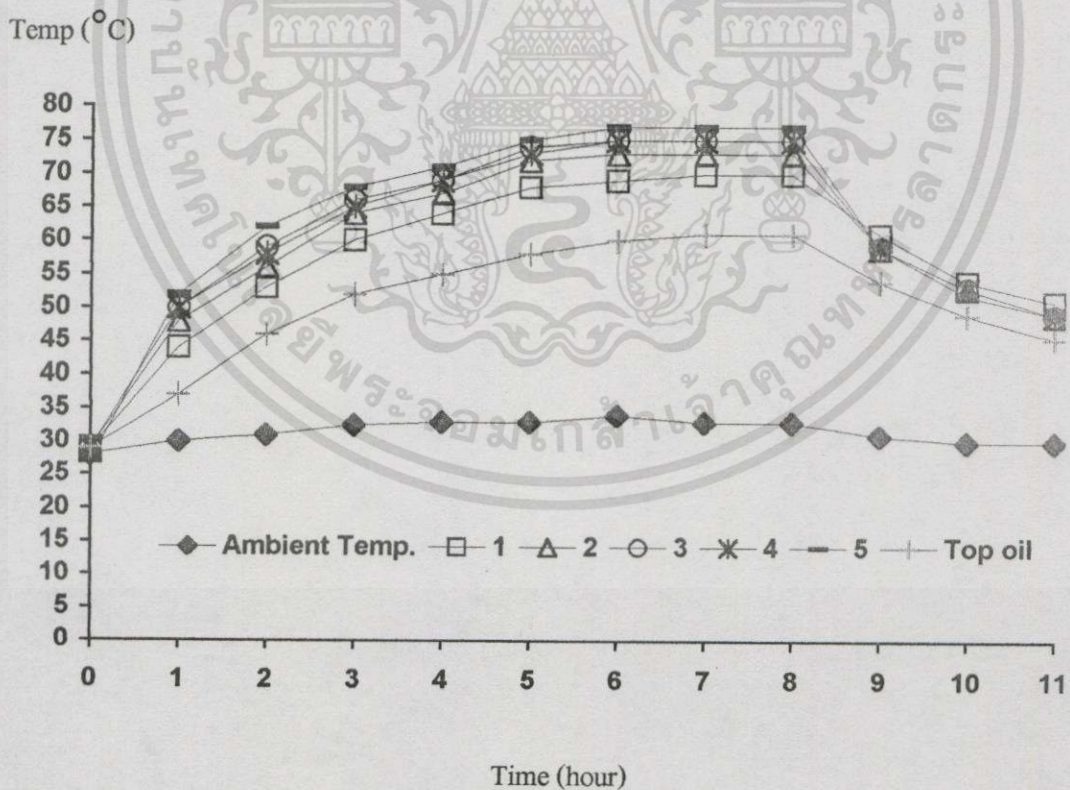
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบจะเห็นว่า ที่บริเวณด้านบนของขดลวด จะเป็นตำแหน่งที่ร้อนที่สุด ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการตรวจสอบอุณหภูมิที่บริเวณด้านบนของขดลวดทั้ง 3 คอยล์ โดยจะติดตั้งตัวเทอร์โมคัปเปิลเปิดตำแหน่งที่คาดคะเนว่ามีอุณหภูมิสูงสุด โดยจะแสดงตำแหน่งที่ติดตั้งตัวเทอร์โมคัปเปิลดังรูปที่ 5.95 และทำการทดสอบโดยวิธีการลัดวงจรที่กระแสฟัดด์ 8 ชั่วโมง และไร้ภาระ 3 ชั่วโมง ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.96 ถึง 5.103



TOP VIEW

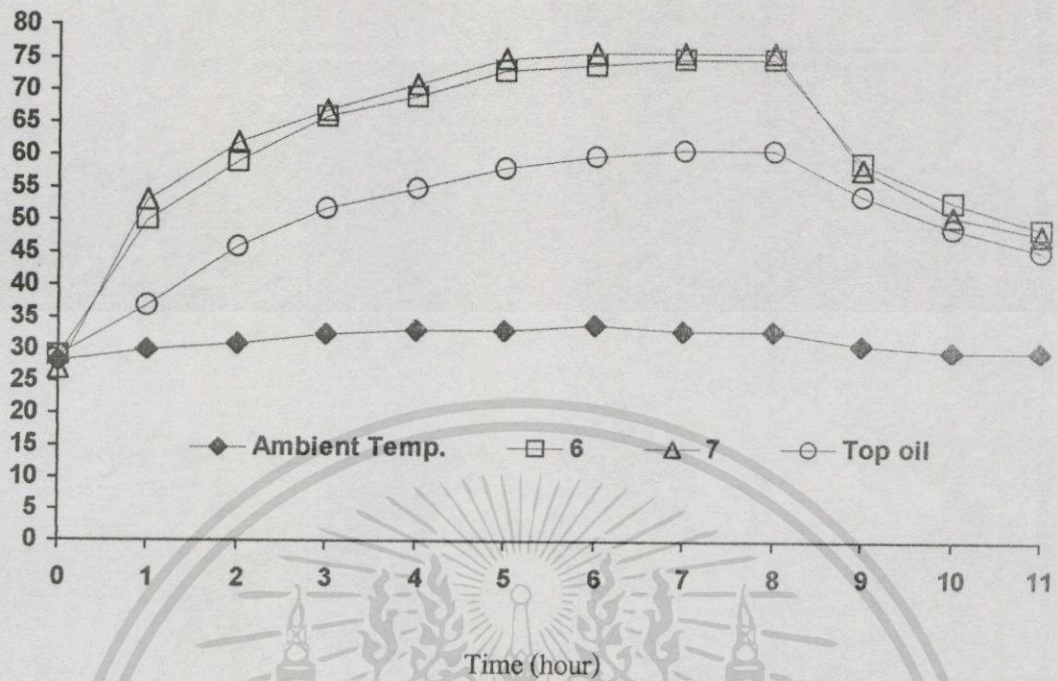
รูปที่ 5.95 แสดง การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บริเวณด้านบนขดลวดทั้ง 3 คอยล์



รูปที่ 5.96 แสดงผลของอุณหภูมิของขดลวดและน้ำมันด้านบน ขณะทำการทดสอบแบบลัดวงจร ที่คอยล์ 1

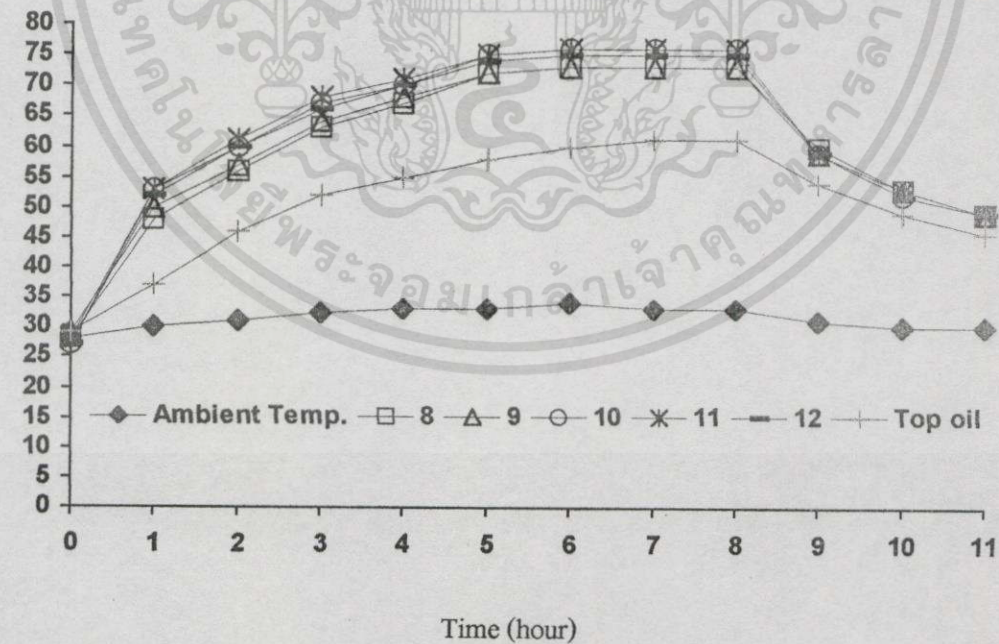
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temp (°C)



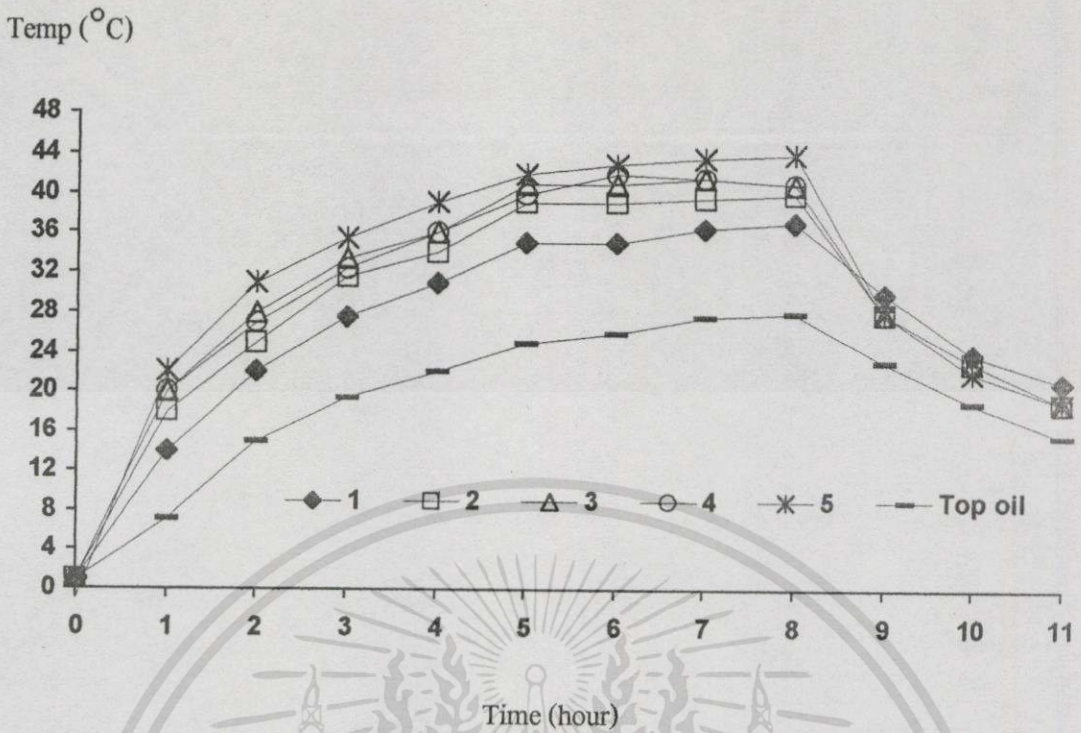
รูปที่ 5.97 แสดงผลของอุณหภูมิของขดลวดและน้ำมันด้านบน ขณะทำการทดสอบแบบลัดวงจร ที่คอยล์ 2

Temp (°C)

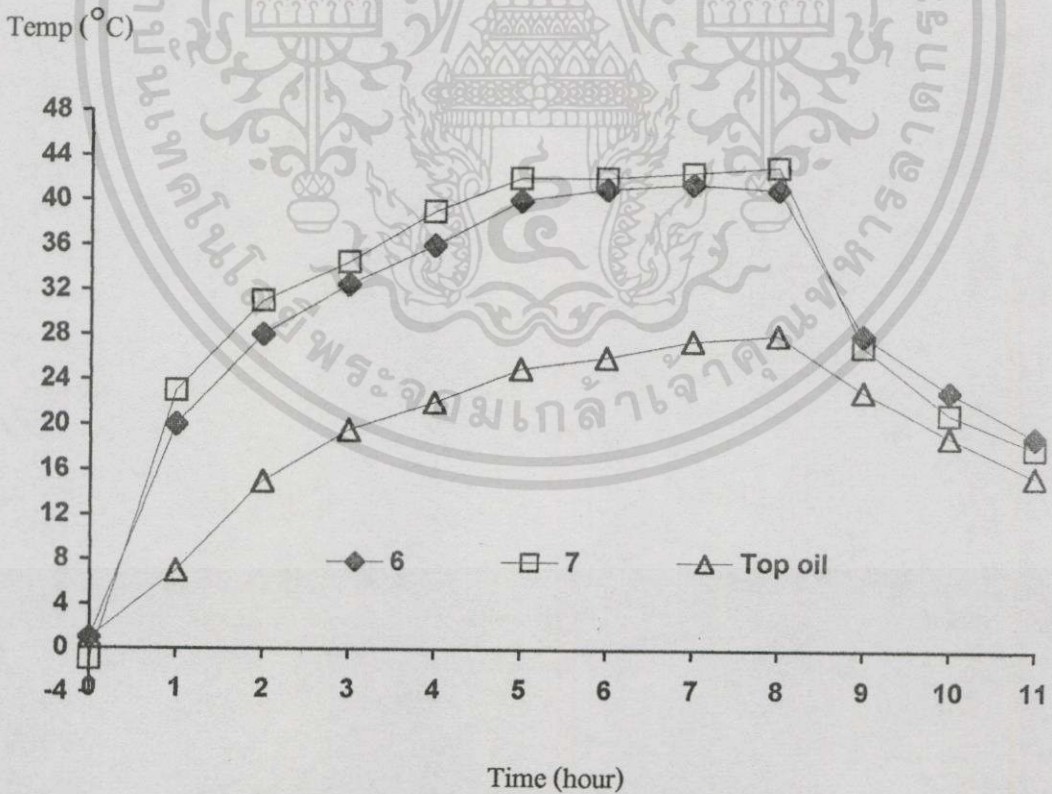


รูปที่ 5.98 แสดงผลของอุณหภูมิของขดลวดและน้ำมันด้านบน ขณะทำการทดสอบแบบลัดวงจร ที่คอยล์ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

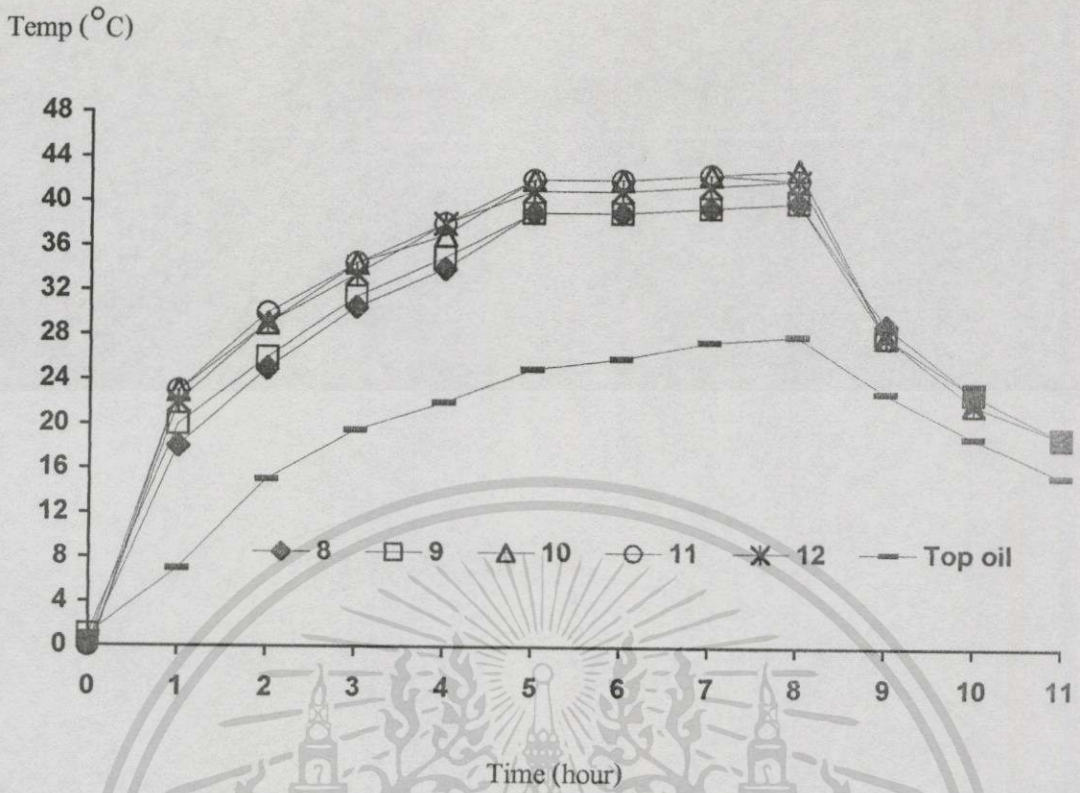


รูปที่ 5.99 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดและน้ำมันด้านบน ขณะทำการทดสอบแบบลัดวงจรที่คอยล์ 1

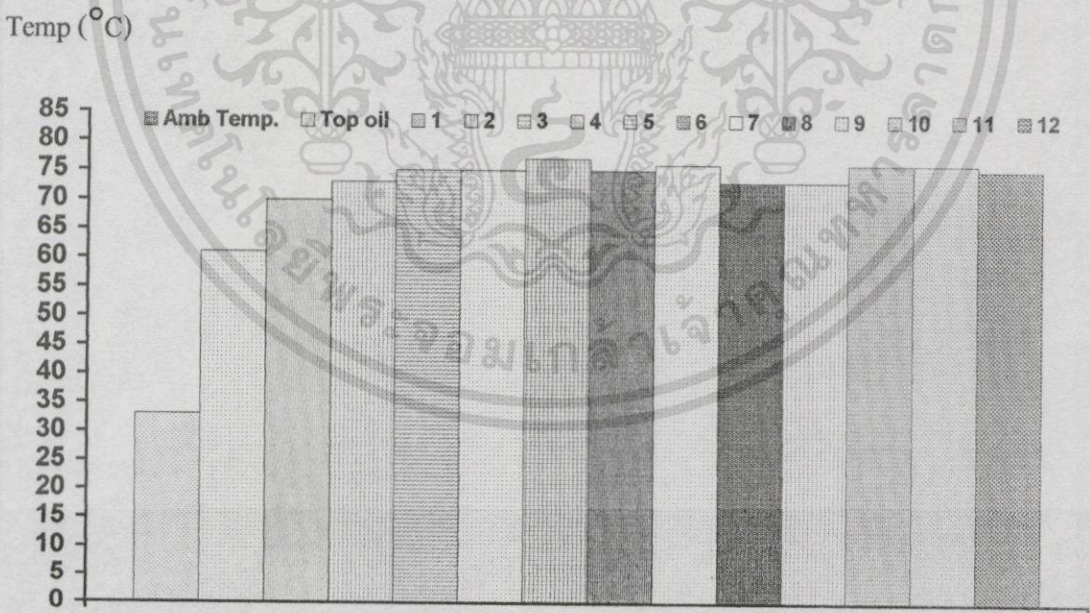


รูปที่ 5.100 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดและน้ำมันด้านบน ขณะทำการทดสอบแบบลัดวงจรที่คอยล์ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.101 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดและน้ำมันฉนวนบน ขณะทำการทดสอบแบบลัดวงจรที่คอยล์ 3

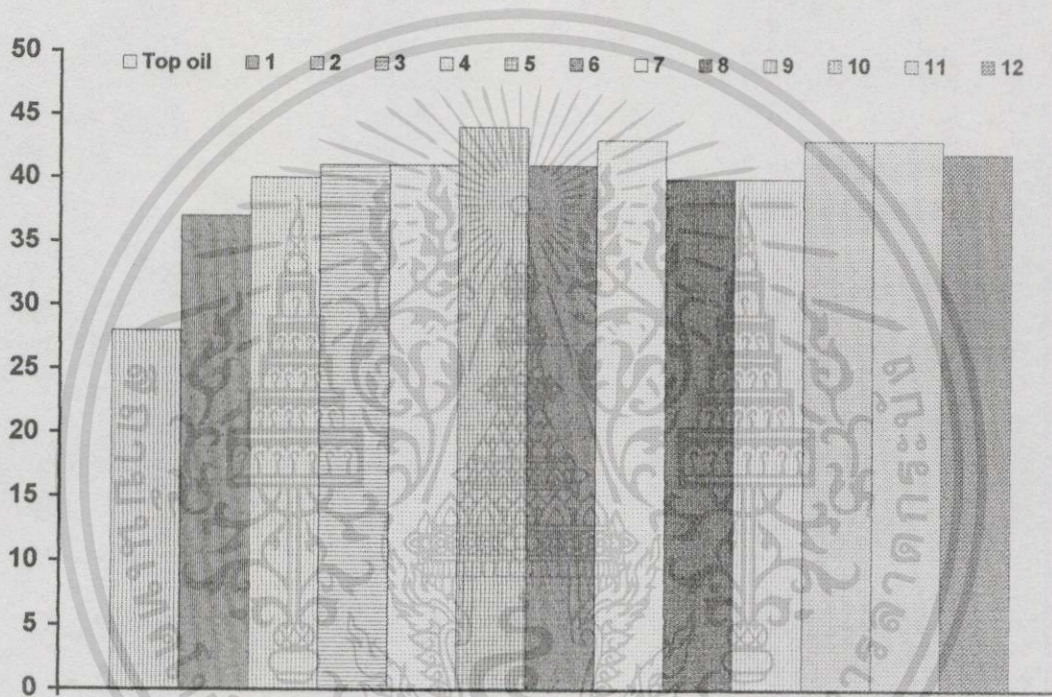


ตำแหน่งที่ทดสอบวัดอุณหภูมิ

รูปที่ 5.102 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิของขดลวด ทั้ง 3 คอยล์และน้ำมันฉนวนบน ขณะทำการทดสอบแบบลัดวงจร ที่สภาวะคงตัว ชั่วโมงที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temp (°C)



ตำแหน่งที่ทดสอบวัดอุณหภูมิ

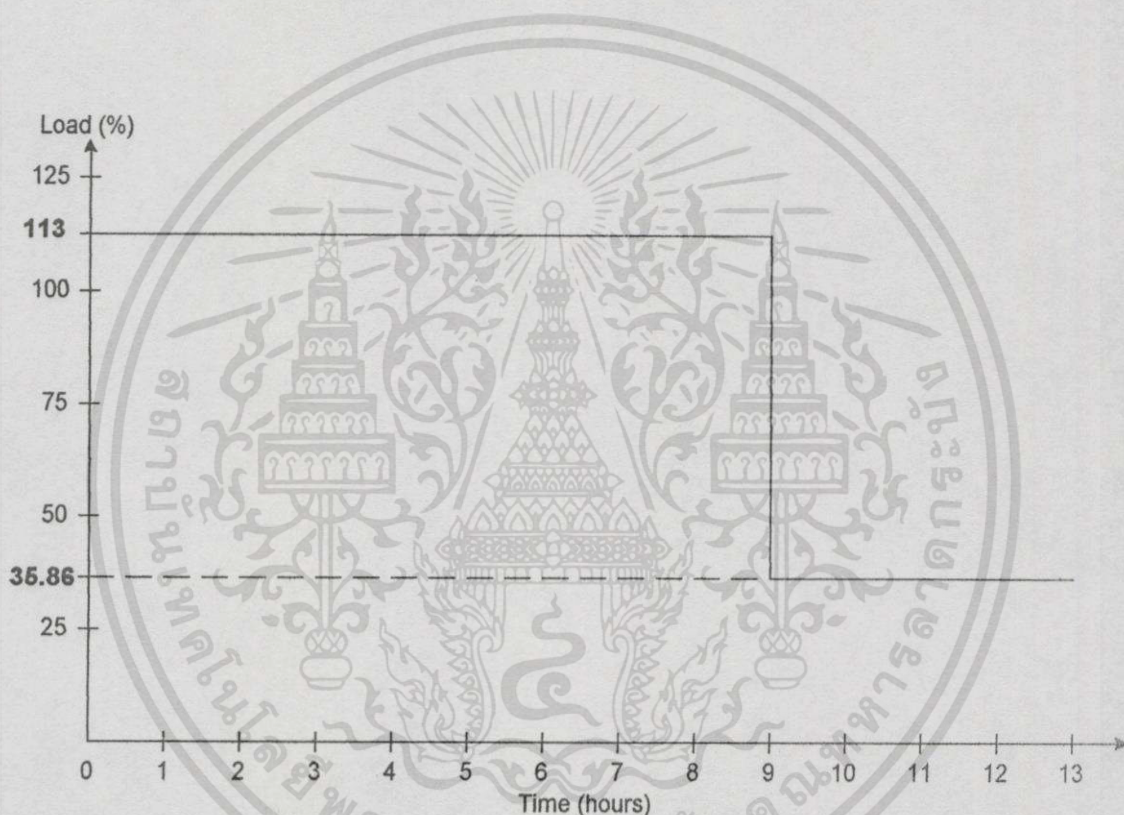
รูปที่ 5.103 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด ทั้ง 3 คอยล์และน้ำมันด้านบน ขณะทำการทดสอบแบบดีดวงจร ที่สภาวะคงตัว ชั่วโมงที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.) เมื่อโหลดเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้นและมีระดับโหลดหลายระดับ

การทดสอบวิธีการนี้จะติดตั้งตัวเทอร์โมคัปเปิลดังรูปที่ 5.95 โดยการทดสอบจะมีการเปลี่ยนแปลงระดับโหลดหลาย ๆ ค่า ซึ่งจะแสดงไว้ดังตัวอย่างต่าง ๆ ดังนี้

ตัวอย่างที่ 1 ของการทดสอบ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น เมื่อกำหนดให้ลักษณะของโหลดต่อช่วงเวลาที่ใช้ทดสอบดังรูปที่ 5.104 ขนาดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 5.9 และผลการทดสอบอุณหภูมิหม้อแปลงดังรูปที่ 5.105 ถึง 5.112

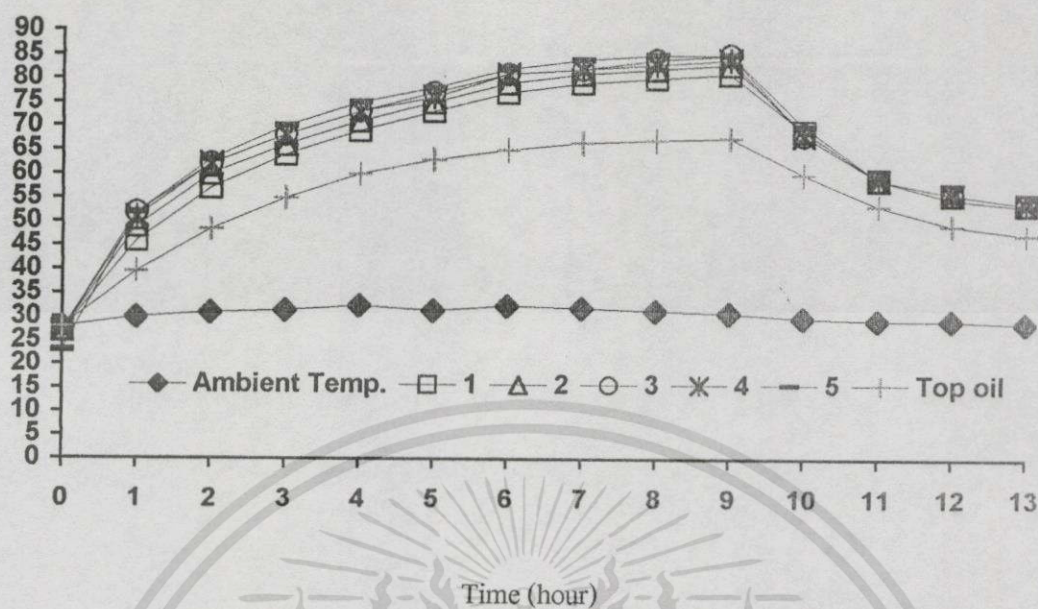


รูปที่ 5.104 แสดงการเปลี่ยนแปลงโหลด 2 ระดับ ในช่วงเวลา 13 ชั่วโมง

ตารางที่ 5.9 แสดงค่าขนาดต่างๆ ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางค่านขดลวดปฐมภูมิ จากตัวอย่างที่ 1 ของการทดสอบโหลดไม่เชิงเส้น 2 ระดับ

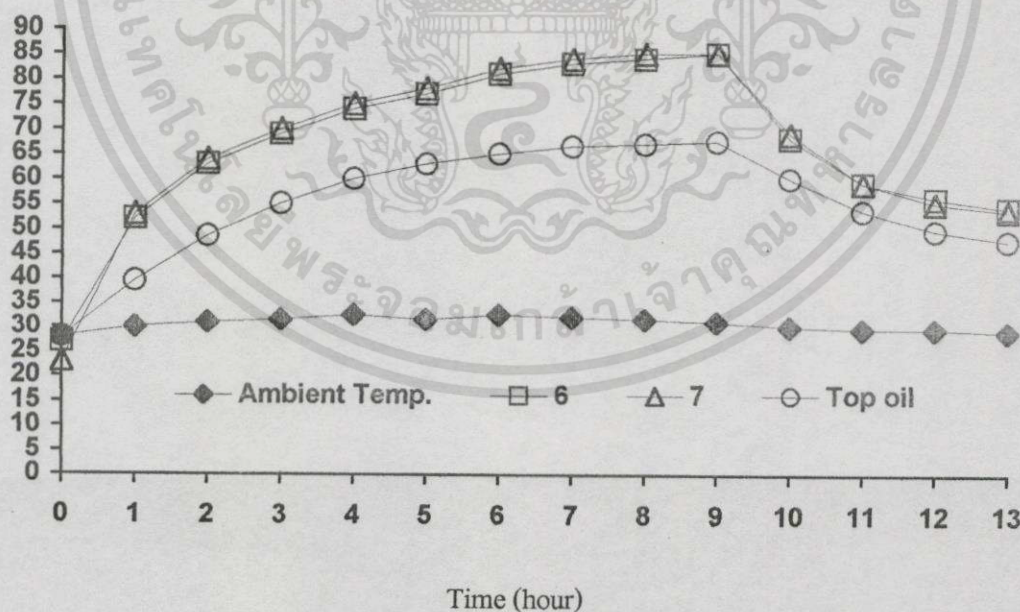
ลำดับ	I Load ต่อ I rated ของหม้อแปลง (%)	ชนิดโหลด	เวลา (ชั่วโมง)	THDV (%)	Vrms (Volt)	DC (%)	Order										
							I (%) / Volt	3 (%)	5 (%)	7 (%)	9 (%)	11 (%)	13 (%)	15 (%)	17 (%)	19 (%)	
1.	113	1.รีกตีฟายเออร์ 2.โหลดความร้อน+ โหลดคอินแทนฯ 3.คาปาซิเตอร์ 4050μF	9	2	383.06	0	100	0	1.8	0.6	0	0.2	0	0	0		
							I (%) / Amp	3	5	7	9	11	13	15	17	19	
																	15.38
2.	35.85	1.รีกตีฟายเออร์ 2.โหลดความร้อน+ โหลดคอินแทนฯ 3.คาปาซิเตอร์ 4050μF	4	1.7	382.9	0	100	0.1	1.5	0.6	0	0	0	0			
							I (%) / Volt	3	5	7	9	11	13	15	17	19	
																	4.17
					5.45	20.7	100	4.17	6.4	62.3	48.2	2.0	15.2	7.6	1.4	6.6	4.6

Temp (°C)



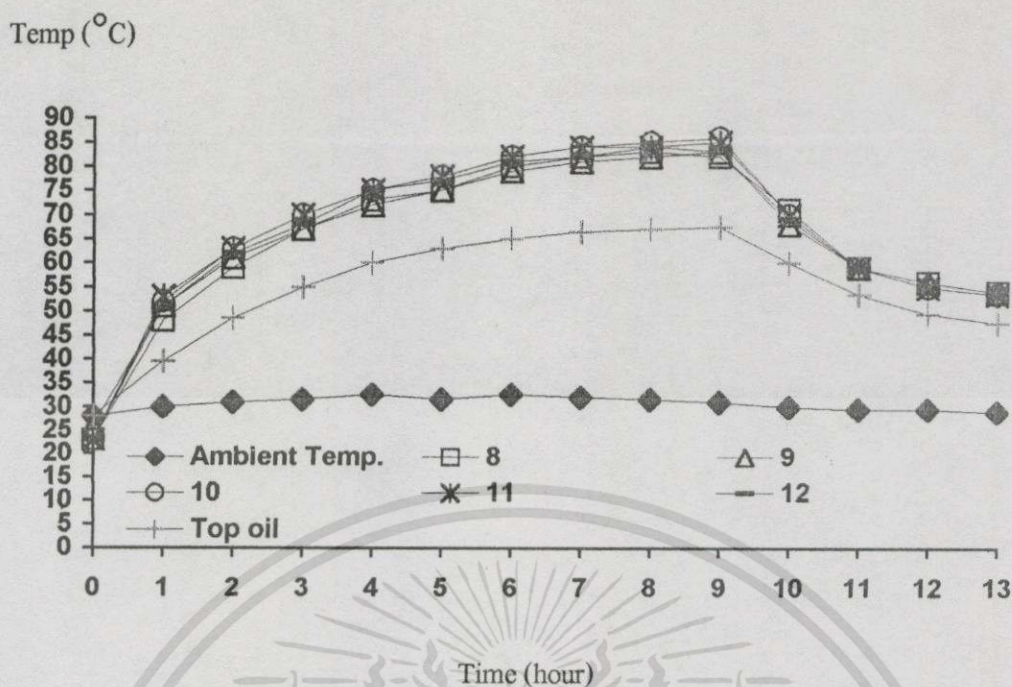
รูปที่ 5.105 แสดงผลของอุณหภูมิของขดลวดและน้ำมันด้านบนขณะทำการทดสอบแบบโหลดไม่  
เป็นเชิงเส้น ที่คอยล์ 1

Temp (°C)

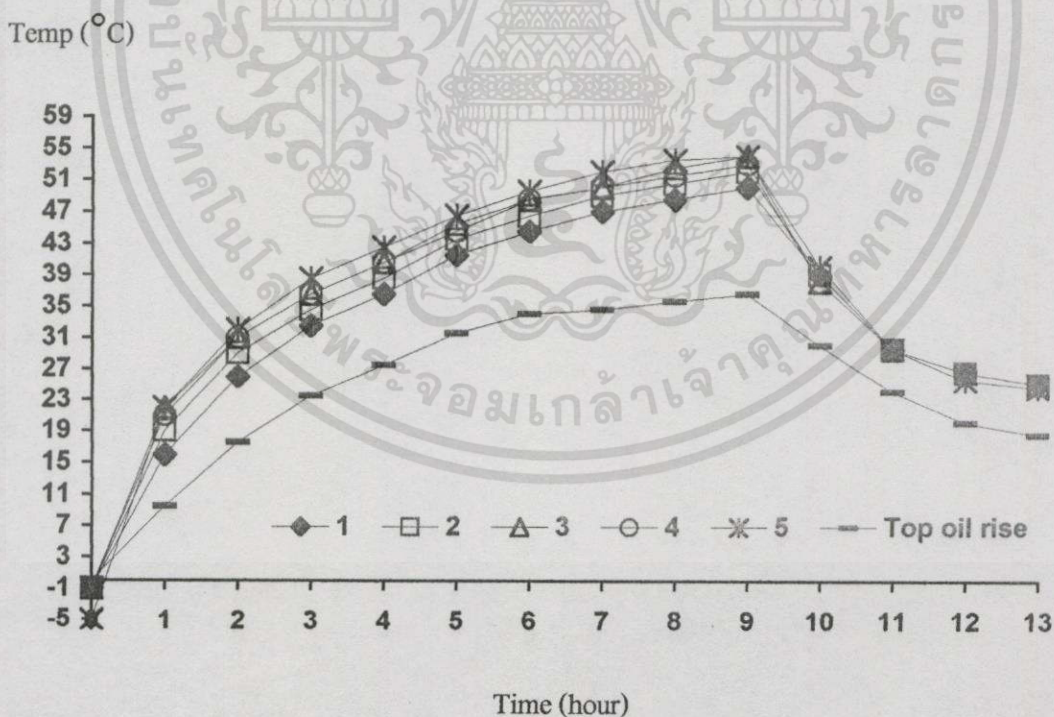


รูปที่ 5.106 แสดงผลของอุณหภูมิของขดลวดและน้ำมันด้านบนขณะทำการทดสอบแบบโหลดไม่  
เป็นเชิงเส้น ที่คอยล์ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

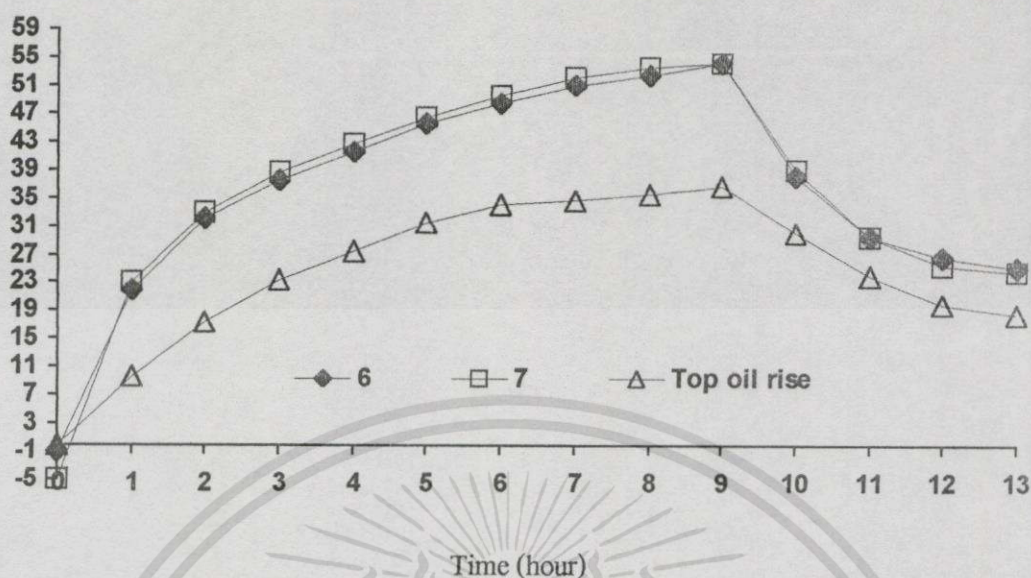


รูปที่ 5.107 แสดงผลของอุณหภูมิของขดลวดและน้ำมันด้านบนขณะทำการทดสอบแบบ โหลด ไม่เป็นเชิงเส้น ที่คอยล์ 3

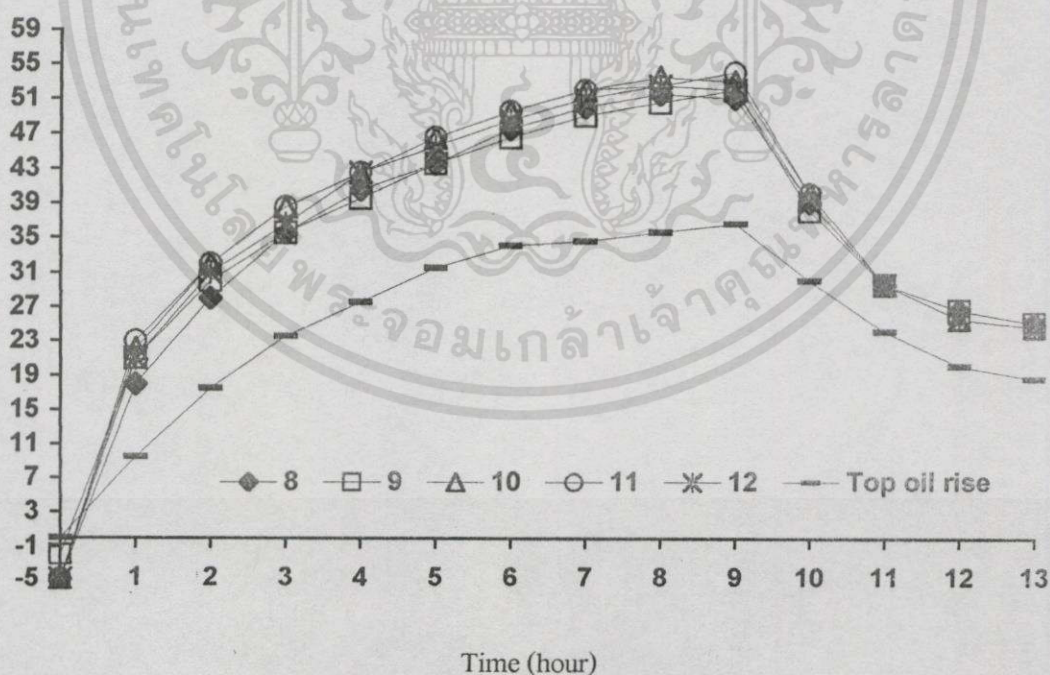


รูปที่ 5.108 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดและน้ำมันด้านบนขณะทำการทดสอบแบบ โหลด ไม่เป็นเชิงเส้น ที่คอยล์ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )

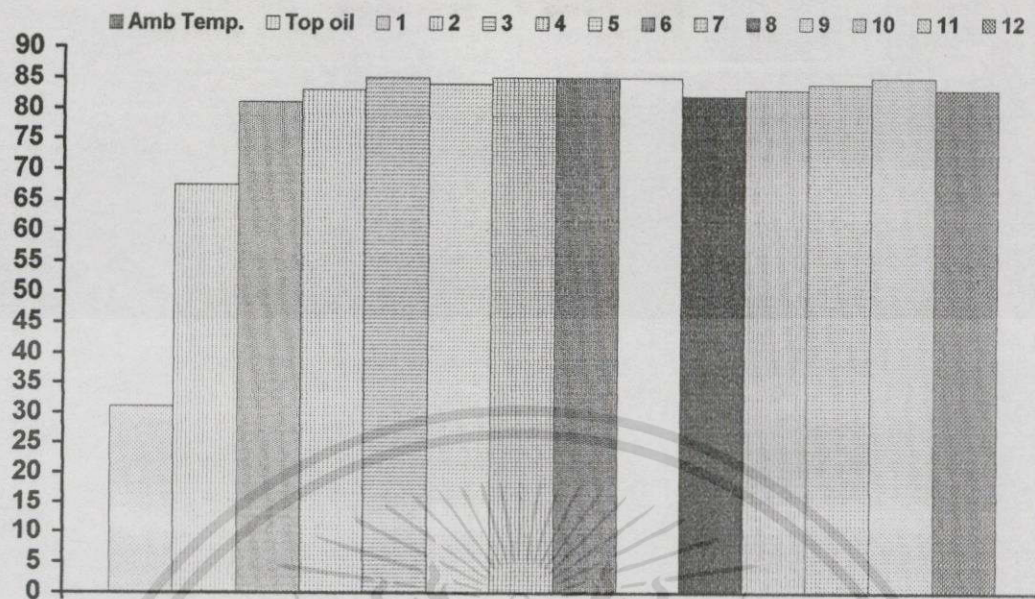
รูปที่ 5.109 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดและน้ำมันด้านบนขณะทำการทดสอบแบบ โหลด  
ไม่เป็นเชิงเส้น ที่คอยล์ 2

Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )

รูปที่ 5.110 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดและน้ำมันด้านบนขณะทำการทดสอบแบบ โหลด  
ไม่เป็นเชิงเส้น ที่คอยล์ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

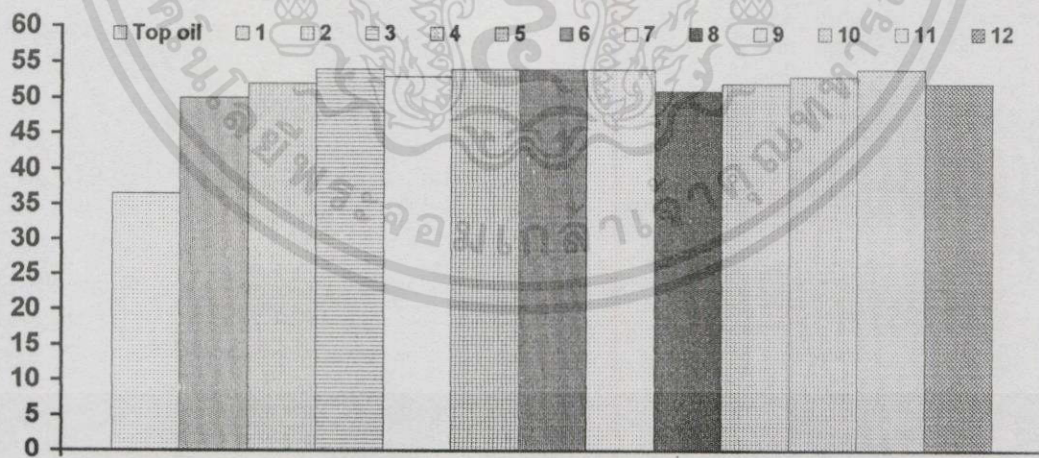
Temp (°C)



ตำแหน่งที่ทดสอบวัดอุณหภูมิ

รูปที่ 5.111 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิของขดลวด ทั้ง 3 คอยล์และน้ำมันค้ำบน ขณะทำการทดสอบแบบโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ชั่วโมงที่ 9

Temp (°C)

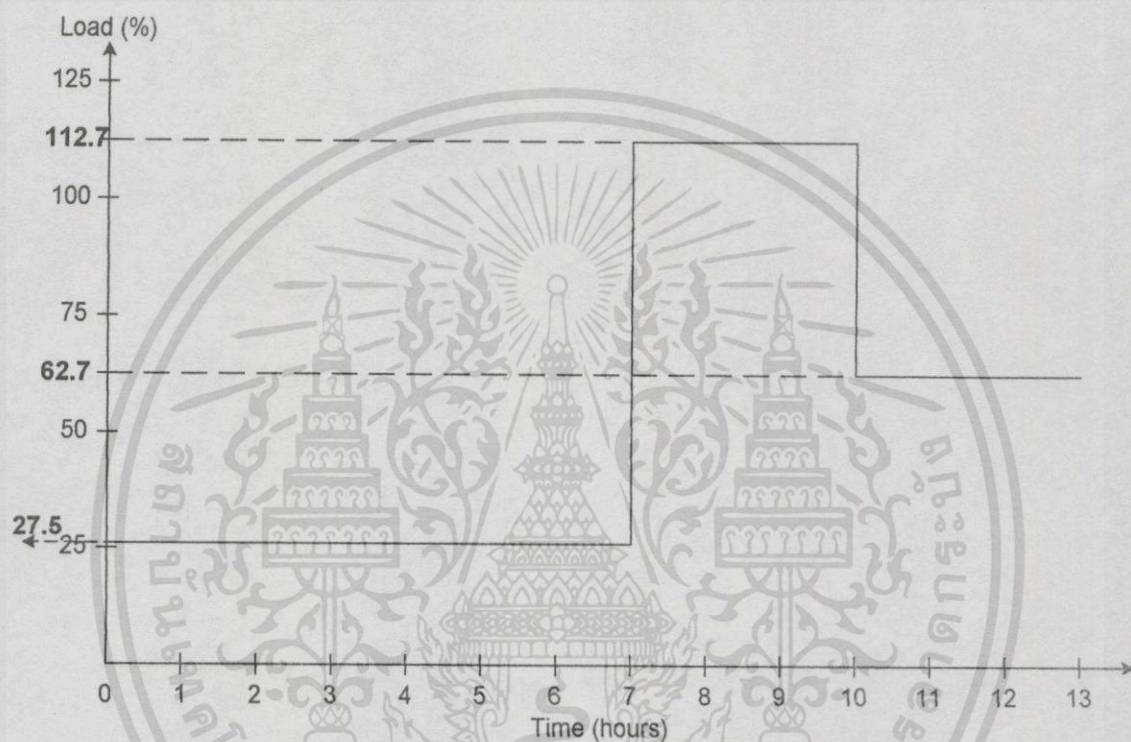


ตำแหน่งที่ทดสอบวัดอุณหภูมิ

รูปที่ 5.112 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด ทั้ง 3 คอยล์และน้ำมันค้ำบน ขณะทำการทดสอบแบบโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ชั่วโมงที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

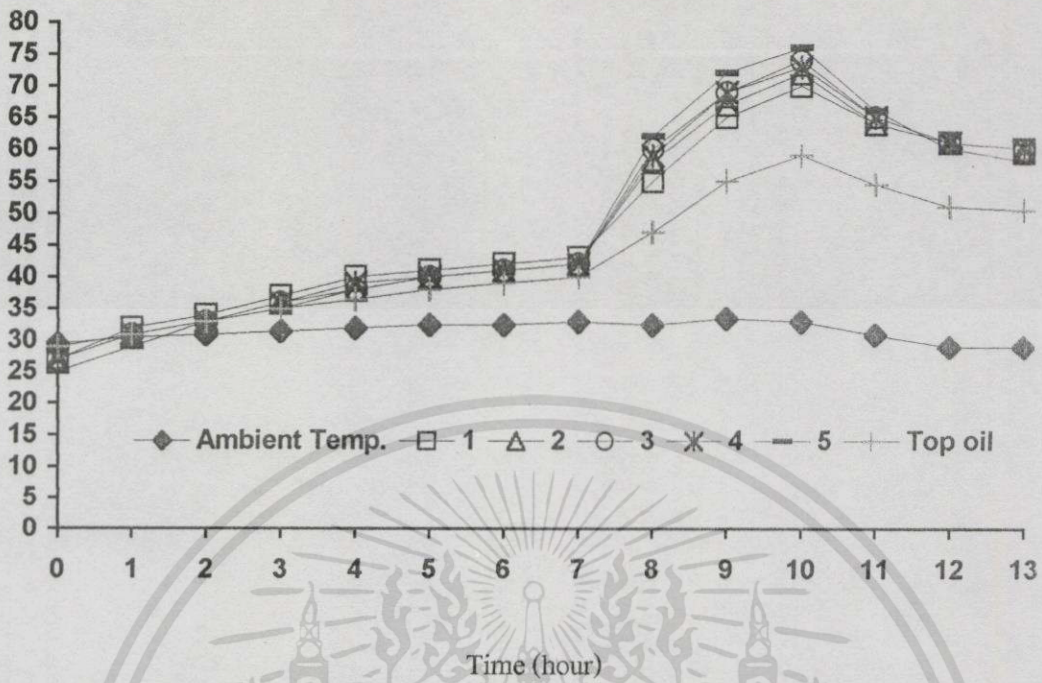
ตัวอย่างที่ 2 ของการทดสอบโหลดไม่เป็นเชิงเส้น เมื่อกำหนดให้ลักษณะของโหลดต่อช่วงเวลาที่ใช้ทดสอบดังรูปที่ 5.113 ขนาดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 5.10 และผลการทดสอบอุณหภูมิหม้อแปลงดังรูปที่ 5.114 ถึง 5.119



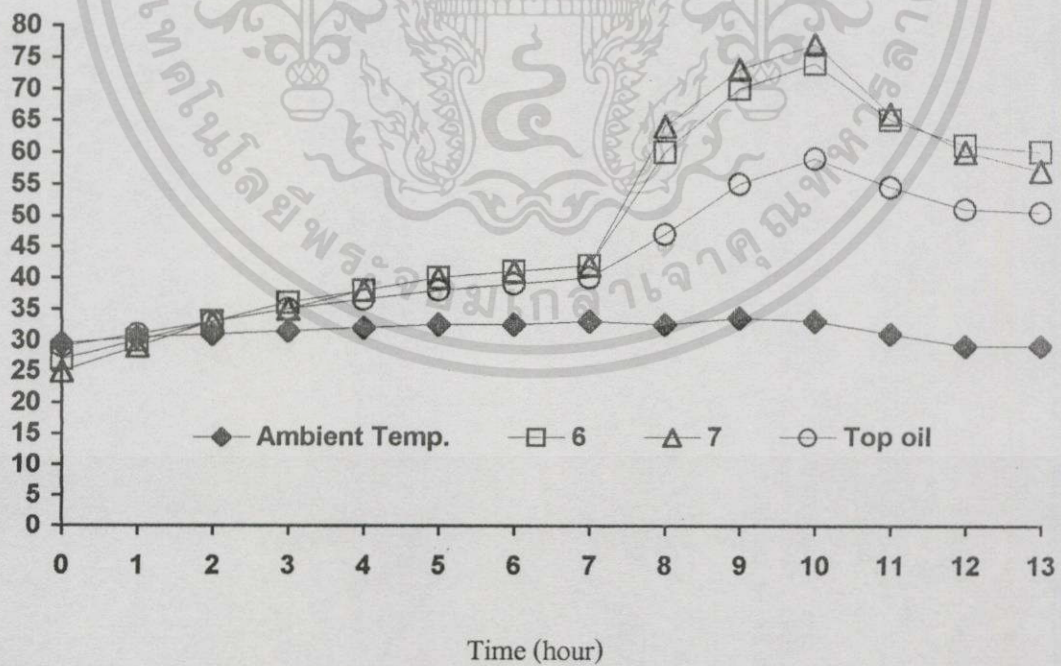
รูปที่ 5.113 แสดงการเปลี่ยนแปลงโหลด 3 ระดับ ในช่วงเวลา 13 ชั่วโมง

ตารางที่ 5.10 แสดงค่าขนาดต่าง ๆ ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางคานขดลวดปฐมภูมิ จากตัวอย่างที่ 2 ของการทดสอบโหลดไม่เป็นเชิงเส้น 3 ระดับ

ลำดับ	ILoad ต่อ Irated ของหม้อแปลง (%)	ชนิดโหลด	เวลา (ชั่วโมง)	THDV (%)	Vrms (Volt)	Order											
						DC (%)	1 (% / Volt)	3 (%)	5 (%)	7 (%)	9 (%)	11 (%)	13 (%)	15 (%)	17 (%)	19 (%)	
1.	27.5	1.เร็กติฟายเออร์ 2.ลวดความร้อน+ หลอดอินแคนด	7	1.5	379.04	0	100	379	0.1	1.5	0.6	0	0	0	0	0	0
				THDI (%)	Irms (Amp)	DC (%)	1 (% / Amp)	3 (%)	5 (%)	7 (%)	9 (%)	11 (%)	13 (%)	15 (%)	17 (%)	19 (%)	
				25.2	4.18	22.2	100	3.96	0.6	20.5	8.1	0.3	8.2	4.9	0.2	4.9	3.3
2.	112.17	1.เร็กติฟายเออร์ 2.ลวดความร้อน+ หลอดอินแคนด 3.คาปาซิเตอร์ 4050µF	3	THDV (%)	Vrms (Volt)	DC (%)	1 (% / Volt)	3 (%)	5 (%)	7 (%)	9 (%)	11 (%)	13 (%)	15 (%)	17 (%)	19 (%)	
				2.4	382.8	0	100	380.7	0.2	2.4	0.5	0	0.1	0	0	0.1	0
				THDI (%)	Irms (Amp)	DC (%)	1 (% / Amp)	3 (%)	5 (%)	7 (%)	9 (%)	11 (%)	13 (%)	15 (%)	17 (%)	19 (%)	
50.13	17.05	6.2	100	15.24	3.4	45.4	18.51	0.5	5.1	4	0.3	2.3	1.6				
3.	62.7	1.เร็กติฟายเออร์ 2.ลวดความร้อน+ หลอดอินแคนด 3.คาปาซิเตอร์	3	THDV (%)	Vrms (Volt)	DC (%)	1 (% / Volt)	3 (%)	5 (%)	7 (%)	9 (%)	11 (%)	13 (%)	15 (%)	17 (%)	19 (%)	
				1.4	384	0.1	100	383.9	0.1	1.2	0.7	0	0	0	0	0	
				THDI (%)	Irms (Amp)	DC (%)	1 (% / Amp)	3 (%)	5 (%)	7 (%)	9 (%)	11 (%)	13 (%)	15 (%)	17 (%)	19 (%)	
70.4	9.53	10.7	100	7.78	4.1	58.8	36.8	1.7	7.4	6.8	0.7	3.7	2.7				

Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )

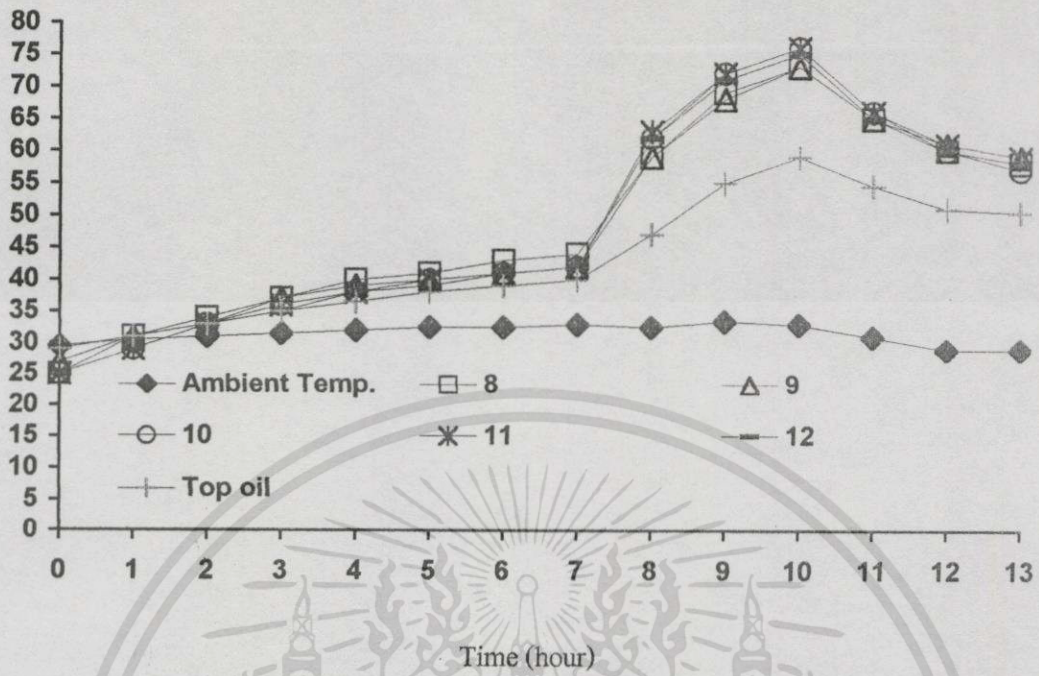
รูปที่ 5.114 แสดงผลของอุณหภูมิของขดลวดและน้ำมันด้านบนขณะทำการทดสอบแบบโหลด  
ไม่เป็นเชิงเส้น ที่คอยล์ 1

Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )

รูปที่ 5.115 แสดงผลของอุณหภูมิของขดลวดและน้ำมันด้านบนขณะทำการทดสอบแบบโหลด  
ไม่เป็นเชิงเส้น ที่คอยล์ 2

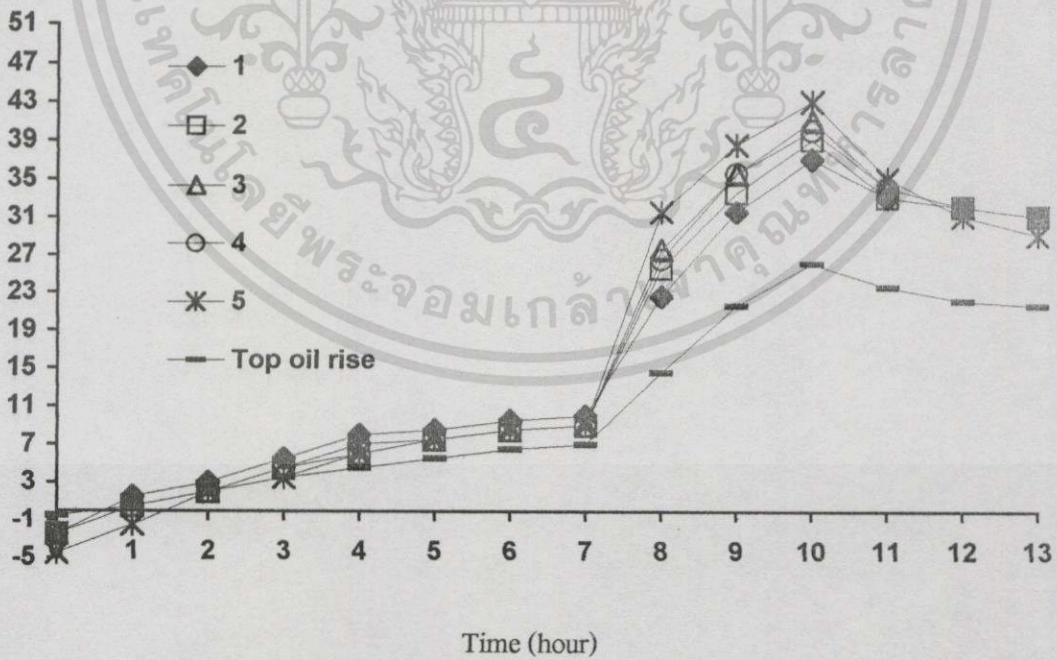
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temp (°C)



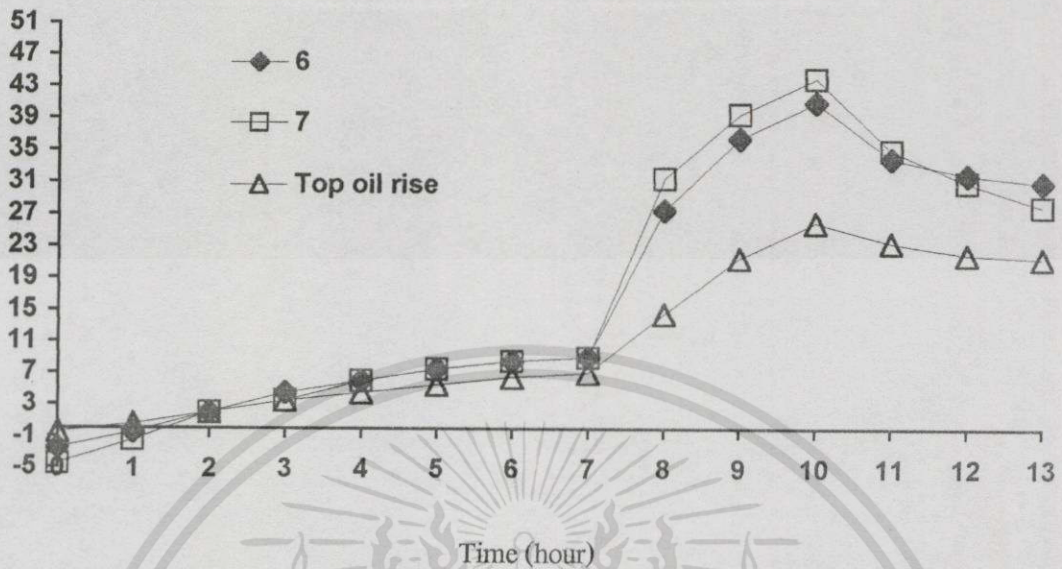
รูปที่ 5.116 แสดงผลของอุณหภูมิของขดลวดและน้ำมันด้านบนขณะทำการทดสอบแบบโหลด ไม่เป็นเชิงเส้น ที่คอยล์ 3

Temp (°C)

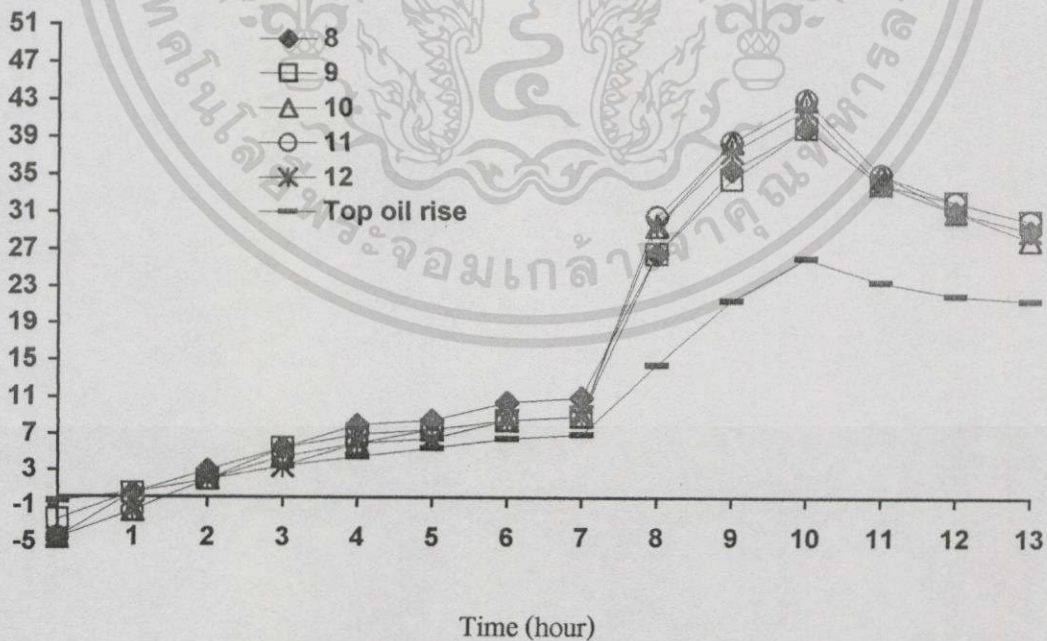


รูปที่ 5.117 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดและน้ำมันด้านบนขณะทำการทดสอบแบบโหลด ไม่เป็นเชิงเส้น ที่คอยล์ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )

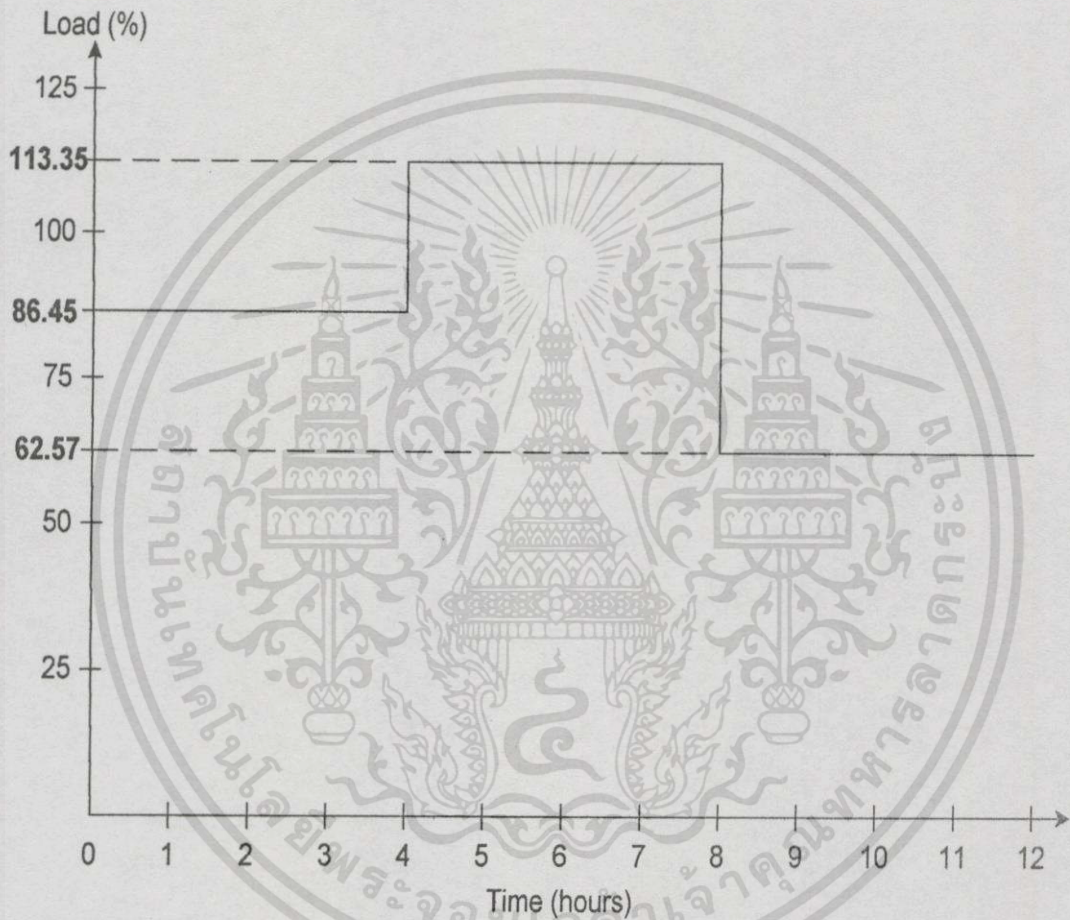
รูปที่ 5.118 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดและน้ำมันด้านบนขณะทำการทดสอบ โหลด  
ไม่เป็นเชิงเส้น ที่คอยล์ 2

Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )

รูปที่ 5.119 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดและน้ำมันด้านบนขณะทำการทดสอบแบบ โหลด  
ไม่เป็นเชิงเส้น ที่คอยล์ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

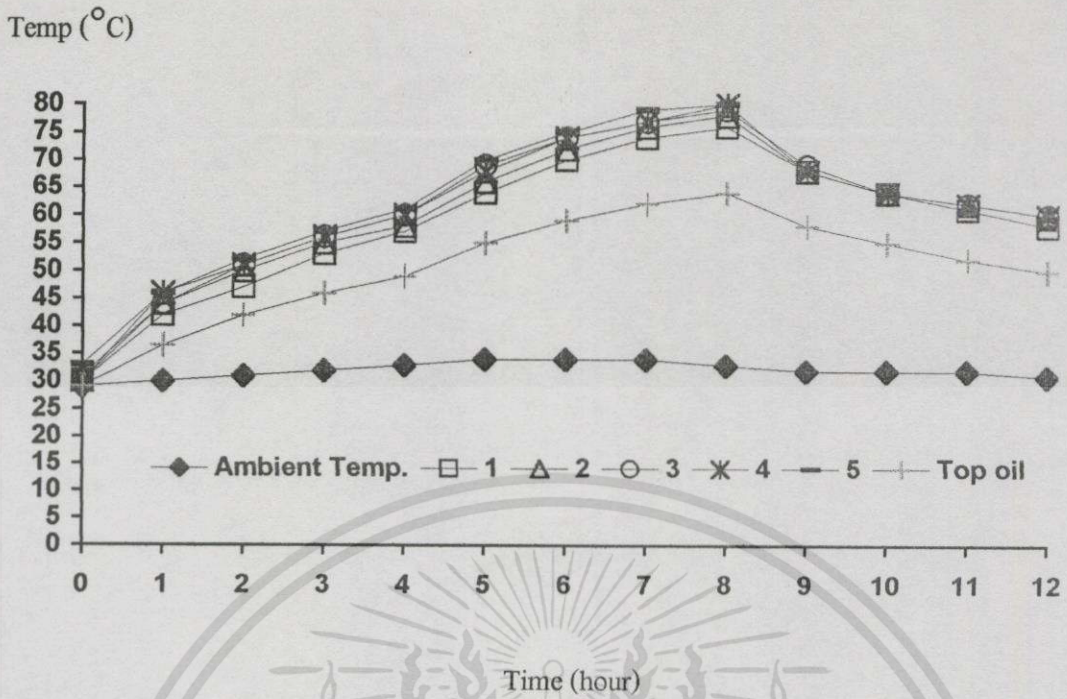
ตัวอย่างที่ 3 ของการทดสอบโหลดไม่เป็นเชิงเส้น เมื่อกำหนดให้ลักษณะของโหลดต่อช่วงเวลาที่ใช้ทดสอบดังรูปที่ 5.120 ขนาดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าต่างๆ แสดงดังตารางที่ 5.11 และผลการทดสอบอุณหภูมิหม้อแปลงดังรูปที่ 5.121 ถึง 5.126



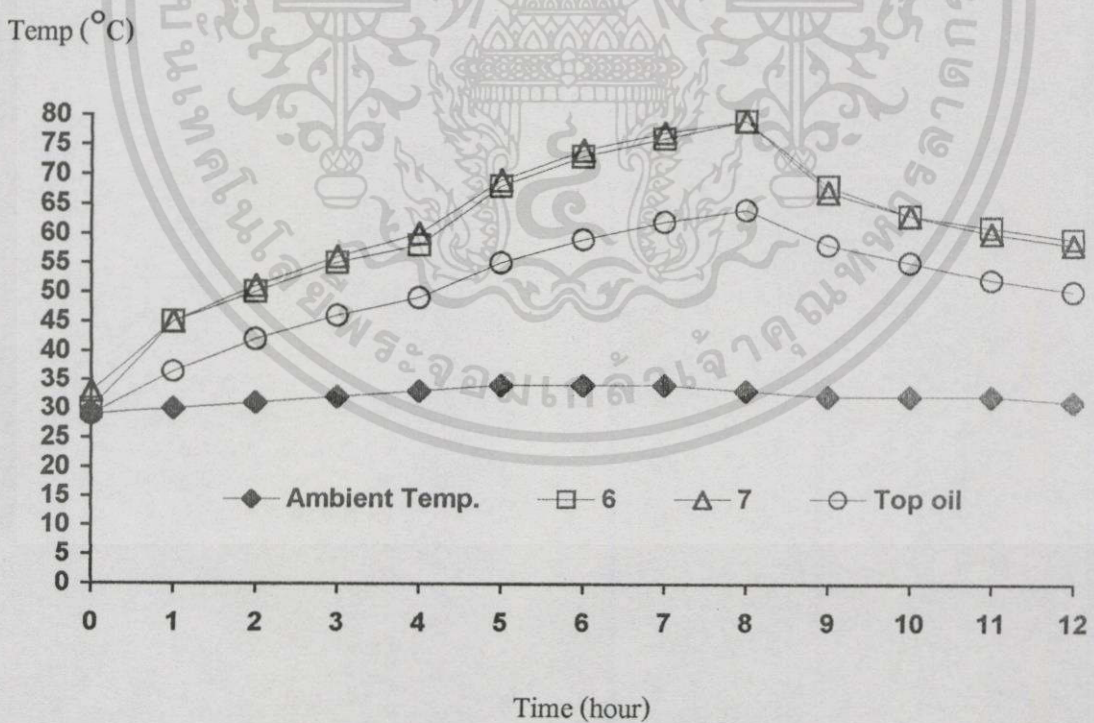
รูปที่ 5.120 แสดงการเปลี่ยนแปลงโหลด 3 ระดับ ในช่วงเวลา 12 ชั่วโมง

ตารางที่ 5.11 แสดงค่าขนาดต่าง ๆ ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านขดลวดปฐมภูมิ จากตัวอย่างที่ 3 ของการทดสอบโพลดีไม่เรียงเส้น 3 ระดับ

ลำดับ	I Load ต่อ Irated ของหม้อแปลง (%)	ชนิดโหลด	เวลา (ชั่วโมง)	THDV (%)	Vrms (Volt)	DC (%)	Order										
							I <sub>1</sub> (%/ Volt)	3 (%)	5 (%)	7 (%)	9 (%)	11 (%)	13 (%)	15 (%)	17 (%)	19 (%)	
1.	86.45	1.เร็กติไฟเออร์	4	1.5	378.1	0	100	378	0.2	1.3	0.5	0	0	0	0	0	
		2.ลดความเร็วบน+ หลอดอินแคดสฯ		THDI (%)	Irms (Amp)	DC (%)	I <sub>1</sub> (%/ Amp)	3	5	7	9	11	13	15	17	19	
		3.คาปาซิเตอร์ 4050µF		59.7	13.14	7.9	100	11.25	0.9	52.3	27.1	0.8	6.7	5.2	0.4	3	2.1
2.	113.35	1.เร็กติไฟเออร์	4	1.9	381.43	0	100	381.4	0.1	2.3	1.2	0	0	0	0	0	
		2.ลดความเร็วบน+ หลอดอินแคดสฯ		THDV (%)	Vrms (Volt)	DC (%)	I <sub>1</sub> (%/ Volt)	3	5	7	9	11	13	15	17	19	
		3.คาปาซิเตอร์ 4050µF		52	17.23	5.3	100	15.28	3.1	46.9	21.4	0.1	6.0	3.7	0.1	2.6	1.2
3.	62.57	1.เร็กติไฟเออร์	4	1.25	381.63	0.1	100	381.6	0.1	1.2	0.5	0	0	0	0	0	
		2.ลดความเร็วบน+ หลอดอินแคดสฯ		THDV (%)	Vrms (Volt)	DC (%)	I <sub>1</sub> (%/ Volt)	3	5	7	9	11	13	15	17	19	
		3.คาปาซิเตอร์ 4050µF		70.4	9.51	10.7	100	7.78	4.1	58.8	36.8	1.7	7.4	6.8	0.7	3.7	2.7

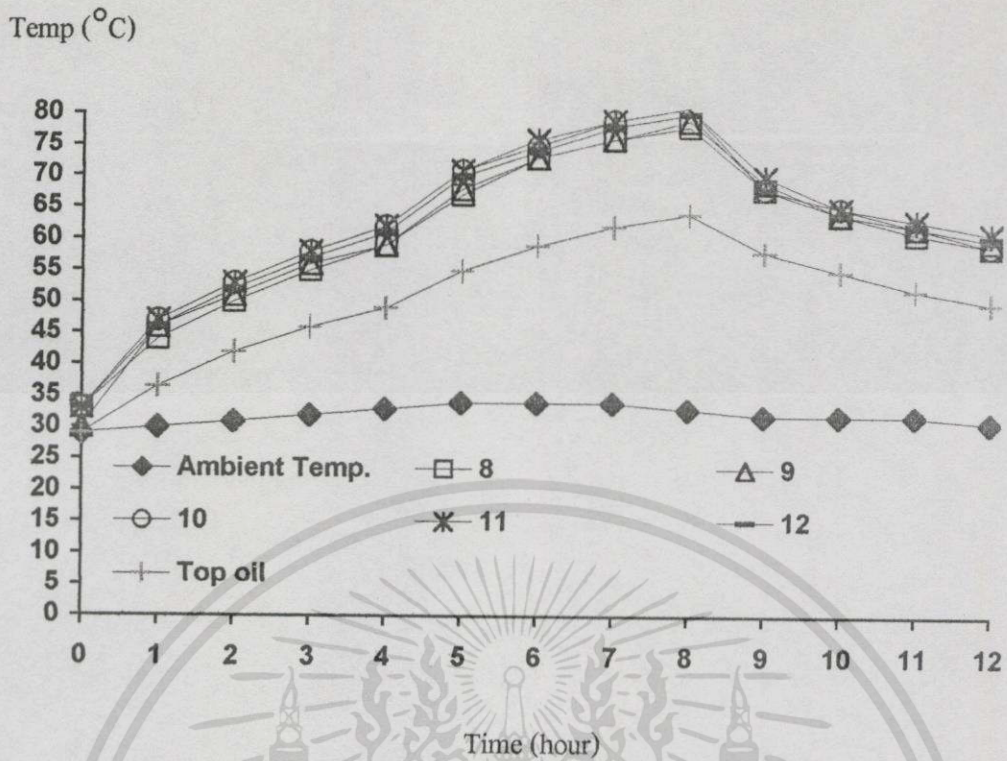


รูปที่ 5.121 แสดงผลของอุณหภูมิของขดลวดและน้ำมันด้านบน ขณะทำการทดสอบแบบโหลด ไม่เป็นเชิงเส้น ที่คอยล์ 1

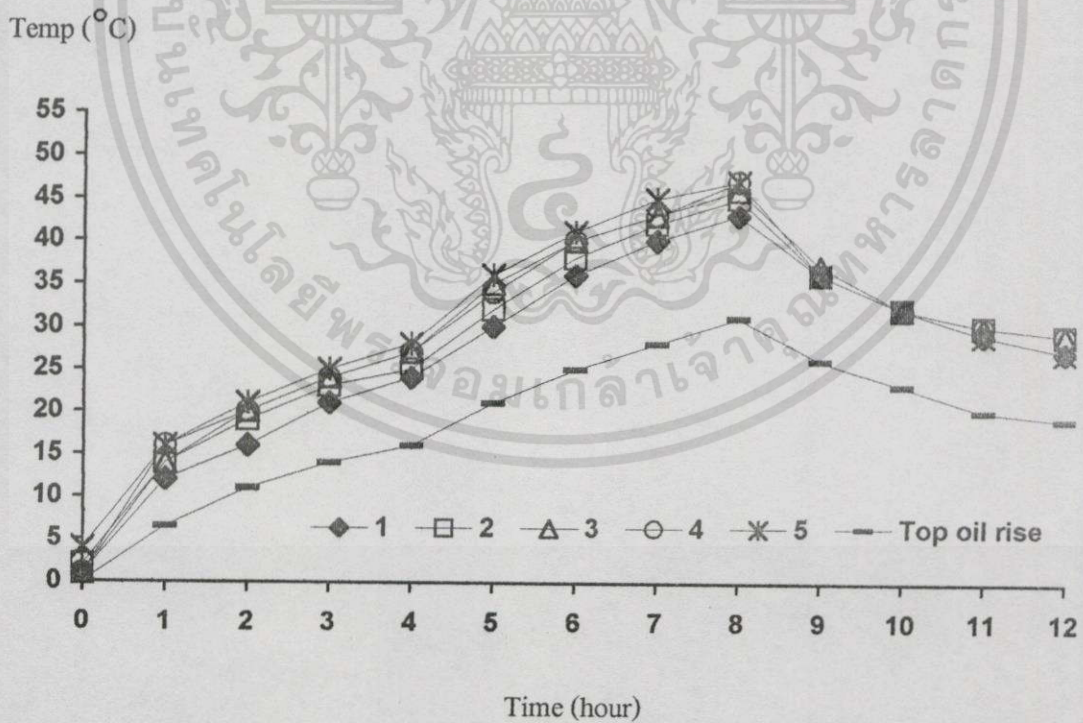


รูปที่ 5.122 แสดงผลของอุณหภูมิของขดลวดและน้ำมันด้านบน ขณะทำการทดสอบแบบโหลด ไม่เป็นเชิงเส้น ที่คอยล์ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

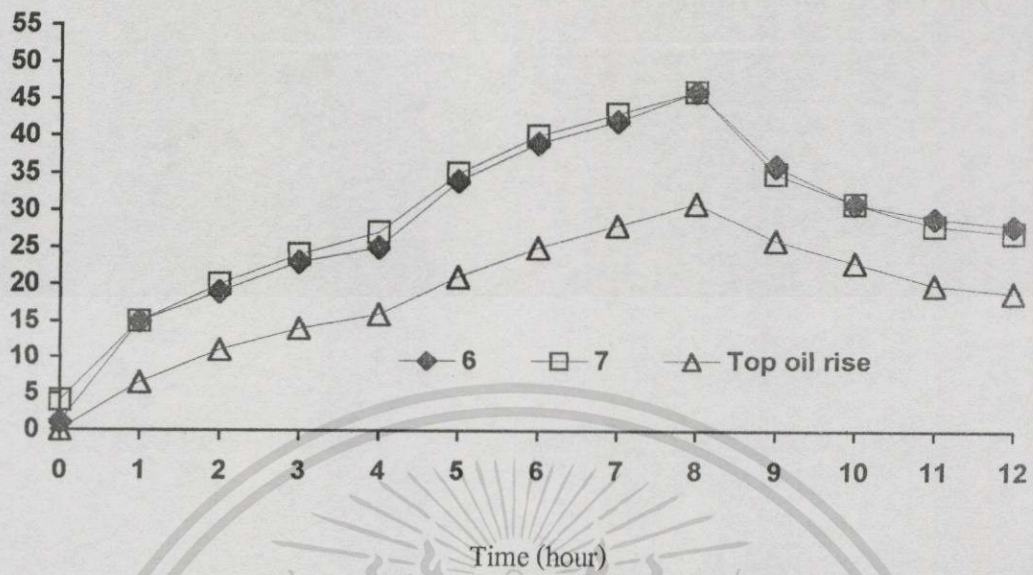


รูปที่ 5.123 แสดงผลของอุณหภูมิของขดลวดและน้ำมันด้านบน ขณะทำการทดสอบแบบ โหลด ไม่เป็นเชิงเส้น ที่คอยล์ 3

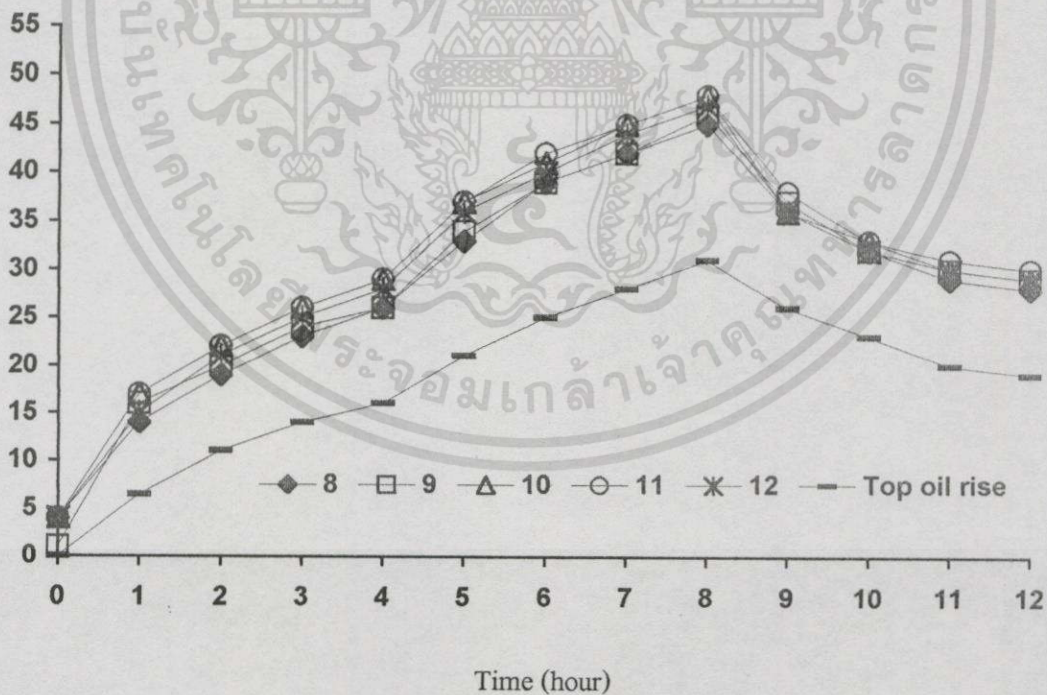


รูปที่ 5.124 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดและน้ำมันด้านบน ขณะทำการทดสอบแบบ โหลด ไม่เป็นเชิงเส้น ที่คอยล์ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )

รูปที่ 5.125 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดและน้ำมันค้ำบนขณะทำการทดสอบแบบ โหลด  
ไม่เป็นเชิงเส้น ที่คอยล์ 2

Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )

รูปที่ 5.126 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดและน้ำมันค้ำบน ขณะทำการทดสอบแบบ  
โหลดไม่เป็นเชิงเส้น ที่คอยล์ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิจากการทดสอบเทียบกับการคำนวณ

จากสมการการหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและอุณหภูมิหม้อแปลงจากทั้ง 3 รูปแบบ คือ

1. จากมาตรฐาน IEEE หรือ IEC [1-3,7-8]
2. จากรูปแบบสมการคณิตศาสตร์ ซึ่งได้จากการทดสอบหาค่ากำลังสูญเสียเนื่องจากฮาร์โมนิกแบบแยกเฉพาะ(individual harmonic) [31]
3. K-factor [33]

จากผลการทดสอบของรูปที่ 5.53 ถึง 5.55 สามารถเปรียบเทียบกับผลการคำนวณได้ดังรูปกราฟที่ 5.127 ถึง 5.128

ซึ่งการคำนวณใช้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

### แบบที่1 Standard

#### Input1 Characteristic of Transformer at Rated load

Load loss at rated( $P_{l\_R}$ ),watt	= 350
Core loss at rated( $P_{core\_R}$ ),watt	= 77
Loss at tank at rated( $P_{tank\_R}$ ),watt	= 0
Top oil rise at rated( $T_{or\_R}$ ),celsius	= 31
Winding to oil temperature different at rated ( $T_{gr\_R}$ ),celsius	= 13.5
Thermal time constant for oil( $Time\_con$ )	= 3
Exponential power of total loss versus top oil temp. rise	= 0.8
Exponential power of winding loss versus winding temp. rise	= 0.8
Hot-spot factor(H)	= 1.1

#### Input2 Step Load

Number of different load periods for a day(N)	= 1
Irms[P.U.] at load step [1]	≈ 1.13
Time step[1] , hours	= 9

### แบบที่2 Model

#### Input1 Characteristic of Transformer at Rated load

I rms per phase at nameplate(rated),amp	= 8.78
Core loss at rated( $P_{core\_R}$ ),watt	= 77
Loss at tank at rated( $P_{tank\_R}$ ),watt	= 0
Resistance of ac at rated , ohm/phase	= 1.526

Resistance of dc at rated , ohm/phase = 1.457  
 Top oil rise at rated( $T_{or\_R}$ ),celsius = 31  
 Winding to oil temperature different at rated ( $T_{gr\_R}$ ),celsius = 13.5  
 Thermal time constant for oil( $Time\_con$ ) = 3  
 Exponential power of total loss versus top oil temp. rise = 0.8  
 Exponential power of winding loss versus winding temp. rise = 0.8  
 Hot-spot factor(H) = 1.1

### **Input2** Step Load

Number of different load peroids for a day(N) = 1  
 Pload/phase at step [1], watt  $\approx$  149.2  
 Irms/phase at step [1], amp  $\approx$  9.88  
 Time step[1] , hours = 9

### **แบบที่3** K-factor

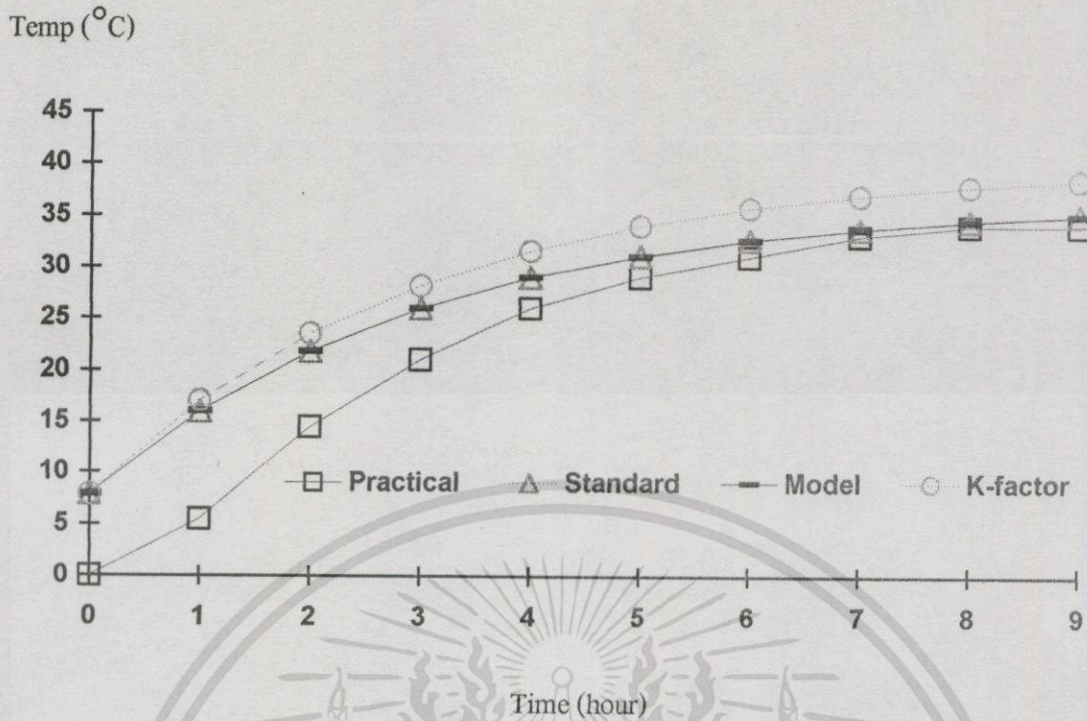
#### **Input1** Characteristic of Transformer at Rated load

I rms per phase at nameplate(rated),amp = 8.78  
 Load loss at rated,watt = 350  
 Core loss at rated( $P_{core\_R}$ ),watt = 77  
 Loss at tank at rated( $P_{tank\_R}$ ),watt = 0  
 D.C Resistance , ohm/phase = 1.457  
 Top oil rise at rated( $T_{or\_R}$ ),celsius = 31  
 Winding to oil temperature different at rated ( $T_{gr\_R}$ ),celsius = 13.5  
 Thermal time constant for oil( $Time\_con$ ) = 3  
 Exponential power of total loss versus top oil temp. rise = 0.8  
 Exponential power of winding loss versus winding temp. rise = 0.8  
 Hot-spot factor(H) = 1.1

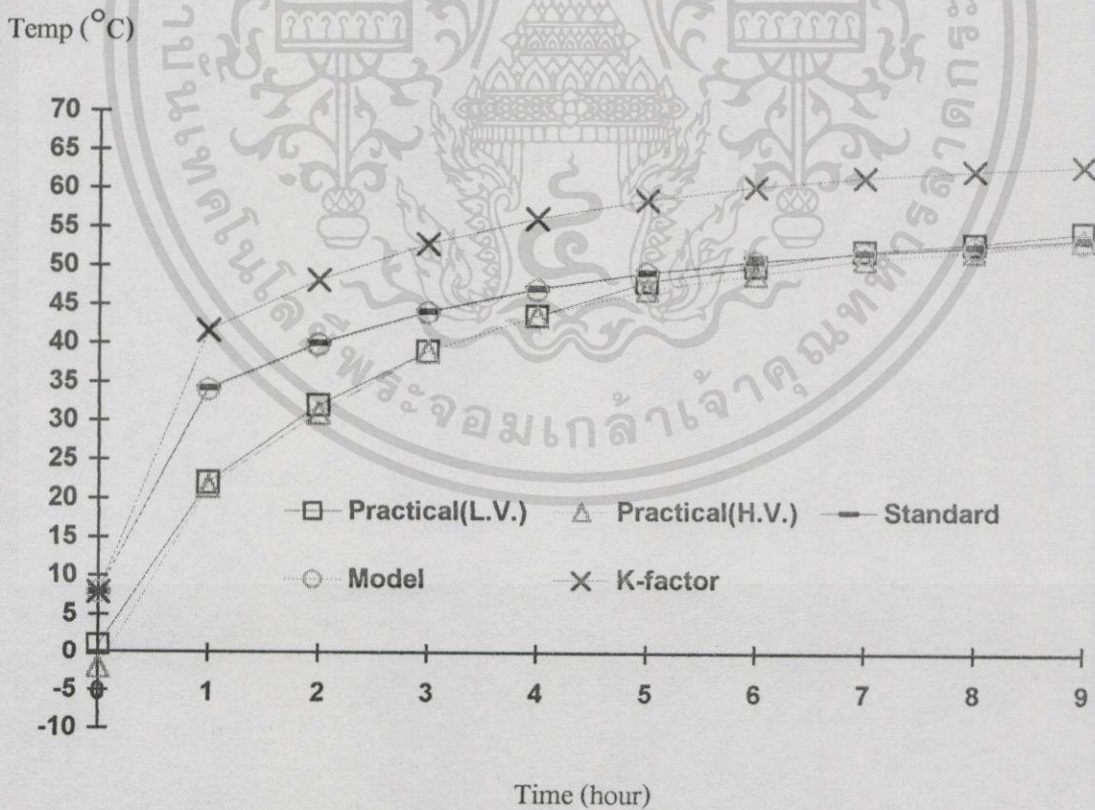
### **Input2** Step Load

Number of different load peroids for a day(N) = 1  
 Irms/phase at step [1], amp  $\approx$  9.88  
 K-Factor at step [1]  $\approx$  9.32  
 Time step[1] , hours = 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.127 แสดงผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของน้ำในถัง ซึ่งได้จากการทดสอบและการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ



รูปที่ 5.128 แสดงผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของลวดตัวนำด้านแรงดันตำแหน่งที่ 5, ลวดตัวนำด้านแรงดันสูงตำแหน่งที่ 10 และการคำนวณทั้ง 3 แบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบของรูปที่ 5.105 ถึง 5.112 สามารถเปรียบเทียบกับผลการคำนวณได้  
 ดังรูปกราฟที่ 5.129 ถึง 5.141

ซึ่งการคำนวณใช้พารามิเตอร์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

### แบบที่ 1 Standard

#### **Input1** Characteristic of Transformer at Rated load

Load loss at rated( $P_{l\_R}$ ),watt	= 350
Core loss at rated( $P_{core\_R}$ ),watt	= 77
Loss at tank at rated( $P_{tank\_R}$ ),watt	= 0
Top oil rise at rated( $T_{or\_R}$ ),celsius	= 31
Winding to oil temperature different at rated ( $T_{gr\_R}$ ),celsius	= 13.5
Thermal time constant for oil( $Time\_con$ )	= 3
Exponential power of total loss versus top oil temp. rise	= 0.8
Exponential power of winding loss versus winding temp. rise	= 0.8
Hot-spot factor(H)	= 1.1

#### **Input2** Step Load

Number of different load peroids for a day(N)	= 2
Irms[P.U.] at load step [1]	≈ 1.13
Time step[1], hours	= 9
Irms[P.U.] at load step [2]	≈ 0.36
Time step[2], hours	= 4

### แบบที่ 2 Model

#### **Input1** Characteristic of Transformer at Rated load

I rms per phase at nameplate(rated),amp	= 8.78
Core loss at rated( $P_{core\_R}$ ),watt	= 77
Loss at tank at rated( $P_{tank\_R}$ ),watt	= 0
Resistance of ac at rated , ohm/phase	= 1.526
Resistance of dc at rated , ohm/phase	= 1.457
Top oil rise at rated( $T_{or\_R}$ ),celsius	= 31
Winding to oil temperature different at rated ( $T_{gr\_R}$ ),celsius	= 13.5
Thermal time constant for oil( $Time\_con$ )	= 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Exponential power of total loss versus top oil temp. rise = 0.8

Exponential power of winding loss versus winding temp. rise = 0.8

Hot-spot factor(H) = 1.1

### **Input2**

Number of different load periods for a day(N) = 2

Pload/phase at step [1], watt  $\approx$  149.2

Irms/phase at step [1], amp  $\approx$  9.88

Time step[1], hours = 9

Pload/phase at step [2], watt  $\approx$  12.77

Irms/phase at step [2], amp  $\approx$  3.15

Time step[2], hours = 4

### **แบบที่3 K-Factor**

**Input1** Characteristic of Transformer at Rated load

I rms per phase at nameplate(rated),amp = 8.78

Load loss at rated,watt = 350

Core loss at rated(Pcore\_R),watt = 77

Loss at tank at rated(Ptank\_R),watt = 0

D.C Resistance , ohm/phase = 1.457

Top oil rise at rated(Tor\_R),celsius = 31

Winding to oil temperature different at rated (Tgr\_R),celsius = 13.5

Thermal time constant for oil(Time\_con) = 3

Exponential power of total loss versus top oil temp. rise = 0.8

Exponential power of winding loss versus winding temp. rise = 0.8

Hot-spot factor(H) = 1.1

### **Input2 Step Load**

Number of different load periods for a day(N) = 2

Irms/phase at step [1], amp  $\approx$  9.88

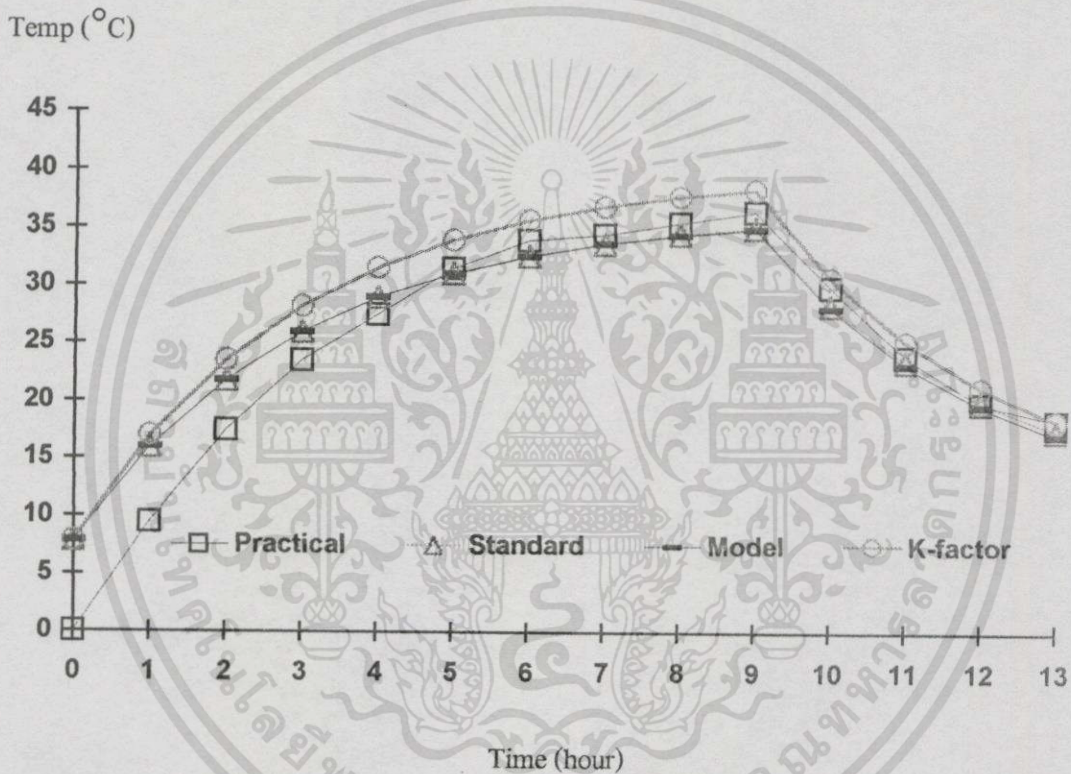
K-Factor at step [1]  $\approx$  9.32

Time step[1], hours = 9

Irms/phase at step [2], amp  $\approx 3.15$

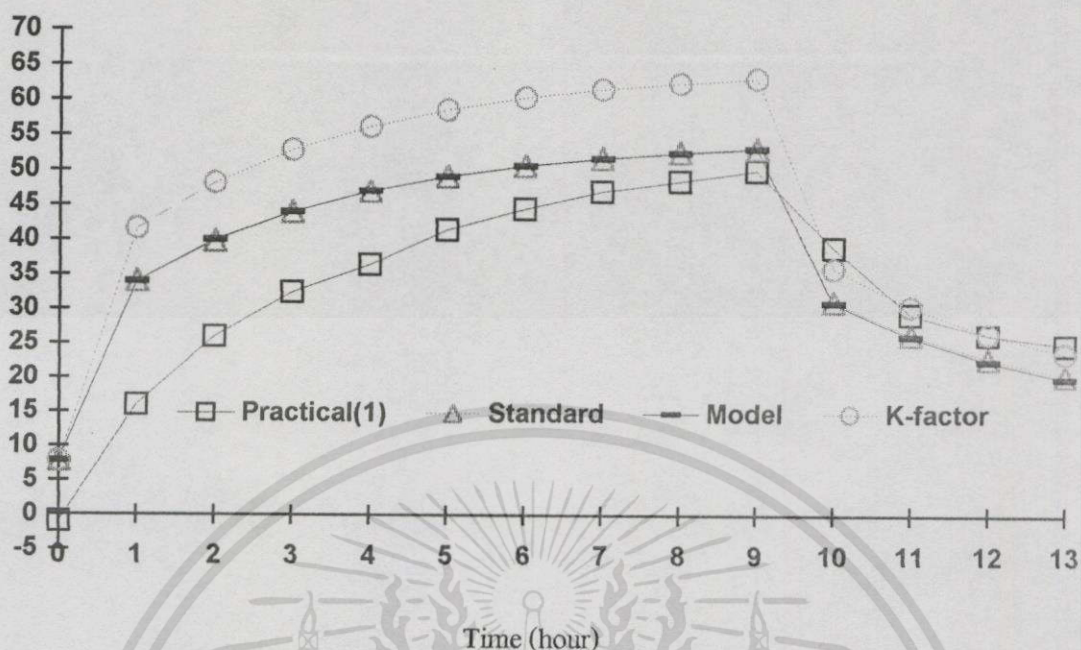
K-Factor at step [2]  $\approx 2.1$

Time step[2] , hours = 4

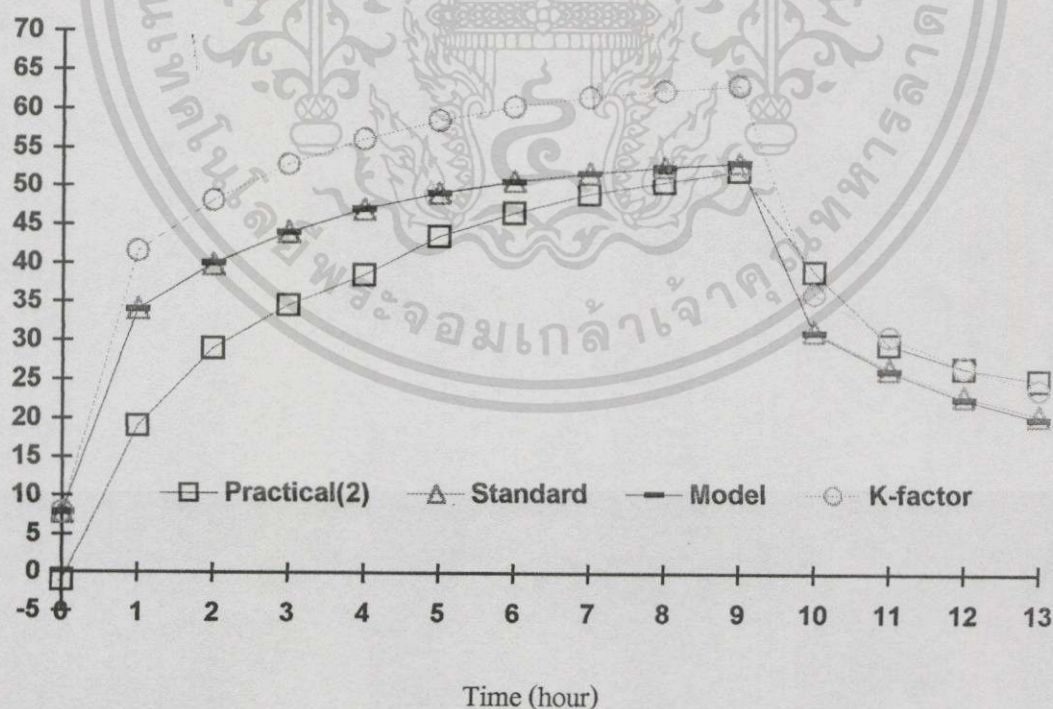


รูปที่ 5.129 แสดงผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของน้ำมันด้านบน ซึ่งได้จากการทดสอบและการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

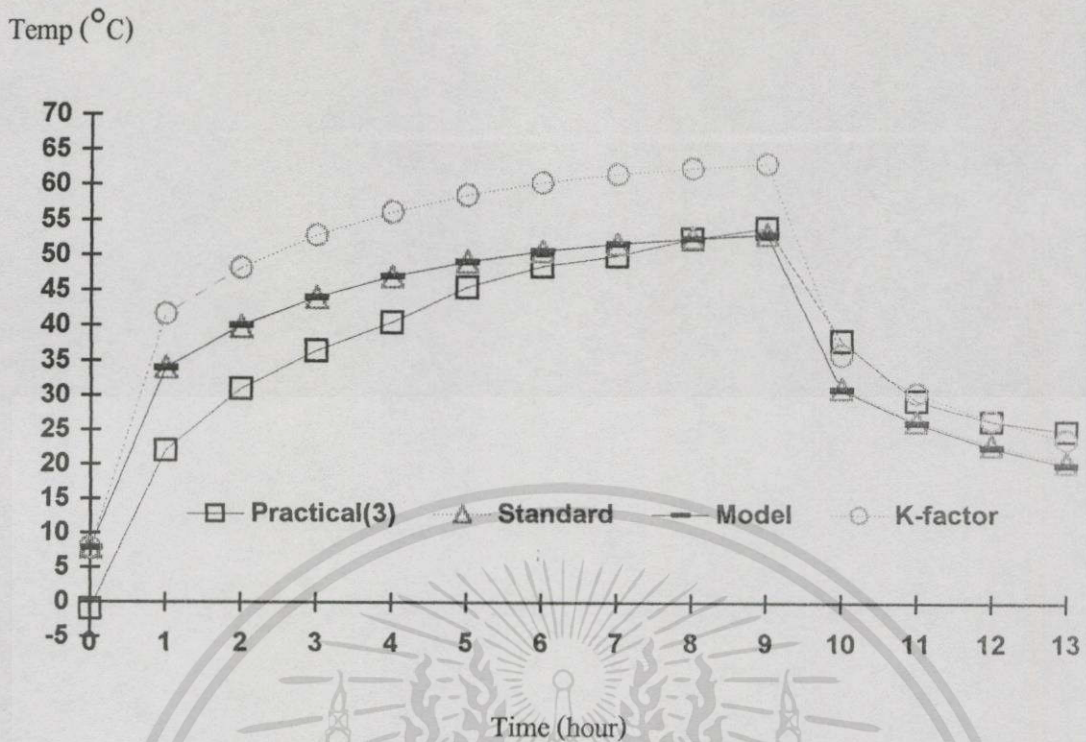
Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )

รูปที่ 5.130 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 1 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

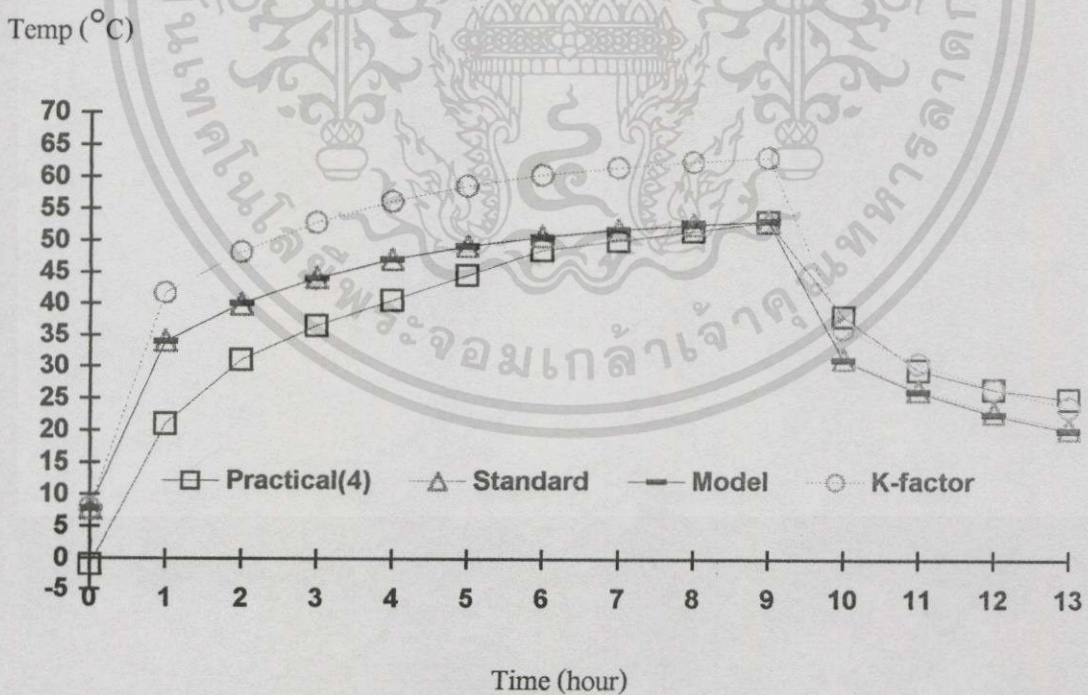
Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )

รูปที่ 5.131 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 2 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



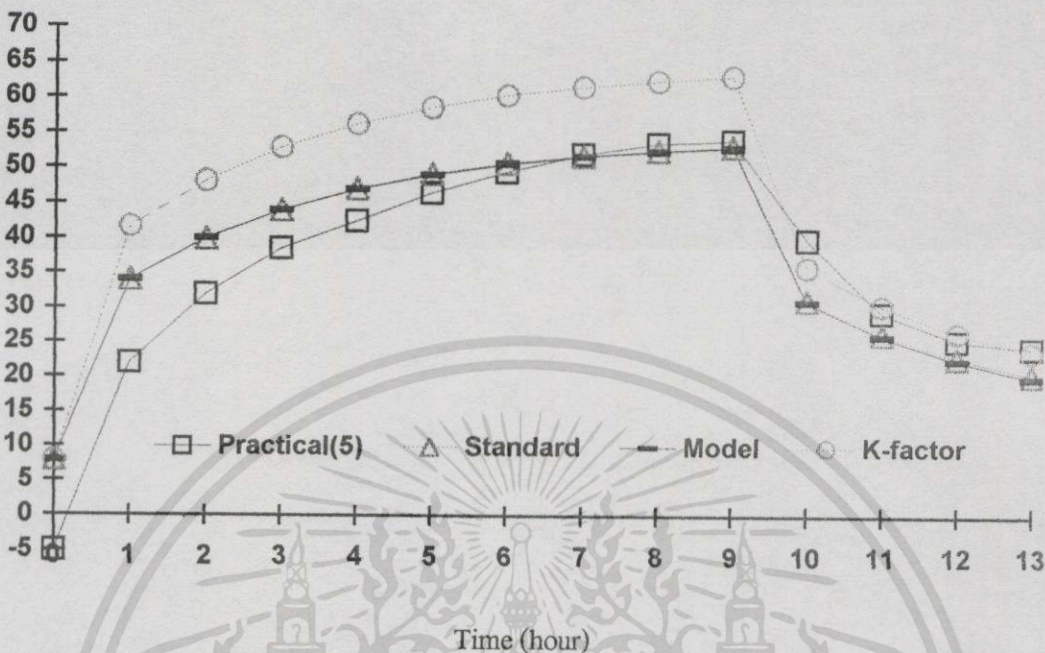
รูปที่ 5.132 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 3 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ



รูปที่ 5.133 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 4 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

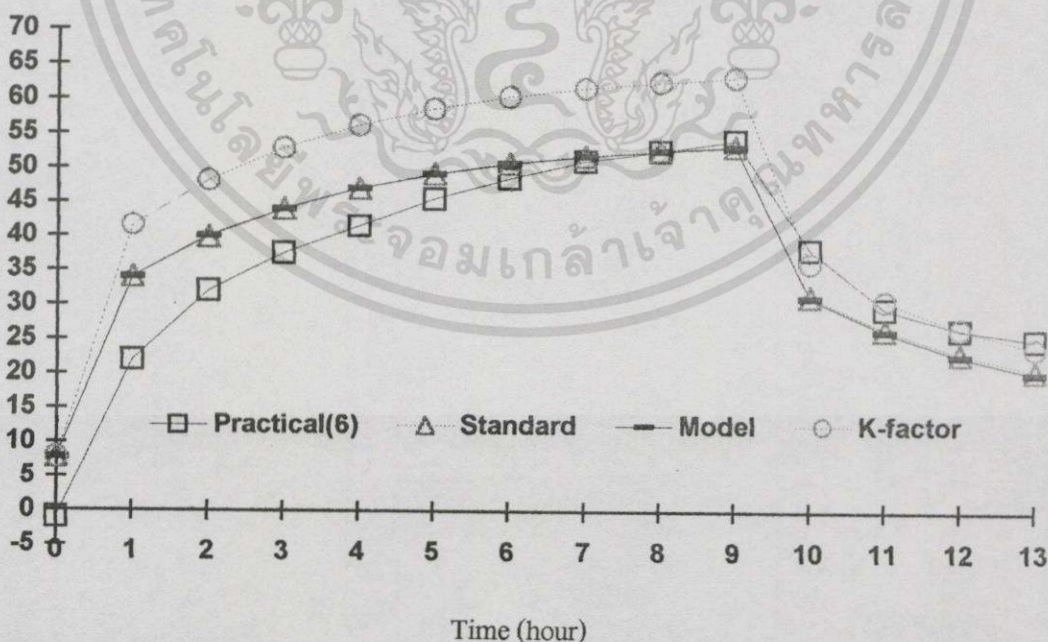
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temp (°C)



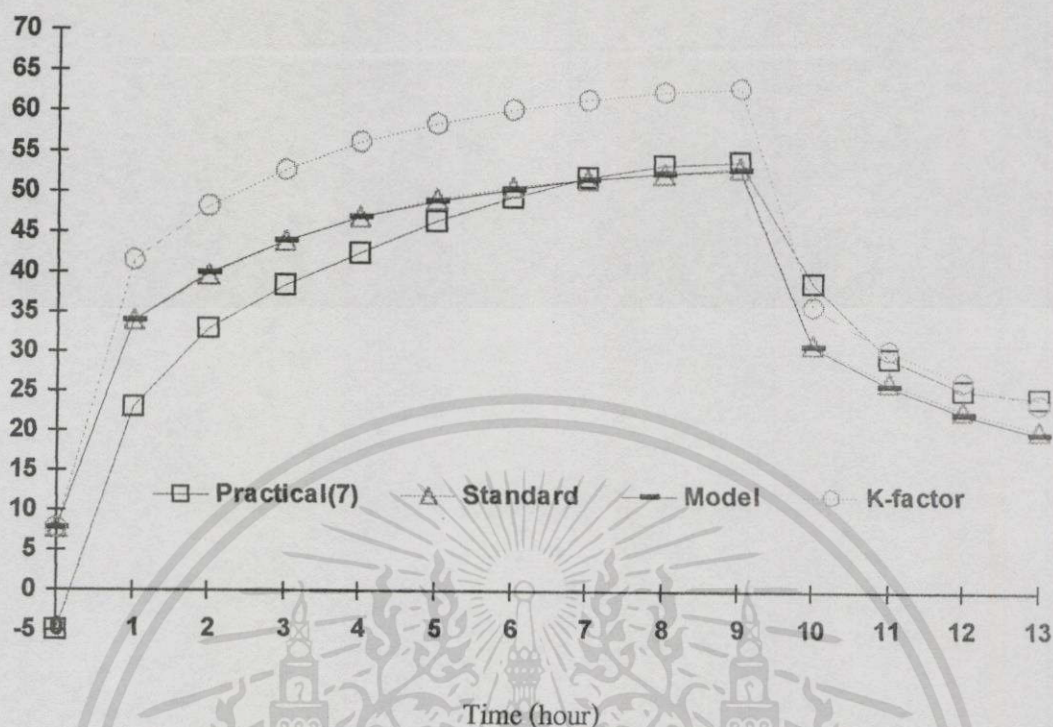
รูปที่ 5.134 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 5 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

Temp (°C)

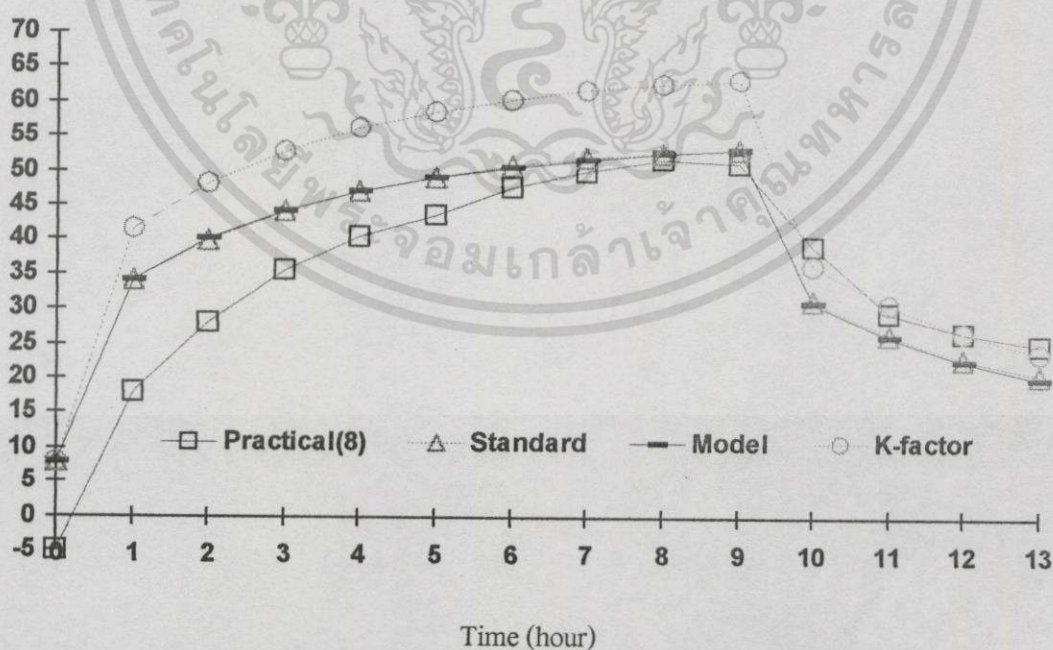


รูปที่ 5.135 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 6 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

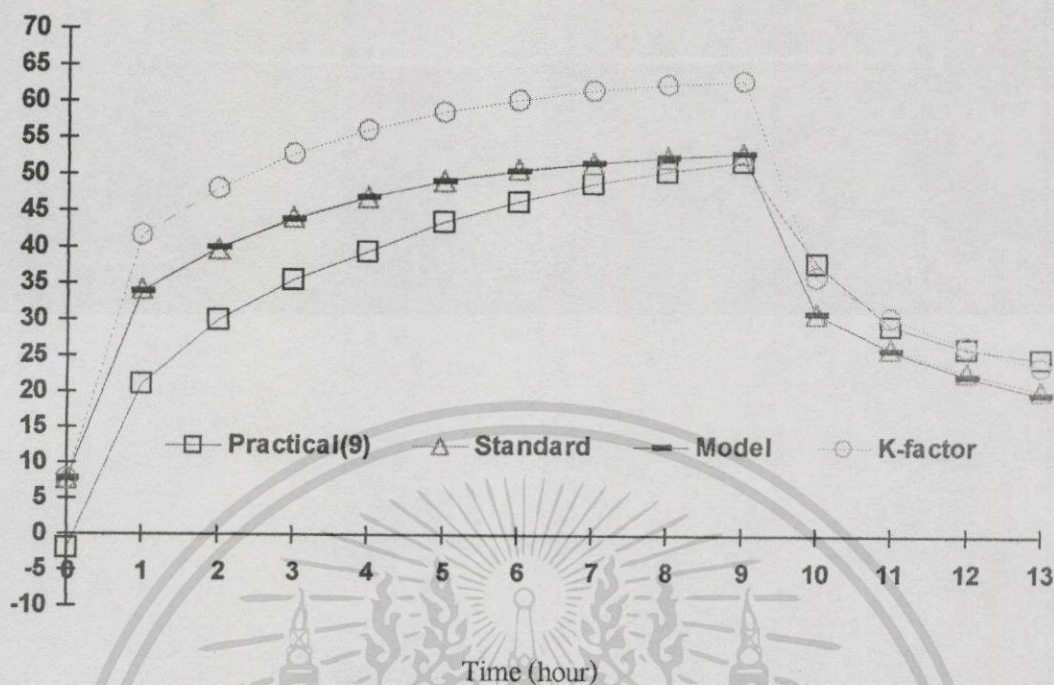
Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )

รูปที่ 5.136 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 7 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

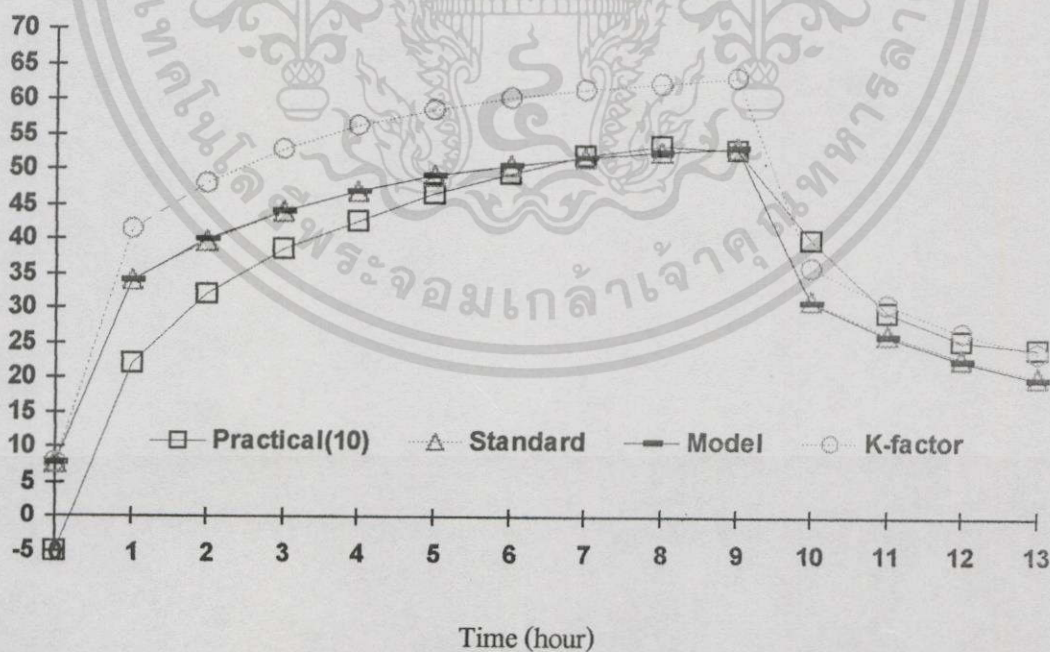
Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )

รูปที่ 5.137 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 8 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

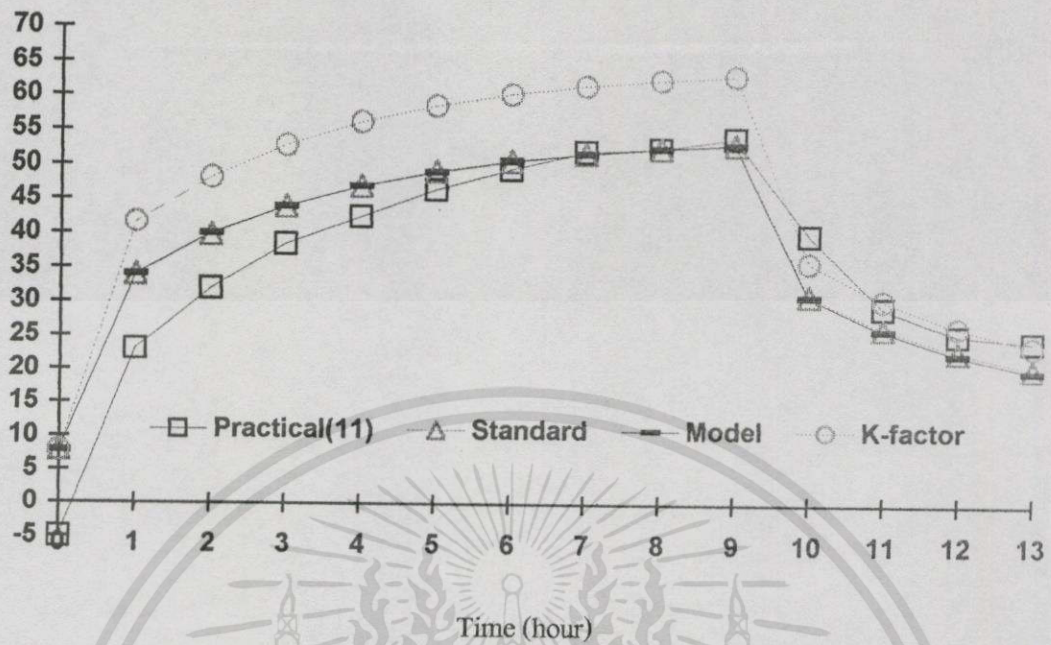
Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )

รูปที่ 5.138 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 9 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

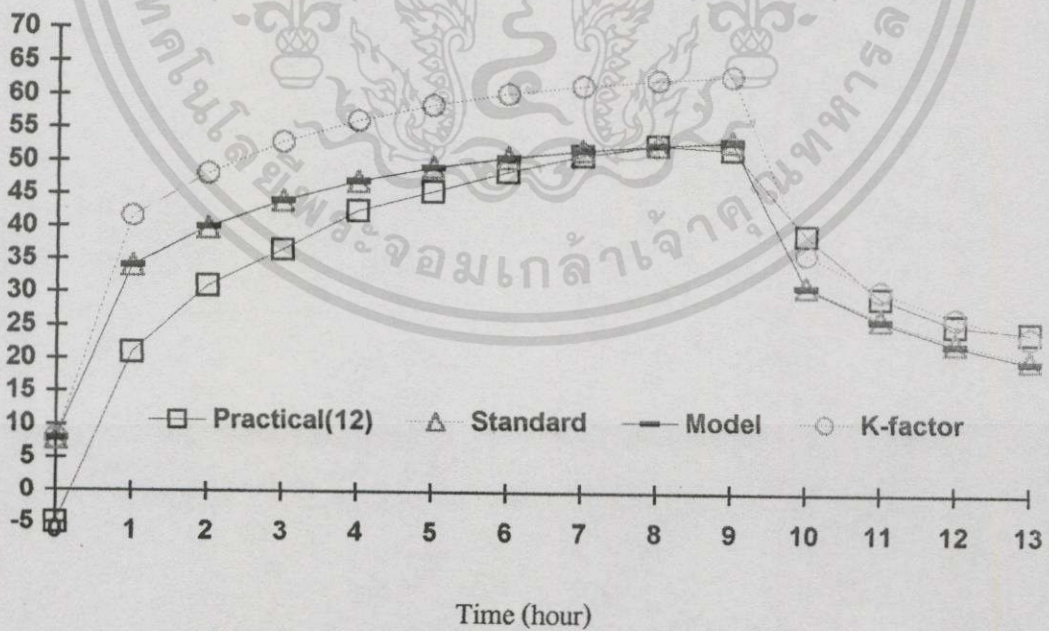
Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )

รูปที่ 5.139 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 10 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )

รูปที่ 5.140 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 11 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )

รูปที่ 5.141 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 12 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบของรูปที่ 5.114 ถึง 5.119 สามารถเปรียบเทียบกับผลการคำนวณได้  
ดังรูปกราฟที่ 5.142 ถึง 5.154

ซึ่งการคำนวณใช้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

### แบบที่ 1 Standard

#### **Input1** Characteristic of Transformer at Rated load

Load loss at rated( $P_{l\_R}$ ),watt	= 350
Core loss at rated( $P_{core\_R}$ ),watt	= 77
Loss at tank at rated( $P_{tank\_R}$ ),watt	= 0
Top oil rise at rated( $T_{or\_R}$ ),celsius	= 31
Winding to oil temperature different at rated ( $T_{gr\_R}$ ),celsius	= 13.5
Thermal time constant for oil( $Time\_con$ )	= 3
Exponential power of total loss versus top oil temp. rise	= 0.8
Exponential power of winding loss versus winding temp. rise	= 0.8
Hot-spot factor(H)	= 1.1

#### **Input2** Step Load

Number of different load peroids for a day(N) = 3

Irms[P.U.] at load step [1]  $\approx$  0.28

Time step[1] , hours = 7

Irms[P.U.] at load step [2]  $\approx$  1.13

Time step[2] , hours = 3

Irms[P.U.] at load step [3]  $\approx$  0.63

Time step[3] , hours = 3

### แบบที่ 2 Model

#### **Input1** Characteristic of Transformer at Rated load

I rms per phase at nameplate(rated),amp = 8.78

Core loss at rated( $P_{core\_R}$ ),watt = 77

Loss at tank at rated( $P_{tank\_R}$ ),watt = 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Resistance of ac at rated , ohm/phase = 1.526  
 Resistance of dc at rated , ohm/phase = 1.457  
 Top oil rise at rated(Tor\_R),celsius = 31  
 Winding to oil temperature different at rated (Tgr\_R),celsius = 13.5  
 Thermal time constant for oil(Time\_con) = 3  
 Exponential power of total loss versus top oil temp. rise = 0.8  
 Exponential power of winding loss versus winding temp. rise = 0.8  
 Hot-spot factor(H) = 1.1

### **Input2** Step Load

Number of different load periods for a day(N) = 3  
 Pload/phase at step [1], watt  $\approx$  8.5  
 Irms/phase at step [1], amp  $\approx$  2.41  
 Time step[1] , hours = 7  
 Pload/phase at step [2], watt  $\approx$  149.2  
 Irms/phase at step [2], amp  $\approx$  9.88  
 Time step[2] , hours = 3  
 Pload/phase at step [3], watt  $\approx$  46.42  
 Irms/phase at step [3], amp  $\approx$  5.50  
 Time step[3] , hours = 3

### **แบบที่3** K-Factor

#### **Input1** Characteristic of Transformer at Rated load

I rms per phase at nameplate(rated),amp = 8.78  
 Load loss at rated,watt = 350  
 Core loss at rated(Pcore\_R),watt = 77  
 Loss at tank at rated(Ptank\_R),watt = 0  
 D.C Resistance , ohm/phase = 1.457  
 Top oil rise at rated(Tor\_R),celsius = 31  
 Winding to oil temperature different at rated (Tgr\_R),celsius = 13.5

Thermal time constant for oil(Time<sub>con</sub>) = 3

Exponential power of total loss versus top oil temp. rise = 0.8

Exponential power of winding loss versus winding temp. rise = 0.8

Hot-spot factor(H) = 1.1

### **Input2** Step Load

Number of different load periods for a day(N) = 3

Irms/phase at step [1], amp  $\approx$  2.41

K-Factor at step [1]  $\approx$  0.32

Time step[1] , hours = 7

Irms/phase at step [2], amp  $\approx$  9.88

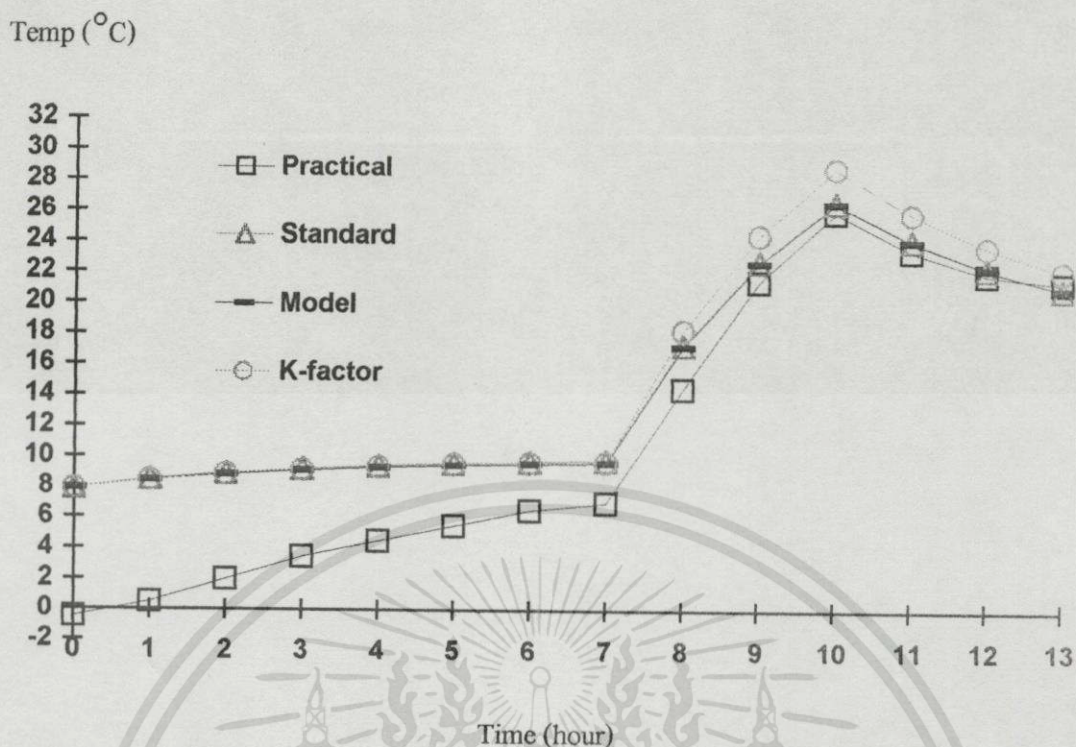
K-Factor at step [2]  $\approx$  9.2

Time step[2] , hours = 3

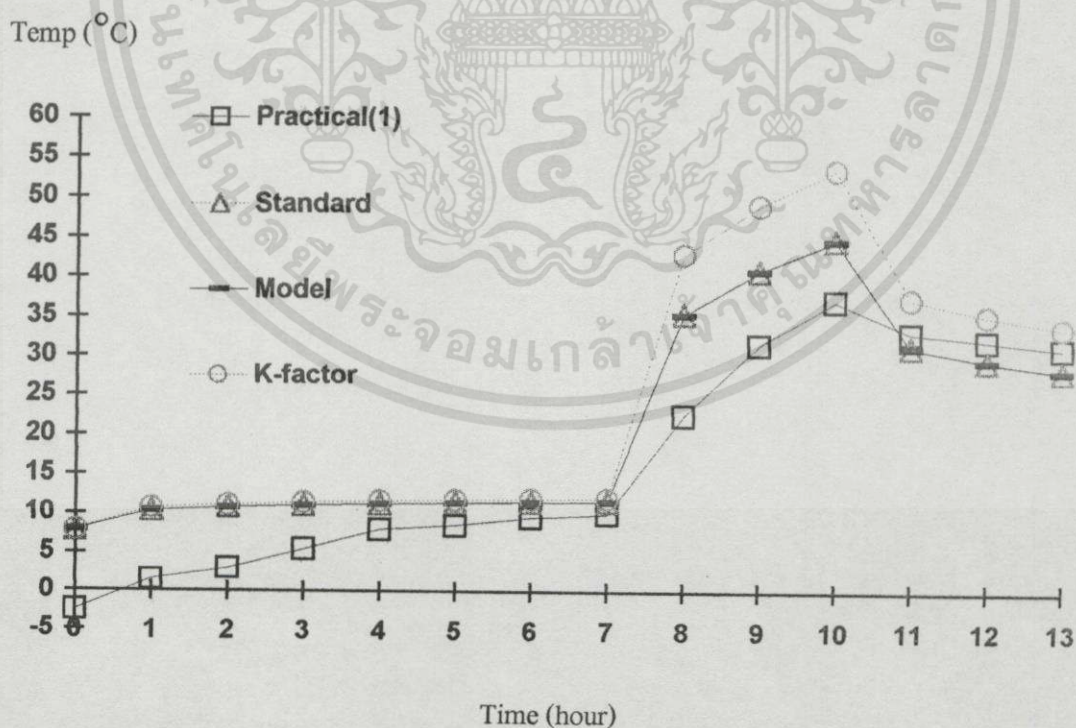
Irms/phase at step [2], amp  $\approx$  5.50

K-Factor at step [2]  $\approx$  4.81

Time step[2] , hours = 3

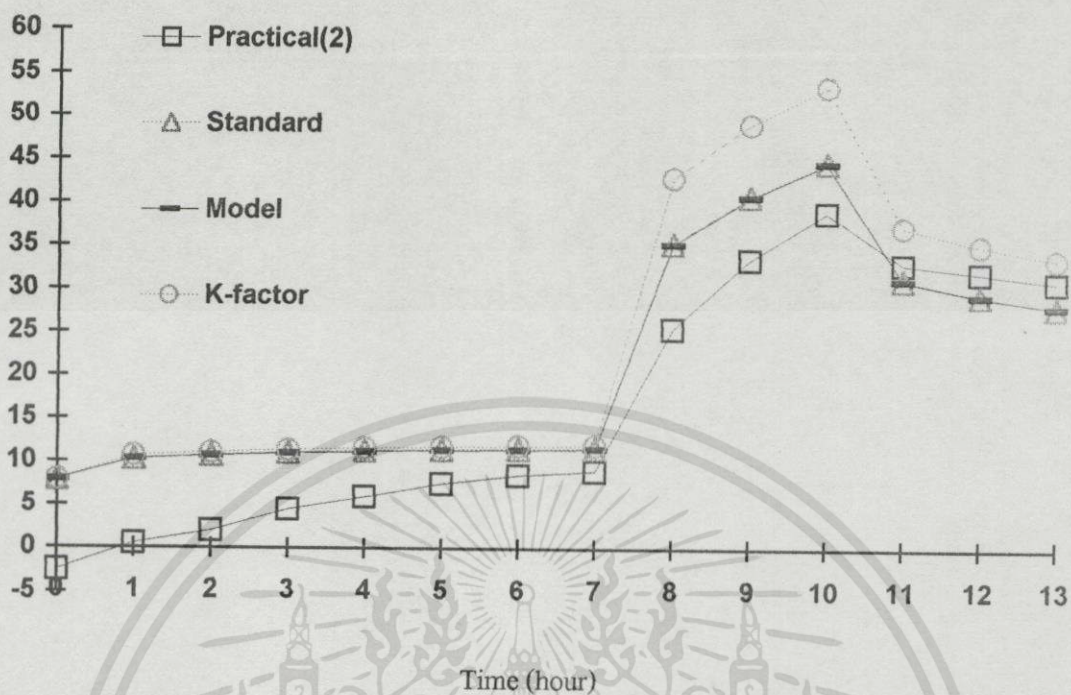


รูปที่ 5.142 แสดงผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของน้ำในถังบน ซึ่งได้จากการทดสอบและการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

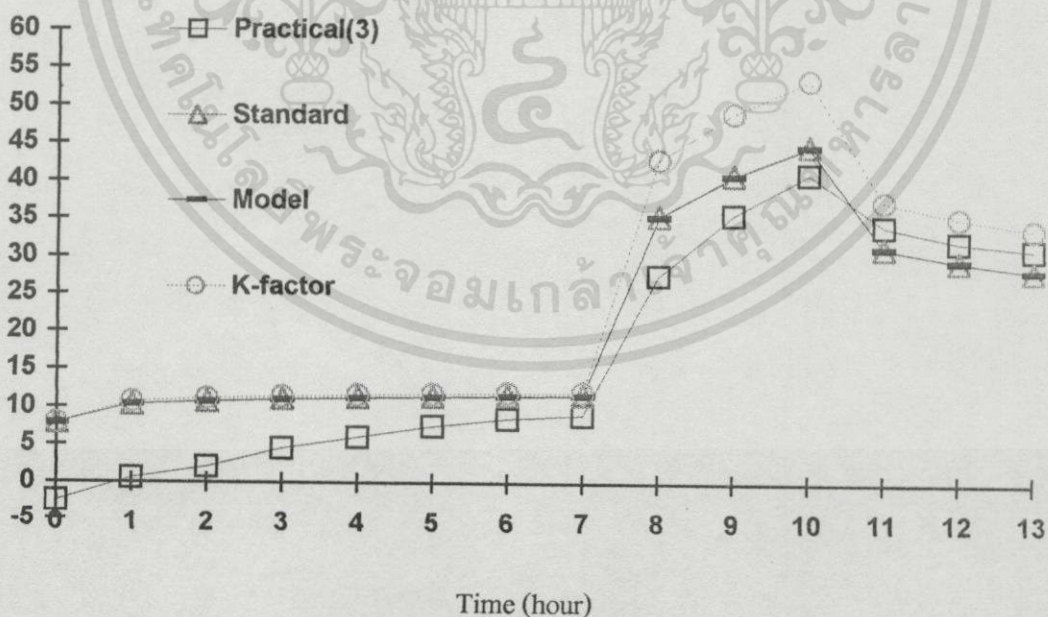


รูปที่ 5.143 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 1 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

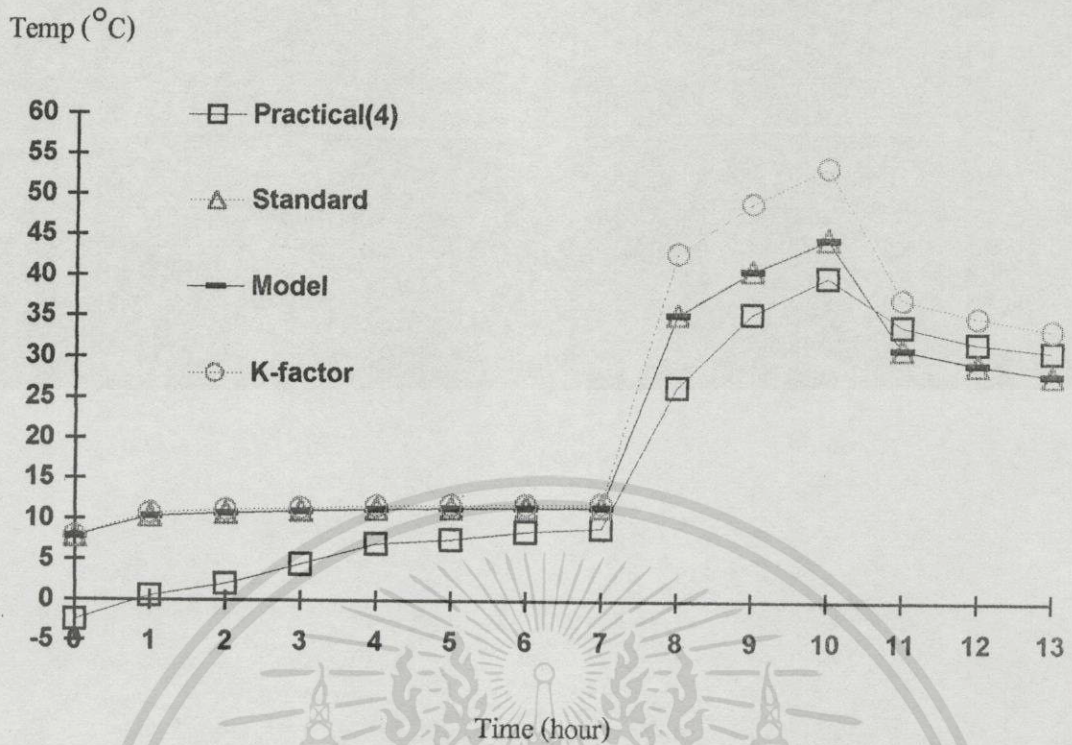
Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )

รูปที่ 5.144 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 2 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

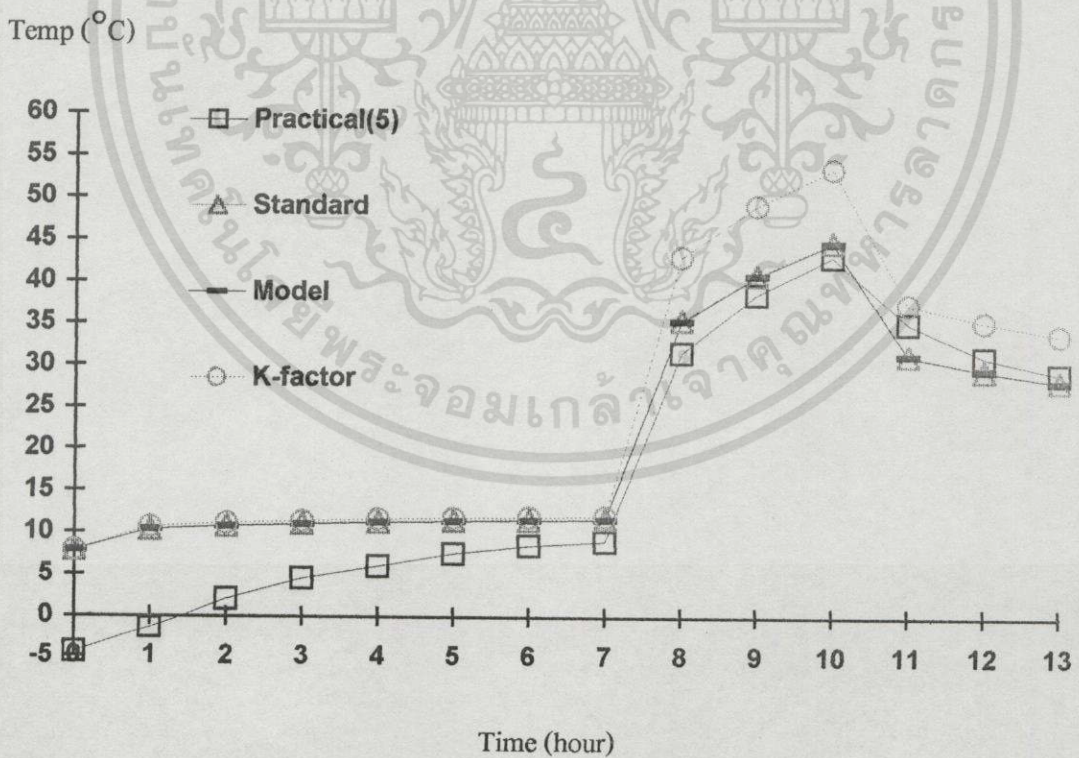
Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )

รูปที่ 5.145 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 3 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



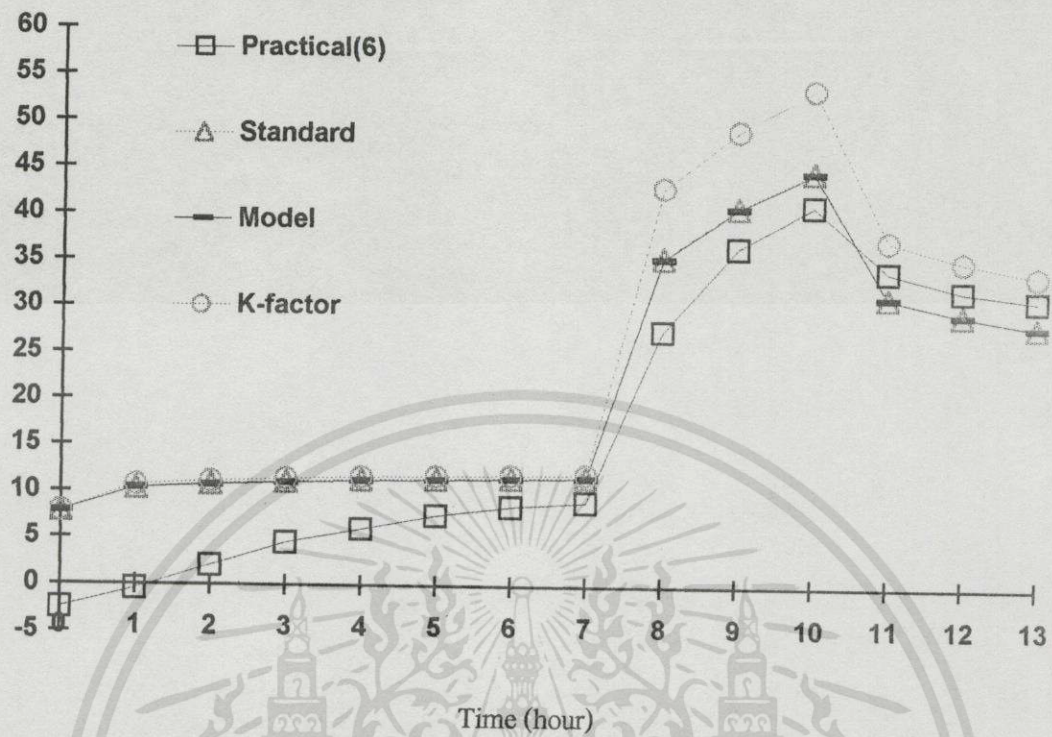
รูปที่ 5.146 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 4 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูป



รูปที่ 5.147 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 5 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

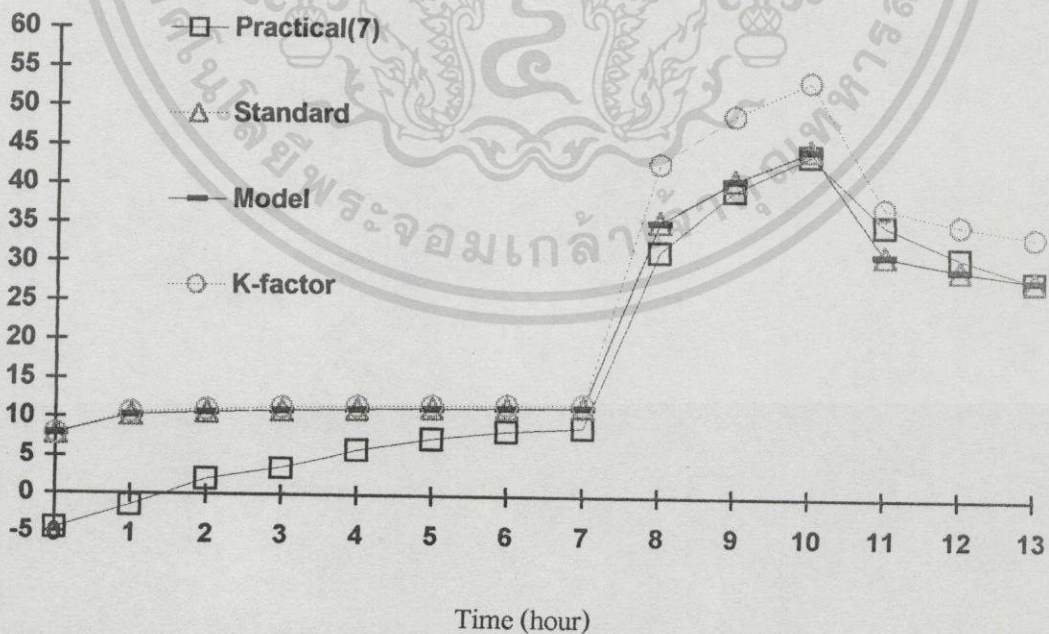
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temp (°C)



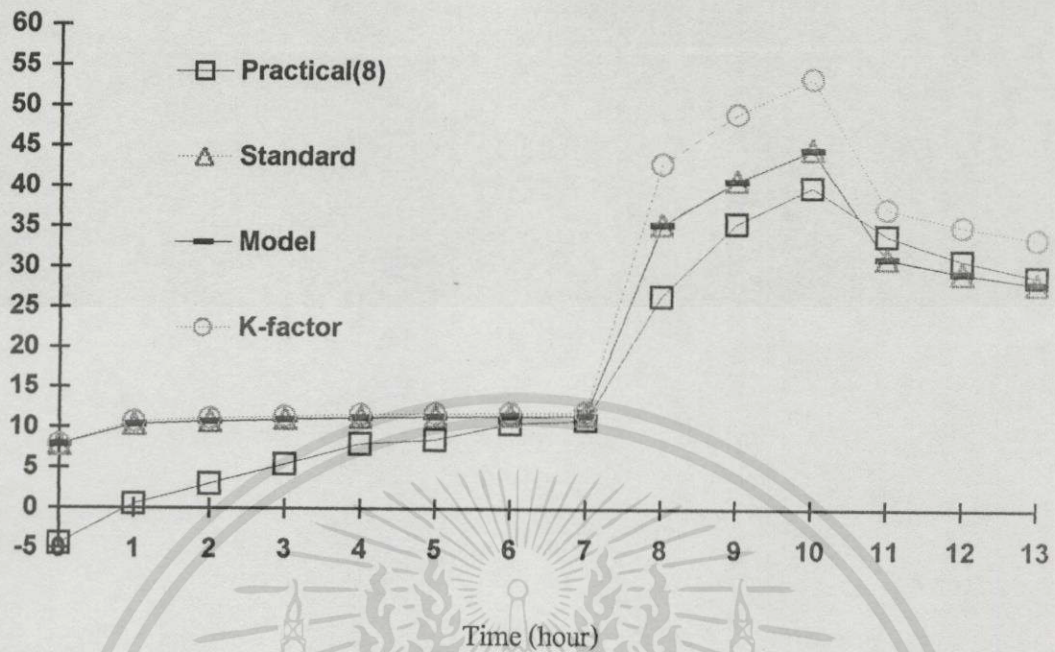
รูปที่ 5.148 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 6 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

Temp (°C)

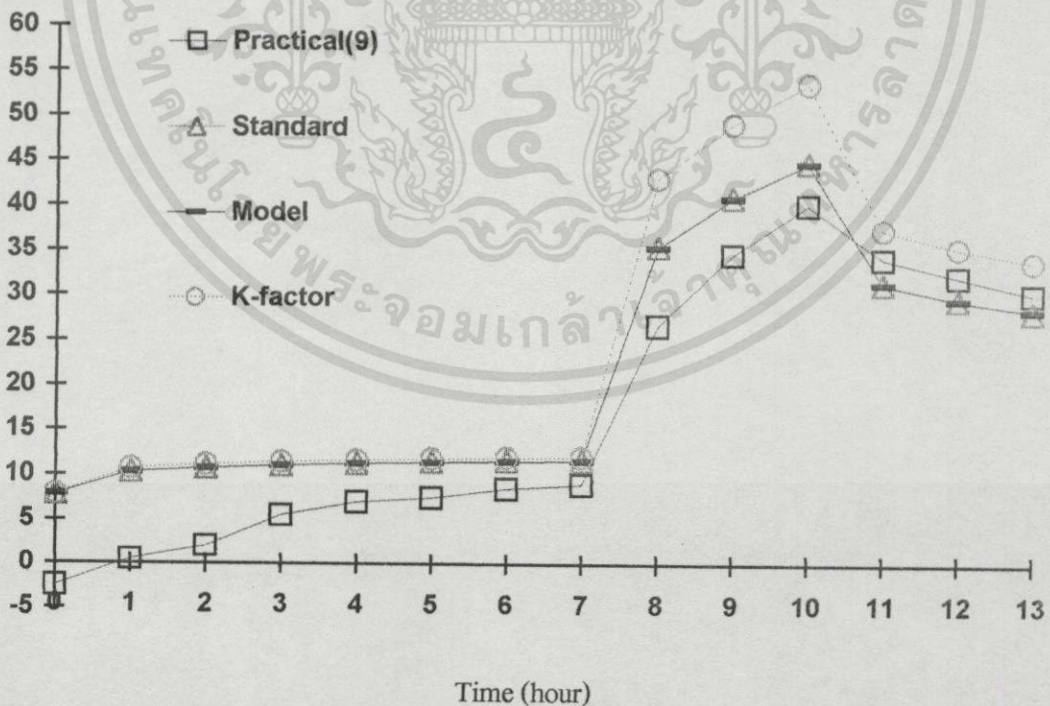


รูปที่ 5.149 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 7 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

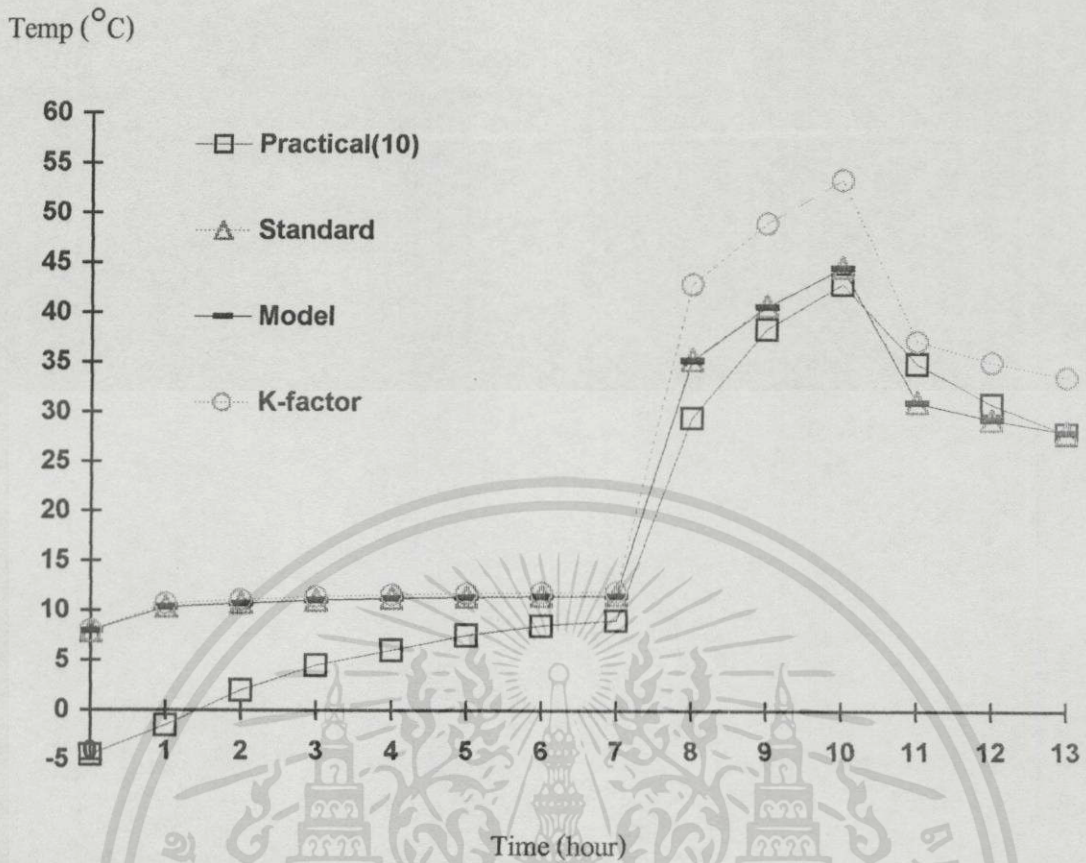
Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )

รูปที่ 5.150 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 8 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

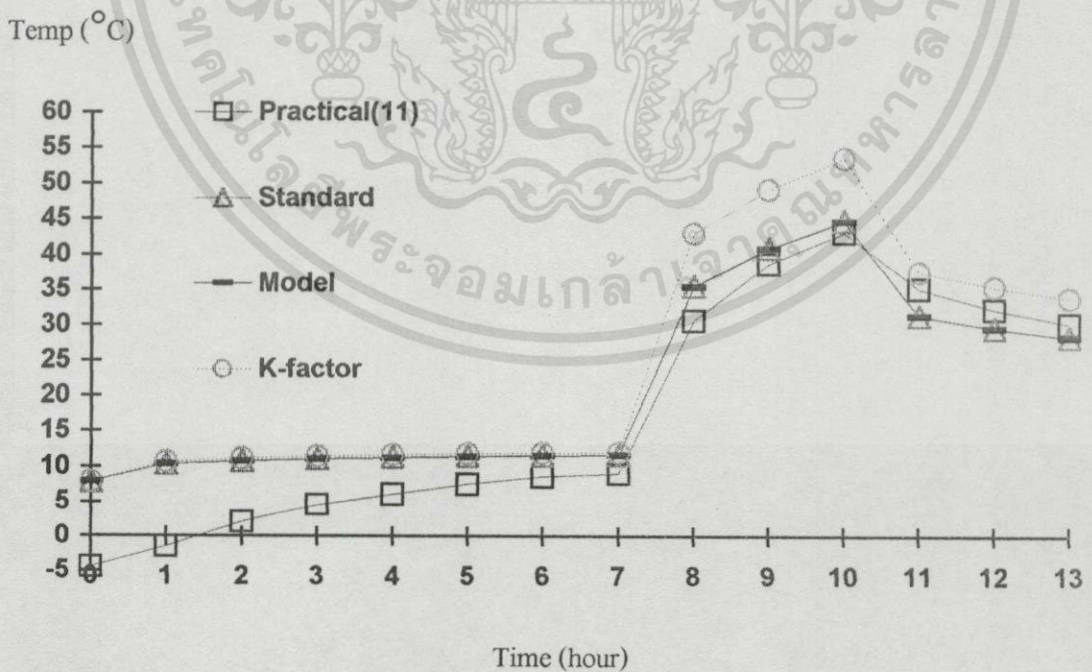
Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )

รูปที่ 5.151 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 9 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

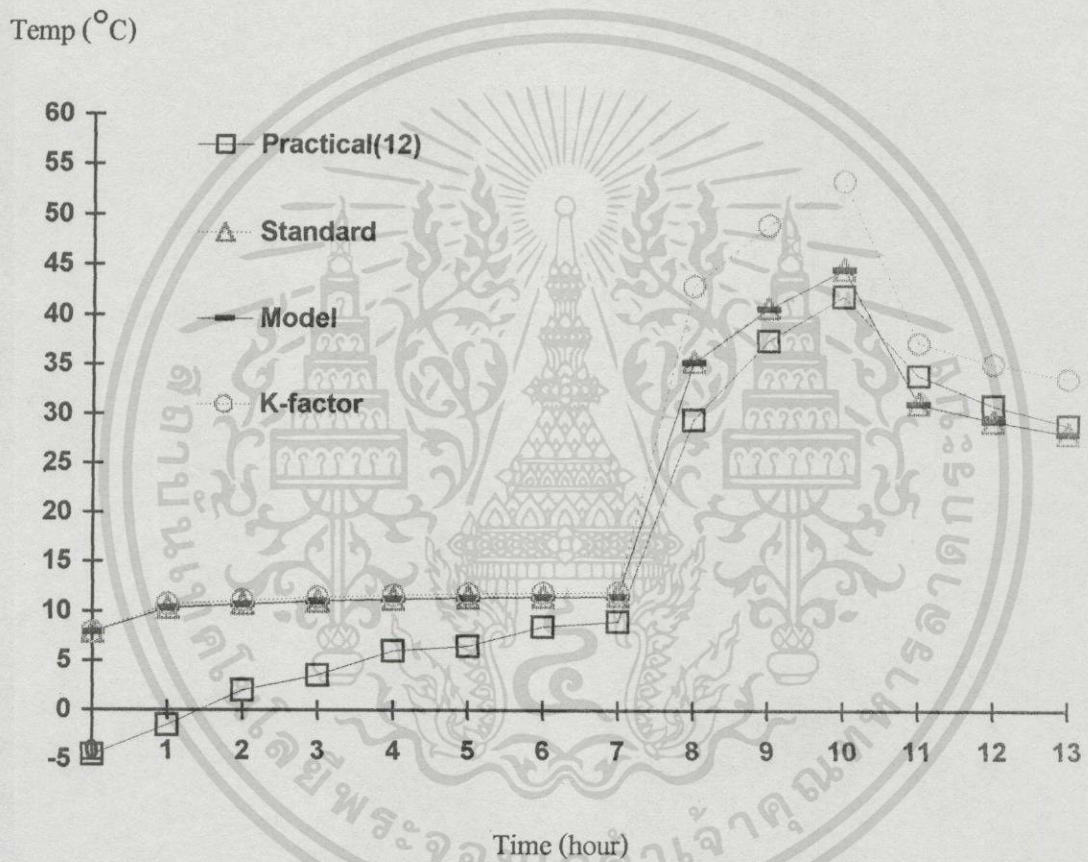


รูปที่ 5.152 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 10 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ



รูปที่ 5.153 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 11 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.154 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลาวตั่วหน้าตำแหน่ง 12 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบของรูปที่ 5.121 ถึง 5.126 สามารถเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจาก  
ทั้ง 3 รูปแบบ ได้ดังรูปกราฟที่ 5.155 ถึง 5.167 ซึ่งการคำนวณใช้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

### แบบที่ 1 Standard

#### Input1 Characteristic of Transformer at Rated load

Load loss at rated( $P_{l\_R}$ ),watt	= 350
Core loss at rated( $P_{core\_R}$ ),watt	= 77
Loss at tank at rated( $P_{tank\_R}$ ),watt	= 0
Top oil rise at rated( $T_{or\_R}$ ),celsius	= 31
Winding to oil temperature different at rated ( $T_{gr\_R}$ ),celsius	= 13.5
Thermal time constant for oil( $Time\_con$ )	= 3
Exponential power of total loss versus top oil temp. rise	= 0.8
Exponential power of winding loss versus winding temp. rise	= 0.8
Hot-spot factor(H)	= 1.1

#### Input2 Step Load

Number of different load periods for a day(N)	= 3
Irms[P.U.] at load step [1]	≈ 0.86
Time step[1], hours	= 4
Irms[P.U.] at load step [2]	≈ 1.13
Time step[2], hours	= 4
Irms[P.U.] at load step [3]	≈ 0.63
Time step[3], hours	= 4

### แบบที่ 2 Model

#### Input1 Characteristic of Transformer at Rated load

I rms per phase at nameplate(rated),amp	= 8.78
Core loss at rated( $P_{core\_R}$ ),watt	= 77
Loss at tank at rated( $P_{tank\_R}$ ),watt	= 0
Resistance of ac at rated, ohm/phase	= 1.526
Resistance of dc at rated, ohm/phase	= 1.457

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Top oil rise at rated( $T_{or\_R}$ ),celsius = 31  
 Winding to oil temperature different at rated ( $T_{gr\_R}$ ),celsius = 13.5  
 Thermal time constant for oil( $Time\_con$ ) = 3  
 Exponential power of total loss versus top oil temp. rise = 0.8  
 Exponential power of winding loss versus winding temp. rise = 0.8  
 Hot-spot factor(H) = 1.1

### **Input2** Step Load

Number of different load peroids for a day(N) = 3

Pload/phase at step [1], watt  $\approx$  88.03

Irms/phase at step [1], amp  $\approx$  7.59

Time step[1] , hours = 4

Pload/phase at step [2], watt  $\approx$  149.2

Irms/phase at step [2], amp  $\approx$  9.88

Time step[2] , hours = 4

Pload/phase at step [3], watt  $\approx$  46.42

Irms/phase at step [3], amp  $\approx$  5.50

Time step[3] , hours = 4

### **แบบที่3** K-Factor

#### **Input1** Characteristic of Transformer at Rated load

I rms per phase at nameplate(rated),amp = 8.78

Load loss at rated,watt = 350

Core loss at rated( $P_{core\_R}$ ),watt = 77

Loss at tank at rated( $P_{tank\_R}$ ),watt = 0

D.C Resistance , ohm/phase = 1.457

Top oil rise at rated( $T_{or\_R}$ ),celsius = 31

Winding to oil temperature different at rated ( $T_{gr\_R}$ ),celsius = 13.5

Thermal time constant for oil( $Time\_con$ ) = 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Exponential power of total loss versus top oil temp. rise = 0.8

Exponential power of winding loss versus winding temp. rise = 0.8

Hot-spot factor(H) = 1.1

### **Input2** Step Load

Number of different load peroids for a day(N) = 3

Irms/phase at step [1], amp  $\approx 7.59$

K-Factor at step [1]  $\approx 7.04$

Time step[1] , hours = 4

Irms/phase at step [2], amp  $\approx 9.88$

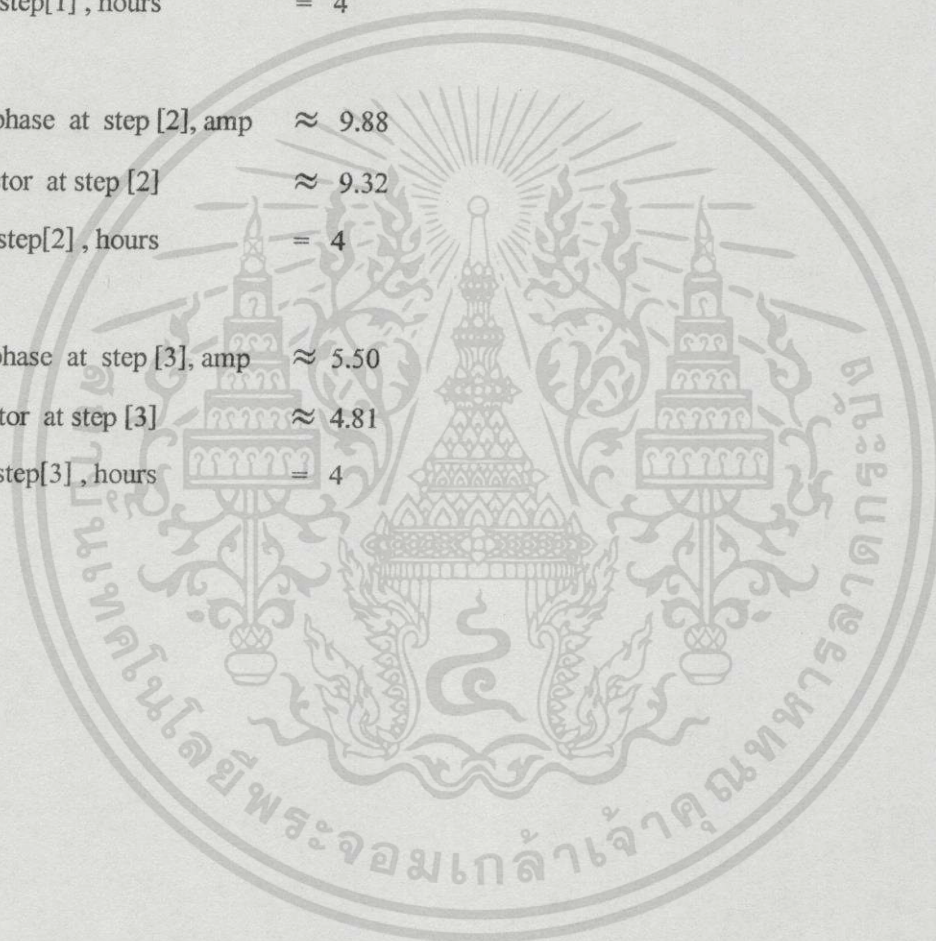
K-Factor at step [2]  $\approx 9.32$

Time step[2] , hours = 4

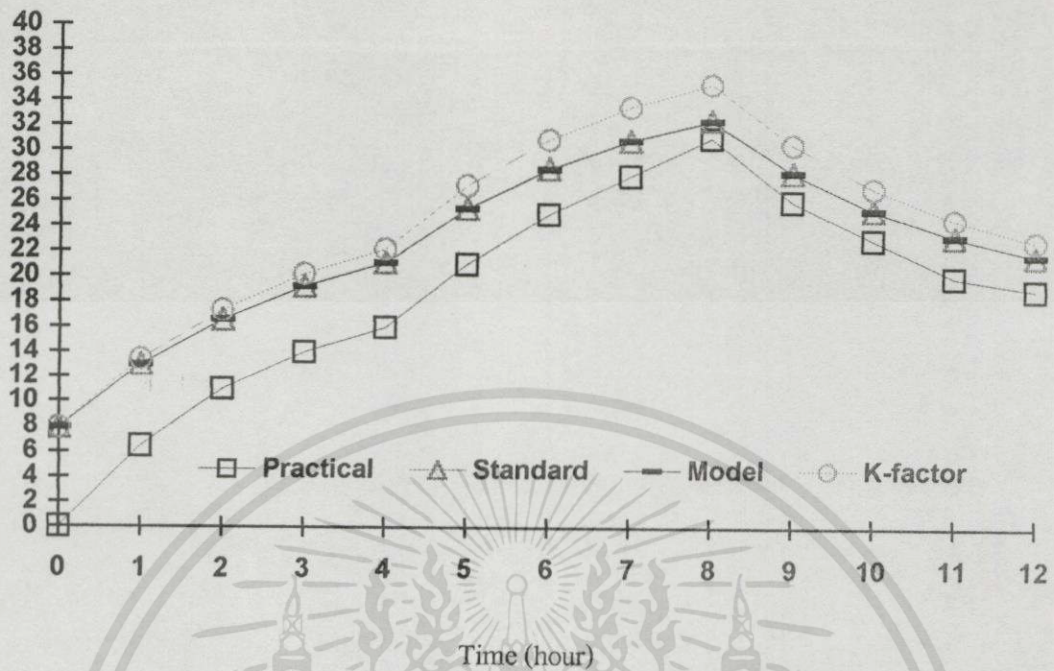
Irms/phase at step [3], amp  $\approx 5.50$

K-Factor at step [3]  $\approx 4.81$

Time step[3] , hours = 4

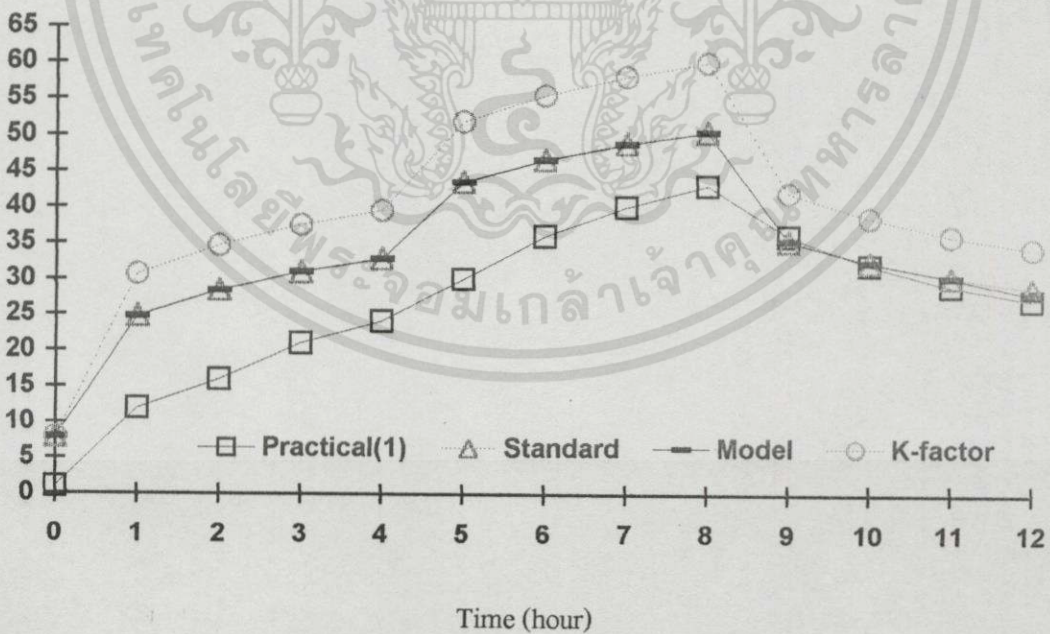


Temp (°C)



รูปที่ 5.155 แสดงผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของน้ำมันค้ำบน ซึ่งได้จากการทดสอบและการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

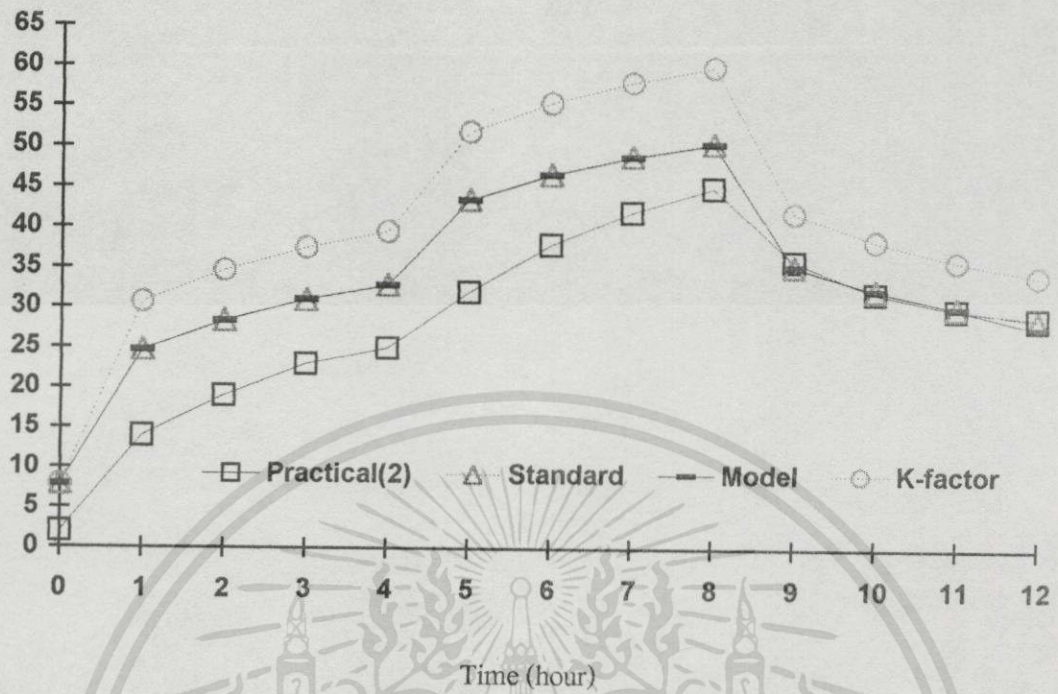
Temp (°C)



รูปที่ 5.156 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของลาวตัวนำที่ตำแหน่ง 1 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

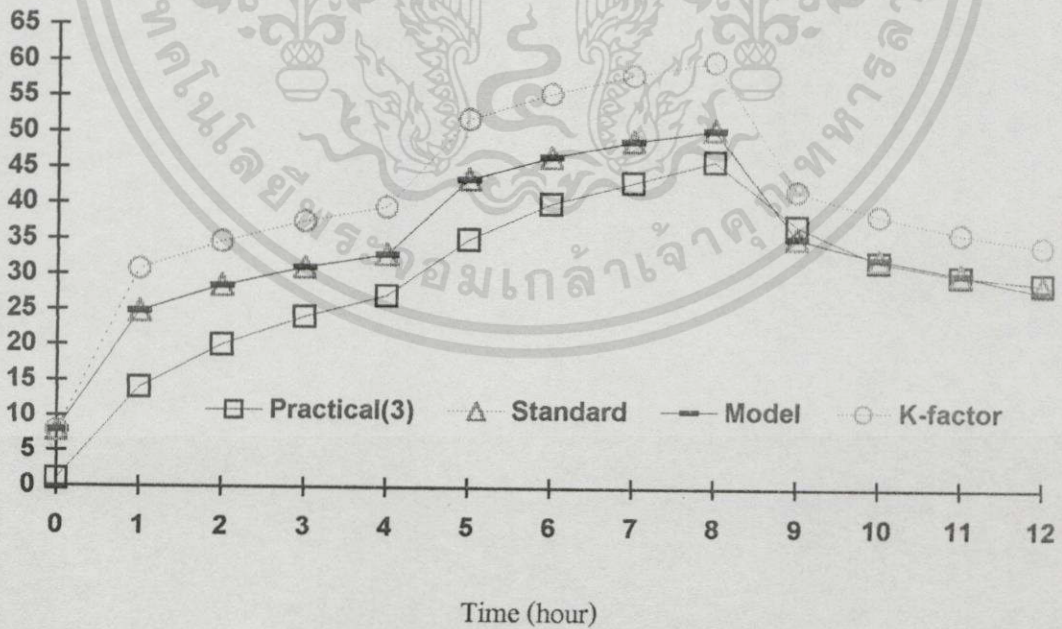
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temp (°C)



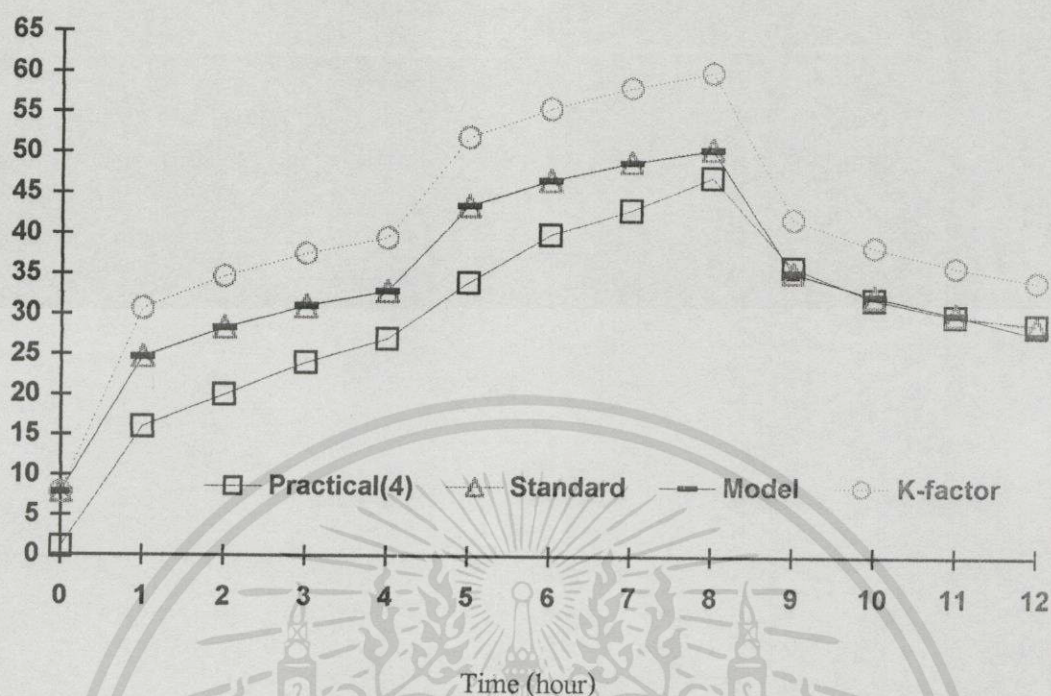
รูปที่ 5.157 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของลาวตัวนำที่ตำแหน่ง 2 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

Temp (°C)

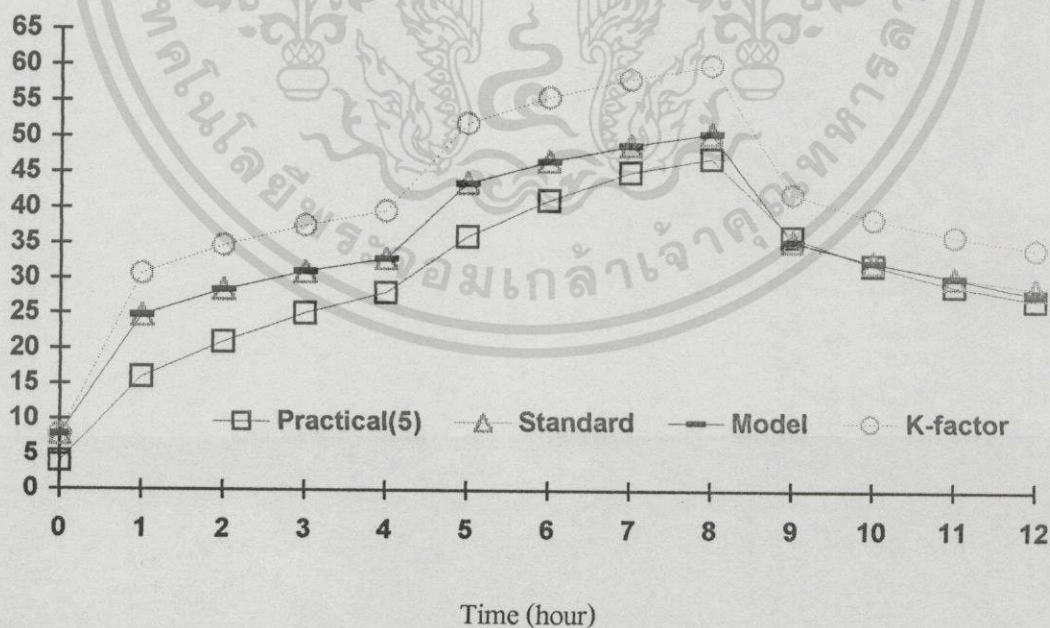


รูปที่ 5.158 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของลาวตัวนำที่ตำแหน่ง 3 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )

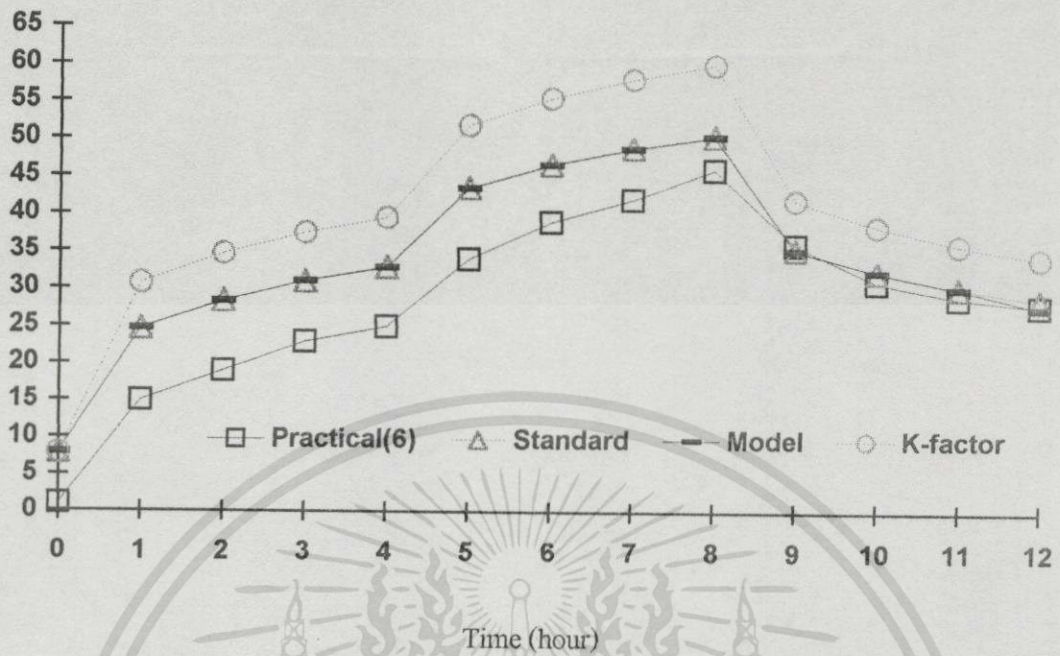
รูปที่ 5.159 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 4 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )

รูปที่ 5.160 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 5 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

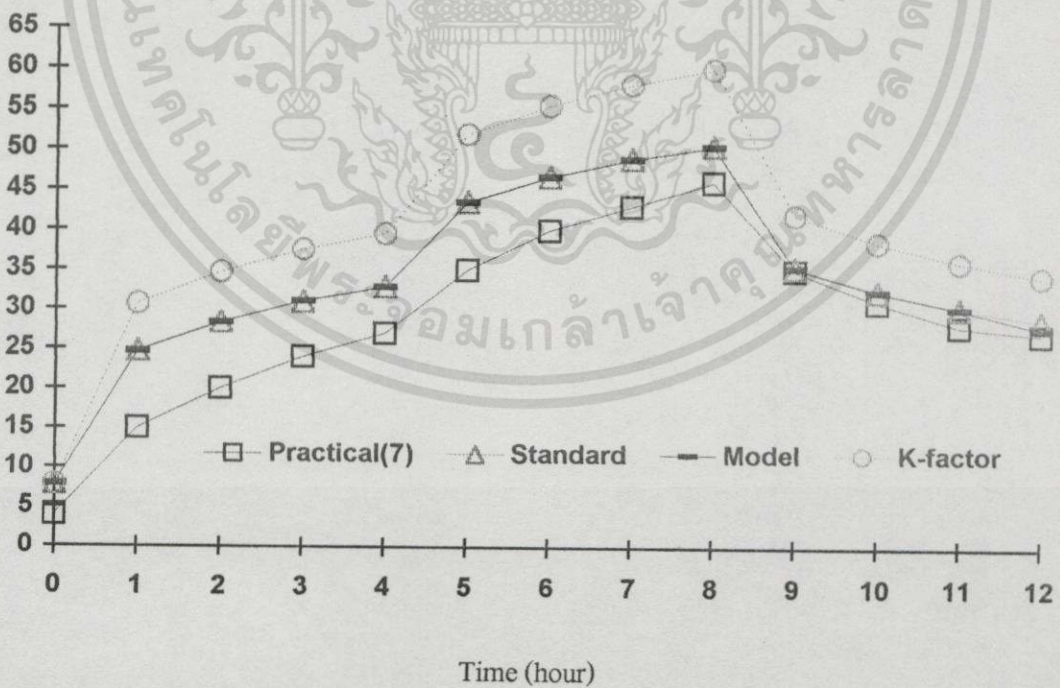
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่จําการณใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temp (°C)



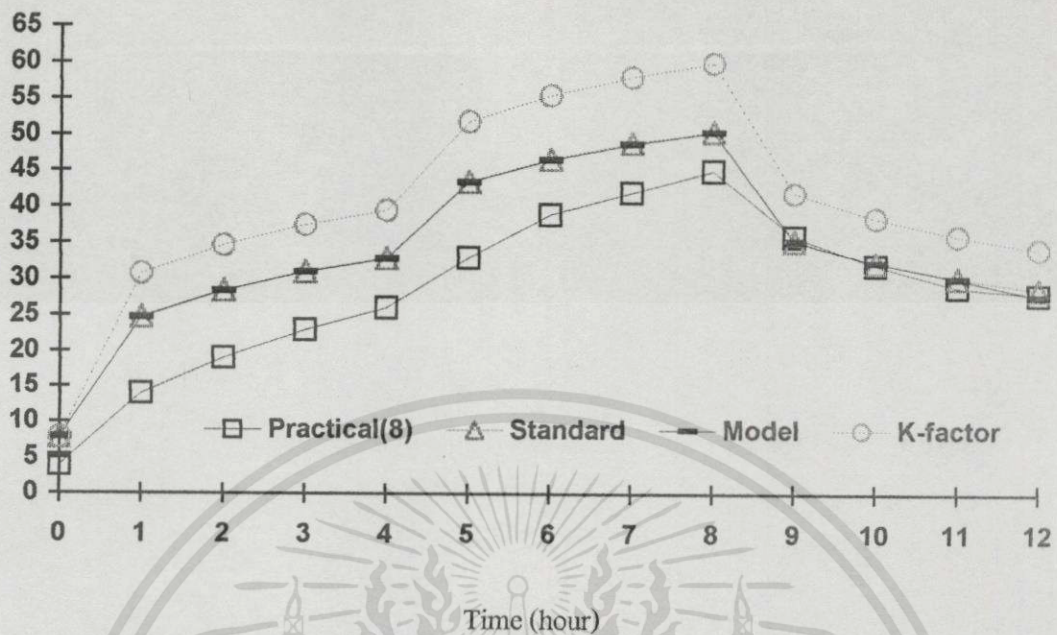
รูปที่ 5.161 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 6 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

Temp (°C)

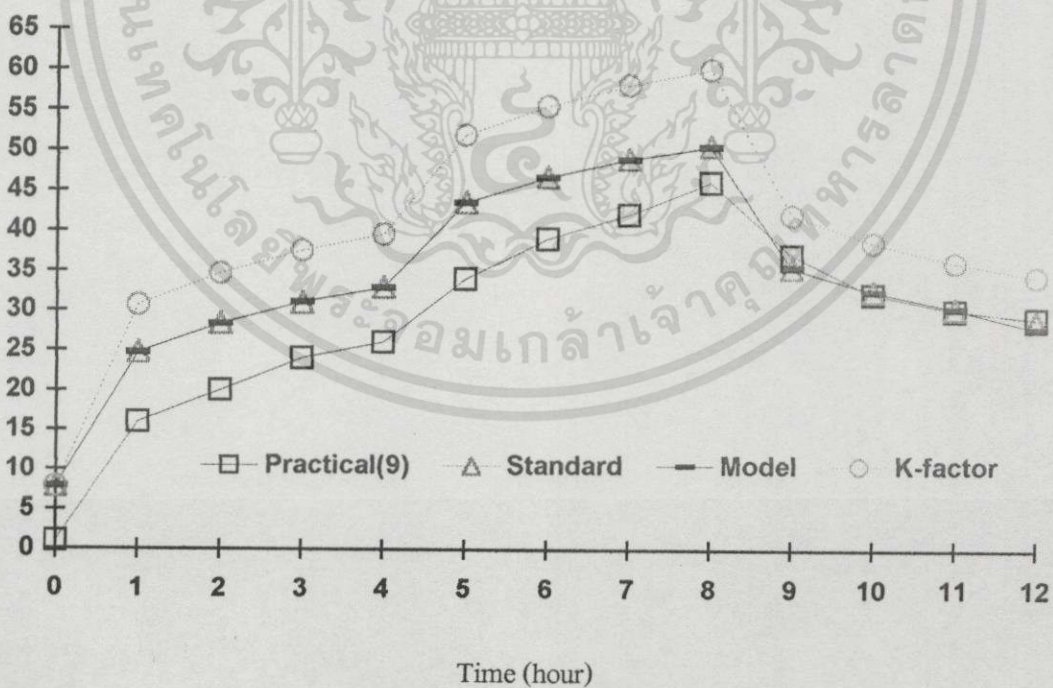


รูปที่ 5.162 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 7 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

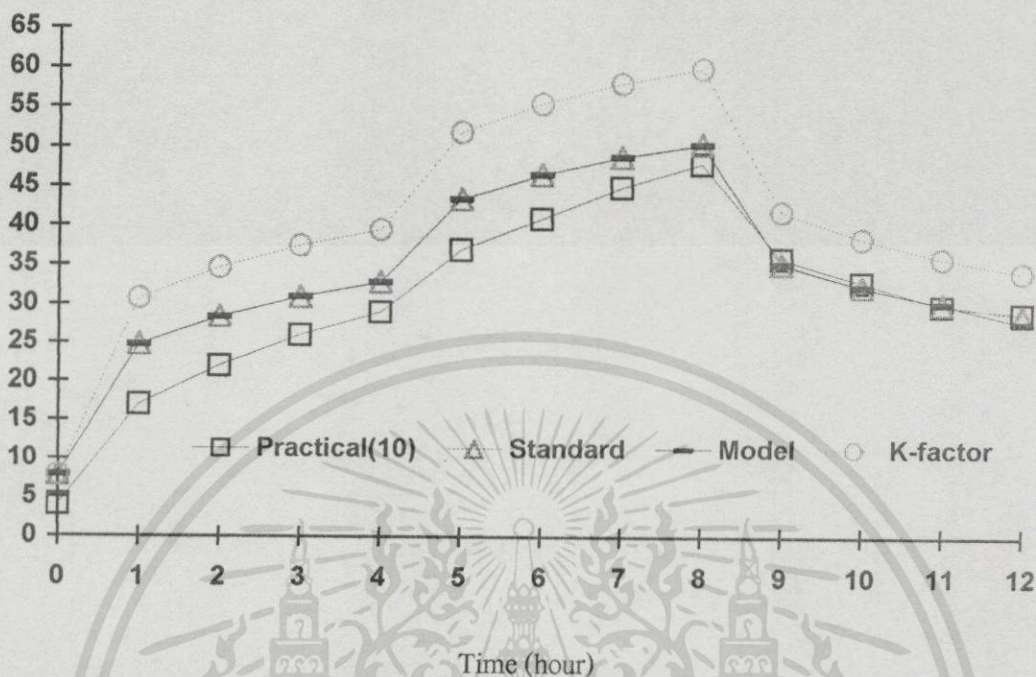
Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )

รูปที่ 5.163 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของสวดตัวนำที่ตำแหน่ง 8 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

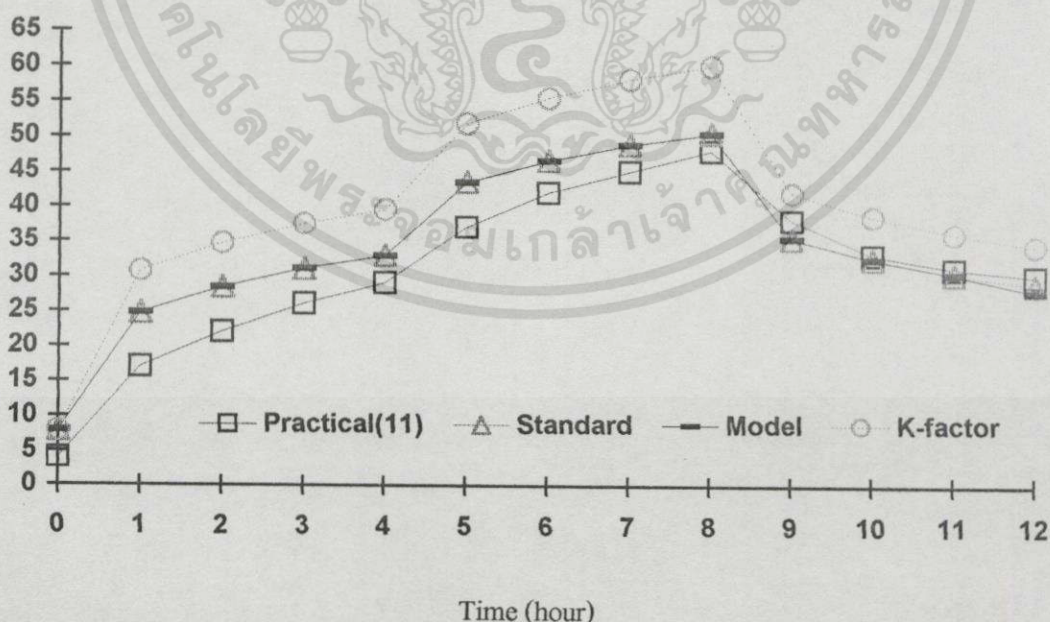
Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )

รูปที่ 5.164 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของสวดตัวนำที่ตำแหน่ง 9 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

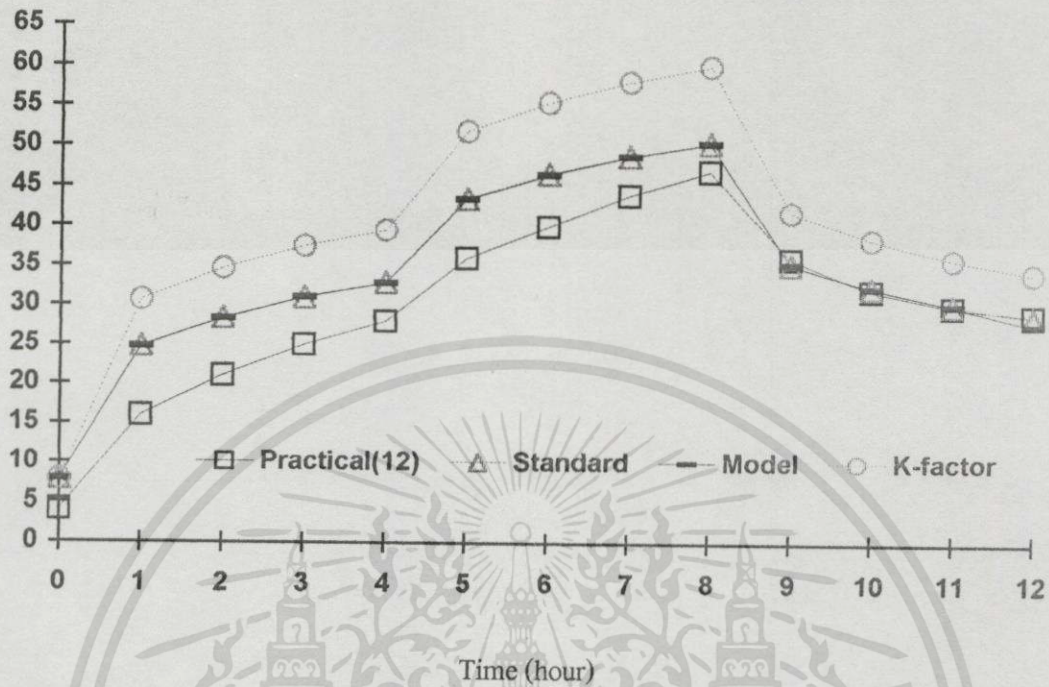
Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )

รูปที่ 5.165 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 10 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )

รูปที่ 5.166 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 11 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

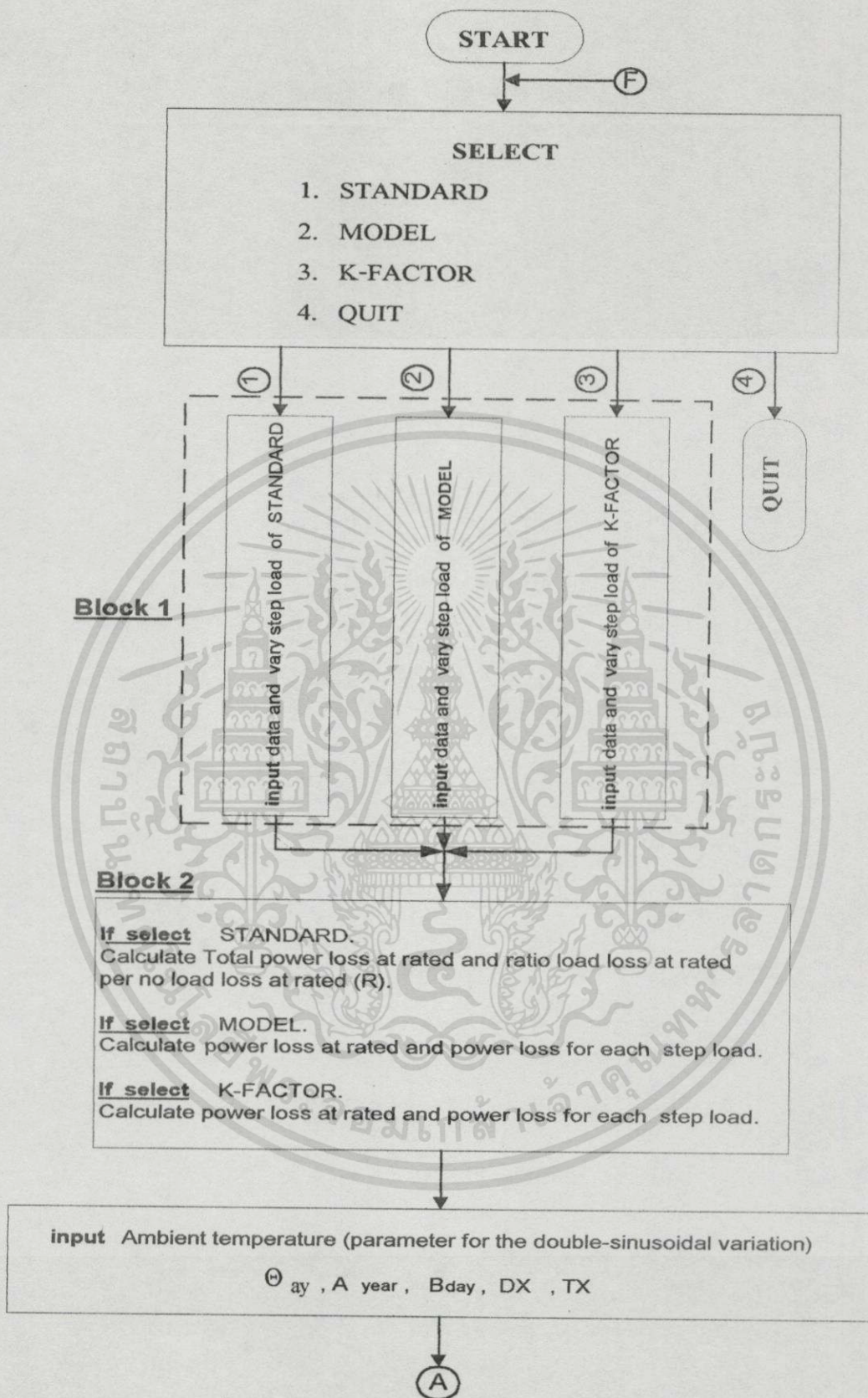
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )

รูปที่ 5.167 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของลวดตัวนำที่ตำแหน่ง 12 ซึ่งได้จากการทดสอบเปรียบเทียบ  
กับผลการคำนวณทั้ง 3 รูปแบบ

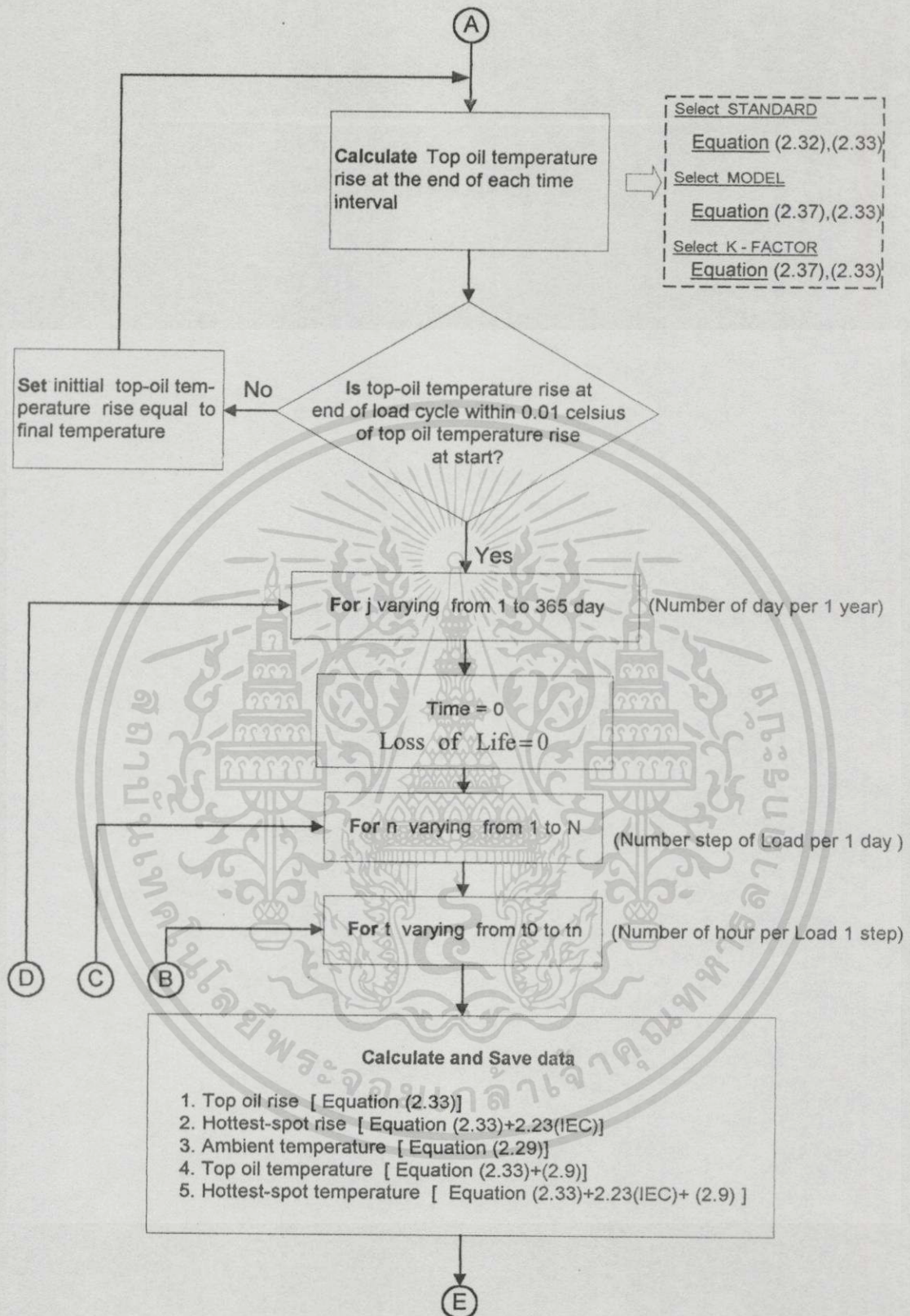
### 5.3 การสร้างโปรแกรมซอฟต์แวร์ของการทำนายอุณหภูมิ, ค่าอายุที่สูญเสีย และอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน

เพื่อความสะดวกกับการคำนวณหาค่าต่าง ๆ ตามรูปแบบที่ได้กำหนดไว้ให้มีความรวดเร็วมากยิ่งขึ้น จึงได้สร้างโปรแกรมซอฟต์แวร์ช่วยในการวิเคราะห์ ซึ่งภาษาที่ใช้คือเทอร์โบซี (Turbo C)[23, 24] ส่วนแผนผังของโปรแกรมซอฟต์แวร์แสดงดังรูปที่ 5.168



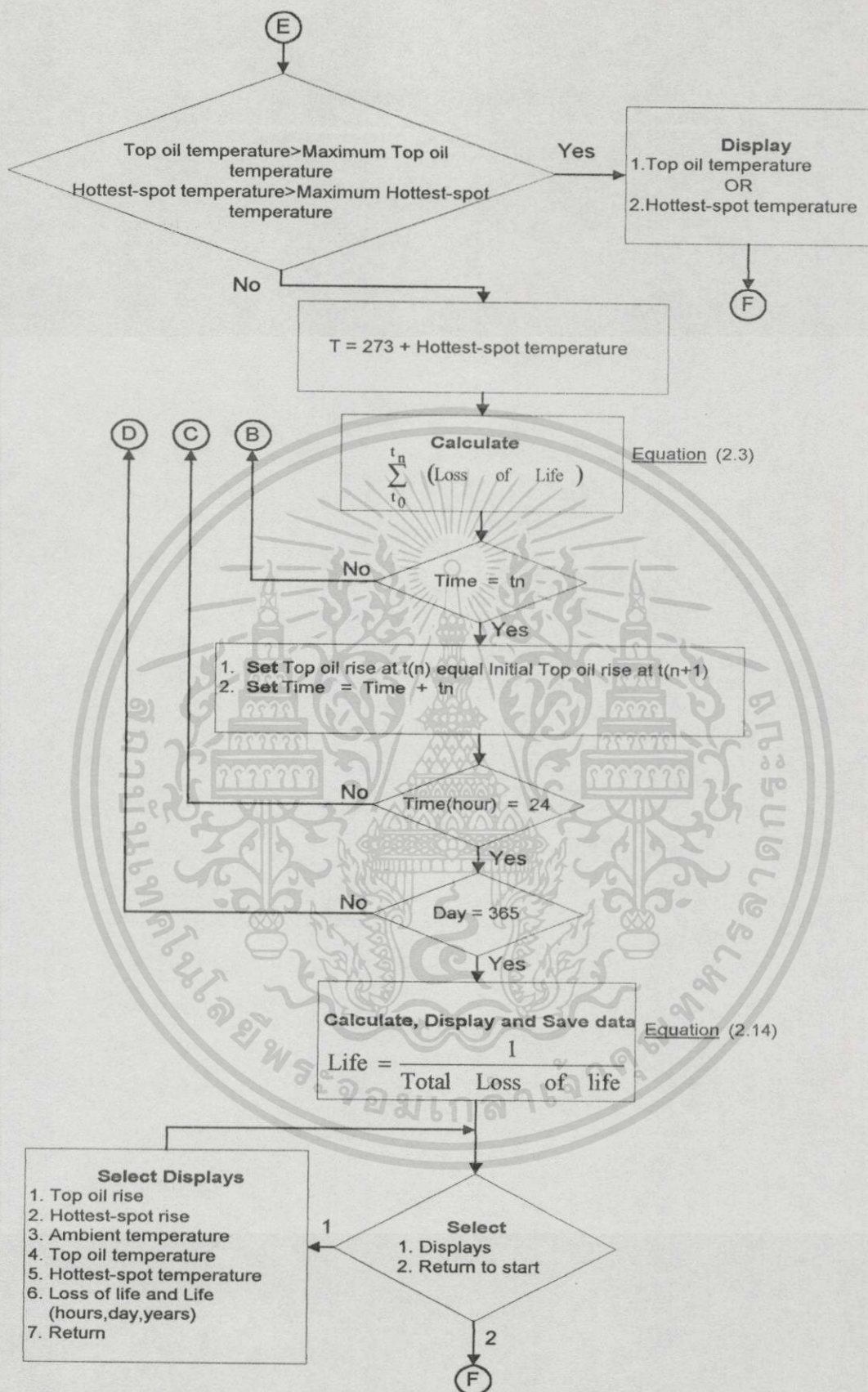
รูปที่ 5.168 แสดงแผนผังขั้นตอนการคำนวณค่าอุณหภูมิ, อายุที่สูญเสียและอายุการใช้งานของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.168 (ต่อ) แสดงแผนผังขั้นตอนการคำนวณค่าอุณหภูมิ, อายุที่สูญเสียและอายุการใช้งานของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.168 (ต่อ) แสดงแผนผังขั้นตอนการคำนวณค่าอุณหภูมิ, อายุที่สูญเสียและอายุการใช้งานของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.12 แสดง การเปรียบเทียบอินพุทของแต่ละรูปแบบจากบล็อกที่ 1 ของรูปแผนผังที่ 5.168

	<b>Input data STANDARD</b>	<b>Input data MODEL</b>	<b>Input data K - FACTOR</b>
1.	Load loss at rated(PLL_R/3 phase),watt	I rms/ phase at nameplate(rated),amp	I rms/ phase at nameplate(rated),amp
2.	Core loss at rated(Pc_R/ 3 phase),watt	Core loss at rated(Pc_R/3phase),watt	Load loss at rated (PLL_R/3phase),watt
3.	Loss at tank at rated(Ptank_R/3phase),watt	Loss at tank at rated(Ptank_R/3phase),watt	Core loss at rated(Pc_R/3phase),watt
4.	Top oil rise at rated(Tor),celsius	Resistance of ac at rated (Rac) , ohm/phase	Loss at tank at rated(Ptank_R/3phase),watt
5.	Winding to oil temperature different at rated (gr),celsius	Resistance of dc at rated (Rdc) , ohm/phase	Resistance of dc at rated (Rdc) , ohm/phase
6.	Thermal time constant for oil ( $\tau_0$ )	Top oil rise at rated(Tor),celsius	Top oil rise at rated(Tor),celsius
7.	Exponential power of total loss versus top oil temp. rise	Winding to oil temperature different at rated (gr),celsius	Winding to oil temperature different at rated (gr),celsius
8.	Exponential power of winding loss versus winding temp. rise	Thermal time constant for oil ( $\tau_0$ )	Thermal time constant for oil ( $\tau_0$ )
9.	Hot-spot factor(H)	Exponential power of total loss versus top oil temp. rise	Exponential power of total loss versus top oil temp. rise
10.	Maximum Top oil( $T_{o\_max}$ ),celsius	Exponential power of winding loss versus winding temp. rise	Exponential power of winding loss versus winding temp. rise
11.	Maximum hot-spot( $T_{hs\_max}$ ),celsius	Hot-spot factor(H)	Hot-spot factor(H)
12.	-	Maximum Top oil( $T_{o\_max}$ ),celsius	Maximum Top oil( $T_{o\_max}$ ),celsius
13.	-	Maximum hot-spot( $T_{hs\_max}$ ),celsius	Maximum hot-spot( $T_{hs\_max}$ ),celsius
	<b>Input data step load</b>	<b>Input data step load</b>	<b>Input data step load</b>
1.	Number of different load peroids for a day(N)	Number of different load peroids for a day(N)	Number of different load peroids for a day(N)
2.	I rms[P.U] at load step [n]	Pload/phase at step [n], watt	I rms/phase at step [n], amp
3.	Time step[n] , hours	I rms/phase at step [n], amp	K-Factor at step [n]
4.	-	Time step[n] , hours	Time step[n] , hours

ตารางที่ 5.13 แสดง การเปรียบเทียบสมการกำลังไฟฟ้าสูญเสียของแต่ละรูปแบบจากบล็อกที่ 2 ของรูปแผนผังรูปที่ 5.168

	STANDARD	MODEL	K - FACTOR
1.	$P_{T\_R} = (P_{LL\_R}/3\phi) + P_{C\_R} + P_{\tan k\_R}$	$P_{LL\_R}/1\phi = I_{-R}^2 R_{ac\_R}$	$P_{T\_R} = (P_{LL\_R}/3\phi) + P_{C\_R} + P_{\tan k\_R}$
2.	$R = \left[ \frac{P_{LL\_R}}{P_{C\_R} + P_{\tan k\_R}} \right]$	$P_{dc\_R} = I_{-R}^2 R_{dc\_R}$	$P_{dc\_R} = I_{-R}^2 R_{dc\_R}$
3.	-	$P_{ecw\_R} = (P_{LL\_R}/1\phi) - P_{dc\_R}$	$P_{dc}[n] = I_{rms}[n]^2 \times R_{dc\_R}$
4.	-	$P_{ecw\_H(p.u.)} = 4 \cdot \left( \frac{P_{ecw\_R}}{P_{dc\_R}} \right)$	$P_{dc}(p.u.)[n] = \frac{P_{dc}[n]}{P_{dc\_R}}$
5.	-	$P_{T\_R} = (3 \cdot P_{LL\_R}/1\phi) + P_{C\_R} + P_{\tan k\_R}$	$P_{LL}/1\phi [n] = \{ (K - \text{Factor}) \cdot [0.02 \times P_{dc\_R}] \} + P_{dc}[n]$
6.	-	$P_{dc}[n] = I_{rms}^2 [n] \times R_{dc\_R}$	$P_T [n] = 3 \cdot (P_{LL}/1\phi [n]) + P_{C\_R} + P_{\tan k\_R}$
7.	-	$P_{dc}(p.u.)[n] = \frac{P_{dc}[n]}{P_{dc\_R}}$	-
8.	-	$P_T [n] = 3 \cdot (P_{LL}/1\phi [n]) + P_{C\_R} + P_{\tan k\_R}$	-

เมื่อนำซอฟต์แวร์ที่ได้จากแผนผังรูปที่ 5.168 ไปทดสอบใช้งานทำนายอุณหภูมิต่าง ๆ ของหม้อแปลง, ค่าอายุที่สูญเสียและอายุการใช้งานหม้อแปลง

ตัวอย่างที่ 1 ของการจำลองโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งจะกำหนดระดับโหลดดังรูปที่ 5.169 และผลการคำนวณค่าต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 5.170 ถึง 5.178 ส่วนขั้นตอนการใช้โปรแกรมแสดงไว้ในภาคผนวก ข



รูปที่ 5.169 แสดงการจำลองโหลด 3 ระดับแบบโหลดที่ 1 ในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง

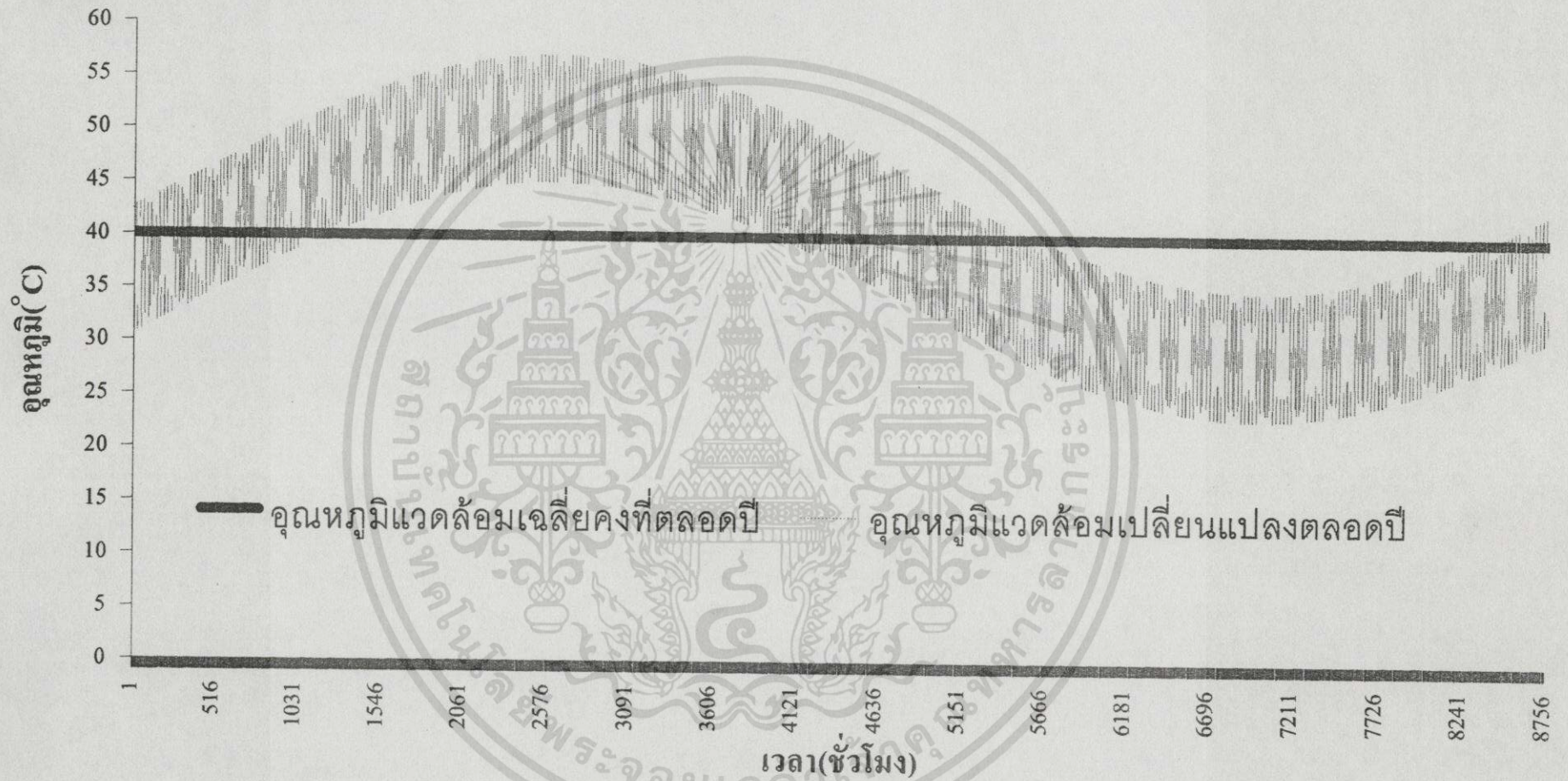
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.14 แสดงการจำลองค่าขนาดต่าง ๆ ของกระแสไฟฟ้าทางคานขดลวดปฐมภูมิเมื่อเป็นโหลดไม่เป็นเชิงเส้น จากตัวอย่างที่ 1 ของการจำลองโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

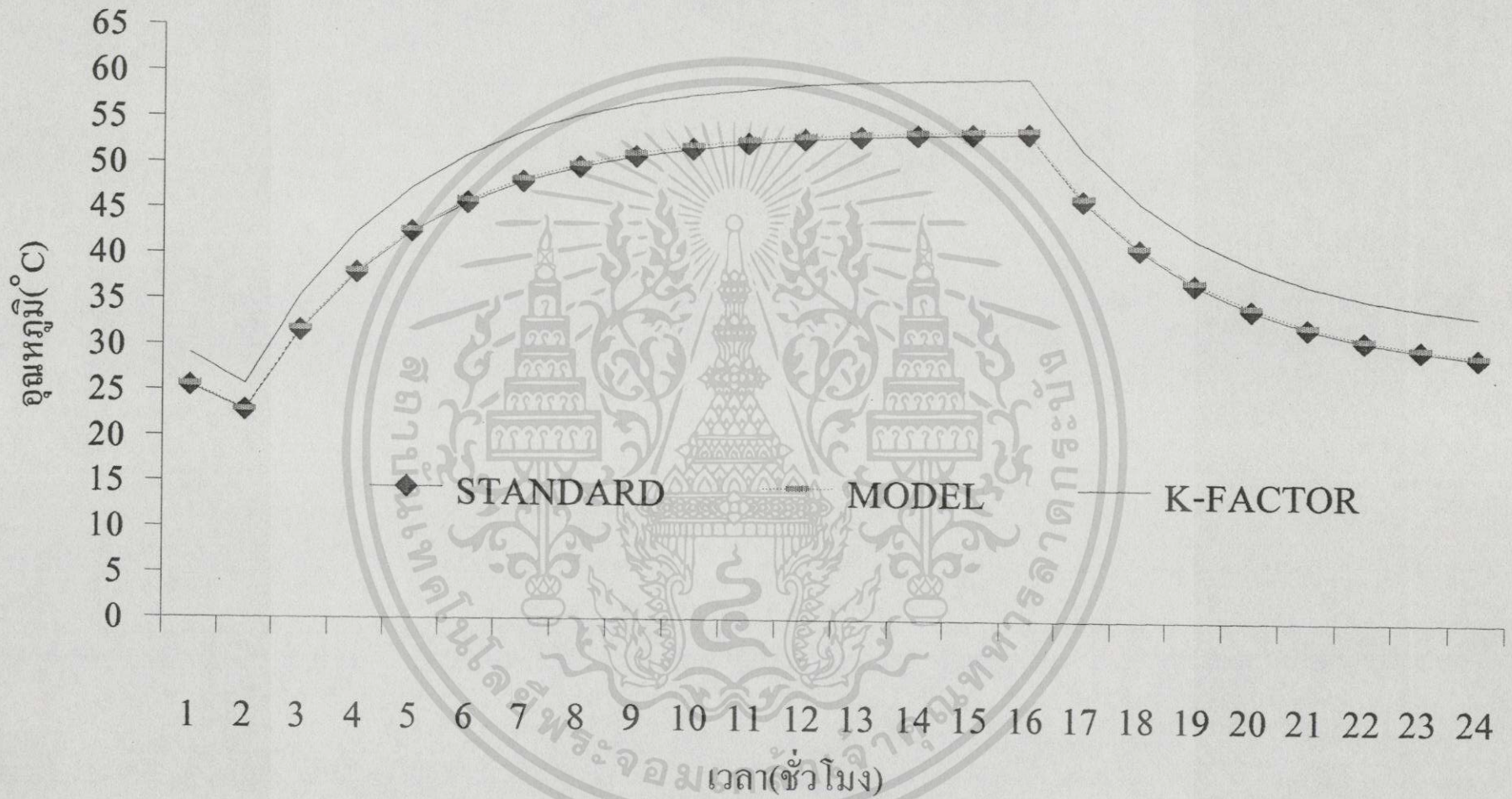
กระแสโหลด- ฮาร์โมนิก ระดับโหลดที่	THDI (%)	Irms (A/Phase)	Order									
			1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
1.	49.13	4.889	(100%) 4.388A	(0%) 0A	(40%) 1.755A	(20%) 0.877A	(0%) 0A	(15%) 0.658A	(10%) 0.439A	(0%) 0A	(8%) 0.351A	(5%) 0.22A
2.	55.69	13.06	(100%) 11.41A	(0%) 0A	(50%) 5.705A	(20%) 2.282A	(0%) 0A	(9%) 1.027A	(7.7%) 0.879A	(0%) 0A	(6%) 0.685A	(5.3%) 0.6A
3.	82.92	7.98	(100%) 6.143A	(0%) 0A	(75%) 4.61A	(30%) 1.843A	(0%) 0A	(12%) 0.737A	(10%) 0.614A	(0%) 0A	(8%) 0.491A	(6%) 0.369A

ตารางที่ 5.15 แสดงผลการคำนวณ K-Factor และการคำนวณกำลังไฟฟ้าแต่ละฮาร์โมนิก จาก ตัวอย่างที่ 1 ของการจำลองโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

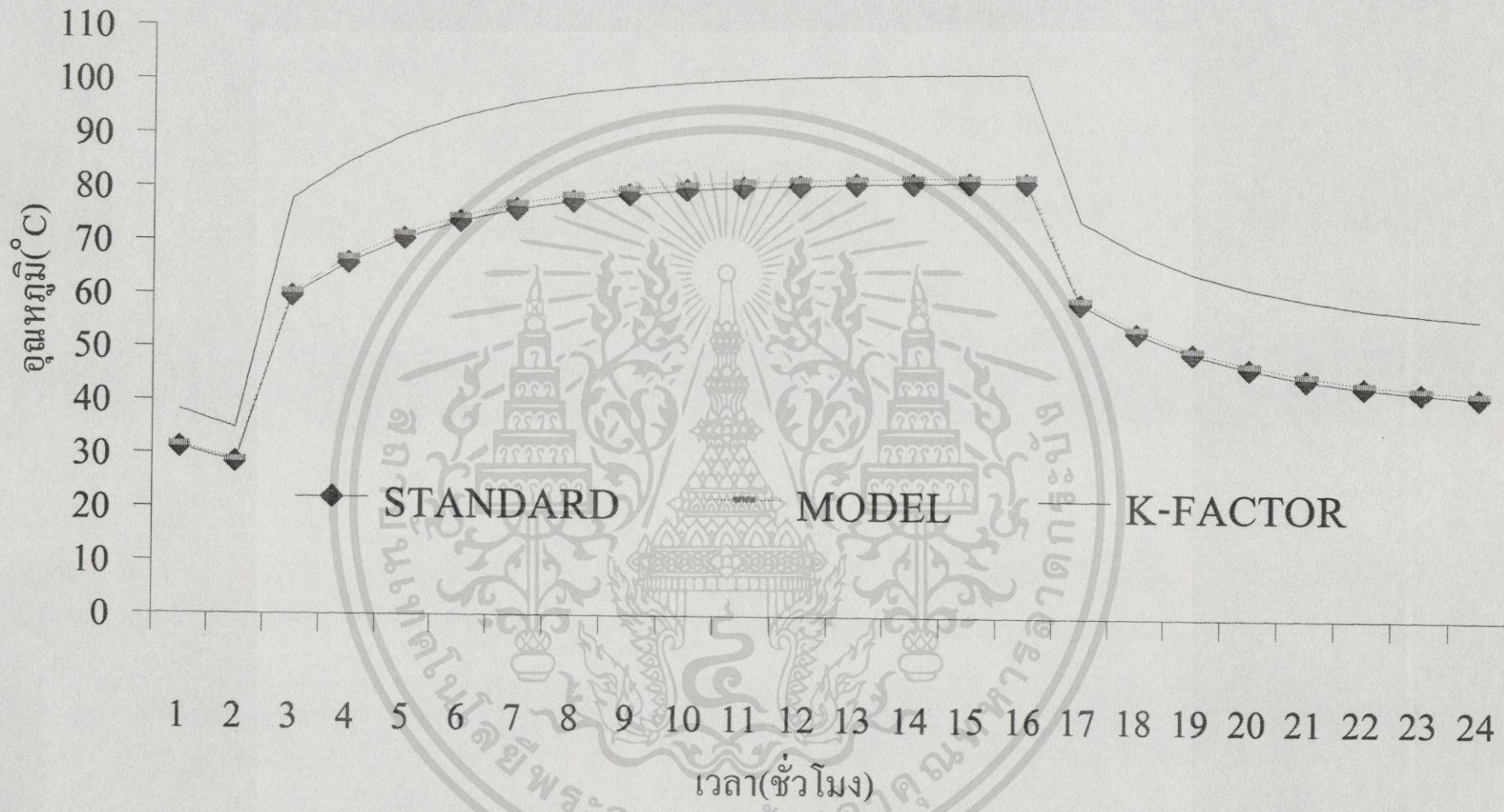
กระแสโหลด- ฮาร์โมนิก ระดับโหลดที่	K-Factor	Power Loss (Watts/Phase) of Harmonic										
		1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	Total
1.	<b>3.5315</b>	29.382	0	4.784	1.212	0	0.747	0.351	0	0.267	0.115	<b>36.86</b>
2.	<b>22.368</b>	198.67	0	50.546	8.197	0	1.82	1.41	0	1.024	0.857	<b>262.52</b>
3.	<b>12.775</b>	57.586	0	33.0	5.35	0	0.94	0.69	0	0.526	0.324	<b>98.416</b>



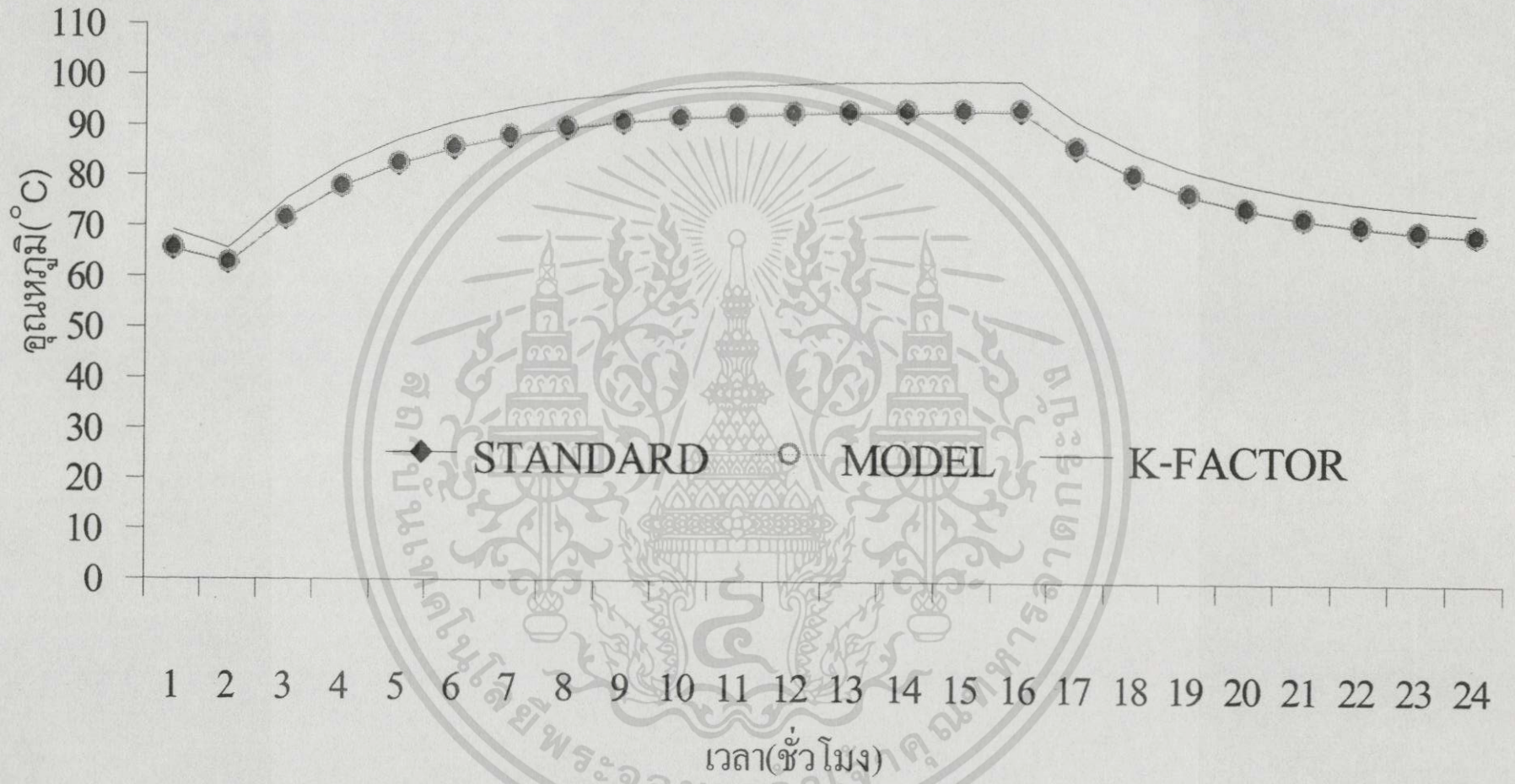
รูปที่ 5.170 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยคงที่ตลอดปี ( $\theta_{ay} = 40^{\circ}\text{C}$ ) กับอุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปี ( $\theta_{ay} = 40^{\circ}\text{C}$ ,  $A_{\text{year}} = 11$ ,  $B_{\text{day}} = 6$ ,  $DX = 110$ ,  $TX = 14$ ) ที่การจำลองโหลดตัวอย่างที่ 1



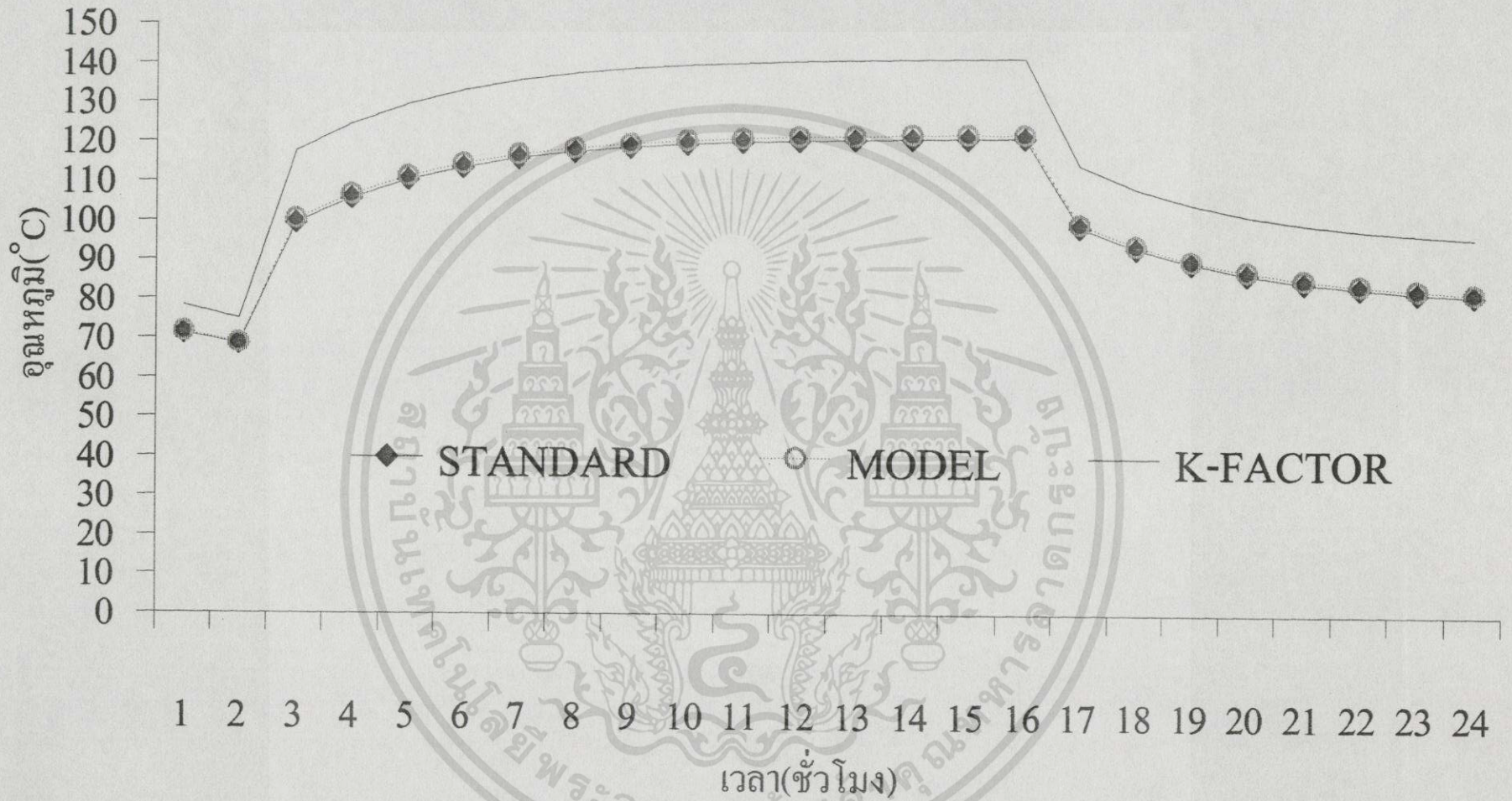
รูปที่ 5.171 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของน้ำมันด้านบนของการจำลองไหลคตัวอย่างที่ 1 จากทั้ง 3 รูปแบบ



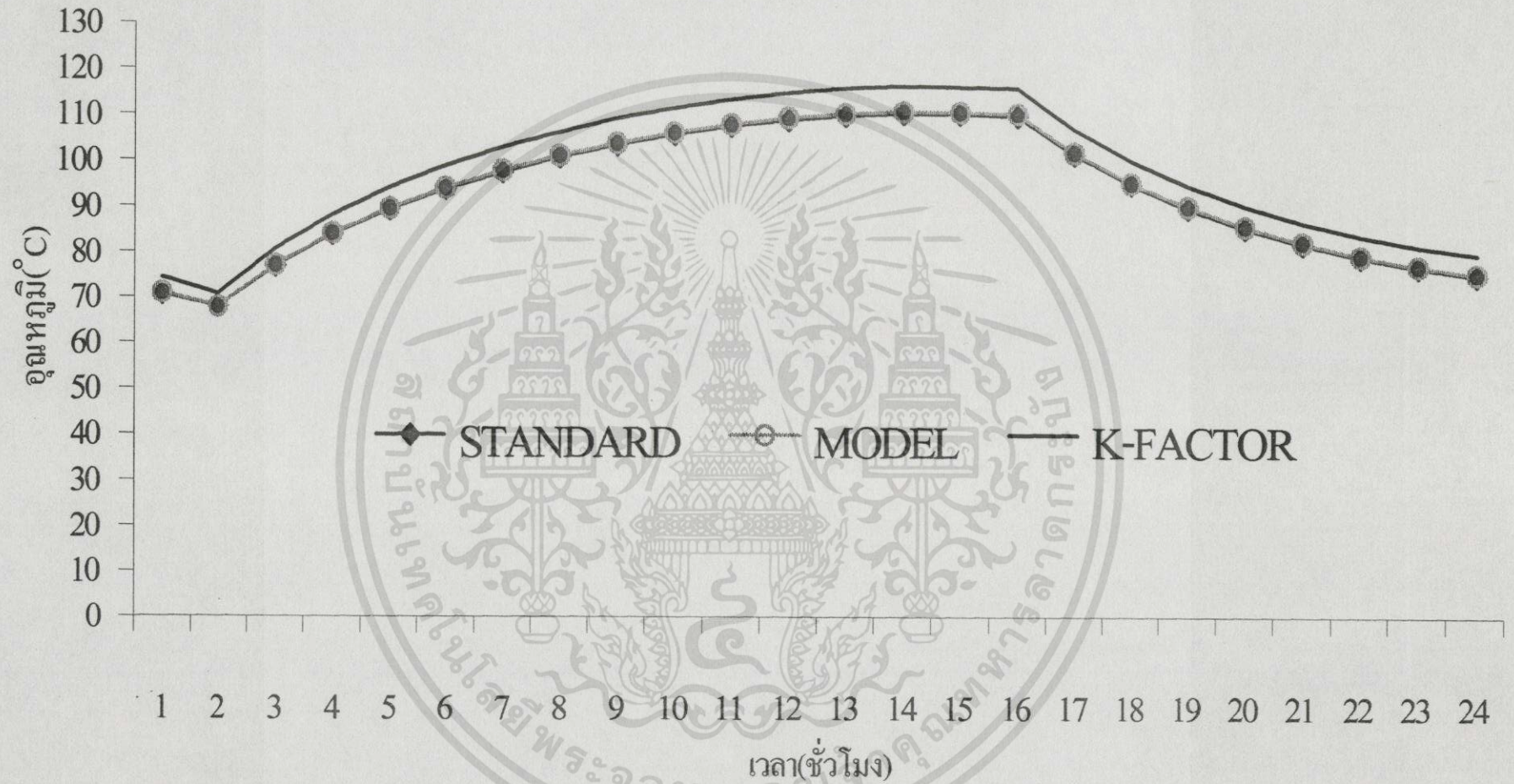
รูปที่ 5.172 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุดของตัวนำของจำลองโหลดตัวอย่างที่ 1 จากทั้ง 3 รูปแบบ



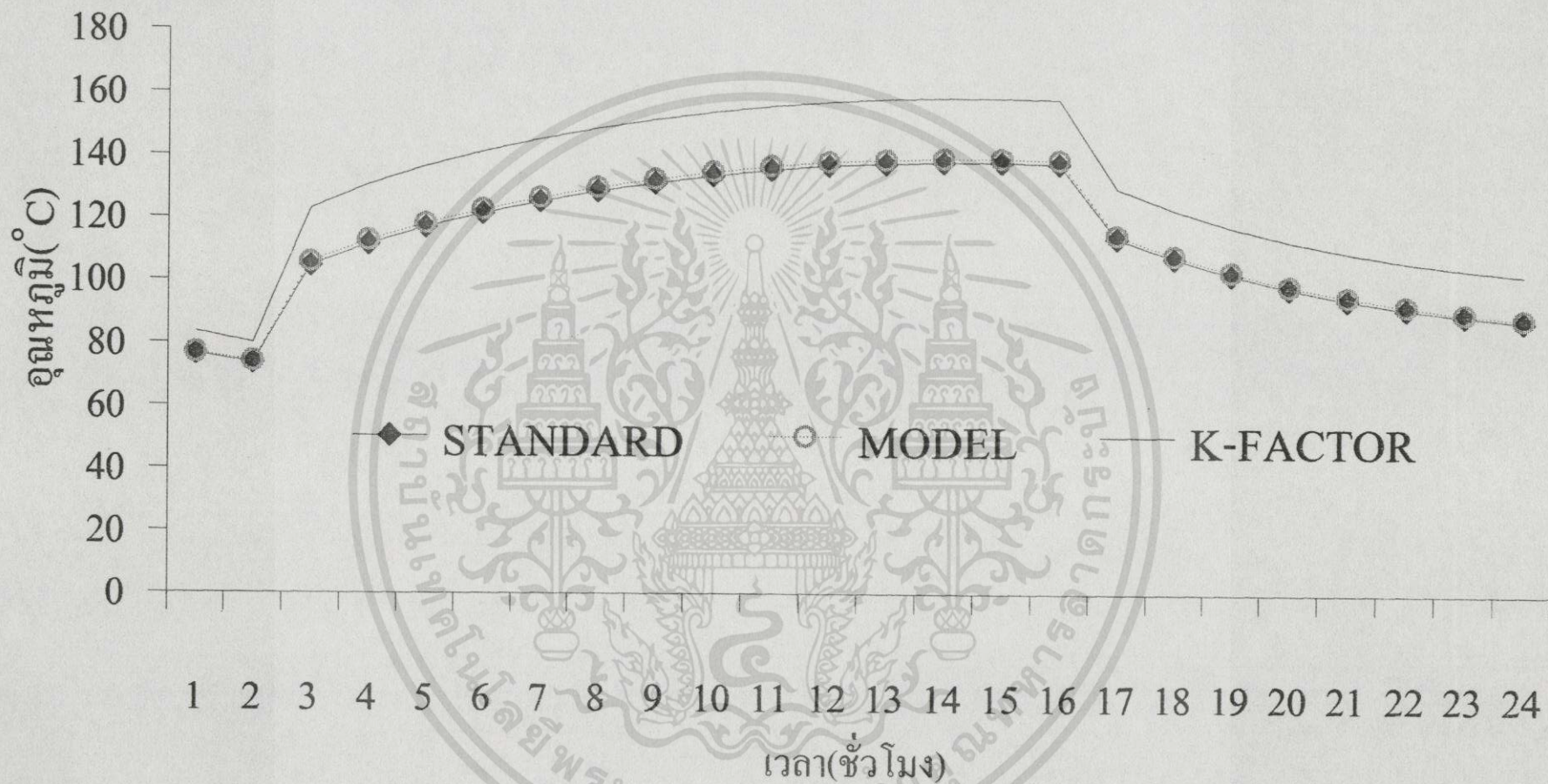
รูปที่ 5.173 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิของน้ำมันด้านบน เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยคงที่ตลอดปีของวันที่ 110 ของการจำลองโหลดตัวอย่างที่ 1 จากทั้ง 3 รูปแบบ



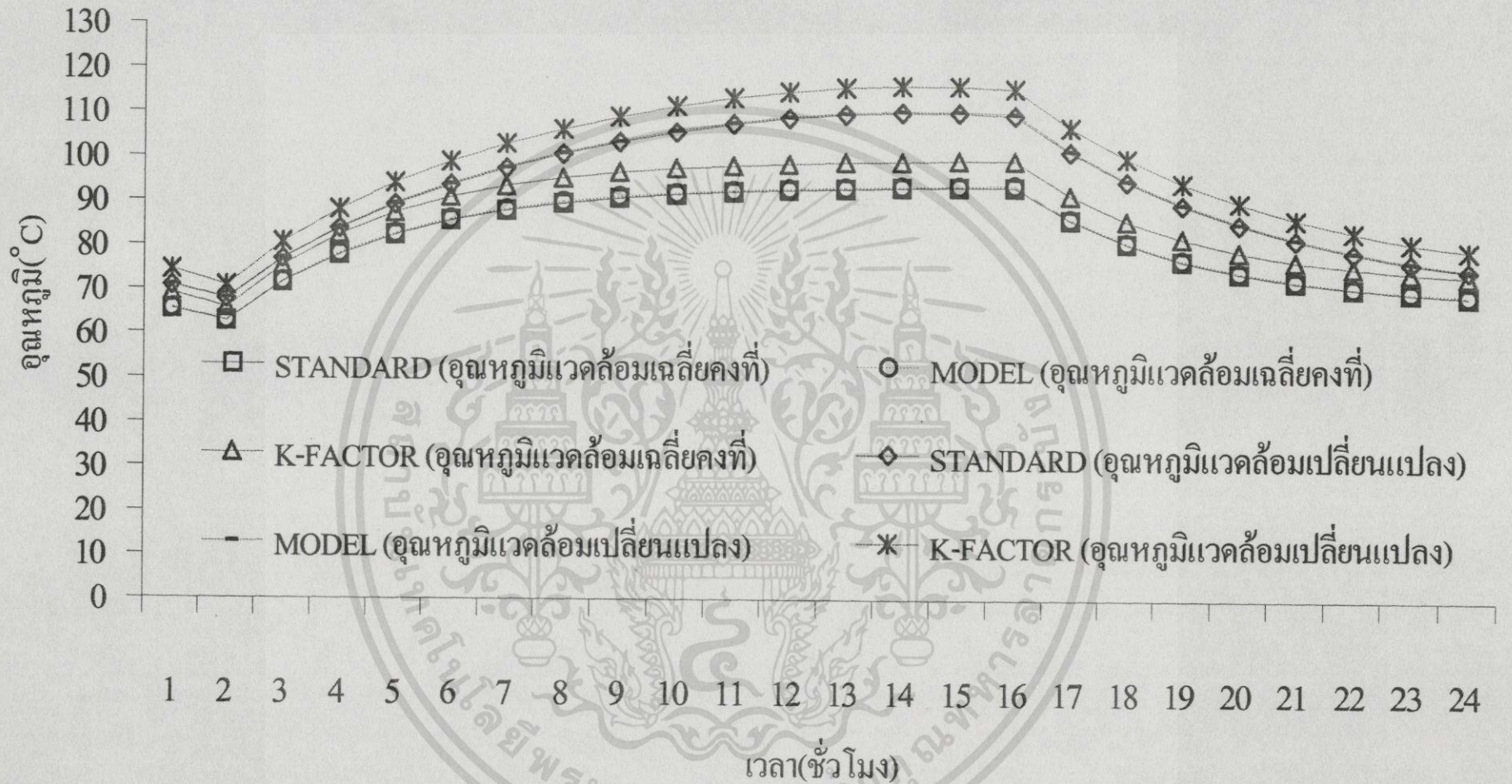
รูปที่ 5.174 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิจุกหรือสิ้นสุดของตัวนำ เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยคงที่ตลอดปีของวันที่ 110 ของการจำลองโหลดตัวอย่างที่ 1 จากทั้ง 3 รูปแบบ



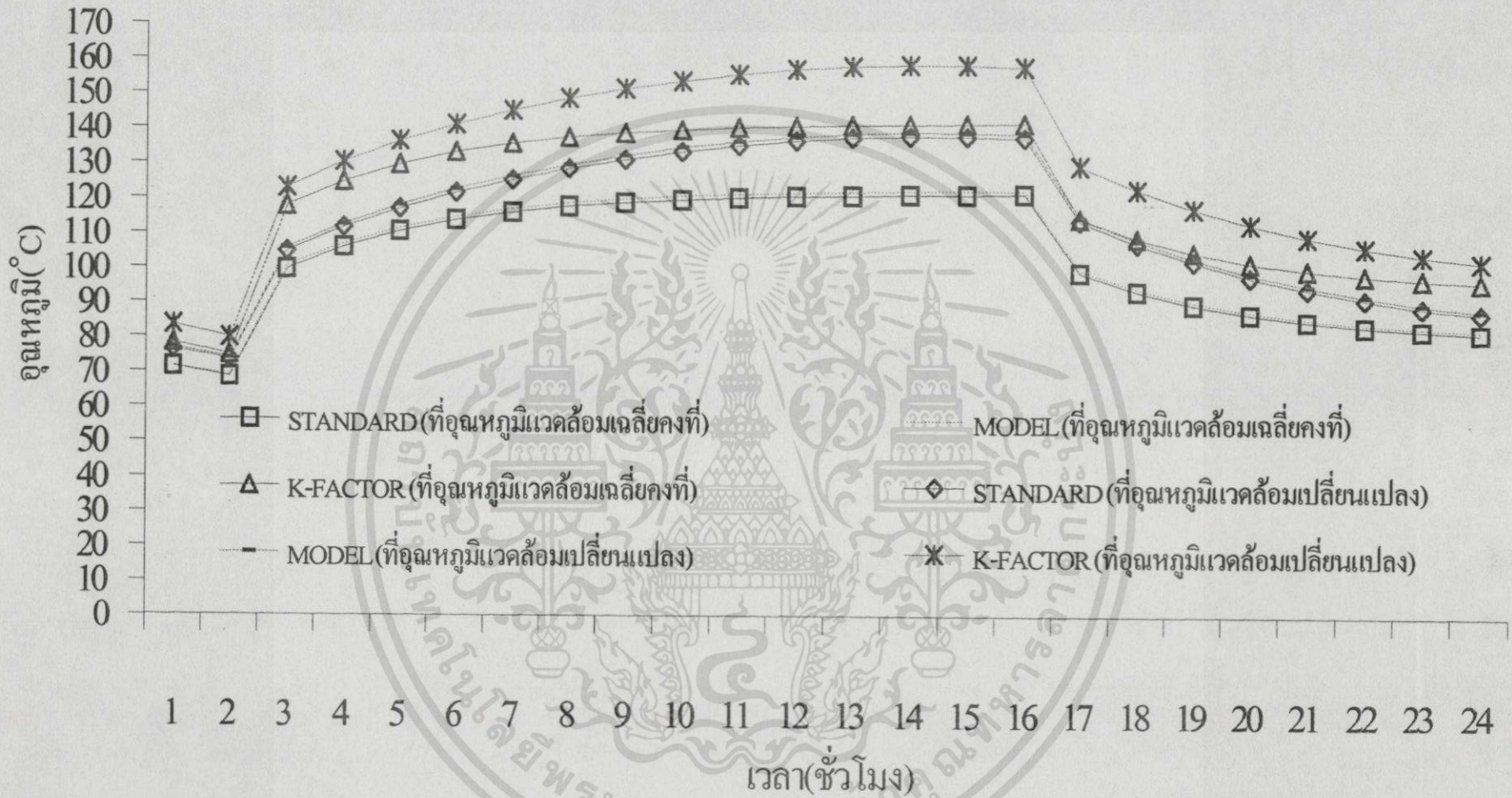
รูปที่ 5.175 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิของน้ำมันด้านบน เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปีของวันที่ 110 ของการจำลองไหลคตัวอย่างที่ 1 จากทั้ง 3 รูปแบบ



รูปที่ 5.176 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิจุดร้อนสุดของคั่วน้ำ เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปีของวันที่ 110 ของการจำลองไหลคั่วตัวอย่างที่ 1 จากทั้ง 3 รูปแบบ

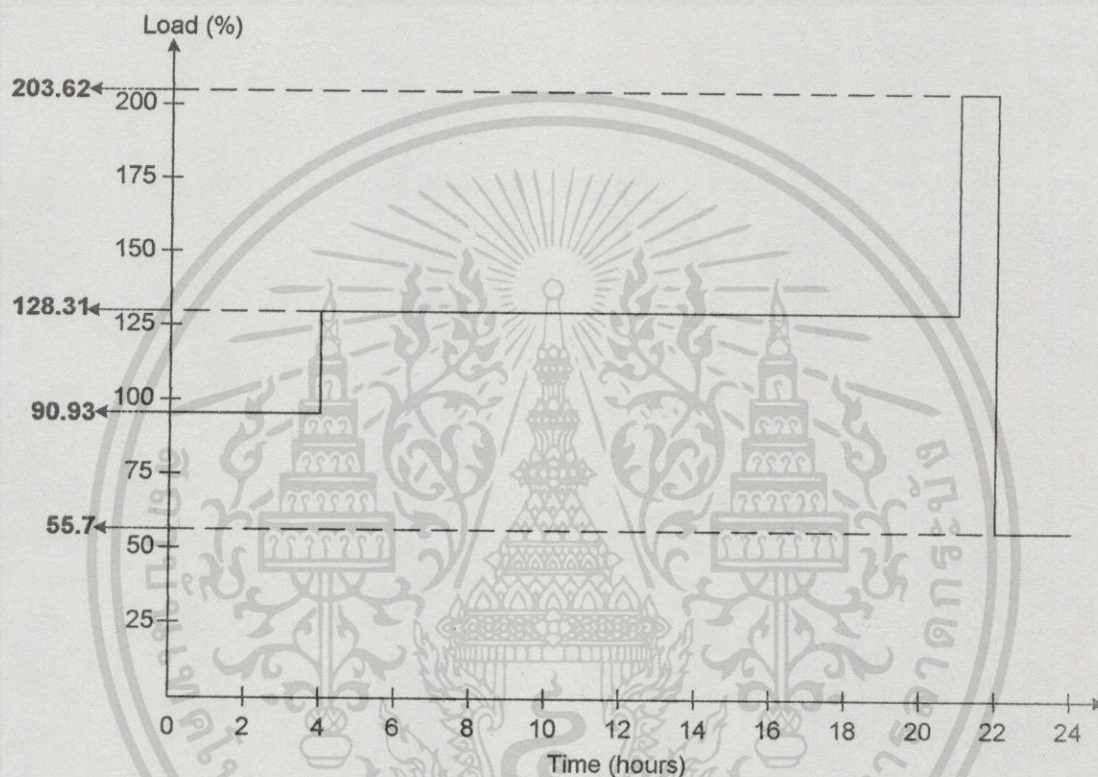


รูปที่ 5.177 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิของน้ำมันด้านบน เมื่ออุณหภูมิเวกต์อ้อมคงที่ตลอดปีกับอุณหภูมิเวกต์อ้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปี ของวันที่ 110 ของการจำลองโหลดตัวอย่างที่ 1 จากทั้ง 3 รูปแบบ



รูปที่ 5.178 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำ เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยคงที่ตลอดปีกับอุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปี ของวันที่ 110 ของการจำลองโหลดตัวอย่างที่ 1 จากทั้ง 3 รูปแบบ

ตัวอย่างที่ 2 ของการจำลองโหลดไม่เป็นเชิงเส้น โดยการทดสอบจะกำหนดระดับโหลดดังรูปที่ 5.179 และผลลัพธ์จากการคำนวณค่าต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 5.180 ถึง 5.188



รูปที่ 5.179 แสดงการจำลองโหลด 4 ระดับ ในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 5.16 แสดงการจำลองค่าขนาดต่าง ๆ ของกระแสไฟฟ้าทางด้านขดลวดปฐมภูมิ เมื่อโหลดไม่เป็นเชิงเส้น จากตัวอย่างที่ 2 ของการจำลองโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

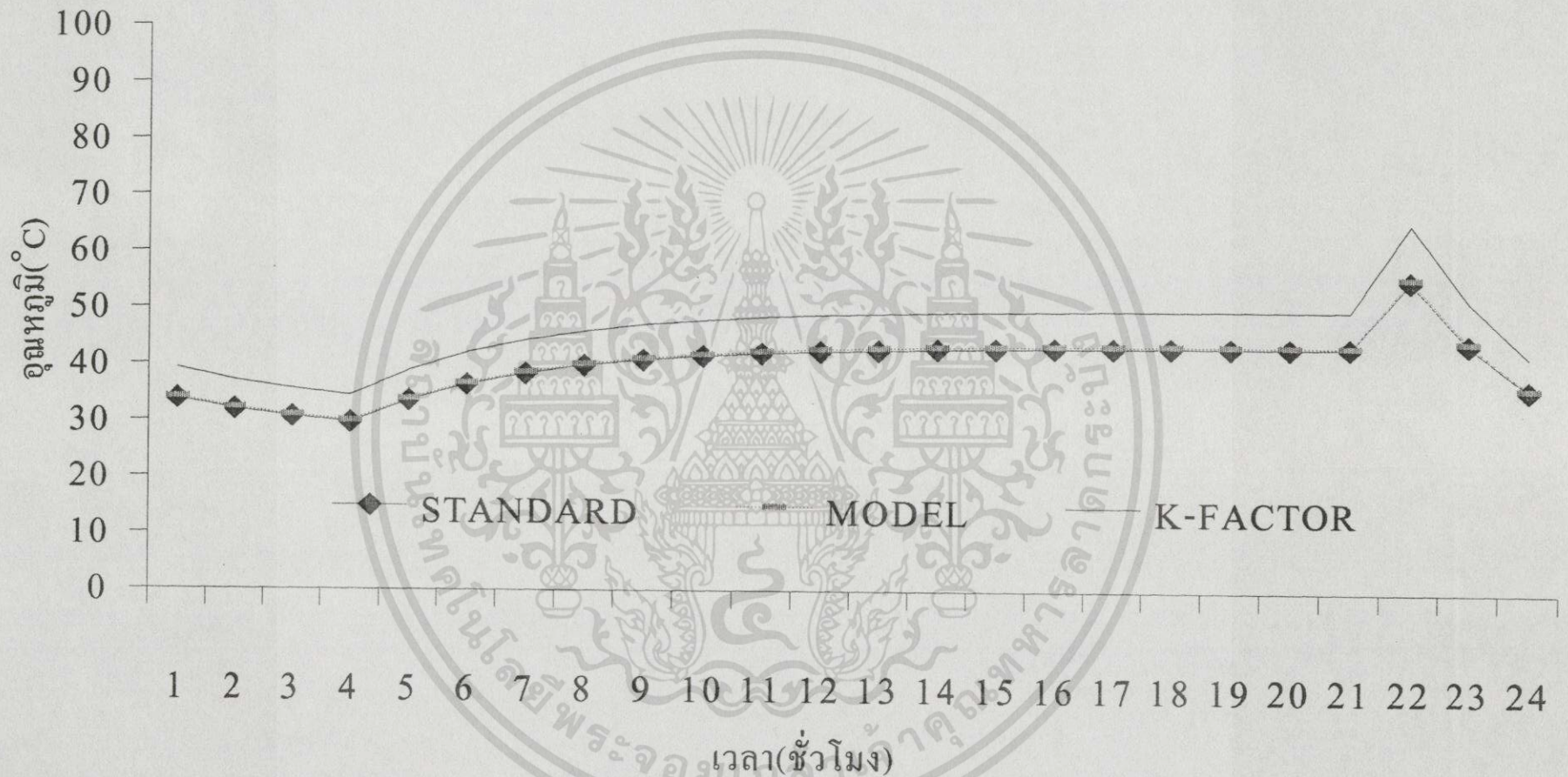
กระแสโหลด- ฮาร์โมนิก ระดับโหลดที่	THDI (%)	Irms (A/Phase)	Order									
			1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
1.	82.92	7.98	(100%) 6.143A	(0%) 0A	(75%) 4.61A	(30%) 1.843A	(0%) 0A	(12%) 0.737A	(10%) 0.614A	(0%) 0A	(8%) 0.491A	(6%) 0.369A
2.	62.66	11.261	(100%) 8.776A	(0%) 0A	(75%) 6.582A	(25%) 2.194A	(0%) 0A	(10%) 0.877A	(8%) 0.702A	(0%) 0A	(6%) 0.527A	(4%) 0.351A
3.	91.8	17.87	(100%) 13.16A	(0%) 0A	(80%) 10.53A	(40%) 5.266A	(0%) 0A	(15%) 1.975A	(10%) 1.316A	(0%) 0A	(8%) 1.053A	(6%) 0.79A
4.	49.13	4.889	(100%) 4.388A	(0%) 0A	(40%) 1.755A	(20%) 0.877A	(0%) 0A	(15%) 0.658A	(10%) 0.439A	(0%) 0A	(8%) 0.351A	(5%) 0.22A

ตารางที่ 5.17 แสดงผลการคำนวณ K-Factor และการคำนวณกำลังไฟฟ้าแต่ละฮาร์โมนิก จากการจำลองโหลด จาก ตัวอย่างที่ 2 ของการจำลองโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

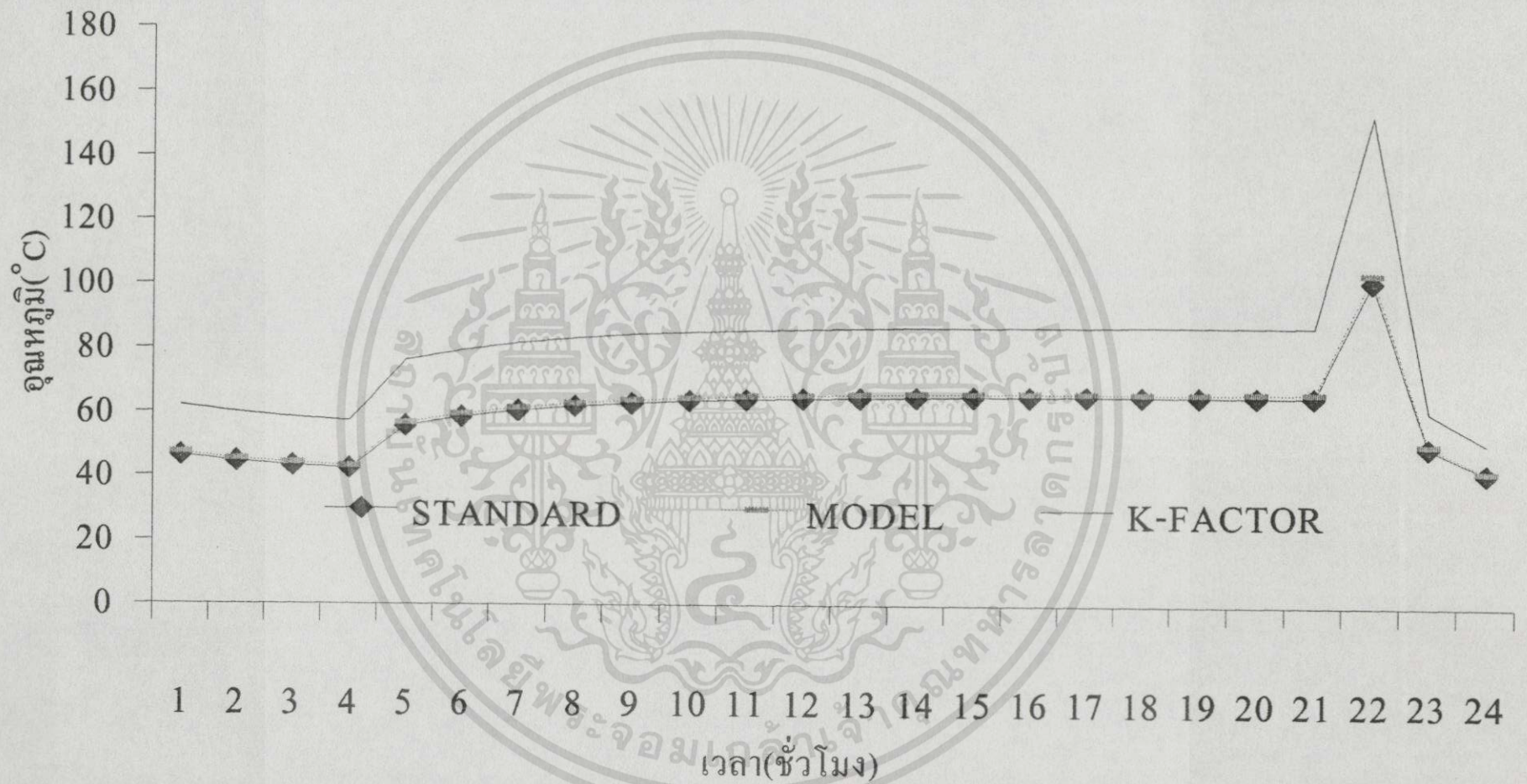
กระแสโหลด- ฮาร์โมนิก ระดับโหลดที่	K-Factor	Power Loss (Watts/Phase) of Harmonic										
		1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	Total
1.	12.775	57.586	0	33.0	5.35	0	0.94	0.69	0	0.526	0.324	98.416
2.	22.033	117.53	0	67.28	7.577	0	1.329	0.9	0	0.6	0.293	195.51
3.	72.9	264.44	0	172.23	43.65	0	6.732	3.163	0	2.42	1.485	494.12
4.	3.5315	29.382	0	4.784	1.212	0	0.747	0.351	0	0.267	0.115	36.86



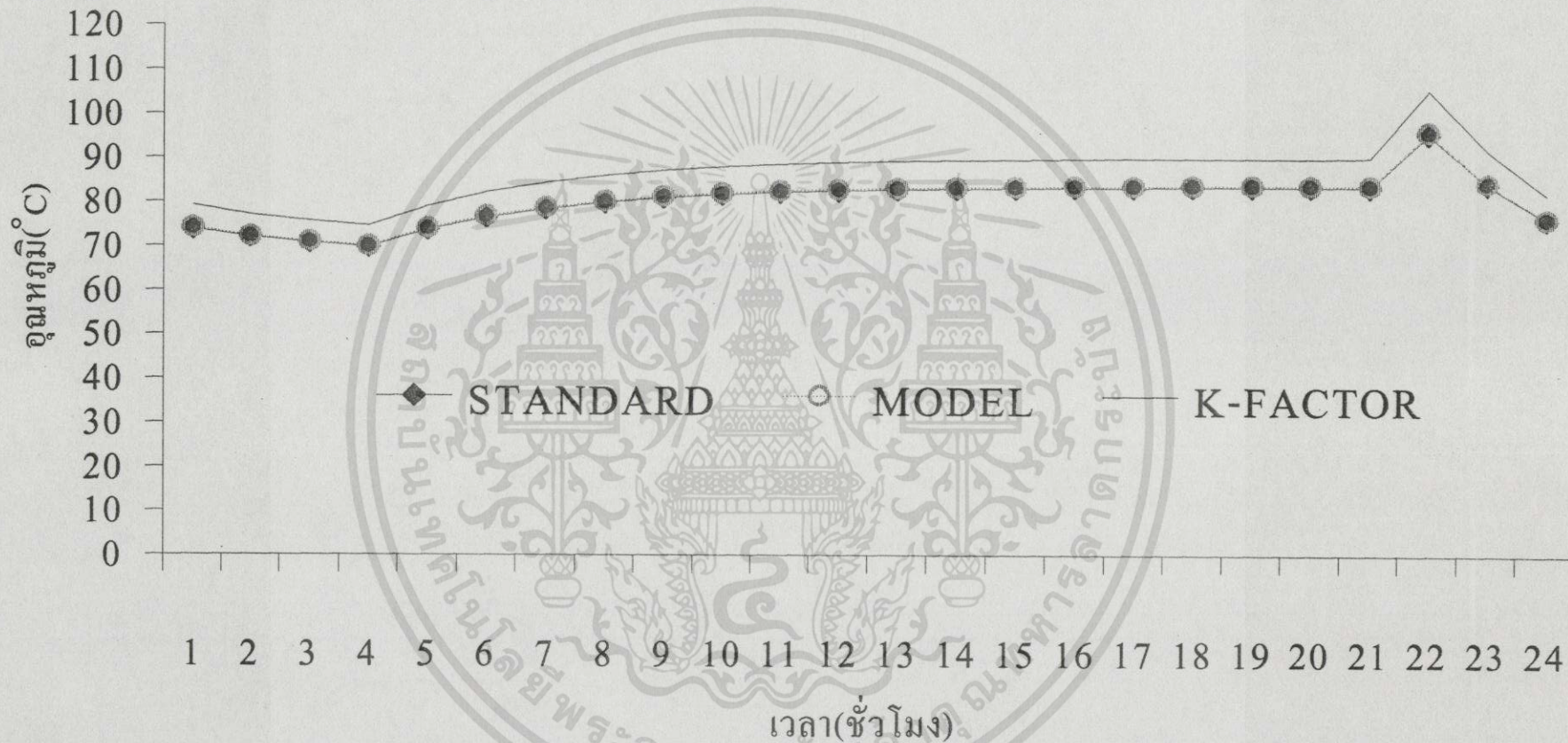
รูปที่ 5.180 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยคงที่ตลอดปี ( $\theta_{ay} = 40^{\circ}\text{C}$ ) กับอุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปี ( $\theta_{ay} = 40^{\circ}\text{C}$ ,  $A_{\text{year}} = 8$ ,  $B_{\text{day}} = 5$ ,  $DX = 115$ ,  $TX = 13$ ) ของการจำลองโหลดตัวอย่างที่ 2



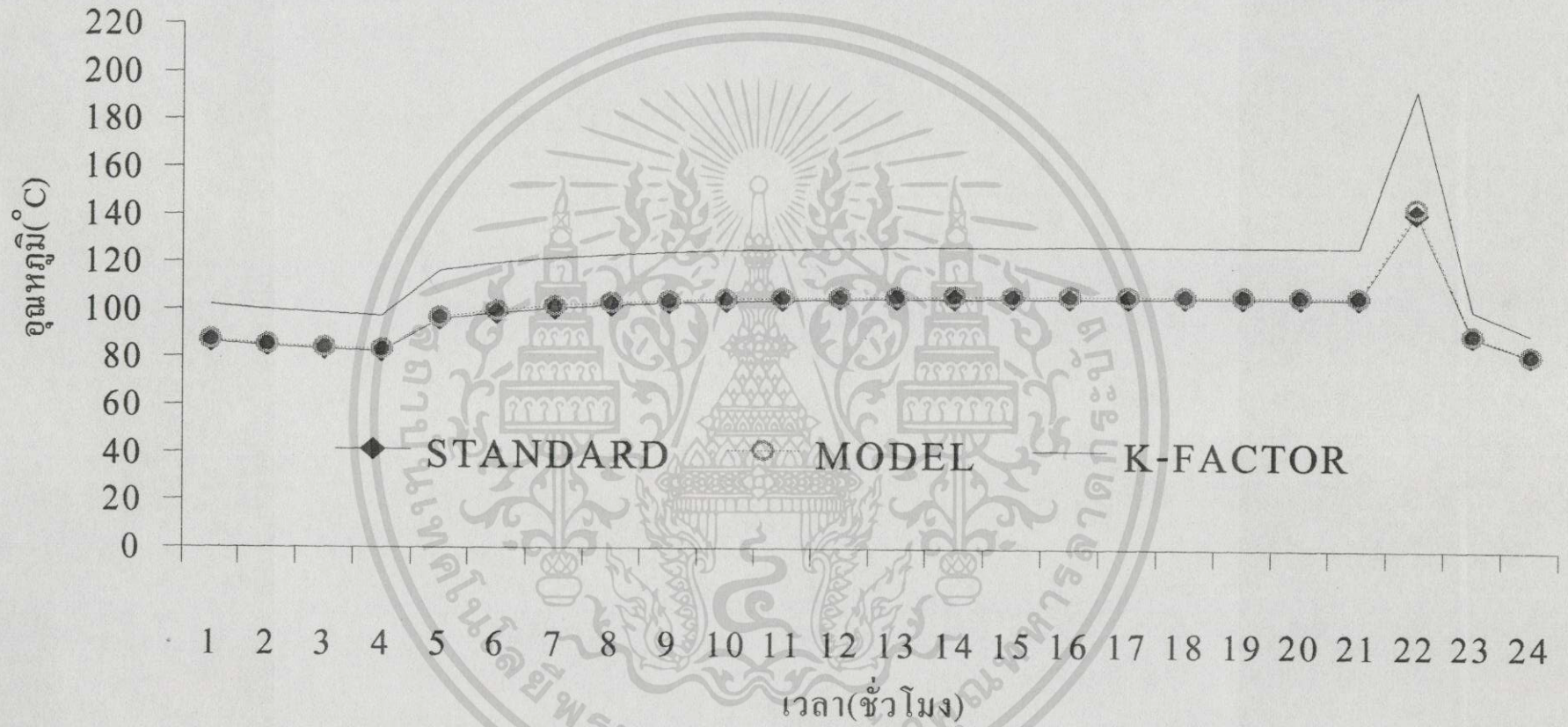
รูปที่ 5.181 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของน้ำมันด้านบนของการจำลองโหลดตัวอย่างที่ 2 จากทั้ง 3 รูปแบบ



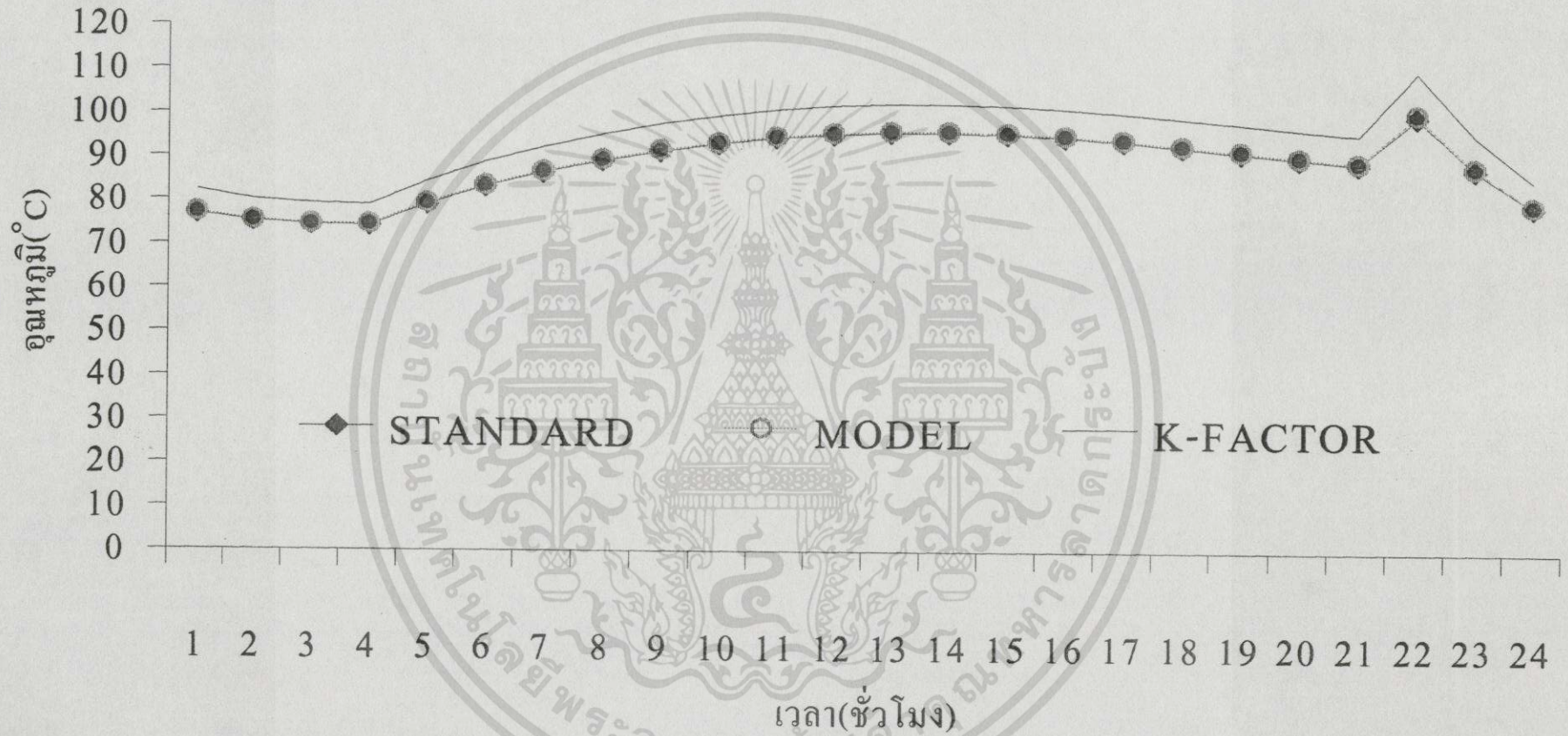
รูปที่ 5.182 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุดของตัวนำของการจำลองไหลด้วยวิธี 2 จากทั้ง 3 รูปแบบ



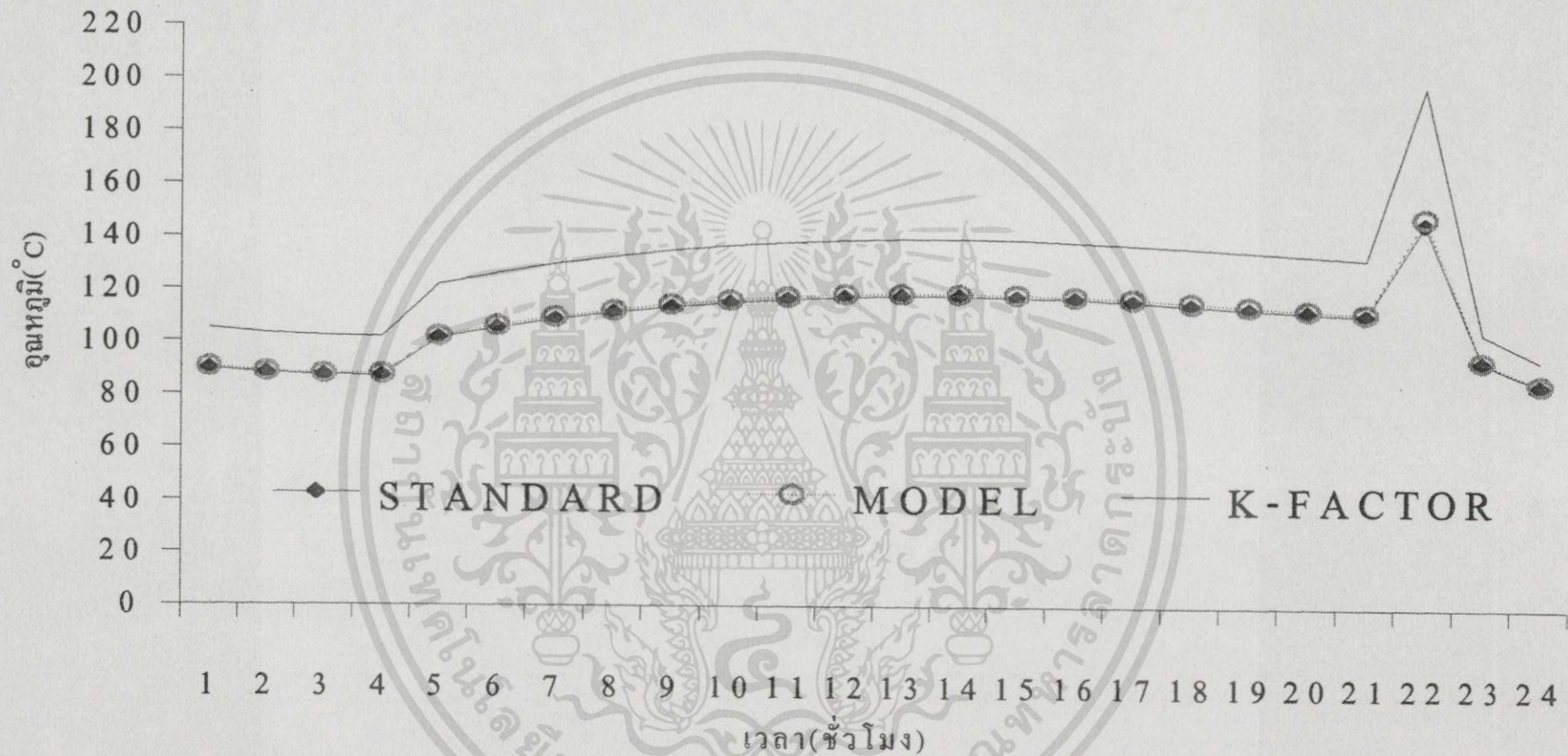
รูปที่ 5.183 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิของน้ำมันด้านบน เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยคงที่ตลอดปีของวันที่ 115 ของการจำลองโหลดตัวอย่างที่ 2 จากทั้ง 3 รูปแบบ



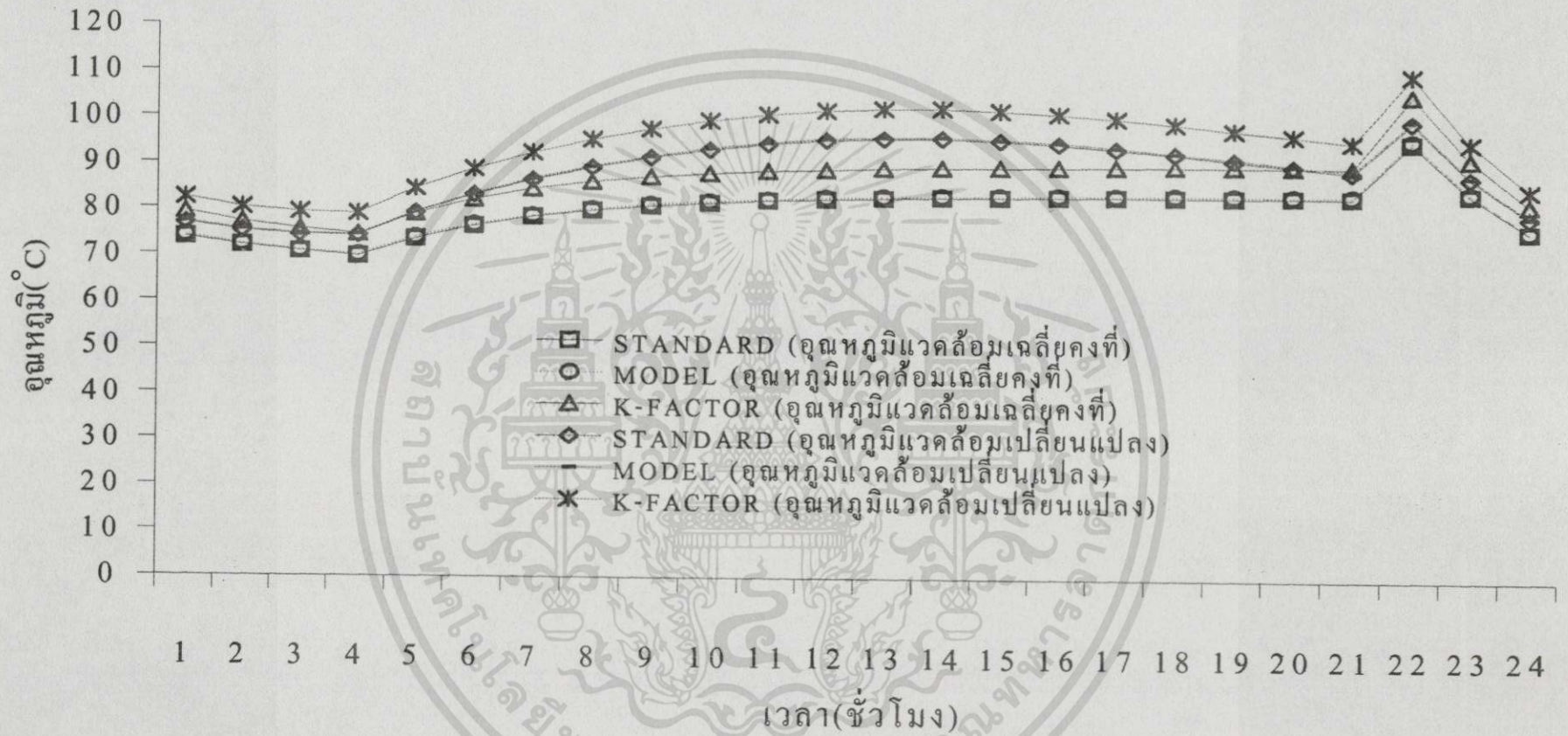
รูปที่ 5.184 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำ เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยคงที่ตลอดปีของวันที่ 115 ของการจำลองโหลดตัวอย่างที่ 2 จากทั้ง 3 รูปแบบ



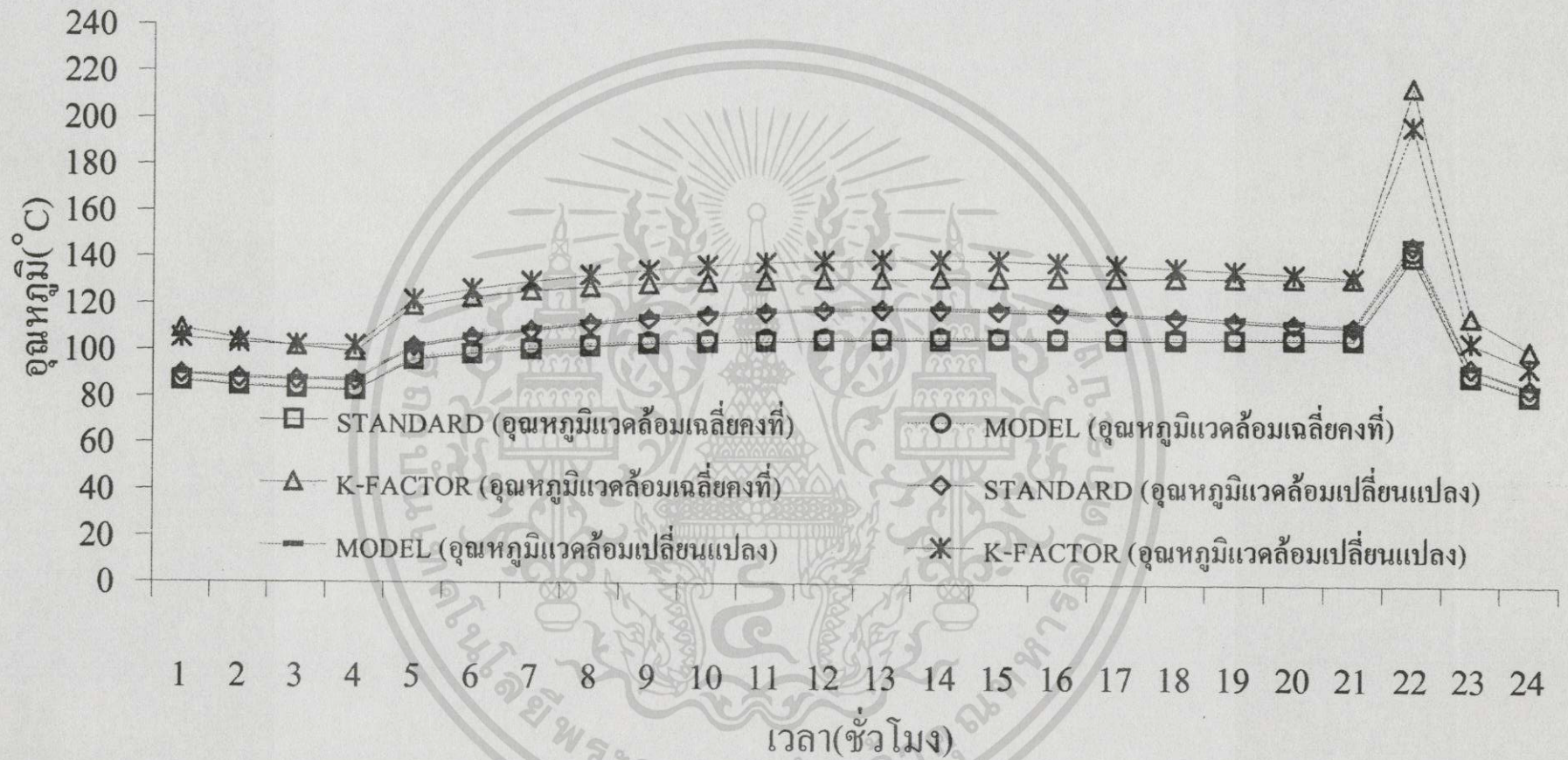
รูปที่ 5.185 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิของน้ำมันด้านบน เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปีของวันที่ 115 ของการจำลองโหลดตัวอย่างที่ 2 จากทั้ง 3 รูปแบบ



รูปที่ 5.186 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิจุกร้อนสุดของตัวนำ เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปีของวันที่ 115 ของการจำลองไหลคตัวอย่างที่ 2 จากทั้ง 3 รูปแบบ



รูปที่ 5.187 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิของน้ำมันด้านบน เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยคงที่ตลอดปีกับอุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปี ของวันที่ 115 ของการจำลองโหลดตัวอย่างที่ 2 จากทั้ง 3 รูปแบบ



รูปที่ 5.188 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิจุดร้อนสุดของคาน้ำ เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยคงที่ตลอดปีกับอุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปี ของวันที่ 115 ของการจำลองโหลดตัวอย่างที่ 2 จากทั้ง 3 รูปแบบ

## 5.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบและการคำนวณ

จากผลการทดสอบหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย, ค่าพารามิเตอร์จำเพาะทางความร้อน, อุณหภูมิของน้ำมันและลดตัวนำรวมถึงการจำลองโหลดให้กับหม้อแปลง ซึ่งผลการทดสอบที่ได้ นั้น ซึ่งสามารถแยกวิเคราะห์เป็นหัวข้อต่าง ๆ ได้ดังนี้

### 5.4.1 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการแยกทดสอบแต่ละความถี่ฮาร์โมนิก

การทดสอบที่ได้จากรูปที่ 5.12 เป็นการทดสอบหาค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลดที่ความถี่ฮาร์โมนิกต่าง ๆ นั้น ผลลัพธ์จากเส้นกราฟซึ่งเป็นเส้นแนวโน้ม ซึ่งสามารถทำให้ทราบค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ต่าง ๆ ได้ เมื่อพิจารณาที่เส้นกราฟรูปที่ 5.13 จะเห็นว่าค่า  $K_n$  จะค่อย ๆ เพิ่มมากขึ้นที่ลำดับฮาร์โมนิกสูง ๆ ซึ่งแสดงว่าค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับจะสูงขึ้น ดังนั้นจะส่งผลทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสฮาร์โมนิกมีมากขึ้นตามปริมาณค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับที่เกิดขึ้นจะแปรตามความถี่ไฟฟ้า, ตัวนำสารแม่เหล็ก และพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดตัวนำ จากการออกแบบหม้อแปลงตัวที่ใช้ทดสอบนี้ ที่ขดลวดปฐมภูมิมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 1.80 mm ส่วนขดลวดทุติยภูมิมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 3.20 mm ดังนั้นค่า  $K_n$  ของขดลวดจะมีค่าต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 5.2

เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิหม้อแปลงที่ได้จากการทดสอบกับการคำนวณของ Model นั้น จะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกันพอสมควร เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 2.44 คือ

$$\text{Hottest-spot over top oil } (\Theta_{gu}) = \left[ \frac{[(I_{rms})^2 \cdot R_{dc}] + (4 \times P_{ecw})}{[(I_{rms\_R})^2 \cdot R_{dc}] + (4 \times P_{ecw\_R})} \right]^{0.8} \cdot \Theta_{gr}$$

เมื่อกำหนดให้  $Z$  เป็นอัตราส่วนของ  $P_{LL}$  ที่จุดร้อนสุดของตัวนำที่โหลดใด ๆ ต่อ  $P_{LL\_R}$  ที่จุดร้อนสุดของตัวนำที่พิกัดโหลด แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} Z &= \frac{(I_{rms})^2 \cdot R_{dc} + (4 \times P_{ecw})}{(I_{rms\_R})^2 \cdot R_{dc} + (4 \times P_{ecw\_R})} \\ &= \frac{(I_{rms})^2 \cdot R_{dc} + 4(P_{LL} - (I_{rms})^2 \cdot R_{dc})}{(I_{rms\_R})^2 \cdot R_{dc} + 4(P_{LL\_R} - (I_{rms\_R})^2 \cdot R_{dc})} \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$Z = \frac{4P_{LL} - 3(I_{rms})^2 \cdot R_{dc}}{4P_{LL\_R} - 3(I_{rms\_R})^2 \cdot R_{dc}} \quad (5.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแทน  $R_{dc}$  ด้วยตัวเลขใดๆ ผลลัพธ์จะให้ค่า  $Z$  มีค่าใกล้เคียงกันทุกๆ ครั้ง ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้จากตารางที่ 5.18

ตารางที่ 5.18 แสดงผลการทดสอบหาค่าอัตราส่วนของ  $P_{LL}$  ที่จุดร้อนสุดของตัวนำที่โหลดใด ๆ ต่อ  $P_{LL\_R}$  ที่จุดร้อนสุดของตัวนำที่พิกัดโหลด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า  $R_{dc}$

ลำดับ	ข้อมูลจากตารางที่	$R(h)$ ที่ทดสอบได้	$R_{dc}$ ที่กำหนด, โอห์ม	$Z$	% relative error
1.	5.9 ลำดับโหลดที่ 1	จากตารางที่ 5.2	1.457	1.308	0
	5.9 ลำดับโหลดที่ 1	จากตารางที่ 5.2	5	1.281	-2.064
	5.9 ลำดับโหลดที่ 1	จากตารางที่ 5.2	0.001	1.292	-1.223
2.	5.9 ลำดับโหลดที่ 2	จากตารางที่ 5.2	1.457	0.130	0
	5.9 ลำดับโหลดที่ 2	จากตารางที่ 5.2	5000	0.125	-3.846
	5.9 ลำดับโหลดที่ 2	จากตารางที่ 5.2	0.00001	0.126	-3.08
3.	5.10 ลำดับโหลดที่ 1	จากตารางที่ 5.2	1.457	0.072970	0
	5.10 ลำดับโหลดที่ 1	จากตารางที่ 5.2	50	0.072015	-1.309
	5.10 ลำดับโหลดที่ 1	จากตารางที่ 5.2	0.3	0.072341	-0.862
4.	5.10 ลำดับโหลดที่ 3	จากตารางที่ 5.2	1.457	0.403	0
	5.10 ลำดับโหลดที่ 3	จากตารางที่ 5.2	10000	0.392	-2.73
	5.10 ลำดับโหลดที่ 3	จากตารางที่ 5.2	0.000001	0.395	-1.985
5.	5.14 ลำดับโหลดที่ 1	จากตารางที่ 5.2	1.457	0.320	0
	5.14 ลำดับโหลดที่ 1	จากตารางที่ 5.2	1000	0.310	-3.125
	5.14 ลำดับโหลดที่ 1	จากตารางที่ 5.2	0.5	0.314	-1.875

หมายเหตุ การคิดค่า relative error โดยสมมติให้ค่า  $Z$  ที่ได้จาก  $R_{dc} = 1.457$  โอห์ม เป็นค่าจริง

จากสมการที่ 5.2 เมื่อแทน  $R_{dc}$  ด้วย 0 จะได้ค่า  $Z$  ดังต่อไปนี้

$$Z = \frac{P_{LL}}{P_{LL\_R}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=\alpha} I_{(h)}^2 \times R'_{ps(h)}}{I_{rms\_R}^2 \times R'_{ps(1)}}$$

ดังนั้นสามารถปรับสมการที่ 2.44 เป็นสมการต่อไปนี้

$$\text{Hottest-spot over top oil } (\Theta_{gu}) = \left[ \frac{P_{LL}}{P_{LL\_R}} \right]^{0.8} \cdot \Theta_{gr} \quad (5.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.31 ของ IEEE คือ

$$\Theta_{gu} = \Theta_{gr} K^{2n}$$

เมื่อ

$$K = \frac{I_{rms}}{I_{rms\_R}}$$

ดังนั้น

$$\Theta_{gu} = \Theta_{gr} \left( \frac{I_{rms}}{I_{rms\_R}} \right)^{2n}$$

เมื่อ  $n = 0.8$  สำหรับหม้อแปลงระบายความร้อนแบบ ONAN

ดังนั้น

$$\Theta_{gu} = \Theta_{gr} \left( \left( \frac{I_{rms}}{I_{rms\_R}} \right)^2 \right)^{0.8}$$

จากผลการทดสอบอุณหภูมิของ Standard กับ Model มีค่า  $\Theta_{gu}$  ใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นสมการที่ 2.31 กับสมการที่ 2.44 มีค่าประมาณเท่าๆ กัน ซึ่งก็หมายความว่า

$$\frac{P_{LL}}{P_{LL\_R}} = \left( \frac{I_{rms}}{I_{rms\_R}} \right)^2 \quad (5.4)$$

หรือ

$$P_{LL} = P_{LL\_R} \left( \frac{I_{rms}}{I_{rms\_R}} \right)^2 \quad (5.5)$$

ดังนั้น เมื่อต้องการทราบค่า  $P_{LL}$  ของหม้อแปลง ก็จะสามารถหาได้ง่าย จากสมการที่ 5.5

#### 5.4.2 พารามิเตอร์ทางความร้อน

จากผลการทดลองทั้ง 3 อย่าง ได้แก่ 1. การทดสอบโดยการลัดวงจร 2. การใช้โหลดเชิงเส้น 3. การใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้น สามารถสรุปเป็นค่าพารามิเตอร์แต่ละค่าได้ดังนี้

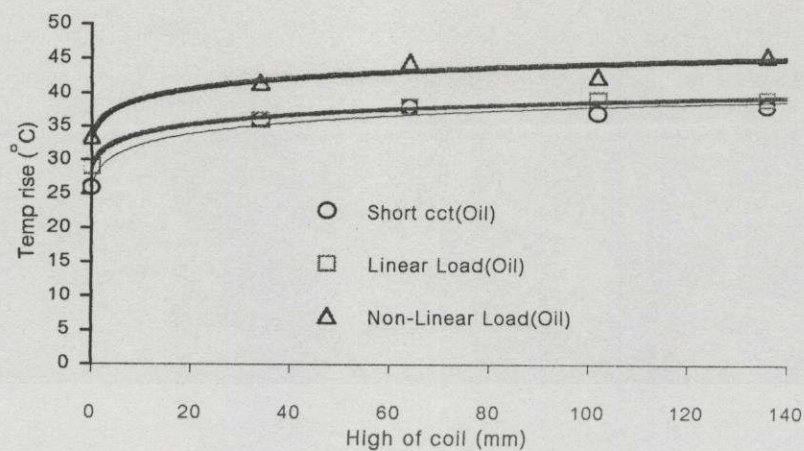
1. จากตารางที่ 5.5 เป็นผลการคำนวณเห็นว่าค่าอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนของการทดสอบแบบโหลดเชิงเส้นมีค่าใกล้เคียงกับวิธีการลัดวงจร ส่วนการใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นค่าอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนจะมีค่าสูงกว่า 2 แบบแรกอีกประมาณ 9.7 % ซึ่งแสดงว่าสามารถใช้การทดสอบโดยวิธีลัดวงจรแทนการทดสอบแบบใช้โหลดเชิงเส้นได้ และแสดงว่าเมื่อเกิดกระแสฮาร์โมนิกในหม้อแปลงทำให้ค่าอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนมีค่าสูงขึ้นกว่าเดิม
2. จากตารางที่ 5.6 เป็นผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของขดลวดแรงดันสูงกับขดลวดแรงดันต่ำในสถานะทดสอบแบบลัดวงจร, ใช้โหลดเชิงเส้นและโหลดไม่เป็นเชิงเส้น จากผลการทดสอบทั้ง 3 เงื่อนไข พบว่าอุณหภูมิขดลวดแรงดันสูงและขดลวดแรงดันต่ำมีค่าใกล้เคียงกัน สาเหตุเพราะการออกแบบหม้อแปลงตัวนี้จะใช้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ขดลวดแรงดันสูงใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density) =  $3.45 \text{ A/mm}^2$  และขดลวดแรงดันต่ำใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density) =  $3.26 \text{ A/mm}^2$
3. จากตารางที่ 5.6 เป็นผลการคำนวณซึ่งจะเห็นว่าค่าพารามิเตอร์  $\Theta_{WR}$  ของการทดสอบแบบโหลดเชิงเส้นมีค่าใกล้เคียงกับวิธีการลัดวงจร ส่วนการใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นค่า  $\Theta_{WR}$  จะมีค่าสูงกว่า 2 เงื่อนไขแรก ( $\Theta_{WR}(\text{sec})$  มากกว่า 9.6 % ถึง 10.35% และ ( $\Theta_{WR}(\text{pri})$  มากกว่า 6.9% ถึง 10.8%) ซึ่งแสดงว่าสามารถใช้การทดสอบโดยวิธีลัดวงจรแทนการทดสอบแบบใช้โหลดเชิงเส้นได้ และแสดงว่าเมื่อเกิดกระแสฮาร์โมนิกในหม้อแปลงทำให้ค่า  $\Theta_{WR}$  มีค่าสูงขึ้น
4. จากตารางที่ 5.7 เป็นผลการคำนวณค่า  $R_{eq}(\text{d.c})$  ของการทดสอบทั้ง 3 เงื่อนไข จะเห็นว่าค่า  $R_{eq}(\text{d.c})$  ของวิธีการลัดวงจรมีค่าต่ำกว่าการทดสอบแบบใช้โหลดเชิงเส้นเล็กน้อย ส่วน  $R_{eq}(\text{d.c})$  ของวิธีการใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นจะมีค่าสูงกว่า 2 เงื่อนไขแรก แสดงว่าเมื่อเกิดกระแสฮาร์โมนิกในหม้อแปลงทำให้ค่าอุณหภูมิขดลวดตัวนำสูงขึ้น ซึ่งอุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้จะมีผลต่อความต้านทานของขดลวดตัวนำมีค่าสูงขึ้นตามด้วย
5. จากตารางที่ 5.8 เป็นผลการเปรียบเทียบจากการทดสอบค่า  $g_r$  จากทั้ง 3 เงื่อนไข จะเห็นว่า การทดสอบโดยวิธีการลัดวงจรและการทดสอบโดยการใช้โหลดเชิงเส้นมีค่า  $g_r$  ใกล้เคียงกัน ซึ่งหมายความว่า สามารถแทนการทดสอบโดยใช้โหลดจริงด้วยวิธีการลัดวงจรได้ แต่การทดสอบโดยใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นจะมีค่า  $g_r$  ต่ำกว่าประมาณ  $1-2^\circ\text{C}$  ซึ่งถือว่าต่างกันเล็กน้อย ส่วนผลการ

คำนวณหาค่า  $g_r$  จากทั้ง 3 วิธีก็มามีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก และผลจากการคำนวณมีค่าสูงกว่าทดสอบเล็กน้อย ซึ่งสาเหตุมาจากการผลการเขียนกราฟหาค่าความต้านทาน ณ จุดตัดกระแสไฟฟ้า ( $R_{t2}$ ) ผิดพลาดบ้างเล็กน้อย รวมถึงข้อผิดพลาดอันเนื่องมาจากเครื่องมือที่ใช้วัดค่าความต้านทานลวดตัวนำ

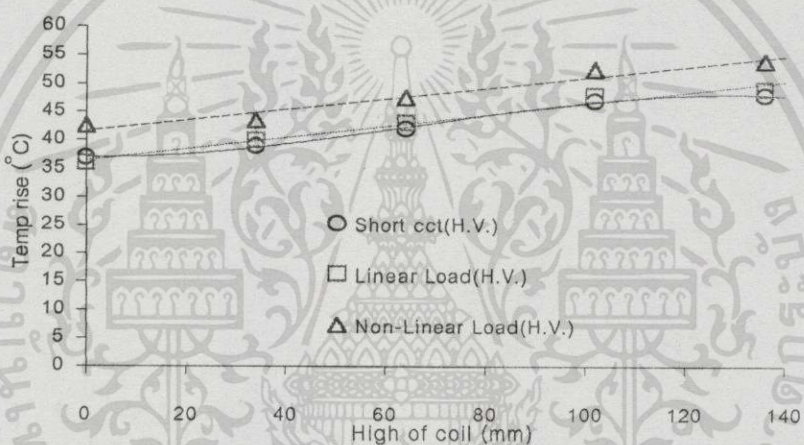
### 5.4.3 การเปรียบเทียบพฤติกรรมของความร้อน

จากผลการทดสอบและการคำนวณอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลง จะสามารถแยกวิเคราะห์ได้เป็นข้อ ๆ ดังนี้

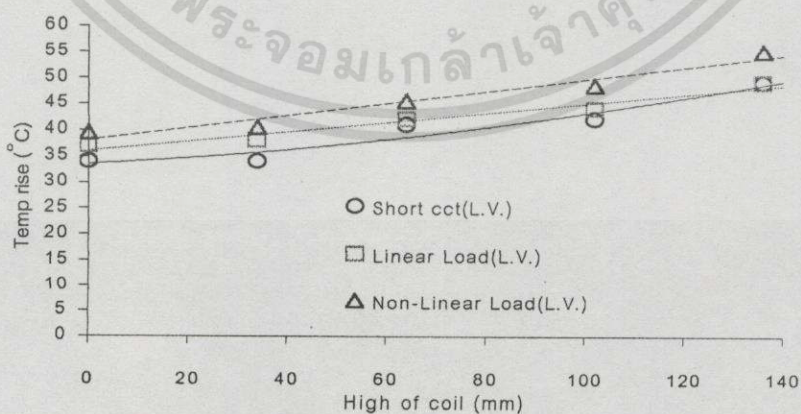
1. จากรูปที่ 5.85 ถึง 5.90 เป็นผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำมันกับอุณหภูมิขดลวดแรงดันสูงและแรงดันต่ำในสภาวะทดสอบแบบลัดวงจร, ใช้โหลดเชิงเส้นและโหลดไม่เป็นเชิงเส้น จากผลการทดสอบทั้ง 3 เงื่อนไข พบว่าอุณหภูมิขดลวดจะสูงกว่าอุณหภูมิของน้ำมัน เมื่อเปรียบเทียบที่ระดับความสูงเดียวกัน
2. จากรูปที่ 5.85 ถึง 5.90 เป็นผลของอุณหภูมิของขดลวดแรงดันสูงและแรงดันต่ำในสภาวะทดสอบแบบลัดวงจร, ใช้โหลดเชิงเส้นและโหลดไม่เป็นเชิงเส้น จากผลการทดสอบทั้ง 3 เงื่อนไข พบว่าอุณหภูมิขดลวดด้านบนสูงกว่าขดลวดด้านล่างตลอดช่วงการทดสอบ เพราะฉะนั้นค่าอุณหภูมิที่สูงส่งผลทำให้ฉนวนด้านบนเสื่อมสภาพเร็วกว่าบริเวณตำแหน่งอื่น ๆ
3. จากรูปที่ 5.111 ถึง 5.112 เป็นผลของอุณหภูมิของขดลวดแรงดันสูงและแรงดันต่ำ จะเห็นว่าอุณหภูมิตำแหน่งที่ 1, 8 จะมีค่าต่ำสุด ส่วนตำแหน่งที่ 3, 5, 6, 7, 11 มีค่าสูงสุด สาเหตุอันเนื่องมาจากตำแหน่งที่ 1, 8 มีการหมุนเวียนของน้ำมันได้ดีกว่าตำแหน่งอื่น ๆ ส่วนตำแหน่ง 3, 5, 6, 7, 11 เป็นตำแหน่งที่อยู่บริเวณร่องน้ำมัน ระหว่างขดลวดแรงดันสูงและแรงดันต่ำ ซึ่งมีการหมุนเวียนของน้ำมันไม่ดีนัก จึงทำให้บริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิสูง
4. จากสมการที่ 5.2 ถึง 5.10 เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดและน้ำมัน จากการทดสอบทั้ง 3 เงื่อนไข ซึ่งเห็นได้ว่าการทดสอบโดยใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นนั้นจะให้ค่าอุณหภูมิเพิ่มสูงกว่าวิธีการลัดวงจรและการใช้โหลดเชิงเส้น โดยเปรียบเทียบที่ตำแหน่งเดียวกัน ซึ่งสามารถนำมาเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 5.189 ถึง 5.191



รูปที่ 5.189 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของน้ำมันจากวิธีการทดสอบทั้ง 3 เงื่อนไข



รูปที่ 5.190 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของลวดตัวนำด้านแรงดันสูง จากวิธีการทดสอบทั้ง 3 เงื่อนไข



รูปที่ 5.191 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของลวดตัวนำด้านแรงดันต่ำ จากวิธีการทดสอบทั้ง 3 เงื่อนไข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 189 ถึง 191 เป็นผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 3 เองใจ ซึ่งเห็นว่าความชันของเส้นอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดค่อนข้างจะเป็นเชิงเส้นตรง ส่วนเส้นของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันค่อนข้างจะโค้ง ซึ่งผลที่ได้ทำให้ทราบว่าอุณหภูมิน้ำมันที่ระดับกลางถึงกับด้านบนถึงมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงว่าระบบการหมุนเวียนของน้ำมันในหม้อแปลงที่ออกแบบ ONAN ไม่ค่อยดีนัก

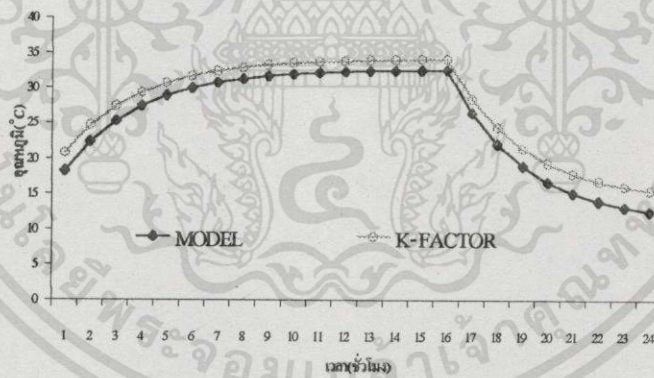
5. จากรูปที่ 5.92 ถึง 5.94 เป็นการเปลี่ยนแปลงระดับโหลดประเภทเชิงเส้น 5 ระดับ ซึ่งค่าจากการทดสอบเปรียบเทียบกับจากการคำนวณโดยใช้รูปแบบ Standard จะเห็นว่าค่าอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันหม้อแปลงหรืออุณหภูมิเพิ่มของจุดร้อนสุดมีค่าใกล้เคียงกันที่ช่วงเวลาลาย ส่วนช่วงเวลาริมต้นจะมีค่าแตกต่างกันมาก สาเหตุอันเนื่องมาจากการทดสอบอุณหภูมิเริ่มต้นขณะหม้อแปลงไร้ภาระยังไม่คงตัว ส่วนสมการที่ใช้ นั้นจะใช้กับสถานะอุณหภูมิเริ่มต้นขณะหม้อแปลงไร้ภาระคงตัวแล้ว

6. จากรูปที่ 5.129 ถึง 5.167 เป็นผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างการทดสอบกับการคำนวณจากทั้ง 3 รูปแบบ ซึ่งเห็นได้ว่าการใช้รูปแบบของ Standard กับ Model มีค่าใกล้เคียงกันมาก เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิจากการทดสอบและการคำนวณ จะเห็นได้ว่าค่าจากการคำนวณ Standard และ Model จะมีค่าสูงกว่าการทดสอบเล็กน้อย ส่วนแบบ K-factor ค่าจากการคำนวณจะสูงกว่าการทดสอบค่อนข้างมาก สาเหตุอันเนื่องมาจากซึ่งการใช้ K-factor หากค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนที่ขดลวดนั้นเป็นเพียงแค่การคาดเดา ข้อแนะนำของการใช้ K-factor มาพิจารณา ก็คือผลของการใช้ K-factor จะมีค่าใกล้เคียงความจริงมากที่สุดเมื่อขนาดของกระแสอาร์โมนิกลำดับที่  $h$  มีค่าไม่มากกว่า  $\frac{1}{h}$  ของกระแสมูลฐาน ซึ่งเห็นได้จากการทดสอบอุณหภูมิขณะภาระไม่เป็นเชิงเส้น โดยเมื่อมีการต่อตัวเก็บประจุขนานกับโหลด(แห่งลวดความร้อนกับหลอดอินแคนเดสเซนต์) ซึ่งเห็นได้ว่าค่าของกระแสอาร์โมนิกลำดับที่  $h$  มีค่ามากกว่า  $\frac{1}{h}$  ของกระแสมูลฐาน ซึ่งทำให้ผลการคำนวณค่ากำลังสูญเสียจากกระแสไหลวนที่ขดลวดขณะมีอาร์โมนิกมีค่าสูง และจะส่งผลทำให้ค่าจากการคำนวณอุณหภูมิจุดร้อนสุดนั้นมีค่าสูงขึ้นตาม โดยเห็นได้จากตัวอย่างการคำนวณของรูปต่าง ๆ ซึ่งจะมีค่ามากกว่าการคำนวณอีก 2 รูปแบบ

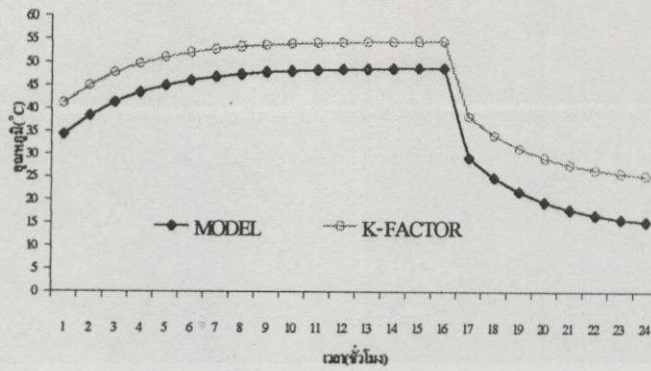
จากตารางที่ 5.19 เป็นการจำลองโหลดที่มีค่าของกระแสอาร์โมนิกลำดับที่  $h$  มีค่าเท่ากับ  $\frac{1}{h}$  ของกระแสมูลฐาน เปรียบเทียบกับกระแสอาร์โมนิกลำดับที่  $h$  มีค่ามากกว่า  $\frac{1}{h}$  ของกระแสมูลฐาน เมื่อนำค่า K-factor จากทั้ง 2 กรณีไปคำนวณหาอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนและอุณหภูมิจุดร้อนสุดเพิ่มของตัวนำ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.192 ถึง 5.195 และสามารถหาค่า เปอร์เซนต์ผิดพลาดสัมพัทธ์ได้ดังตารางที่ 5.20

ตารางที่ 5.19 แสดงข้อมูลการจำลองกระแสโหลด ในสภาวะกระแสร์โมนิกลำดับที่  $h$  มีค่าเท่ากับ  $\frac{1}{h}$  ของกระแสมูลฐาน และในสภาวะกระแสร์โมนิกลำดับที่  $h$  มีค่ามากกว่า  $\frac{1}{h}$  ของกระแสมูลฐาน

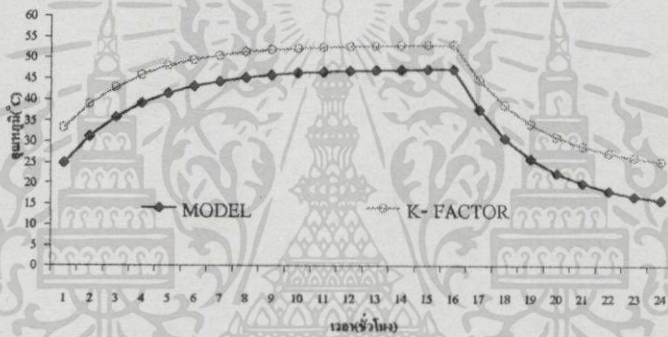
เงื่อนไขที่ 1. กระแสร์โมนิกลำดับที่ $h$ มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{h}$ ของกระแสมูลฐาน						
ลำดับ	เวลา(ช.ม)	%THDi	Irms/phase (A)	I(1)/phase (A)	Total PL(W)	K-factor
1.	16	28.42	9.123(1.04 P.U.)	8.776	127.807	6.476
2.	8	28.42	3.00(0.342 P.U.)	2.887	13.831	6.476
เงื่อนไขที่ 2. กระแสร์โมนิกลำดับที่ $h$ มีค่ามากกว่า $\frac{1}{h}$ ของกระแสมูลฐาน						
ลำดับ	เวลา(ช.ม)	%THDi	Irms/phase (A)	I(1)/phase (A)	Total PL(W)	K-factor
1.	16	90.692	11.85(1.35 P.U.)	8.776	218.42	22.3
2.	8	90.692	4.05(0.46 P.U.)	3	25.524	22.3



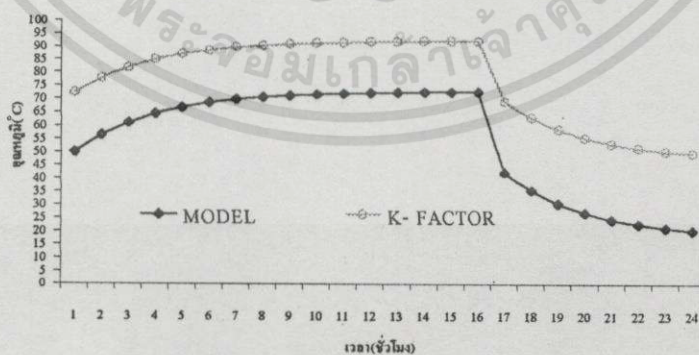
รูปที่ 5.192 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน จากการใช้รูปแบบ Model เปรียบเทียบกับรูปแบบ K-factor จากเงื่อนไขที่ 1. เมื่อกระแสร์โมนิกลำดับที่  $h$  มีค่าเท่ากับ  $\frac{1}{h}$  ของกระแสมูลฐาน



รูปที่ 5.193 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มจตุรอนสุดของตัวนำ จากการใช้รูปแบบ Model เปรียบเทียบกับรูปแบบ K-factor จากเงื่อนไขที่ 1. เมื่อกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่  $h$  มีค่าเท่ากับ  $\frac{1}{h}$  ของกระแสมูลฐาน



รูปที่ 5.194 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน จากการใช้รูปแบบ Model เปรียบเทียบกับรูปแบบ K-factor จากเงื่อนไขที่ 2. เมื่อกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่  $h$  มีค่ามากกว่า  $\frac{1}{h}$  ของกระแสมูลฐาน



รูปที่ 5.195 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มจตุรอนสุดของตัวนำ จากการใช้รูปแบบ Model เปรียบเทียบกับรูปแบบ K-factor จากเงื่อนไขที่ 2. เมื่อกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่  $h$  มีค่ามากกว่า  $\frac{1}{h}$  ของกระแสมูลฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.20 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดสัมพัทธ์ ในสภาวะกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่  $h$  มีค่าเท่ากับ  $\frac{1}{h}$  ของกระแสมูลฐานเปรียบเทียบกับกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่  $h$  มีค่ามากกว่า  $\frac{1}{h}$  ของกระแสมูลฐาน

ชั่วโมงที่	% ผิดพลาดสัมพัทธ์ (% Relative error)			
	กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ $h$ มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{h}$ ของกระแสมูลฐาน		กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ $h$ มีค่ามากกว่า $\frac{1}{h}$ ของกระแสมูลฐาน	
	Top oil rise	Hot -spot rise	Top oil rise	Hot -spot rise
1	14	19.79	33.7	43.89
2	10	16.89	24.47	37.61
3	8.09	15.19	19.86	33.93
4	6.92	14.13	17.25	31.61
5	5.85	13.41	15.62	30.09
6	5.73	12.95	14.55	29.07
7	5.39	12.6	13.84	28.37
8	5.2	12.37	13.35	27.88
9	5.04	12.21	13.02	27.54
10	4.9	12.09	12.79	27.29
11	4.84	12.02	12.64	27.12
12	4.78	11.94	12.51	26.99
13	4.74	11.92	12.43	26.92
14	4.7	11.89	12.37	26.84
15	4.72	11.87	12.33	26.82
16	4.68	11.84	12.32	26.78
17	7.38	30.62	18.32	62.96
18	10.23	37.22	24.89	77.34
19	13.15	43.67	31.77	91.59
20	15.87	49.54	38.47	105.03
21	18.36	54.7	44.85	116.95
22	20.44	58.95	50.39	127.15
23	22.19	62.41	55.21	135.56
24	23.65	65.11	59.02	142.24

หมายเหตุ การหาค่าผิดพลาดสัมพัทธ์ จะสมมติให้ค่าจากรูปแบบ Model เป็นค่าจริง

ผลการหาค่าความผิดพลาดจากตารางที่ 5.20 ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นว่าค่าความผิดพลาดของกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่  $h$  ที่มีค่าเท่ากับ  $\frac{1}{h}$  ของกระแสมาตรฐานมีค่าต่ำกว่ากระแสฮาร์โมนิกลำดับที่  $h$  ที่มีค่ามากกว่า  $\frac{1}{h}$  ของกระแสมาตรฐาน

#### 5.4.4 การจำลองสภาพของโหลดและอุณหภูมิแวดล้อมให้กับหม้อแปลง

เมื่อนำโปรแกรมซอฟต์แวร์การทำงานาค่าอุณหภูมิต่าง ๆ, อายุที่สูญเสีย, อายุการใช้งานหม้อแปลง จากทั้ง 3 รูปแบบ มาจำลองสถานการณ์การจ่ายโหลดของหม้อแปลงดังได้กล่าวมาแล้ว (ดังตัวอย่างที่ 1 ของการจำลองโหลด) เมื่อนำผลการจำลองที่ได้มาวิเคราะห์ สามารถแยกเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

##### 5.4.4.1 การเปรียบเทียบผลการทำนายจากทั้ง 3 รูปแบบ

จากรูปภาพที่ 5.177 ถึง 5.178 เป็นผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิจอร์ร้อนสุดที่ได้จากการคำนวณ ทั้ง 3 รูปแบบ โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยคงที่ตลอดปีกับการใช้อุณหภูมิแวดล้อมแบบซายน์ 2 ชั้น ที่เวลาและวันที่ร้อนที่สุดของปี (14.00 น ของวันที่ 110) จะเห็นว่าอุณหภูมิจอร์ร้อนสุดที่ได้จากการใช้อุณหภูมิซายน์ 2 ชั้น มีค่าสูงกว่าพอสมควร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิแวดล้อมก็มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิจอร์ร้อนสุดและเปอร์เซ็นต์อายุที่สูญเสียของหม้อแปลง ซึ่งได้แสดงผลจากการคำนวณดังตารางที่ 5.21

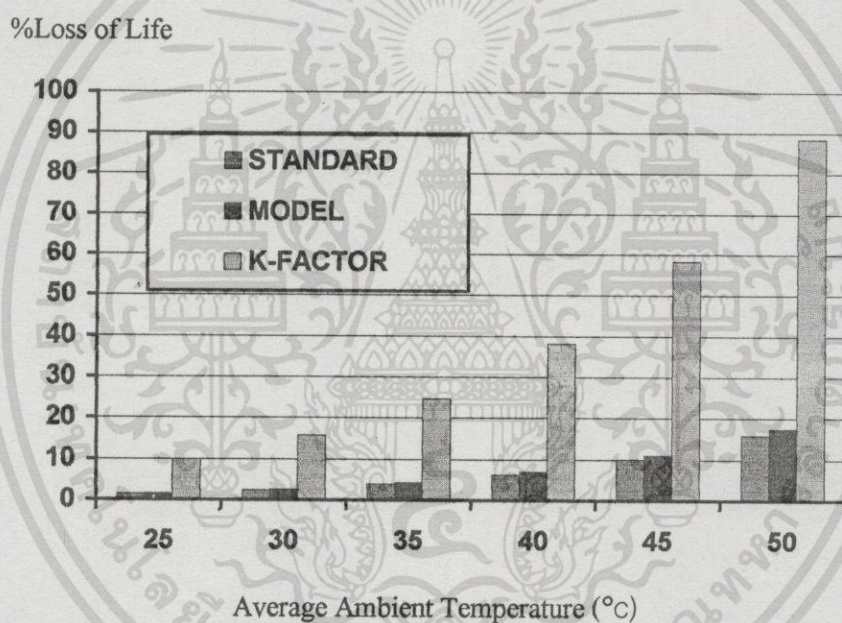
ในสภาพความเป็นจริงอุณหภูมิแวดล้อมของแต่ละท้องถิ่นจะมีค่าที่แตกต่างกันออกไป แต่ในตัวอย่างนี้เป็นการสมมติค่า  $\Theta_{ay}$ ,  $A_{year}$ ,  $B_{day}$ ,  $DX$ ,  $TX$  ขึ้นเอง จึงทำให้ค่าที่ได้มีค่าแตกต่างกันมาก

ตารางที่ 5.21 การเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์อายุที่สูญเสียจากตัวอย่างที่ 1 เมื่อพิจารณาใช้อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยคงที่ตลอดปีกับอุณหภูมิแวดล้อมแบบซายน์ 2 ชั้น ของรูปแบบต่าง ๆ

รูปแบบที่ใช้ทำนาย	%อายุที่สูญเสีย (%Loss of Life)	
	อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยคงที่ตลอดปีที่ ( $\Theta_{ay} = 40^{\circ}\text{C}$ )	อุณหภูมิแวดล้อมแบบซายน์ 2 ชั้น ( $\Theta_{ay} = 40^{\circ}\text{C}$ , $A_{year} = 11$ , $B_{day} = 6$ , $DX=110$ , $TX=14$ )
STANDARD	6.2806	10.8273
MODEL	6.9127	11.8710
K-FACTOR	38.114	61.09911

จากตารางที่ 5.21 ค่าเปอร์เซ็นต์อายุที่สูญเสียเมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปี มีค่าสูงกว่านี้ค่าเปอร์เซ็นต์อายุที่สูญเสียเมื่ออุณหภูมิแวดล้อมคงที่ตลอดปี แต่ผลลัพธ์นี้ได้เป็นเช่นนี้เสมอไป ซึ่งเปอร์เซ็นต์อายุที่สูญเสียจะขึ้นอยู่กับจังหวะของโหลดร่วมกับอุณหภูมิแวดล้อมในช่วงเวลาเดียวกัน

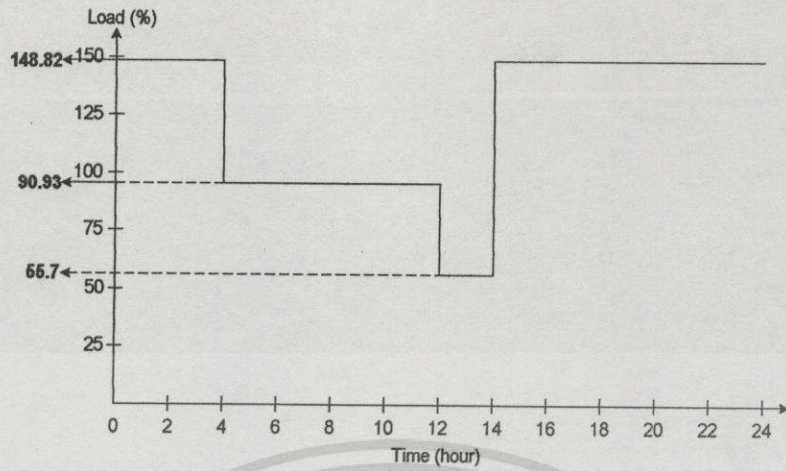
เมื่อต้องการศึกษาอุณหภูมิแวดล้อมมีอิทธิพลต่อเปอร์เซ็นต์อายุที่สูญเสียของหม้อแปลง โดยได้มีการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์อายุที่สูญเสียเมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยตลอดปีมีค่าต่าง ๆ ซึ่งผลการทำนายแสดงดังรูปที่ 5.196 ซึ่งเห็นว่าค่าเปอร์เซ็นต์อายุที่สูญเสียจากรูปแบบ Standard และ Model มีค่าใกล้เคียงกันมาก ส่วนผลที่ได้จากรูปแบบของ K-factor เปอร์เซ็นต์อายุที่สูญเสียสูงกว่ารูปแบบอื่น ๆ ซึ่งสาเหตุนี้เกิดจากการใช้ K-Factor นี้จะเป็นการคาดเดาเท่านั้น ซึ่งได้กล่าวรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 5.4.3 หัวข้อที่ 6 ไว้แล้ว



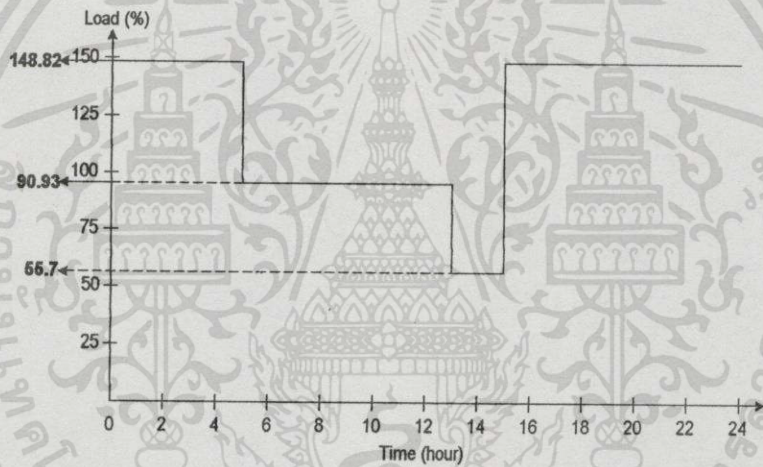
รูปที่ 5.196 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยต่อเปอร์เซ็นต์อายุที่สูญเสีย

#### 5.4.4.2 การเปรียบเทียบค่า เปอร์เซ็นต์อายุที่สูญเสียและอายุการใช้งานของหม้อแปลง เมื่อมีการปรับช่วงเวลาการจ่ายโหลดจากทั้ง 3 รูปแบบ

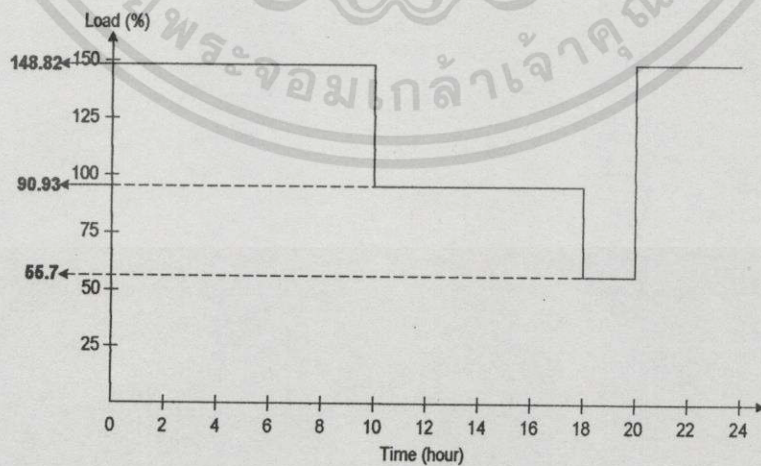
จากการศึกษาที่ผ่านมา ซึ่งเห็นได้ว่าอุณหภูมิแวดล้อมมีผลต่อค่าอายุที่สูญเสียและอายุการใช้งานของหม้อแปลง ดังนั้นในการจ่ายโหลดของหม้อแปลง เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพมากที่สุด ควรคำนึงอุณหภูมิแวดล้อมประกอบด้วย จากรูปที่ 5.196 และรูปที่ 5.197 ถึง 5.199 เป็นการจำลองโหลดที่มีขนาดเดียวกันแต่ช่วงเวลานั้นแตกต่างกัน ซึ่งผลจากการคำนวณจากทั้ง 3 รูปแบบ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.22 ซึ่งอุณหภูมิแวดล้อมพิจารณาจากรูปที่ 5.170



รูปที่ 5.197 แสดงการจำลองโหลด 3 ระดับแบบโหลดที่ 2 ในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 5.198 แสดงการจำลองโหลด 3 ระดับแบบโหลดที่ 3 ในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 5.199 แสดงการจำลองโหลด 3 ระดับแบบโหลดที่ 4 ในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง

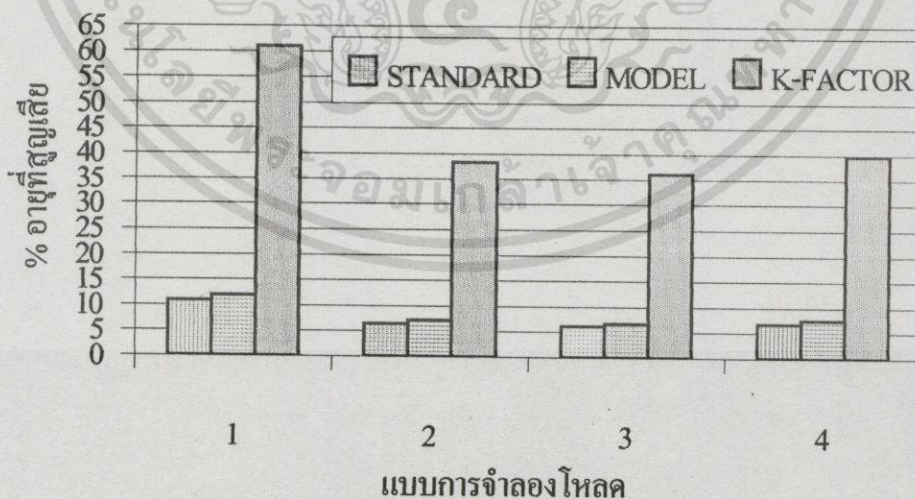
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.22 การเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์อายุที่สูญเสียและอายุการใช้งานจากแบบโหลดที่ 1 ถึง 4 ของแต่ละรูปแบบ เมื่อพิจารณาใช้อุณหภูมิแวดล้อมแบบชายน 2 ชั้น

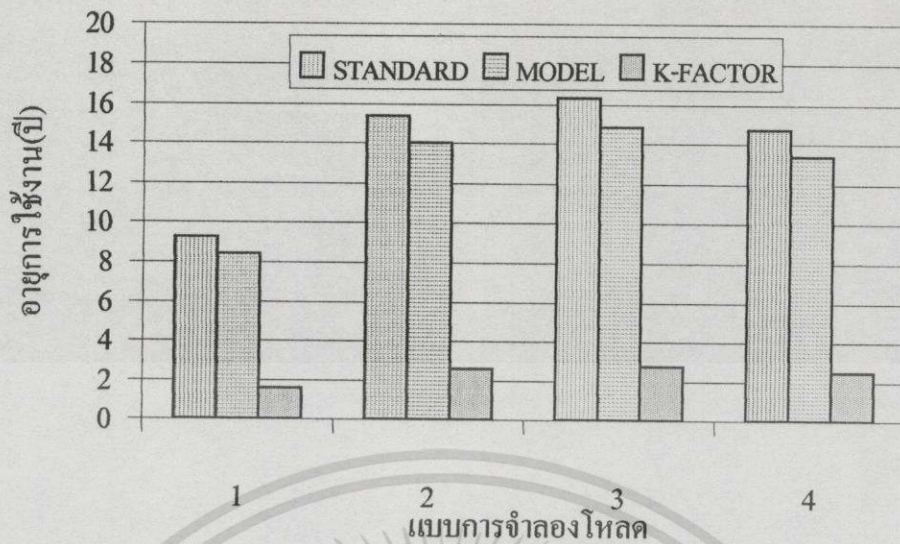
รูปแบบ	% Loss of life / Life(year)			
	แบบโหลดที่ 1	แบบโหลดที่ 2	แบบโหลดที่ 3	แบบโหลดที่ 4
Standard	10.8273/9.236	6.5011/15.382	6.1286/16.317	6.7945/14.718
Model	11.8710/8.424	7.1406/14.004	6.7302/14.859	7.4614/13.402
K-factor	61.09911/1.637	38.3198/2.61	36.3090/2.754	39.7364/2.517

ผลจากตารางที่ 5.22 แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองโหลดที่ 3 จะมีค่าเปอร์เซ็นต์อายุที่สูญเสียต่ำกว่าแบบจำลองอื่น ๆ ดังนั้นถ้าสามารถเลือกช่วงเวลาการจ่ายโหลดของหม้อแปลงได้สมควรเลือกแบบโหลดที่ 3 และรูปแบบจาก Standard จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์อายุที่สูญเสียต่ำกว่าแบบจำลองอื่น ๆ ส่วนอายุการใช้งานของหม้อแปลงจะเป็นส่วนกลับของเปอร์เซ็นต์อายุที่สูญเสีย ส่วนรูปที่ 5.200 และรูปที่ 5.201 แสดงการเปรียบเทียบเป็นรูปกราฟแท่ง ซึ่งจะให้เห็นการเปรียบเทียบได้อย่างชัดเจน

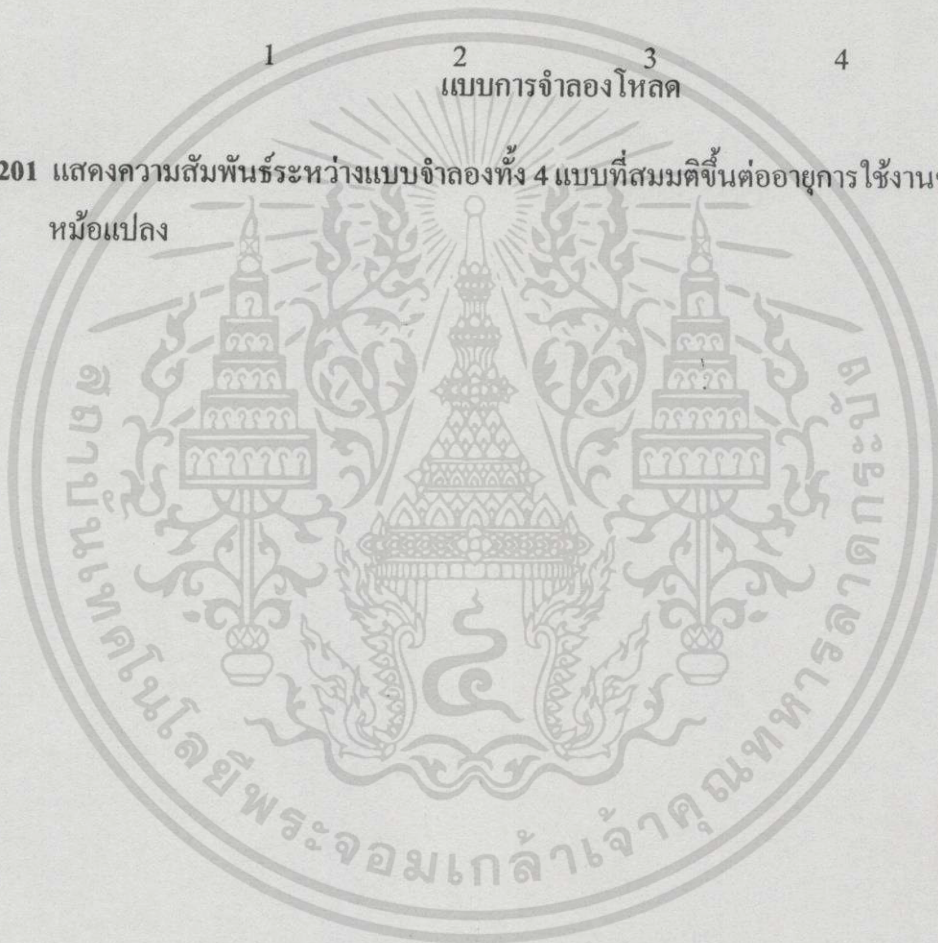
ส่วนรูปที่ 180 ถึง 188 เป็นตัวอย่างที่ 2 ของการจำลองโหลด จุดประสงค์ของการสร้างตัวอย่างนี้ขึ้นมาคือเพื่อต้องการแสดงสภาวะที่อุณหภูมิของน้ำมันและของลวดตัวนำมีสภาวะโหลดเกินฉุกเฉิน ซึ่งเป็นช่วงที่อุณหภูมิสูงขึ้นทันทีทันใด



รูปที่ 5.200 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองทั้ง 4 แบบ ที่สมมติขึ้นต่อเปอร์เซ็นต์อายุที่สูญเสียของหม้อแปลง



รูปที่ 5.201 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองทั้ง 4 แบบที่สมมติขึ้นต่ออายุการใช้งานของหม้อแปลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบหากำลังไฟฟ้าสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสฮาร์โมนิกและการทดสอบอุณหภูมิหม้อแปลงในเงื่อนไขต่าง ๆ นั้น ทำให้ช่วยทำนายอายุที่สูญเสียและอายุการใช้งานตามหลักการของ Arrhenius ซึ่งข้อสรุปที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้สามารถแยกสรุปได้เป็นข้อ ๆ ดังนี้

1. การออกแบบขนาดเส้นลวดตัวนำของหม้อแปลงไฟฟ้า จำเป็นจะต้องคำนึงถึงขนาดพื้นที่หน้าตัดต่อจำนวนเส้นลวดตัวนำด้วย ถ้าขนาดของพื้นที่หน้าของเส้นลวดตัวนำมากจะทำให้เกิดผลของสกิน เอฟเฟคสูง ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียอันเนื่องกระแสไหลวนที่ขดลวดมากขึ้น ดังนั้น การออกแบบลวดตัวนำควรใช้เส้นลวดขนาดเล็กหลาย ๆ เส้นขนานกันและมีการพันสลับสาย ซึ่งจะช่วยลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของกระแสไหลวนที่ขดลวดได้
2. ในสถานะที่เป็นโหลดเชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้นก็ตาม อุณหภูมิจุดร้อนสุดของลวดตัวนำที่เกิดขึ้นที่บริเวณขดลวดคานบนและอยู่ที่ตำแหน่งคานในของขดลวด ดังนั้น การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าสมควรจะใช้กระดาษฉนวนที่สามารถทนระดับอุณหภูมิสูง ๆ ณ บริเวณนี้ และการออกแบบควรจะทำน้ำมันให้กว้าง แต่ควรคำนึงถึงเรื่องการ Flash over ด้วย และการออกแบบควรให้น้ำมันหม้อแปลงหมุนเวียนถ่ายเทความร้อนได้เป็นอย่างดี
3. อุณหภูมิแวดล้อมที่อยู่รอบ ๆ หม้อแปลงจะมีผลต่ออายุการใช้งานของหม้อแปลง ดังนั้นถ้าการทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงได้พิจารณาค่าอุณหภูมิแวดล้อมแบบชานนี้ 2 ชั้น ก็จะทำให้การทำนายค่าต่าง ๆ นั้น ใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงได้ถูกต้องยิ่งขึ้น
4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีการทั้ง 3 แบบ คือ 1. ลัดวงจร 2. โหลดเชิงเส้น 3. โหลดไม่เชิงเส้น สามารถนำไปเป็นข้อมูลประกอบการออกแบบหม้อแปลงตัวต่อไปได้เป็นอย่างดี
5. เงื่อนไขข้อจำกัดในการทดสอบของวิทยานิพนธ์นี้คือ ค่า%THD<sub>v</sub> ทางขดลวดทุติยภูมิต้องไม่เกิน 5 % ดังนั้น การนำโปรแกรมซอฟต์แวร์ไปใช้งานจริงนั้นต้องมีการจำกัด %THD<sub>v</sub> ด้วย และการเลือกใช้สามารถเลือกรูปแบบจาก Standard หรือรูปแบบจาก Model ก็ได้ แต่การใช้รูปแบบจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Model มีความยุ่งยากตรงที่ว่าจะต้องมีการทดสอบหาข้อมูลของความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ฮาร์โมนิกต่าง ๆ ด้วย แต่ก็มีข้อดีคือสามารถทำให้ทราบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แต่ละความถี่ฮาร์โมนิกต่าง ๆ ได้ และสามารถพัฒนางานวิจัยต่อไปได้ ยกตัวอย่าง เช่น พัฒนาการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงโดยไม่จำกัดค่า%THD<sub>v</sub> แต่การใช้รูปแบบจากK-factorนั้น จะให้ผลการคำนวณที่คลาดเคลื่อนจากความจริงมาก ซึ่งการใช้ K-factor หาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนที่ขดลวดนั้นเป็นเพียงแค่การคาดเดา ข้อเสนอแนะของการใช้ K-factor มาพิจารณานั้น ผลของการใช้ K-Factor จะมีค่าใกล้เคียงความจริงมากที่สุด เมื่อขนาดของกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ h มีค่าไม่มากกว่า  $\frac{1}{h}$  ของกระแสสมมูล

6. จากการเปรียบเทียบอุณหภูมิจากรูปแบบ Standard และ Model ค่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนและอุณหภูมิของสุร็อนสุดมีค่าใกล้เคียงกันมาก จากการวิเคราะห์สมการทั้ง 2 รูปแบบ จะได้ความสัมพันธ์ใหม่ คือ

$$P_{LL} = P_{LL\_R} \left( \frac{I_{rms}}{I_{rms\_R}} \right)^2$$

7. ประโยชน์ที่ได้จากซอฟต์แวร์ในการทำนายอุณหภูมิหม้อแปลง, เปร็เซ็นต์อายุที่สูญเสีย, อายุการใช้งาน จากรูปแบบของ Standard และ Model มีหลายประการด้วยกัน เช่น การกำหนดสภาพของโหลดให้กับหม้อแปลงในช่วงเวลาต่าง ๆ เพื่อให้หม้อแปลงทำงานที่ประสิทธิภาพดีที่สุด, การทำนายอุณหภูมิของน้ำมันและสุร็อนสุดของลวดตัวนำ เพื่อป้องกันจนวนของหม้อแปลงเสื่อมสภาพก่อนเวลาอันสมควร และป้องกันอุปกรณ์ต่อร่วมกับหม้อแปลงมีอุณหภูมิสูงเกิน, อื่น ๆ

8.  $R_{dc}$  ที่นำมาคำนวณนั้นเป็นค่า  $R_{t2}$  ดังนั้นผลการคำนวณอุณหภูมิสุร็อนสุดของตัวนำช่วงเริ่มต้นจะมีค่าผิดพลาดต่างจากการทดสอบ ดังนั้นการพัฒนางานวิจัยครั้งต่อไปควรมีการปรับค่า  $R_{dc}$  ให้มีค่าใกล้เคียงสภาพความเป็นจริง ซึ่งจะทำให้การทำนายค่าต่าง ๆ จากซอฟต์แวร์ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

9. ส่วนประกอบอื่น ๆ ที่มีอิทธิพลต่ออายุการใช้งานของหม้อแปลงนอกจากระดับโหลดที่เกินพิกัดและอุณหภูมิแวดล้อมแล้ว ก็ยังมีพารามิเตอร์อื่น ๆ อีก เช่น ระดับความสูงของหม้อแปลงเหนือระดับน้ำทะเล, ความชื้นของหม้อแปลง, ชนิดของน้ำมันหม้อแปลง, ความหนืดของน้ำมัน สิ่งต่าง ๆ เหล่านี้จะเป็นปัจจัยสำคัญกับการพิจารณาค่าความสูญเสียของหม้อแปลง แต่ในวิทยานิพนธ์นี้มีได้นำมาร่วมพิจารณา

10. ในวิทยานิพนธ์นี้จะละเลยค่า Dielectric losses เพราะว่าหม้อแปลงที่ทดสอบเป็นหม้อแปลงที่สร้างขึ้นใหม่ ฉนวนความร้อนยังมีอายุอยู่ในช่วงการใช้งานเริ่มต้น และระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทดสอบสูงสุด 380 V และระดับการทดสอบอุณหภูมิไม่เกินขีดจำกัดของฉนวน จึงไม่ทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพ

11. ในวิทยานิพนธ์นี้ มิได้นำข้อมูลโครงสร้างของหม้อแปลงมาร่วมพิจารณา สาเหตุเพราะในสภาพความเป็นจริงของผู้ใช้หม้อแปลง อาจจะไม่ทราบข้อมูลซึ่งเป็นพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีปริมาณมาก[30] หรือผู้ใช้อาจจะนำหม้อแปลงที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว ดังนั้น จะทำให้เกิดปัญหาในการทำนายค่าอุณหภูมิต่าง ๆ, อายุที่สูญเสียและอายุการใช้งานของหม้อแปลงได้ ดังนั้น โปรแกรมซอฟต์แวร์ที่ได้สร้างขึ้นนี้จะมีความสะดวกสบายในการใช้งานเพื่อเลียนแบบตามสภาพการใช้งานของหม้อแปลงตามความเป็นจริงได้เป็นอย่างดี

12. ข้อผิดพลาดจากการทดสอบมีอยู่หลายประการด้วยกัน ยกตัวอย่าง เช่น 1. สายของเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้ทดสอบวัดอุณหภูมินั้น ไม่ได้สัมผัสกับลวดตัวนำโดยตรง ดังนั้นอุณหภูมิที่ได้จากการทดสอบที่ลวดตัวนำนั้นอาจจะต่ำกว่าสภาพความเป็นจริงอยู่บ้าง ข้อเสนอแนะควรเปลี่ยนมาใช้ Fiber optic แทน 2. แหล่งจ่ายที่ใช้ทดสอบหม้อแปลงนั้นมีระดับแรงดันไม่คงที่สาเหตุอันเนื่องจากสภาพโหลดภายในโรงงานที่ทดสอบหม้อแปลงนั้นเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ข้อเสนอแนะนั้น ควรปรับระดับแรงดันให้คงที่ตลอดช่วงเวลาการทดสอบหรือเปลี่ยนมาใช้แหล่งจ่ายที่แยกอิสระจากโหลดอื่นๆ 3. โหลดของหม้อแปลงที่ใช้ทดสอบควรที่จะมีการปรับได้อย่างละเอียด เพื่อให้ค่ากระแสที่ต้องการถูกต้องมากขึ้น

**หมายเหตุ** การศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ใช้หม้อแปลงแบบแช่น้ำมันเพียง 1 ตัวเท่านั้น เพราะฉะนั้นผลการทดสอบอาจจะมีผลคลาดเคลื่อนบ้าง ดังนั้นการพัฒนาด้านการทดสอบอุณหภูมิหม้อแปลง สมควรที่จะทดสอบกับหม้อแปลงจำนวนหลาย ๆ ตัว และหลาย ๆ ขนาด(kVA) เพื่อให้ผลการวิเคราะห์ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ANSI/IEEE C57.91-1981. IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immerse Overhead and Pad-Mounted Distribution Transformers Rated 500 kVA and Less with 65°C or 55°C Average Winding Rise.
- [2] ANSI/IEEE C57.92 –1981. IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immerse Overhead and Pad-Mounted Power Transformers, up to and including 100 MVA with 65°C or 55°C Average Winding Rise.
- [3] ANSI/IEEE C57.115 – 1981. IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immerse Overhead and Pad-Mounted Power Transformers rated in excess of 100 MVA 65°C Winding Rise.
- [4] IEEE Std C57.12.90-1993. IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers and IEEE Guide for Short-Circuit Testing of Distribution and Power Transformers.
- [5] ANSI/IEEE C57.110 – 1986. Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supply Nonsinusoidal Load Currents.
- [6] Proposed IEEE Std 519-1990. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System.
- [7] IEC 354. Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformer. 1991.
- [8] IEC 76-2. Power transformer Part 2: Temperature rise. 1993.
- [9] สิริวิช ทัดสวน, บุญเลิศ ลือเฉย, ศุภี บรรจงจิตร. "การทำนายอุณหภูมิหม้อแปลงไฟฟ้าจำหน่ายชนิดแช่น้ำมันขณะทำการต่อโหลดโดยซอฟต์แวร์ ซึ่งเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน IEEE กับค่ามาตรฐาน IEC.", วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่14, ฉบับที่ 1, เมษายน 2541. หน้า52-60.
- [10] สิริวิช ทัดสวน, ปัญญา มาลีวัตร, ศุภี บรรจงจิตร, นิทัศน์ กฤษณจินดา, บุญเลิศ ลือเฉย. "การวิเคราะห์ข้อแตกต่างของหม้อแปลงไฟฟ้าจำหน่ายชนิดจุ่มน้ำมัน เมื่อออกแบบสร้างตามข้อกำหนดเดิมเปรียบเทียบกับข้อกำหนดใหม่ตามมาตรฐานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.", วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่16, ฉบับที่ 3, กันยายน 2542. หน้า 13 -18.

- [11] สิริวิช ทัดสวน, วิจิตร กิณเรศ, นิทัศน์ กฤษณจินดา, ศุภี บรรจงจิตร, บุญเลิศ สือเจย. "การทดสอบอุณหภูมิ ณ บริเวณลวดตัวนำและบริเวณน้ำมัน ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน เพื่อนำเป็นค่าบรรทัดฐานของการออกแบบหม้อแปลง." วารสารวิจัยและพัฒนา มจร, ปีที่23, ฉบับที่ 2 พฤษภาคม / สิงหาคม 2543.
- [12] สิริวิช ทัดสวน, สุนันท์ เขียมประไพ, วิจิตร กิณเรศ, ศุภี บรรจงจิตร, นิทัศน์ กฤษณจินดา, บุญเลิศ สือเจย. "การทดสอบอุณหภูมิเพิ่มเพื่อสืบสวนสมรรถนะของความร้อนและตรวจสอบหาพารามิเตอร์จำเพาะของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบจุ่มน้ำมัน." การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 22, ธันวาคม 2542. หน้า 260-263.
- [13] สุทธิพล สุทธิศิลป์, สุพจน์ สุวรรณวานิชกุล, อโนชา วงศ์รุ่งโรจน์ "แหล่งจ่ายไฟสำรอง." ปรินูญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2533.
- [14] วุทธิชัย ภูมิสมบัติ, อุลิต อ่องแสงคุณ. "3  $\phi$  INVERTER." ปรินูญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2525.
- [15] Banspach, Hans. "Transformer-Design." Bangkok. : Faculty of Technical Education and Science, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, 1975.
- [16] William M. HANDBOOK OF TRANSFORMER DESIGN AND APPLICATIONS. Second Edition. Singapore. : McGRAW-HILL, INC. 1992.
- [17] Bharat Heavy Electrical Limited. TRANSFORMER. New Delhi. : Tata McGRAW-HILL Publishing Company Limited. 1987.
- [18] RAO. POWER TRANSFORMER AND SPECIAL TRANSFORMER. Third Edition. Delhi. : KHANNA PUBLISHERS. 1996.
- [19] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง. มอก. 384-2524 กรุงเทพมหานคร. : 2524.
- [20] อุดมศักดิ์ ยั่งยืน, Power Electronic 1. กรุงเทพมหานคร. : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2528.
- [21] สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. กรุงเทพมหานคร. : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528
- [22] ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล, ระบบไฟฟ้ากำลัง เล่ม2. กรุงเทพมหานคร. : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2537
- [23] มন্ত্রী พจนารถลาวัญญ์, การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยเทอร์โบซี. กรุงเทพฯ มหานคร. : ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด. 2537

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [24] ถันวา ศรีประมง, การเขียนโปรแกรมภาษาซี สำหรับวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่สาม.  
กรุงเทพมหานคร. : โรงพิมพ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร. 2537.
- [25] Brian J.McPartland. "USE K=FACTOR TRANSFORMER? DEFINITELY! BUT WHAT K-FACTOR?." EDI. June. 1991.pp. 35-40.
- [26] James Moravek. " EFFECTS OF HARMONICS ON TRANSFORMER KVA RATING." EDI. October. 1991. pp. 17-19.
- [27] James Moravek, Edward Lethert. "THE K- FACTOR: CLEARING UP ITS MYSTERY." EC&M. June 1993. pp. 65-77.
- [28] Daniel W.Egolf, Alfred J. Flechsig. "HARMONICS-TRANSFORMER DERATING." IEEE.Reproduced with permission of copyright owner. Further reproduction prohibited., 1994. pp 79-84
- [29] Robert D. Henderson, Patrick. "Harmonic: The Effects on Power Quality and Transformers." IEEE Transactions on Industry Applications., Vol. 30, No.3, May/June. 1994. pp. 528-532.
- [30] Alexander Eigeles Emanuel, Xiaoming Wang. " ESTIMATION OF LOSS OF LIFE POWER TRANSFORMERS SUPPLYING NONLINEAR LOADS." IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems., Vol. PAS-104, No.3, March. 1985. pp.628-636.
- [31] Bendapudi S. Ram, J.Alan C. Forrest, Glenn W. Swift. "EFFECT OF HARMONIC ON CONVERTER TRANSFORMER LOAD LOSSES." IEEE Transactions on Power Delivery., Vol. 3, No. 3, July. 1988. pp. 1059 -1066.
- [32] M.V. Thaden, S.P. Mehfa, S.C. Tuli, R.L. Grubb. "TEMPERATURE RISE TESTS ON A FORCED-OIL-AIR COOLED (FOA) (OFAF) CORE-FORE TRANSFORMER, INCLUDING LOADING BEYOND NAMPLATE." IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 2, April. 1995. pp. 913 - 923.
- [33] Linden W. Pierce. "Transformer Design and Application Considerations For Nonsinusoidal Load Currents." IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 32, No. 3, MAY/JUNE.1996. pp. 633 -645.
- [34] ชัยวุฒิ จัตรอุทัย. "สารแม่เหล็ก." เอกสารประกอบการเรียนวิชา 01163116 Electrical Engineering Materials ตอน3 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ม.ป.ป. หน้า 3-1 ถึง 3-28.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [35] สุพัตรา ภูมิวัฒน์, เพิ่มศักดิ์ วรรณสถิตย์. "การบำรุงรักษา/วิเคราะห์ น้ำมันหม้อแปลง." เอกสารประกอบคำบรรยายทางวิชาการ IEEE(ประเทศไทย), กรกฎาคม 2539. pp. 1-13.
- [36] บริษัท เอ็มจีอี อิเล็กทรอนิกส์ สยาม จำกัด. "แหล่งกำเนิดของฮาร์โมนิก." กรุงเทพมหานคร. : ไฟฟ้าและอุตสาหกรรม, ปีที่ 4, ฉบับที่ 9, กันยายน 2540. หน้า 65-69.
- [37] ไชยะ แซ่มซ้อย. "ฮาร์โมนิก(2) แหล่งกำเนิด." กรุงเทพมหานคร. : วารสารเทคนิค, ฉบับที่ 134, เมษายน 2539. หน้า 103-109.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



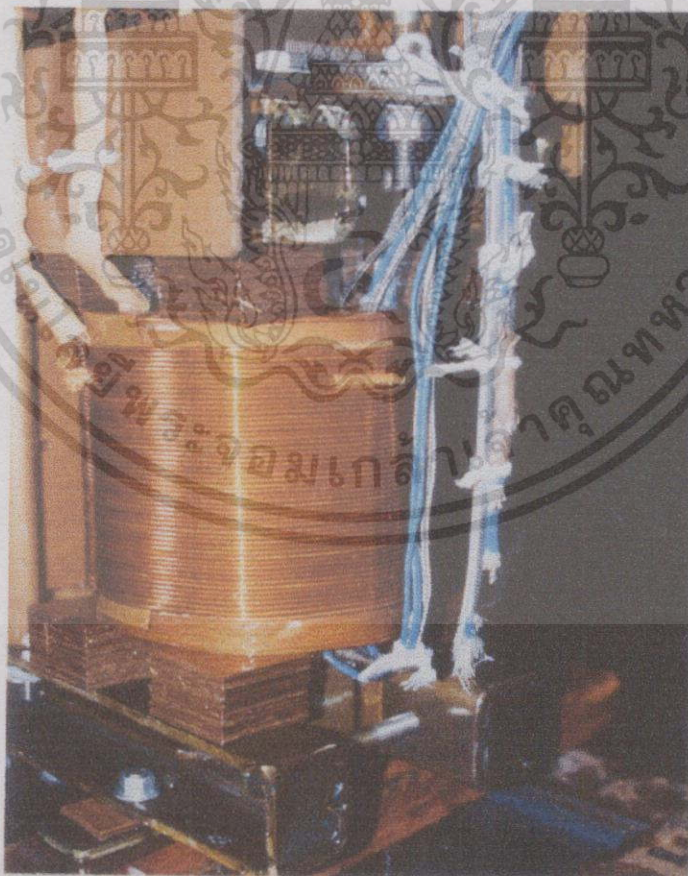
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

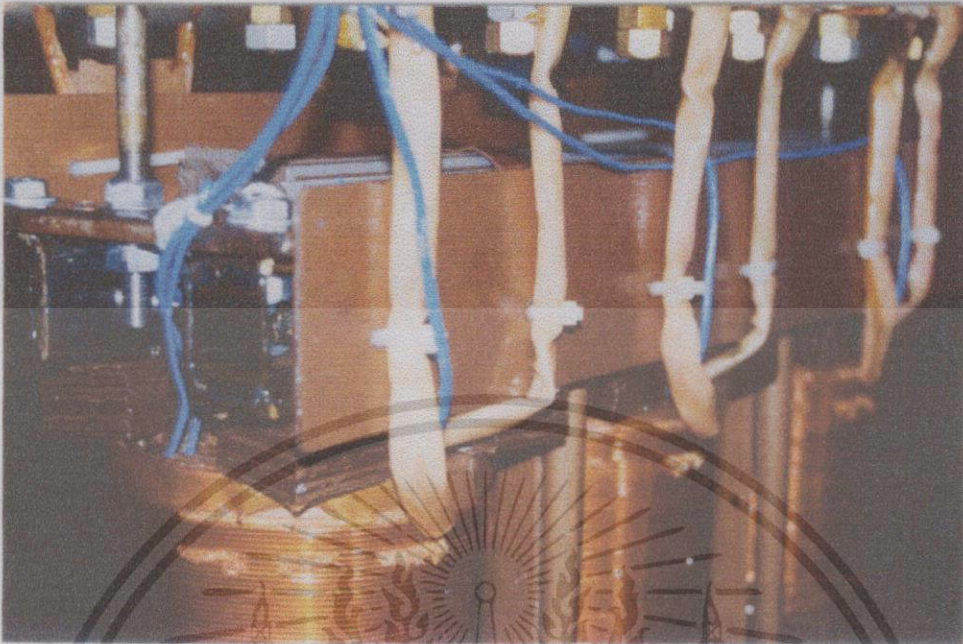


รูปที่ 1 ภาคผนวก ก แสดง โครงสร้างภายนอก - ด้านหน้า ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน

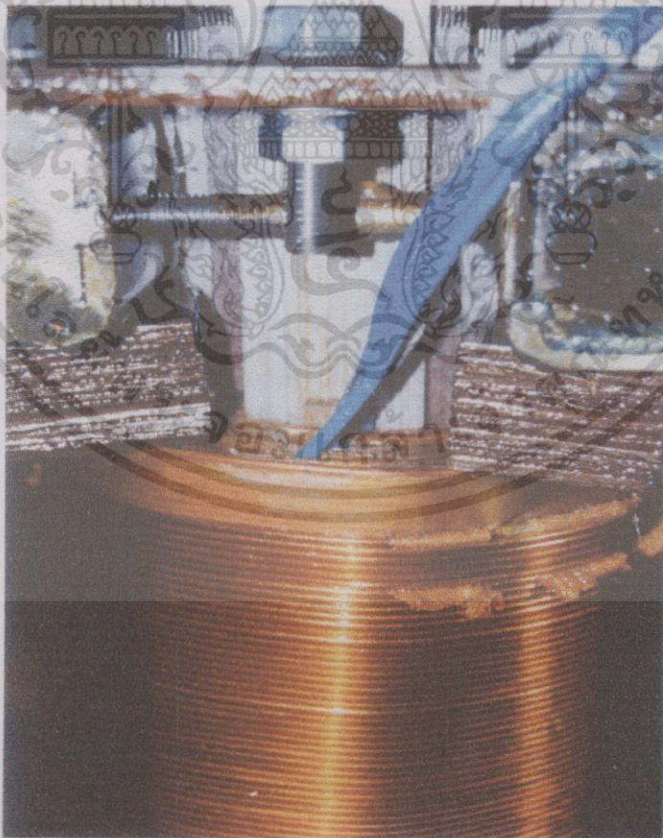


รูปที่ 2 ภาคผนวก ก แสดงการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ในแนวระดับที่ขดลวดและน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

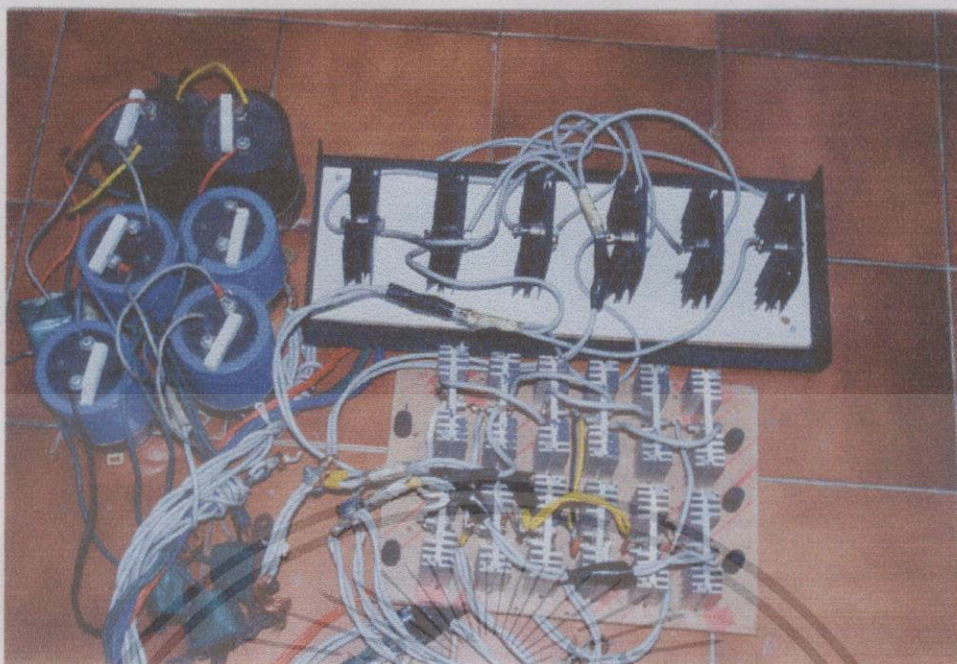


รูปที่ 3 ภาคผนวก ก แสดงการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล บริเวณด้านบนของขดลวดทั้ง 3 ชุด



รูปที่ 4 ภาคผนวก ก แสดงรูปขยายของการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลที่ขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

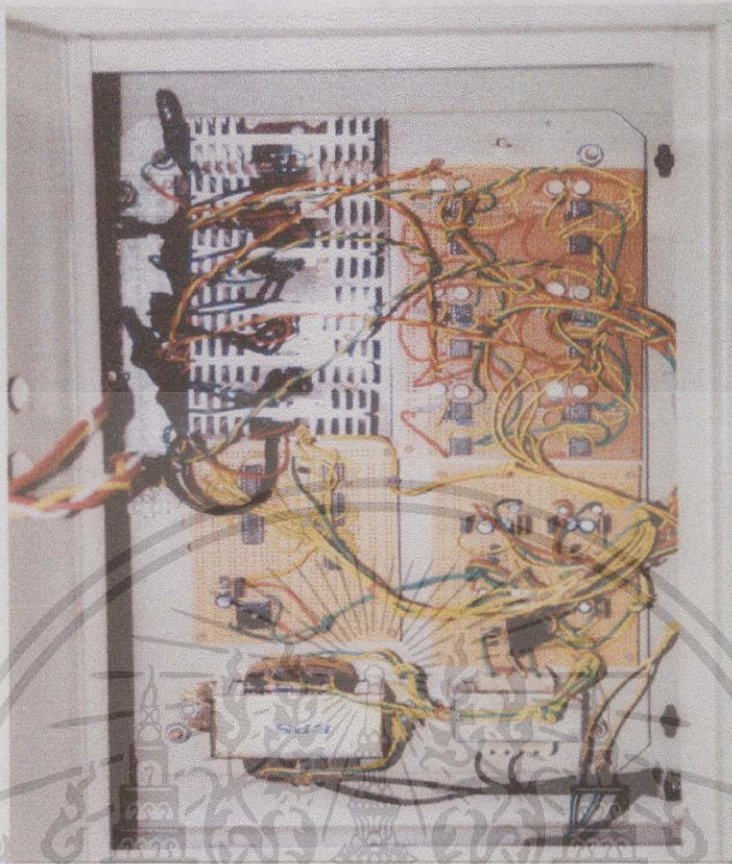


รูปที่ 5 ภาคผนวก ก แสดงชุดเรกติไฟเออร์แบบ 3 เฟส 6 พัลส์ และตัวคาปาซิเตอร์

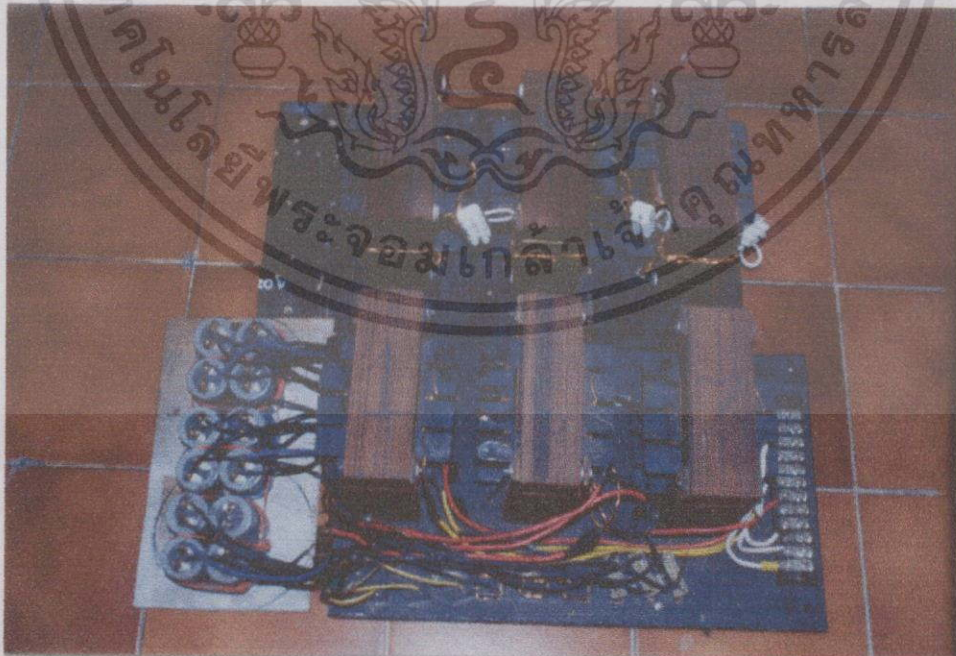


รูปที่ 6 ภาคผนวก ก แสดงแท่งลวดความร้อนและหลอดไฟแบบอินแคนเดสเซนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

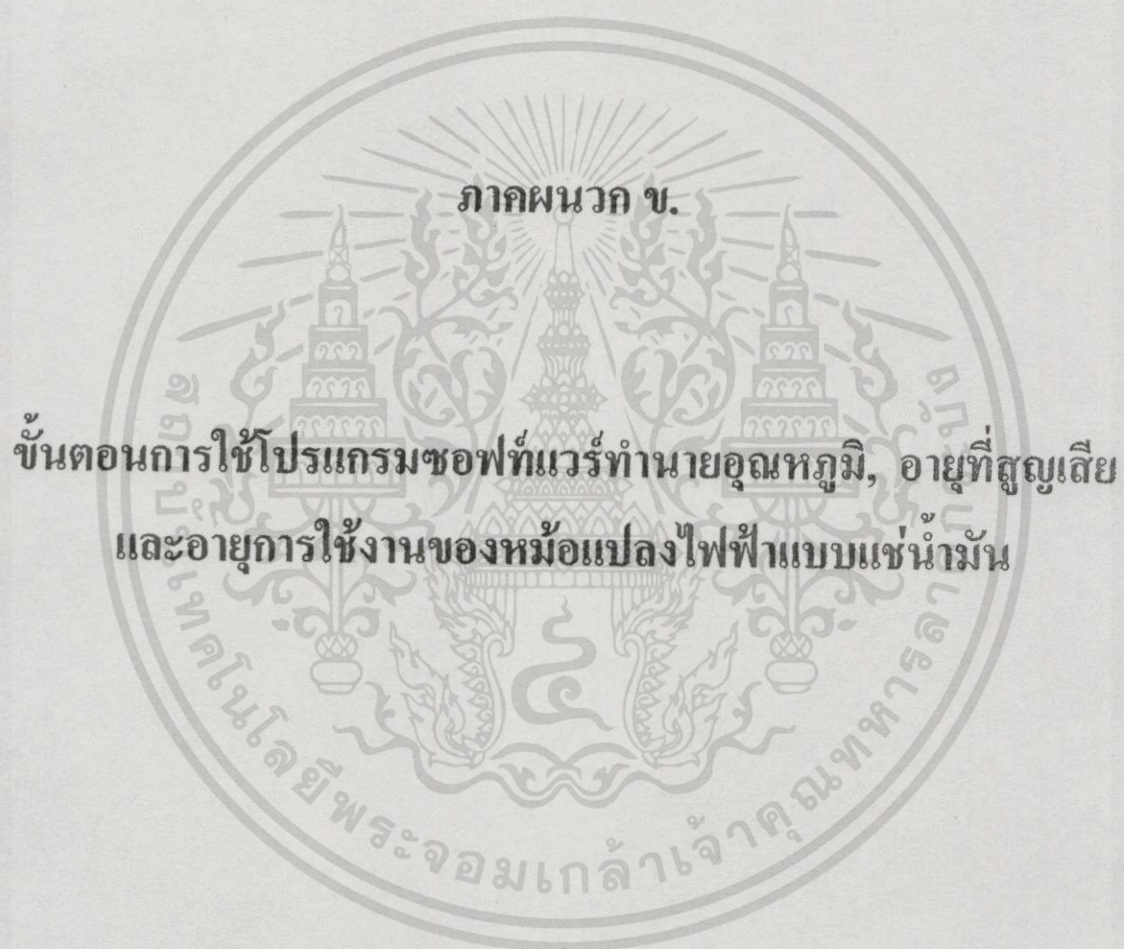


รูปที่ 7 ภาคผนวก ก แสดงชุดอินเวอร์เตอร์ แบบ 3 เฟส คลื่นเอ้าท์พุทแบบ 6 ชั้น



รูปที่ 8 ภาคผนวก ก แสดงชุดฟิวเตอร์แบบกรองความถี่ต่ำผ่าน

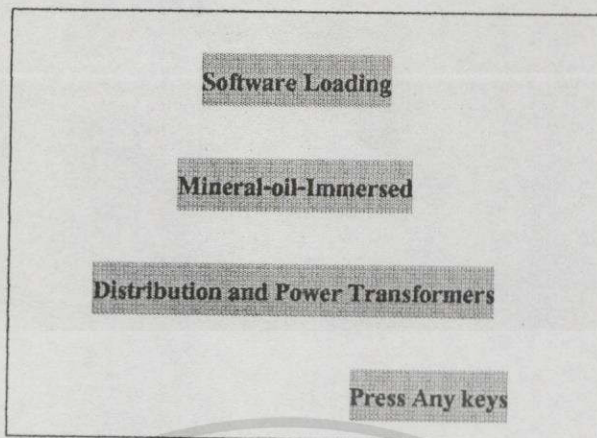
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



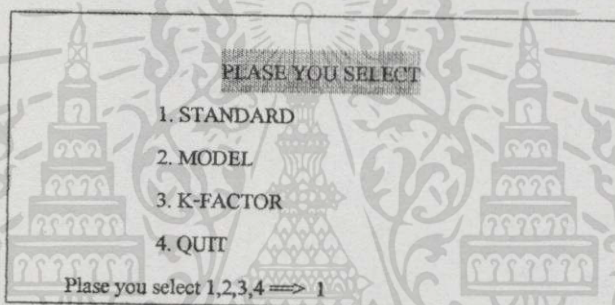
**ภาคผนวก ข.**  
**ขั้นตอนการใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์ทำนายอุณหภูมิ, อายุที่สูญเสียน้ำ  
และอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1. เริ่มเข้าสู่โปรแกรม



### 2. เลือกรูปแบบที่ต้องการใช้



### 3. เลือกรูปแบบ STANDARD และใส่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของหม้อแปลง

CHARACTERISTICS OF TRANSFORMER AT RATED LOAD	
Load loss at rated( $P_{l\_R}$ ),watt	= 350
Core loss at rated( $P_{core\_R}$ ),watt	= 77
Loss at tank at rated( $P_{tank\_R}$ ),watt	= 0
Top oil rise at rated( $T_{or\_R}$ ),celsius	= 31
Winding to oil temperature different at rated ( $T_{gr\_R}$ ),celsius	= 13.5
Thermal time constant for oil( $Time\_con$ )	= 3
Exponential power of total loss versus top oil temp. rise	= 0.8
Exponential power of winding loss versus winding temp. rise	= 0.8
Hot-spot factor(H)	= 1.1
Maximum Top oil( $T_{o\_max}$ ),celsius	= 115
Maximum hot-spot( $T_{hs\_max}$ ),celsius	= 150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. เลือกขนาดพิกัดและเลือกขนาดชนิดของค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด ของหม้อแปลง

**RATED OF TRANSFORMER**

---

1. Rated 500 kVA and Less

2. Rated more over 500 kVA to 100 MVA

3. Rated more over 100 MVA

Selection=1, 2 or 3==> 1

1. Average winding temperature rises of 65 Celsius.

2. Average winding temperature rises of 55 Celsius.

Selection=1=or=2==> 1

#### 5. ใส่ค่าระดับโหลดและช่วงเวลาของโหลดแต่ละระดับ

Number of different load peroids for a day(N) = 3

Irms[P.U] at load step [1] = 0.557

Time step[1], hours = 2

Irms[P.U] at load step [2] = 1.4882

Time step[2], hours = 14

Irms[P.U] at load step [3] = 0.9093

Time step[3], hours = 8

#### 6. ใส่ค่าของอุณหภูมิแวดล้อม

Tay is the yearly average ambient temperature in(Celstus) = 40

A is the amplitude of yearly variation of daily mean ambient temperature in(Celstus) = 11

B is the amplitude of daily variation for aging-rate calculation (Celstus) = 6

DX is the hottest day of a year = 110

TX is the hottest hour of a day = 14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

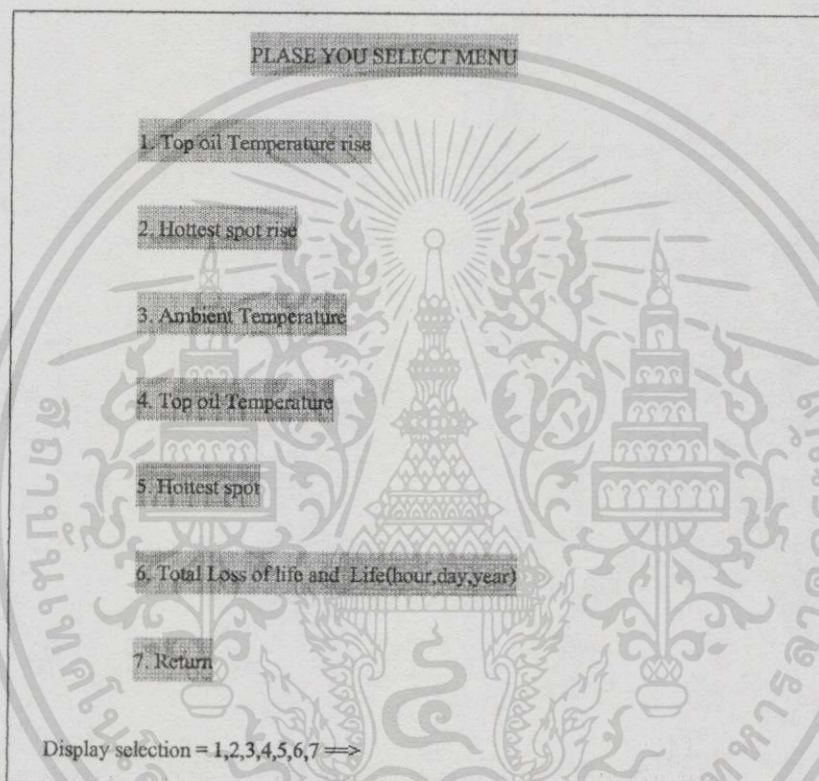
## 7. ผลลัพธ์ของการคำนวณค่าอายุที่สูญเสียและอายุการใช้งานของหม้อแปลง

Total Loss of life	= 0.108273
Life(hour)	= 80906.695312
Life(day)	= 3371.112061
Life(year)	= 9.235924

---

D = Results display , Any Other Keys = Continue

## 8. เลือกเมนูที่ต้องการแสดงค่าต่างๆ



## 9. เลือกแสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน ตั้งแต่ชั่วโมงที่1 ถึง24

Top oil Temperature rise (Celseus) at time(1,1)	= 25.466539
Top oil Temperature rise (Celseus) at time(2,1)	= 22.759508
Top oil Temperature rise (Celseus) at time(1,2)	= 31.581482
Top oil Temperature rise (Celseus) at time(2,2)	= 37.902702
Top oil Temperature rise (Celseus) at time(3,2)	= 42.432053
Top oil Temperature rise (Celseus) at time(4,2)	= 45.677475
Top oil Temperature rise (Celseus) at time(5,2)	= 48.002922
Top oil Temperature rise (Celseus) at time(6,2)	= 49.669178
Top oil Temperature rise (Celseus) at time(7,2)	= 50.863102
Top oil Temperature rise (Celseus) at time(8,2)	= 51.718586
Top oil Temperature rise (Celseus) at time(9,2)	= 52.331566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

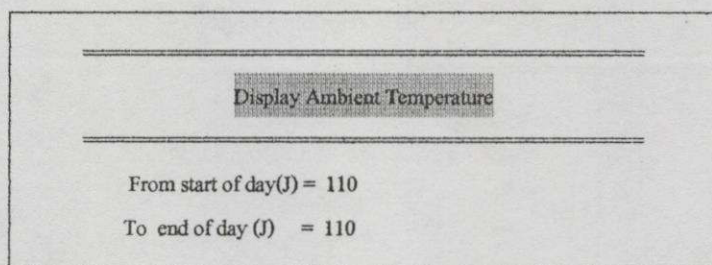
ต่อ

Top oil Temperature rise (Celseus) at time(10,2) = 52.770786  
 Top oil Temperature rise (Celseus) at time(11,2) = 53.085503  
 Top oil Temperature rise (Celseus) at time(12,2) = 53.311005  
 Top oil Temperature rise (Celseus) at time(13,2) = 53.472584  
 Top oil Temperature rise (Celseus) at time(14,2) = 53.588364  
 Top oil Temperature rise (Celseus) at time(1,3) = 46.172352  
 Top oil Temperature rise (Celseus) at time(2,3) = 40.858547  
 Top oil Temperature rise (Celseus) at time(3,3) = 37.051041  
 Top oil Temperature rise (Celseus) at time(4,3) = 34.322842  
 Top oil Temperature rise (Celseus) at time(5,3) = 32.368004  
 Top oil Temperature rise (Celseus) at time(6,3) = 30.967300  
 Top oil Temperature rise (Celseus) at time(7,3) = 29.963652  
 Top oil Temperature rise (Celseus) at time(8,3) = 29.244507

10. เลือกแสดงผลของอุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนจุดของลวดตัวนำ ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 1 ถึง 24

Hottest spot rise (Celseus) at time (1,1) = 31.288841  
 Hottest spot rise (Celseus) at time (2,1) = 28.581810  
 Hottest spot rise (Celseus) at time (1,2) = 59.634819  
 Hottest spot rise (Celseus) at time (2,2) = 65.956039  
 Hottest spot rise (Celseus) at time (3,2) = 70.485390  
 Hottest spot rise (Celseus) at time (4,2) = 73.730812  
 Hottest spot rise (Celseus) at time (5,2) = 76.056259  
 Hottest spot rise (Celseus) at time (6,2) = 77.722511  
 Hottest spot rise (Celseus) at time (7,2) = 78.916435  
 Hottest spot rise (Celseus) at time (8,2) = 79.771919  
 Hottest spot rise (Celseus) at time (9,2) = 80.384903  
 Hottest spot rise (Celseus) at time (10,2) = 80.824120  
 Hottest spot rise (Celseus) at time (11,2) = 81.138840  
 Hottest spot rise (Celseus) at time (12,2) = 81.364342  
 Hottest spot rise (Celseus) at time (13,2) = 81.525917  
 Hottest spot rise (Celseus) at time (14,2) = 81.641701  
 Hottest spot rise (Celseus) at time (1,3) = 58.926693  
 Hottest spot rise (Celseus) at time (2,3) = 53.612888  
 Hottest spot rise (Celseus) at time (3,3) = 49.805382  
 Hottest spot rise (Celseus) at time (4,3) = 47.077183  
 Hottest spot rise (Celseus) at time (5,3) = 45.122345  
 Hottest spot rise (Celseus) at time (6,3) = 43.721642  
 Hottest spot rise (Celseus) at time (7,3) = 42.717991  
 Hottest spot rise (Celseus) at time (8,3) = 41.998848

## 11. เลือกแสดงผลของอุณหภูมิแวดล้อมของวันที่ 110



## 12. การแสดงผลของอุณหภูมิแวดล้อมของวันที่ 110 ตั้งแต่ช่วง โมงที่ 1 ถึง 24

Ambient Temperature (1,1,110) = 45.204445
Ambient Temperature (2,1,110) = 45.000000
Ambient Temperature (1,2,110) = 45.204445
Ambient Temperature (2,2,110) = 45.803848
Ambient Temperature (3,2,110) = 46.757359
Ambient Temperature (4,2,110) = 48.000000
Ambient Temperature (5,2,110) = 49.447086
Ambient Temperature (6,2,110) = 51.000000
Ambient Temperature (7,2,110) = 52.552914
Ambient Temperature (8,2,110) = 54.000000
Ambient Temperature (9,2,110) = 55.242641
Ambient Temperature (10,2,110) = 56.196152
Ambient Temperature (11,2,110) = 56.795555
Ambient Temperature (12,2,110) = 57.000000
Ambient Temperature (13,2,110) = 56.795555
Ambient Temperature (14,2,110) = 56.196152
Ambient Temperature (1,3,110) = 55.242641
Ambient Temperature (2,3,110) = 54.000000
Ambient Temperature (3,3,110) = 52.552914
Ambient Temperature (4,3,110) = 51.000000
Ambient Temperature (5,3,110) = 49.447086
Ambient Temperature (6,3,110) = 48.000000
Ambient Temperature (7,3,110) = 46.757359
Ambient Temperature (8,3,110) = 45.802219

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. เลือกแสดงผลของอุณหภูมิน้ำมันด้านบน ของวันที่ 110 ของ โหลดขั้นที่ 1 ถึง 3

Display Top oil Temperature	
From start of day(J)	= 110
To end of day (J)	= 110
From Step Load (n) start at	= 1
To Step Load (n) end	= 3

14. การแสดงผลของอุณหภูมิน้ำมันด้านบน ของวันที่ 110 ของ โหลดขั้นที่ 1 ถึง 3

Top oil Temperature (Celseus) at time (1,1,110) = 70.670982
Top oil Temperature (Celseus) at time (2,1,110) = 67.759506
Top oil Temperature (Celseus) at time (1,2,110) = 76.785927
Top oil Temperature (Celseus) at time (2,2,110) = 83.706551
Top oil Temperature (Celseus) at time (3,2,110) = 89.189407
Top oil Temperature (Celseus) at time (4,2,110) = 93.677475
Top oil Temperature (Celseus) at time (5,2,110) = 97.450012
Top oil Temperature (Celseus) at time (6,2,110) = 100.669174
Top oil Temperature (Celseus) at time (7,2,110) = 103.416016
Top oil Temperature (Celseus) at time (8,2,110) = 105.718582
Top oil Temperature (Celseus) at time (9,2,110) = 107.574203
Top oil Temperature (Celseus) at time (10,2,110) = 108.966934
Top oil Temperature (Celseus) at time (11,2,110) = 109.881058
Top oil Temperature (Celseus) at time (12,2,110) = 110.311005
Top oil Temperature (Celseus) at time (13,2,110) = 110.268143
Top oil Temperature (Celseus) at time (14,2,110) = 109.784515
Top oil Temperature (Celseus) at time (1,3,110) = 101.414993
Top oil Temperature (Celseus) at time (2,3,110) = 94.858551
Top oil Temperature (Celseus) at time (3,3,110) = 89.603958
Top oil Temperature (Celseus) at time (4,3,110) = 85.322845
Top oil Temperature (Celseus) at time (5,3,110) = 81.815094
Top oil Temperature (Celseus) at time (6,3,110) = 78.967300
Top oil Temperature (Celseus) at time (7,3,110) = 76.721008
Top oil Temperature (Celseus) at time (8,3,110) = 75.046722

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. เลือกแสดงผลของอุณหภูมิจุดร้อนสุดของลวดตัวนำ ของวันที่ 110 ของโหลดขั้นที่ 1 ถึง 3

**Display Hottest spot**

From start of day(J) = 110  
 To end of day (J) = 110

From Step Load (n) start at = 1  
 To Step Load (n) end = 3

16. เลือกแสดงผลของอุณหภูมิจุดร้อนสุดของลวดตัวนำ ของวันที่ 110 ของโหลดขั้นที่ 1 ถึง 3

Hottest-spot (Celseus) at time (1,1,110) = 76.493286  
 Hottest-spot (Celseus) at time (2,1,110) = 73.581810  
 Hottest-spot (Celseus) at time (1,2,110) = 104.839264  
 Hottest-spot (Celseus) at time (2,2,110) = 111.759888  
 Hottest-spot (Celseus) at time (3,2,110) = 117.242752  
 Hottest-spot (Celseus) at time (4,2,110) = 121.730812  
 Hottest-spot (Celseus) at time (5,2,110) = 125.503342  
 Hottest-spot (Celseus) at time (6,2,110) = 128.722504  
 Hottest-spot (Celseus) at time (7,2,110) = 131.469345  
 Hottest-spot (Celseus) at time (8,2,110) = 133.771912  
 Hottest-spot (Celseus) at time (9,2,110) = 135.627548  
 Hottest-spot (Celseus) at time (10,2,110) = 137.020264  
 Hottest-spot (Celseus) at time (11,2,110) = 137.934387  
 Hottest-spot (Celseus) at time (12,2,110) = 138.364349  
 Hottest-spot (Celseus) at time (13,2,110) = 138.321472  
 Hottest-spot (Celseus) at time (14,2,110) = 137.837860  
 Hottest-spot (Celseus) at time (1,3,110) = 114.169334  
 Hottest-spot (Celseus) at time (2,3,110) = 107.612885  
 Hottest-spot (Celseus) at time (3,3,110) = 102.358292  
 Hottest-spot (Celseus) at time (4,3,110) = 98.077179  
 Hottest-spot (Celseus) at time (5,3,110) = 94.569427  
 Hottest-spot (Celseus) at time (6,3,110) = 91.721642  
 Hottest-spot (Celseus) at time (7,3,110) = 89.475349  
 Hottest-spot (Celseus) at time (8,3,110) = 87.801071

## 17. เลือกแสดงผลของค่าอายุที่สูญเสียและอายุการใช้งานของหม้อแปลง

Total Loss of life and Life	
Total Loss of life	= 0.108273
Life(hour)	= 80906.695312
Life(day)	= 3371.112061
Life(year)	= 9.235924
P = Print	, Any Other Keys = Continue

## 18. เลือกการคำนวณจากรูปแบบเดิม หรือกลับไปเมนูเพื่อเลือกรูปแบบอื่น ๆ

S = Start , Any Other Keys = Goto menu

## 19. เลือกรูปแบบ MODEL และใส่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของหม้อแปลง

CHARACTERISTICS OF TRANSFORMER AT RATED LOAD	
I rms per phase at nameplate(rated),amp	= 8.776
Core loss at rated(Pcore_R),watt	= 77
Loss at tank at rated(Ptank_R),watt	= 0
Resistance of ac at rated , ohm/phase	= 1.526
Resistance of dc at rated , ohm/phase	= 1.457
Top oil rise at rated(Tor_R),celsius	= 31
Winding to oil temperature different at rated (Tgr_R),celsius	= 13.5
Thermal time constant for oil(Time_con)	= 3
Exponential power of total loss versus top oil temp. rise	= 0.8
Exponential power of winding loss versus winding temp. rise	= 0.8
Hot-spot factor(H)	= 1.1
Maximum Top oil(To_max),celsius	= 115
Maximum hot-spot(Ths_max),celsius	= 150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 20. ใส่ค่าระดับโหลดและช่วงเวลาของโหลดแต่ละระดับ

Number of different load periods for a day(N) = 3	
Pload/phase at step [1], watt =	36.86
Irms/phase at step [1], amp =	4.889
Time step[1], hours =	2
Pload/phase at step [2], watt = 262.52	
Irms/phase at step [2], amp =	13.06
Time step[2], hours =	14
Pload/phase at step [3], watt = 98.416	
Irms/phase at step [3], amp =	7.98
Time step[3], hours =	8

## 21. ผลลัพธ์ของการคำนวณค่าอายุที่สูญเสียและอายุการใช้งานของหม้อแปลง

Total Loss of life =	0.118710
Life(hour) =	73793.289062
Life(day) =	3074.720215
Life(year) =	8.423891
D = Results display , Any Other Keys = Continue	

## 22. เลือกรูปแบบ K-FACTOR และใส่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของหม้อแปลง

CHARACTERISTICS OF TRANSFORMER AT RATED LOAD	
I rms per phase at nameplate(rated),amp =	8.776
Load loss at rated,watt =	350
Core loss at rated(Pcore_R),watt =	77
Loss at tank at rated(Ptank_R),watt =	0
D.C Resistance , ohm/phase =	1.457
Top oil rise at rated(Tor_R),celsius =	31
Winding to oil temperature different at rated (Tgr_R),celsius =	13.5
Thermal time constant for oil(Time_con) =	3
Exponential power of total loss versus top oil temp. rise =	0.8
Exponential power of winding loss versus winding temp. rise =	0.8
Hot-spot factor(H) =	1.1
Maximum Top oil(To_max),celsius =	115
Maximum hot-spot(Ths_max),celsius =	150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

23. ใส่ค่าระดับโหลดและช่วงเวลาของโหลดแต่ละระดับ

Number of different load periods for a day(N) = 3	
Irms/phase at step [1], amp	= 4.889
K-Factor at step [1]	= 3.5315
Time step[1], hours	= 2
Irms/phase at step [2], amp	= 13.06
K-Factor at step [2]	= 22.368
Time step[2], hours	= 14
Irms/phase at step [3], amp	= 7.98
K-Factor at step [3]	= 12.775
Time step[3], hours	= 8

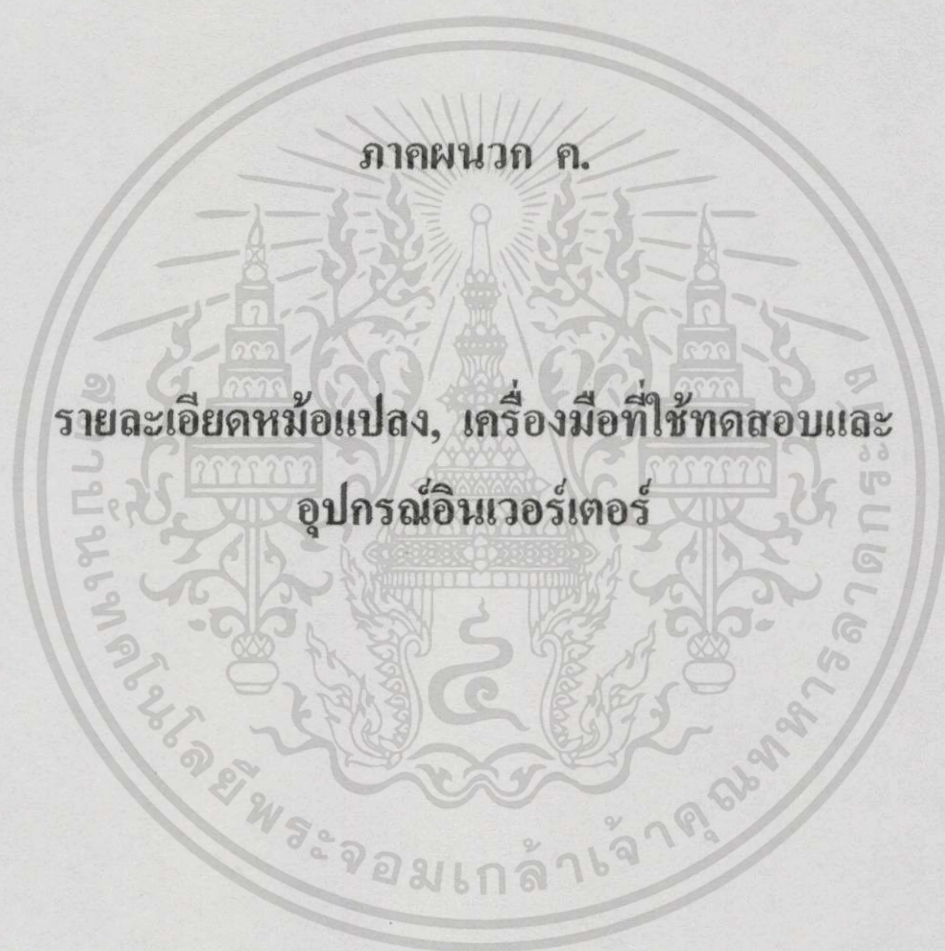
24. ผลลัพธ์จากการคำนวณ เมื่อค่าอุณหภูมิของลวดตัวนำเกินค่าพิคที่  $150^{\circ}\text{C}$

Hot-spot = 151.462158 > Maximum Hot-spot = 150.000000
Press Any keys

25. ผลลัพธ์ของการคำนวณค่าอายุที่สูญเสียและอายุการใช้งานของหม้อแปลง เมื่อกำหนดพารามิเตอร์อุณหภูมิจุดร้อนสุดของลวดตัวนำมากกว่า  $150^{\circ}\text{C}$

Total Loss of life	= 0.610991
Life(hour)	= 14337.360352
Life(day)	= 597.390015
Life(year)	= 1.636685
D = Results display	, Any Other Keys = Continue

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



บริษัท พงษ์พิมานการไฟฟ้า จำกัด  
PHONGPIMARN ELECTRIC CO., LTD.



42/1 หมู่ 3 ต. อ้อมน้อย อ. กระทุ่มแบน จ. สมุทรสาคร 74130 โทรศัพท์. 420-8038-9 , 811-0091-4 โทรสาร. 420-0356  
42/1 Moo 3 Omnoi , Kratumban , Samutsakorn 74130 Tel. 420-8038-9 , 811-0091-4 Fax. 420-0356

### Specification

Transformer	10 kVA	3 Phase	50 Hz
Rate Voltage	HV Voltage	380 V	
	LV Voltage	220 V	
Vector Group	Dyn 11		
Insulation Class	A		
Cooling Type	ONAN		

#### 1. Winding Data

Description	HV winding	LV winding
1 Diameter of conductor (mm.)	1.8	3.2
2 Current density (A/sq.mm.)	3.45	3.26
3 Turn	239	80
4 Winding resistance (ohms)		
Terminal		
A - B	0.440	0.120
B - C	0.440	0.121
C - A	0.445	0.121
Average	0.4416	0.1206

#### 2. Core Data

1 Core Area	40.904 sq.cm.	4 Flux density	1.7485 Tesla
2 Core material	M5	5 Total weight	43 kg.
3 Sheet Thick	0.3 mm.		

#### 3. Tank dimension

1 Internal width	220 mm.	4 Tank & fitting	49 kg.
2 Internal length	530 mm.	5 Volume of oil	35 litre
3 Internal height	425 mm.		

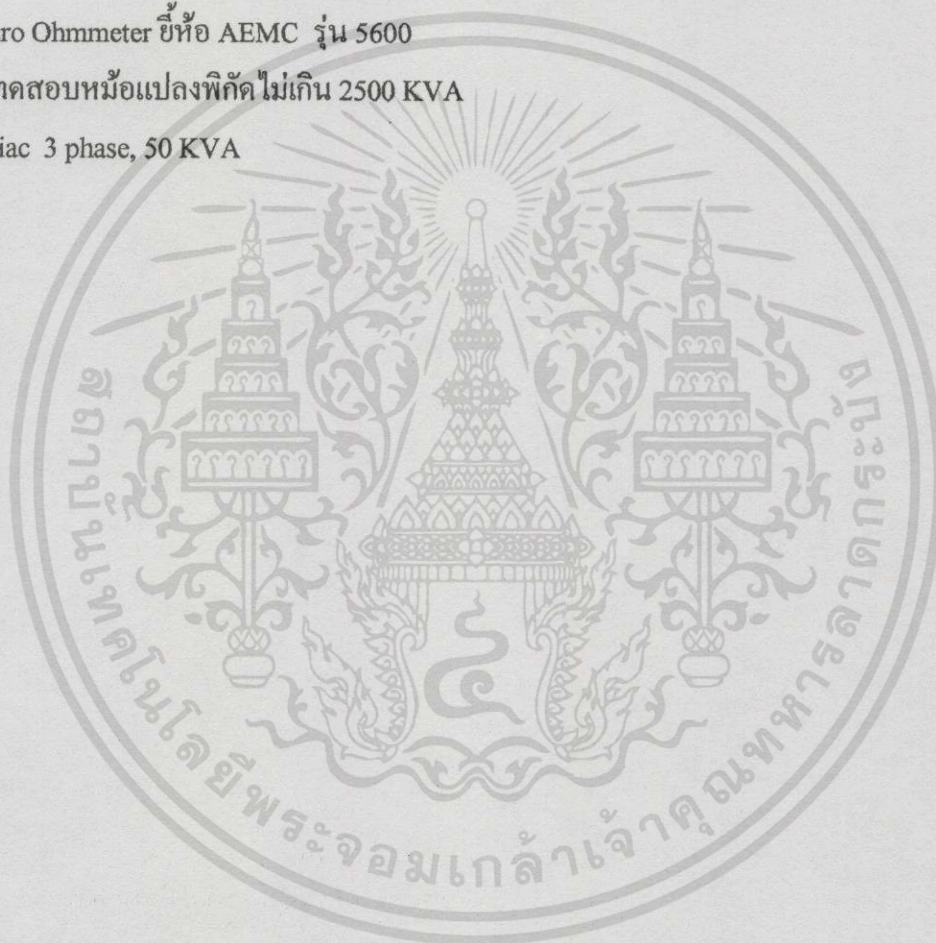
#### 4. Characteristic

1 No load loss	77 W	4 Efficiency	95.73 %
2 Load loss	350 W	5 Voltage regulation	3.31 %
3 Short circuit imp.	4.17 %		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ

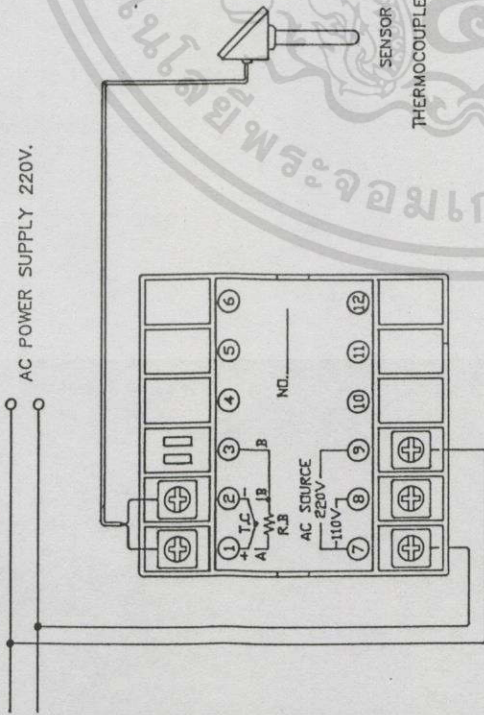
1. Harmonic meter ยี่ห้อ CHAUVIN ARNOUX รุ่น True rms F25
2. Digital oscilloscope ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DL 520 8bits 200 ms/s 150 MHz
3. Temperature indicator ยี่ห้อ DIGICON รุ่น ID-7
4. Portable Three-Phase Wattmeter ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น 2042
5. Multimeter ยี่ห้อ FLUKE model 87
6. Clam-on AC Power meter ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น 2433
7. Micro Ohmmeter ยี่ห้อ AEMC รุ่น 5600
8. ชุดทดสอบหม้อแปลงพิกัดไม่เกิน 2500 KVA
9. Variac 3 phase, 50 KVA



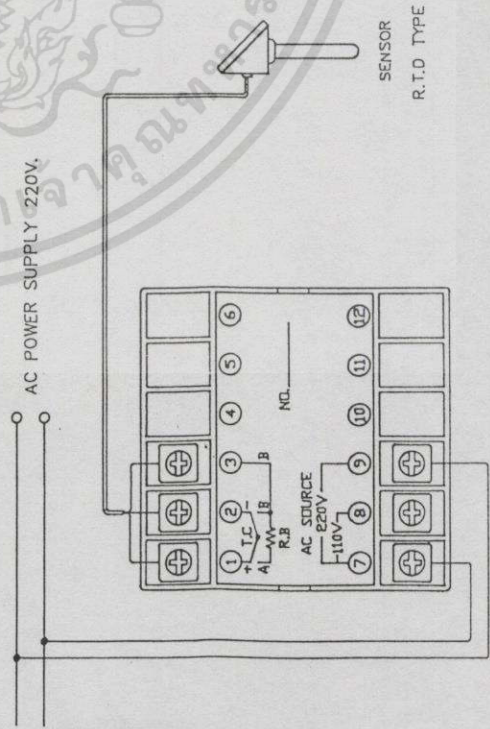
# DIGICON / PRECISION INDUSTRIAL INSTRUMENT

### 3:1 Wiring Connection ID-7

In the case of Thermocouple



In the case of RTD



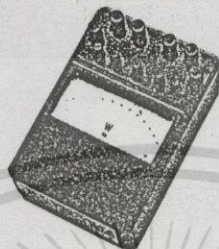
### 4. Standard Specifications

Display	Although compact indicator, easy-to-read LED digital display, for large excellent accuracy & sensitivity. Zero suppression system (blanks) display of leading zeros, thus making it extremely easy to read.
Input	Thermocouple CA(K) IC(J) PR(R) R.T.D Pt-100Ω (3wire)
Setting Accuracy	±0.5% of F.S +1 digit
Accuracy maintained temperature	Ambient temperature 25 °C ±5 °C
Resolution	1 digit
Response time	Approx 1.5 sec (for step input)
Power Supply	AC 100/200V or 110/220V or 120/240V Whichever specified, 50/60Hz.
Supply variation	Less than ±10% of rated voltage
External resistance	No need adjustment up to 100Ω (Thermocouple type)
Ambient temperature	No need adjustment up to 5Ω (R.T.D. type)
Ambient humidity	0~50 °C
Power consumption	45 to 85% Lessthan 3VA
Net weight	Approx 370g. for ID-7, 390g. for IS-7 and IS-73T
Dimensions	72(H) X 72(W) X 126(D) mm
Housing	ABS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Instruction Manual**

**2042  
Portable Three-Phase Wattmeter**



**YOKOGAWA** ◆  
Yokogawa Instruments Corporation

IM 2042-E  
4th Edition

**SPECIFICATIONS**

Technical specifications and characteristics are as follows:

- Model : 2042
- Class : JIS C1102 0.5 class
- Accuracy :  $\pm 0.5\%$  of full scale value
- Over-all dimensions : Approx. 180 x 260 x 140 mm
- Scale length : Approx. 135 mm
- Scale divisions : 120
- Over-load capacity : Voltage circuit:  
..... 50% of rated input  
Current circuit:  
..... 100% of rated input

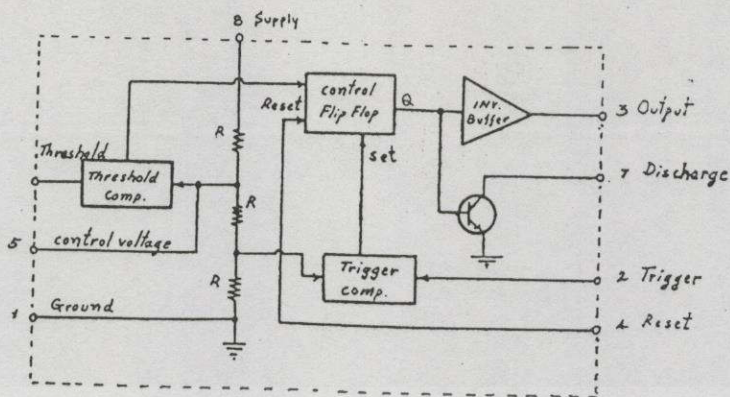
**Characteristics:**

- Self-heating effect : Approx. within  $\pm 0.25\%$
- External temperature effects : Approx. within  $\pm 0.3\%/10^\circ\text{C}$
- External magnetic field effects : Approx. within  $\pm 1\%$  (for 400A/m (5 Oe))
- Frequency response : DC, 25 - 1,000Hz
- Power factor effect : Approx. within  $\pm 0.5\%$  power factor from 1 to 0.5

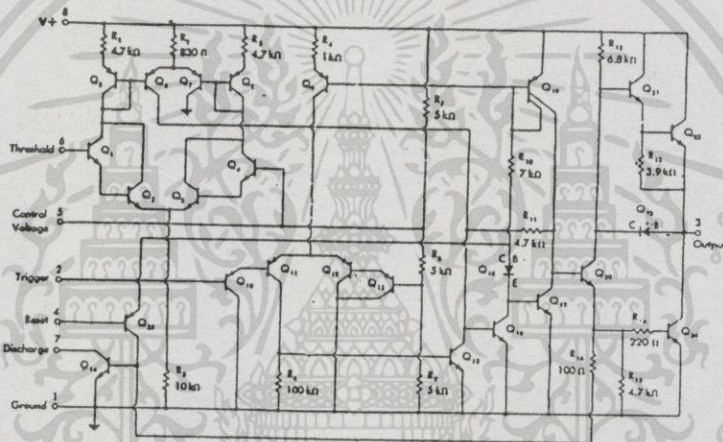
Table 1 Ratings, Internal Impedance, and Rated Power loss VA

Range	Rating	Internal Impedance	Rated Power loss VA
Voltage	120 V	Approx. 12,000 $\Omega$ each element	Approx. 1.2VA $\times 2$
	240 V	" 24,000 "	" 2.4 " $\times 2$
Current	0.2 A	48 W	96 W
	1 A	240 W	480 W
	1 A	240 W	480 W
	5 A	1.2KW	2.4KW
1/5A	5 A	1.2KW	2.4KW
	25 A	GKW	12KW

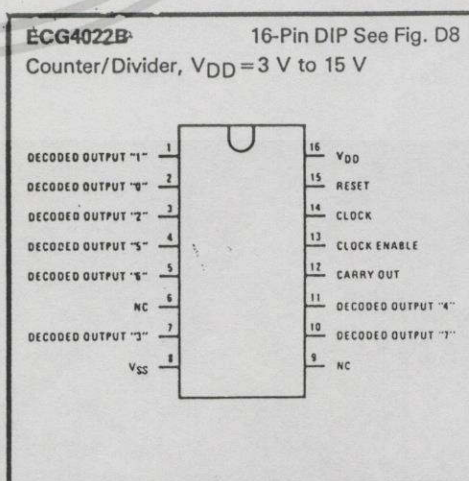
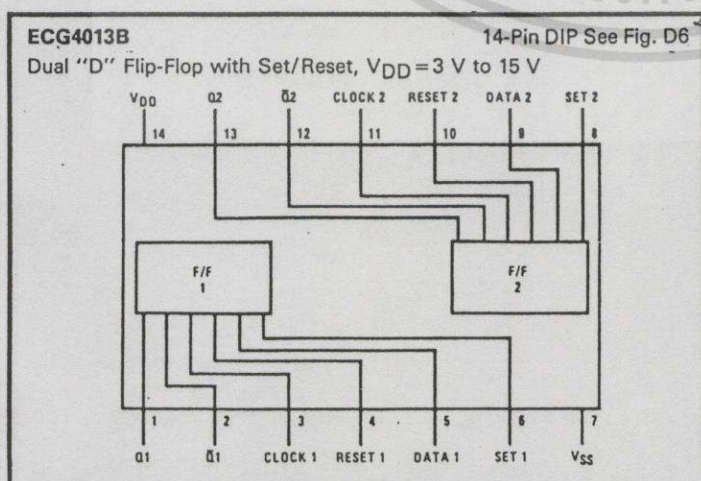
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แสดงแผนผังส่วนต่างๆของไทม์เมอร์ ไอซีเบอร์ 555  
อย่างง่าย



แสดงภาพวงจรเสมือนของไทม์เมอร์ ไอซีเบอร์ 555  
จากบริษัท RCA



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปะลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Designer's™ Data Sheet

## Insulated Gate Bipolar Transistor

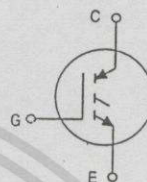
### N-Channel Enhancement-Mode Silicon Gate

**MGP20N60**

Motorola Preferred Device

This Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) uses an advanced termination scheme to provide an enhanced and reliable high voltage-blocking capability. Short circuit rated IGBT's are specifically suited for applications requiring a guaranteed short circuit withstand time such as Motor Control Drives. Fast switching characteristics result in efficient operation at high frequencies.

- Industry Standard TO-220 Package
- High Speed  $E_{off}$ : 60  $\mu$ J per Amp typical at 125°C
- High Short Circuit Capability - 10  $\mu$ s minimum
- Robust High Voltage Termination
- Robust RBSOA

CASE 221A-06, Style 9  
TO-220AB**MAXIMUM RATINGS** ( $T_C = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted)

Rating	Symbol	Value	Unit
Collector-Emitter Voltage	$V_{CES}$	600	Vdc
Collector-Gate Voltage ( $R_{GE} = 1.0 \text{ M}\Omega$ )	$V_{CGR}$	600	Vdc
Gate-Emitter Voltage — Continuous	$V_{GE}$	$\pm 20$	Vdc
Collector Current — Continuous @ $T_C = 25^\circ\text{C}$	$I_{C25}$	32	Adc
— Continuous @ $T_C = 90^\circ\text{C}$	$I_{C90}$	20	
— Repetitive Pulsed Current (1)	$I_{CM}$	64	Apk
Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$	$P_D$	142	Watts
Derate above $25^\circ\text{C}$		1.14	W/°C
Operating and Storage Junction Temperature Range	$T_J, T_{stg}$	-55 to 150	°C
Short Circuit Withstand Time ( $V_{CC} = 360 \text{ Vdc}$ , $V_{GE} = 15 \text{ Vdc}$ , $T_J = 25^\circ\text{C}$ , $R_G = 20 \Omega$ )	$t_{sc}$	10	$\mu$ s
Thermal Resistance — Junction to Case - IGBT	$R_{\theta JC}$	0.88	°C/W
— Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	65	
Maximum Lead Temperature for Soldering Purposes, 1/8" from case for 5 seconds	$T_L$	260	°C
Mounting Torque, 6-32 or M3 screw		10 lbf•in (1.13 N•m)	

(1) Pulse width is limited by maximum junction temperature.

**Designer's Data for "Worst Case" Conditions** — The Designer's Data Sheet permits the design of most circuits entirely from the information presented. SOA Limit curves — representing boundaries on device characteristics — are given to facilitate "worst case" design.

Preferred devices are Motorola recommended choices for future use and best overall value.



**ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.

91 ถ.ประชาอุทิศ บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140 โทร. 4709685-6 โทรสาร 8729083

## KMUTT RESEARCH AND DEVELOPMENT JOURNAL

91 Prachautid Rd, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140 Tel. 4709685-6 Fax. 8729083



ที่ ทม 5310.3/วส 035-43

ศูนย์ส่งเสริมงานวิจัยและทรัพย์สินทางปัญญา  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

25 กุมภาพันธ์ 2543

เรื่อง ตอบรับตีพิมพ์บทความ

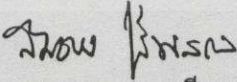
เรียน รศ.สุลี บรรจงจิตร

อ้างถึง บทความหมายเลข 31/42 เรื่อง “การทดสอบอุณหภูมิ ณ บริเวณลวดตัวนำและบริเวณน้ำมันของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน เพื่อนำเป็นค่าบรรทัดฐานของการออกแบบหม้อแปลง”

ด้วยกองบรรณาธิการได้รับบทความวิจัยเรื่อง “การทดสอบอุณหภูมิ ณ บริเวณลวดตัวนำและบริเวณน้ำมัน ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน เพื่อนำเป็นค่าบรรทัดฐานของการออกแบบหม้อแปลง” ซึ่งผ่านการปรับปรุงแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิแล้ว และยินดีที่จะแจ้งให้ท่านทราบว่า บทความของท่านมีกำหนดตีพิมพ์ในวารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 23 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม-สิงหาคม 2543

จึงใคร่ขอขอบคุณที่ท่านให้ความสนใจนำเสนอบทความลงตีพิมพ์ในวารสารฯ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะได้ตีพิมพ์บทความของท่านอีกในโอกาสต่อไป

ขอแสดงความนับถือ

  
(ศ.ดร.สมชาย ชูชีพสกุล)  
บรรณาธิการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การทดสอบอุณหภูมิ ณ บริเวณลวดตัวนำ และบริเวณน้ำมัน ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน เพื่อนำ เป็นค่าบรรทัดฐานของการออกแบบหม้อแปลง

สิริวิษ ทัดสวน<sup>1</sup>, วิจิตร กิณเรศ<sup>2</sup>, นิทัศน์ กฤษณะจินดา<sup>3</sup>, ศุภี บรรจงจิตร<sup>4</sup>  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

บุญเลิศ ตือเฉย<sup>2</sup>

มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ กรุงเทพมหานคร 10160

## บทคัดย่อ

ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมันนั้น ควรคำนึงถึงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนลวดตัวนำและน้ำมัน ทั้งนี้เพราะเมื่อหม้อแปลงจ่ายกระแสไฟฟ้าในสภาวะปกติหรือสภาวะโหลดเกิน อุณหภูมิ ณ บริเวณดังกล่าวจะมีความร้อนที่ไม่เท่ากัน ซึ่งถ้าได้คำนึงถึงอุณหภูมิที่จะเกิดขึ้นบนลวดตัวนำและน้ำมัน ในการออกแบบจะทำให้ได้หม้อแปลงที่คุ้มค่างบราคา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอุณหภูมิที่ลวดตัวนำด้านปฐมภูมิ ทertiary และตำแหน่งน้ำมัน โดยทดสอบที่บริเวณระดับความสูงต่างๆของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน ซึ่งใช้วิธีการทดสอบแบบตัดวงจรทางด้านขดลวดทุติยภูมิแล้วจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ค่าสูญเสียรวมเปรียบเทียบกับ การทดสอบโดยใช้โหลดจริง ถ้าผลลัพธ์จากการทดสอบที่ได้ทั้ง 2 วิธีมีค่าเท่ากัน ก็จะเป็นผลดีกับการทดสอบหม้อแปลงขนาดใหญ่ ซึ่งจะช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการจัดหาภาระไฟฟ้าและประหยัดพลังงานได้มาก นอกจากนี้ผลลัพธ์ที่ได้ทำให้ทราบค่าพารามิเตอร์จำเพาะและความสัมพันธ์ของความร้อน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของหม้อแปลง ซึ่งมีประโยชน์ทางด้านการออกแบบ การป้องกันอุณหภูมิเกิน การทำนายอุณหภูมิ การกำหนดภาระไฟฟ้า และอื่น ๆ เพื่อสามารถใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้าที่จะออกแบบสร้างใน ตัวต่อ ๆ ไป

<sup>1</sup> นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

<sup>2</sup> อาจารย์ ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

<sup>3</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

<sup>4</sup> รองศาสตราจารย์ ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

# Testing of temperature at conductor and oil of Mineral-Oil-Immersed Transformer in order to be the criterion for transformer design

Siriwich Tadsuan<sup>1</sup>, Vijit Kinnares<sup>2</sup>, Nitad Kritsanajinda<sup>3</sup>, Sulee Banjongjit<sup>4</sup>

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520

Boonlert Suechoey<sup>2</sup>

South-East Asia University, Bangkok 10160

---

## Abstract

The design of transformer should be paid on the consideration of temperature at conductor and oil because when the transformer is in normal state or overload, the temperatures at these areas are not equal. So, the consideration at conductor and oil for designing will enhance a reasonable cost transformer.

This paper proposes temperature testing of conductor at high voltage part, low voltage part and oil. Temperature testing is operated at any level of oil-immersed transformer. This testing includes short circuit test at secondary part, then generates current with total loss in order to compare with real load testing. If both testings are relevant, it is useful for the test of large KVA transformer because the cost of providing load and electrical energy will be reduced. The specific parameter and relations among heat at any location and are useful for design, protection of over temperature, prediction of temperature, determination load for transformer shall be known and advised to be the criterion for designing the successive transformer.

---

<sup>1</sup> Graduate Student, Department of Electrical Engineering

<sup>2</sup> Lecturer, Department of Electrical Engineering

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Electrical Engineering

<sup>4</sup> Associate Professor, Department of Electrical Engineering

## 1. บทนำ

บางครั้งผู้ผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าอาจจะต้องการตรวจสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงที่ออกแบบสร้างโดยปกติทั่ว ๆ ไปนั้นจะทำการทดสอบค่าอุณหภูมิเพิ่ม(Temperature rise)ของหม้อแปลง โดยหม้อแปลงเป็นแบบแช่น้ำมัน(ONAN)ซึ่งจะวัดอุณหภูมิน้ำมันด้านบนและครึ่งระบายความร้อนเท่านั้น[3] โดยมีได้ตรวจสอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของขดลวดแรงดันสูง แรงดันต่ำหรือน้ำมันในระดัต่าง ๆ ซึ่งการทดสอบลักษณะนี้จะไม่สามารถทำให้ทราบค่าอุณหภูมิ ณ จุดอื่น ๆ ได้ ดังนั้นจึงได้มีการทดสอบโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลตรวจสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงที่ตำแหน่งต่าง ๆ ที่บริเวณด้านล่าง ตรงกลาง ด้านบน และอื่นๆ ของหม้อแปลง โดยจัดสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมันขนาด 10 kVA, 380V/220V, 3 เฟส,  $\Delta/Y$  ที่มีการระบายความร้อนแบบ ONAN อย่างไรก็ตามหม้อแปลงที่นำมาทดสอบนี้เป็นหม้อแปลงขนาดเล็กๆ แต่จะสะดวกในการจัดหาโหลดมาทดสอบและป้องกันอันตรายอันเนื่องมาจากระดับแรงดันไฟฟ้า การทดสอบใช้หลักการ 2 แบบ คือแบบที่ 1 ใช้วิธีการลัดวงจร(ทดสอบที่ค่าสูญเสียรวม)[3] และแบบที่ 2 ใช้โหลดจริงโดยจ่ายโหลดที่พิกัดหม้อแปลง ซึ่งผลลัพธ์ทำให้ทราบค่าพารามิเตอร์จำเพาะของหม้อแปลง ความสัมพันธ์ของความร้อนในหม้อแปลงและตำแหน่งจุดที่ร้อนที่สุดในหม้อแปลง ตลอดจนความแตกต่างของอุณหภูมิของการทดสอบของทั้งสองหลักการ ซึ่งถ้าผลลัพธ์ต่าง ๆ จากการทดสอบหลักการทั้งสองนี้มีค่าใกล้เคียงกันจะเป็นผลดีกับการทดสอบหม้อแปลงขนาด(kVA)ใหญ่ ๆ ในอันที่จะไม่จำเป็นต้องจัดหาภาระไฟฟ้าที่มีขนาดมาก ๆ มารองรับกับขนาดของหม้อแปลง

## 2. ทฤษฎี

ในการออกแบบสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า สิ่งหนึ่งที่จะนำมาพิจารณาร่วมด้วยคือค่าพารามิเตอร์จำเพาะของหม้อแปลง[1,2] ซึ่งเป็นสิ่งที่มีความสำคัญในการกำหนดอายุการใช้งานของหม้อแปลงหรือค่ากำลังสูญเสีย[1,2] ค่าพารามิเตอร์จำเพาะที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้

### 2.1 อุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของขดลวด

โดยปกติวิธีการหาอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดนั้น ผู้ผลิตจะทำการทดสอบตามวิธีการที่ 1 โดยลัดวงจรทางขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง แต่การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดสอบตามวิธีการที่ 2 เข้าไว้ด้วย ซึ่งเป็นการใช้โหลดจริงเข้าร่วมทดสอบ

วิธีการที่ 1 ได้ทำการจ่ายแรงดันเข้าทางด้านขดลวดปฐมภูมิที่ค่าสูญเสียรวมของหม้อแปลง[3] และทำการวัดอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่เข้าน้ำมันด้านบนและอุณหภูมิแวลล้อม 2 ถึง 3 ตำแหน่ง ทำการบันทึกค่าของอุณหภูมิที่ทุก ๆ ตำแหน่งทุก ๆ ชั่วโมง จนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำมันด้านบนที่วัดได้มีค่าแตกต่างกันไม่เกิน  $1^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นทำการลดแรงดันไฟฟ้า จนกระแสไฟฟาลดลงอยู่ที่ค่าสูญเสียขณะมีโหลด(On load)ที่พิกัด จากนั้นตัดแหล่งจ่ายไฟออกแล้วทำการวัดค่าความต้านทานที่จุดต่อของหม้อแปลงเทียบกับเวลาทั้งด้านขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิทันที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการที่ 2 ใช้โพลจจริง(ลดความร้อนและโหลดไฟฟ้าแบบอินแคนเดสเซนต์) ต่อทางด้านทุติยภูมิ  
จ่ายแรงดันไฟฟ้าที่พิกัดและจ่ายกระแสไฟฟ้าที่พิกัดของหม้อแปลง แล้วทำการวัดอุณหภูมิของน้ำมันด้านบน  
(เหมือนวิธีการที่1)

จากค่าความต้านทานที่ได้ในแต่ละช่วงเวลาของทั้ง 2 วิธี นำมาเขียนกราฟเพื่อหาค่าความต้านทาน ณ จุดตัดกระแสไฟฟ้า( $R_{t2}$ ) ซึ่งหลักการเขียนกราฟแสดงในรูปที่ 1 แล้วนำค่าความต้านทาน ณ จุดตัดกระแสไฟฟ้านี้ไปคำนวณหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวด(Average winding temperature) [1-3] สมการของการพิจารณาอุณหภูมิประกอบด้วย

$$\Theta_{w2} = \frac{R_{t2}}{R_{t1}} (k + \Theta_{w1}) - k \quad (1)$$

โดยที่

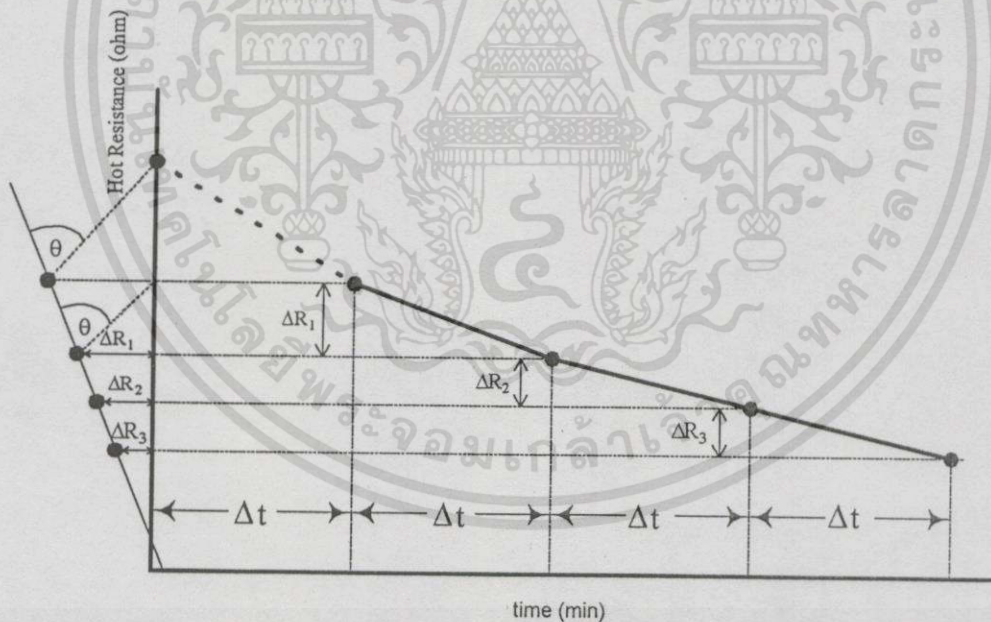
$\Theta_{w1}$  คือค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดที่เวลาก่อนเริ่มทดสอบ( $t_1$ ), °C

$\Theta_{w2}$  คือค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดที่เวลาตัดกระแสไฟฟ้า( $t_2$ ), °C

$R_{t1}$  คือค่าความต้านทานของขดลวดที่ได้จากการวัดที่เวลาก่อนเริ่มทดสอบ( $t_1$ ),  $\Omega$

$R_{t2}$  คือค่าความต้านทานของขดลวดที่ เวลาตัดกระแสไฟฟ้า( $t_2$ ),  $\Omega$

$k$  คือค่าคงที่ สำหรับทองแดง = 234.5 , อลูมิเนียม = 225



รูปที่1 การเขียนกราฟหาค่าความต้านทานของขดลวดตัวนำ ณ จุดตัดกระแสไฟฟ้า

$$\Theta_{wr} = \Theta_{w2} - \Theta_a \quad (2)$$

โดยที่

$\Theta_{wr}$  คืออุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของขดลวดที่มากกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่พิกัดโพลจ , °C

$\Theta_a$  คืออุณหภูมิแวดล้อม , °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 อุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนที่พิกัดโหลด ( $\Theta_{or}$ ), °C[1-3]

$$\Theta_{or} = \text{Top oil temp} - \Theta_a \quad (3)$$

2.3 ค่าอุณหภูมิเพิ่มแตกต่างระหว่างน้ำมันกับขดลวดที่พิกัดโหลด ( $g_r$ ), °C[2,3]

$$g_r = \Theta_{wr} - \Theta_{imr} \quad (4)$$

$$\Theta_{imr} = \frac{\Theta_{ir} + \Theta_{br}}{2} \quad (5)$$

โดยที่

$\Theta_{imr}$  คือค่าอุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของน้ำมัน, °C

$\Theta_{ir}$  คือค่าอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนที่ระดับเดียวกับขดลวดด้านบน, °C

$\Theta_{br}$  คือค่าอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านล่าง, °C

2.4 อัตราส่วนค่าสูญเสียโหลดที่พิกัดต่อค่าสูญเสียไร้ภาระ (R)[1,2]

$$R = \frac{\text{Onload loss}}{\text{Noload loss}} \quad (6)$$

2.5 ค่าเวลาความร้อนของน้ำมันคงตัว ( $\tau$ )[1]

$$\tau = \tau_0 \frac{\left(\frac{\Theta_{ou}}{\Theta_{or}}\right) - \left(\frac{\Theta_{oi}}{\Theta_{or}}\right)}{\left(\frac{\Theta_{ou}}{\Theta_{or}}\right)^{1/x} - \left(\frac{\Theta_{oi}}{\Theta_{or}}\right)^{1/x}} \quad (7)$$

โดยที่

$\tau$  คือค่าเวลาที่ความร้อนของน้ำมันคงตัว, ชั่วโมง

$\tau_0$  คือค่าเวลาที่ความร้อนของน้ำมันคงตัวที่พิกัดโหลดหม้อแปลง โดยพิจารณาที่อุณหภูมิเพิ่มเริ่มต้นของน้ำมันด้านบนที่มีค่าที่ 0 °C, ชั่วโมง

$\Theta_{oi}$  คือค่าอุณหภูมิเพิ่มเริ่มต้นของน้ำมันด้านบนช่วงระหว่างเวลาเริ่มต้น, °C

$\Theta_{ou}$  คือค่าอุณหภูมิเพิ่มสุดท้ายของน้ำมันด้านบน ที่ทุกๆ โหลด, °C

x คือค่ากำลังยกที่ เมื่อเป็นหม้อแปลงชนิด ONAN = 0.8

โดยปกติค่า  $\tau$  กับ  $\tau_0$  มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นสามารถประมาณให้เท่ากันได้ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนัก เมื่อต้องการหาค่า  $\tau_0$  จะพิจารณาที่ช่วงเวลาที่ร้อยละ 63 ของอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิจุดเริ่มต้นที่ 0 °C

2.6 ค่าอุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำ[2]

2.6.1 ที่สภาวะคงตัว

$$\Theta_{ou} = \Theta_{or} \left[ \frac{1 + RK^2}{1 + R} \right]^x \quad (8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Theta_h = \Theta_a + \Theta_{or} \left[ \frac{1+RK^2}{1+R} \right]^x + H.g_r.K^y \quad (9)$$

2.6.2 ที่สภาวะชั่วขณะ

$$\Theta_{ot} = \Theta_{oi} + (\Theta_{ou} - \Theta_{oi}) \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (10)$$

$$\Theta_h = \Theta_a + \left[ \Theta_{oi} + (\Theta_{ou} - \Theta_{oi}) \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right] + H.g_r.K^y \quad (11)$$

โดยที่

$\Theta_{ot}$  คือค่าอุณหภูมิของน้ำมันด้านบนที่โหลดใดๆ ในสภาวะชั่วขณะ, °C

$\Theta_h$  คือค่าอุณหภูมิจุดร้อนสูงสุดของตัวนำ, °C

K คือค่าอัตราส่วนของฟลักซ์โหลดขณะใช้งานต่อฟลักซ์โหลดหมีแปลง

y คือค่ากำลังคงที่ เมื่อหมีแปลงชนิด ONAN = 1.6

H คือค่าตัวประกอบอุณหภูมิจุดร้อนสุด เมื่อเป็นหมีแปลงชนิด ONAN = 1.1

### 3. การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

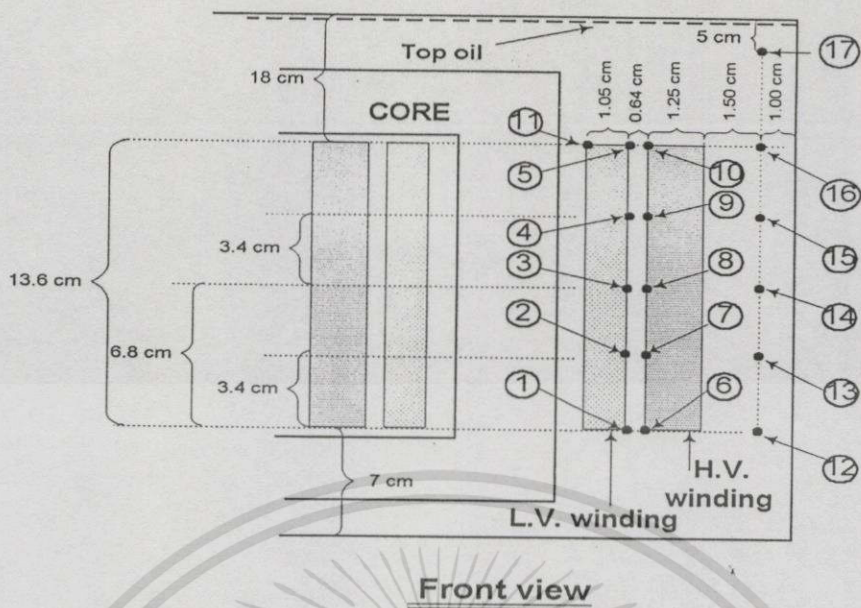
#### 3.1 ขั้นตอนการทดลองและผลการทดลอง

ในการทดสอบหาค่าอุณหภูมิของหมีแปลงแบบแช่น้ำมันนั้น จะใช้หมีแปลงที่มีคุณสมบัติตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 1 ลักษณะการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในหมีแปลงได้แสดงไว้ในรูปที่ 2 และทดสอบตามหัวข้อ 2.1 โดยการวัดอุณหภูมิใช้เครื่องมือแสดงผลอุณหภูมิยี่ห้อ DIGICON รุ่น ID-7 ร่วมกับเทอร์โมคัปเปิลชนิด K

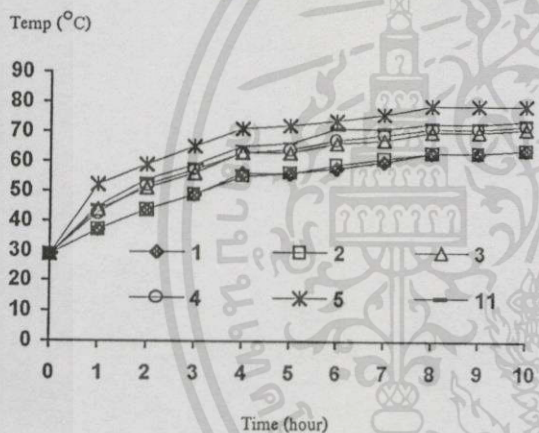
ตารางที่ 1 ข้อมูลของหมีแปลงแบบแช่น้ำมัน

Maximum VA = 10 kVA	Frequency = 50 Hz
Vector Dyn11	Class A
High Volt = 380 V	Type ONAN
Low Volt = 220 V	No Load Loss = 77 W
Load Loss = 350 W	Total Loss = 427 W
Average Winding Temp. rise Guarantee = 65 °C	Top-Oil Temp. rise Guarantee = 60 °C
Weight of core = 43 kg	Volume of Oil = 35 litre
Weight of tank and fitting = 49 kg	Weight of winding (H.V. + L.V.) = 14 kg

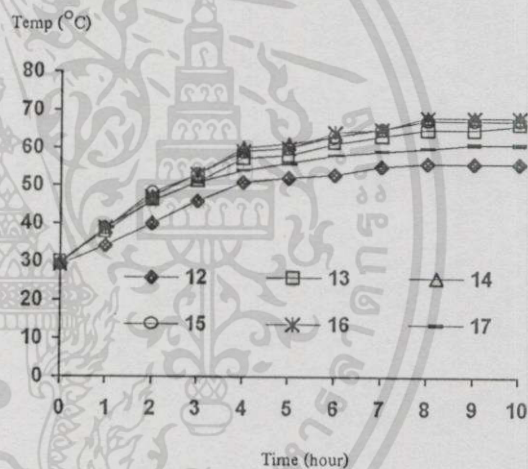
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



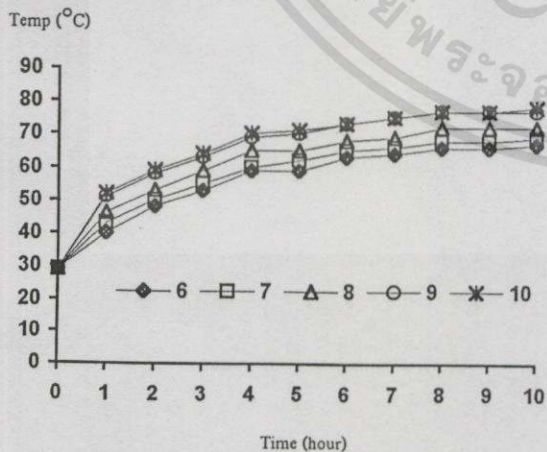
รูปที่ 2 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน



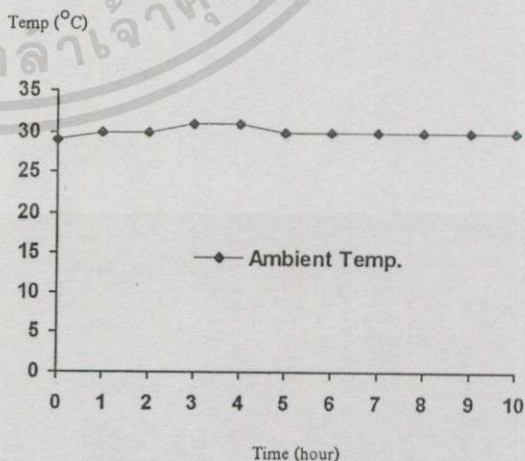
รูปที่ 3 ผลของอุณหภูมิขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 1, 2, 3, 4, 5, 11 เมื่อเป็นการทดสอบแบบลัดวงจร



รูปที่ 5 ผลของอุณหภูมิน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 12, 13, 14, 15, 16, 17 เมื่อเป็นการทดสอบแบบลัดวงจร

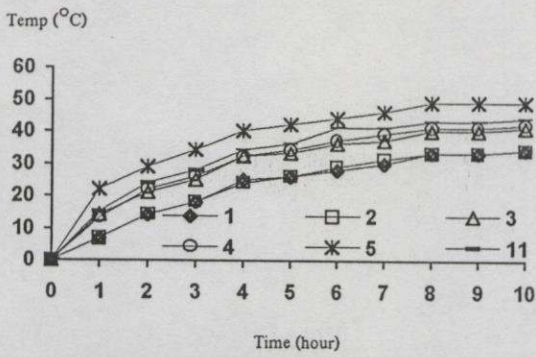


รูปที่ 4 ผลของอุณหภูมิขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 6, 7, 8, 9, 10 เมื่อเป็นการทดสอบแบบลัดวงจร

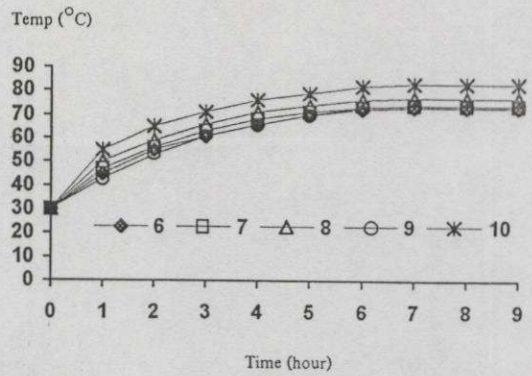


รูปที่ 6 ผลของอุณหภูมิแวดล้อมขณะทำการทดสอบแบบลัดวงจร

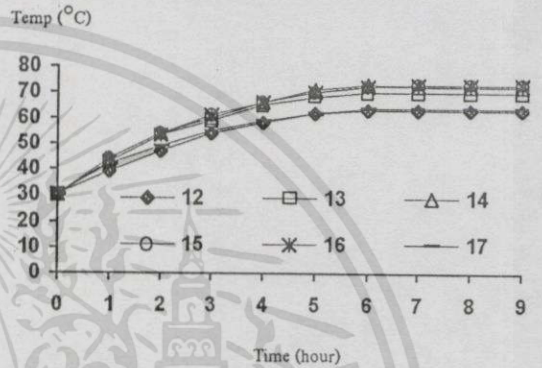
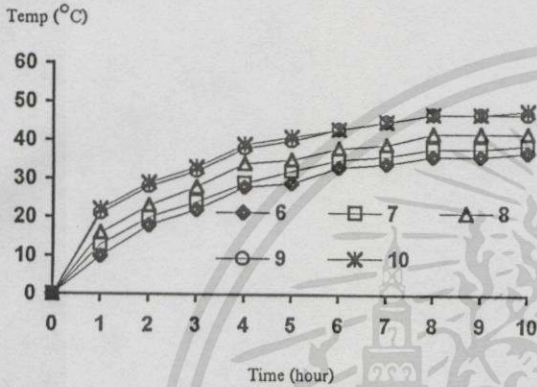
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 ผลของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 1,2,3,4,5,11 เมื่อเป็นการทดสอบแบบลัดวงจร

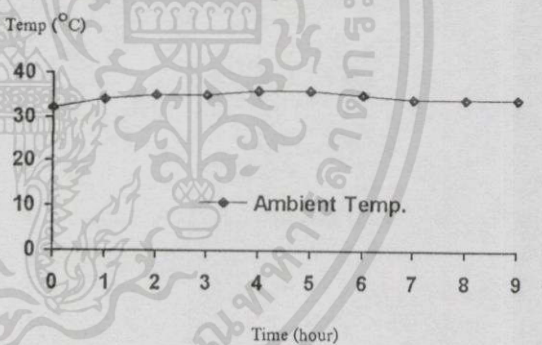
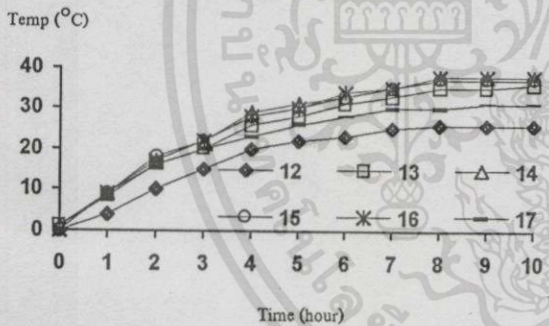


รูปที่ 11 ผลของอุณหภูมิขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 6, 7, 8, 9,10 เมื่อเป็นการทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น



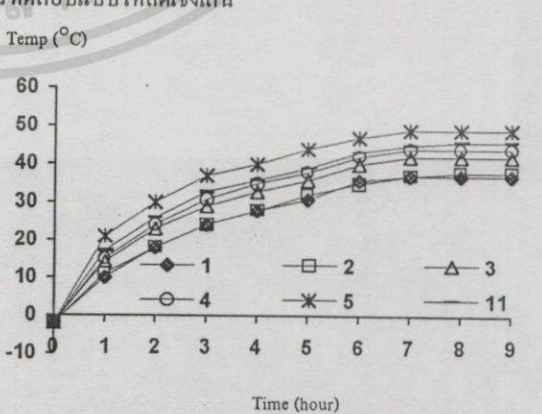
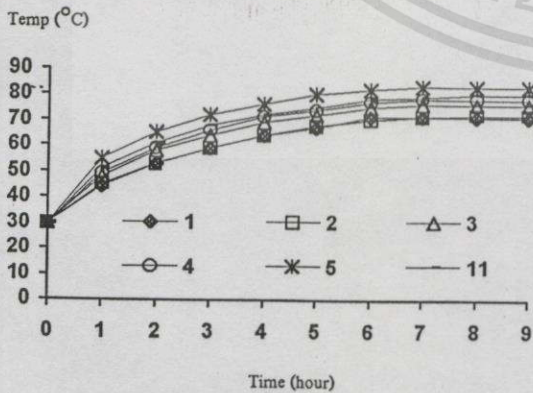
รูปที่ 8 ผลของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 6,7,8,9,10 เมื่อเป็นการทดสอบแบบลัดวงจร

รูปที่ 12 ผลของอุณหภูมิน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 12,13,14,15,16,17 เมื่อเป็นการทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น



รูปที่ 9 ผลของอุณหภูมิตั้งเพิ่มของน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 12,13,14,15, 16,17 เมื่อเป็นการทดสอบแบบลัดวงจร

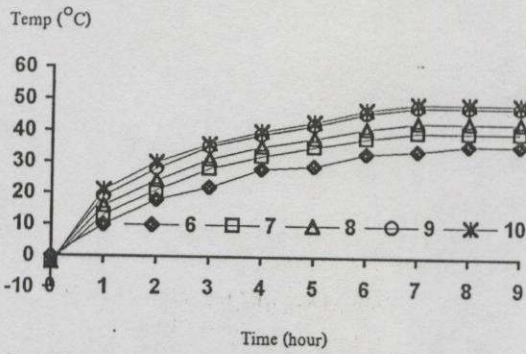
รูปที่ 13 ผลของอุณหภูมิแวดล้อมขณะทำการทดสอบ เมื่อเป็นการทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น



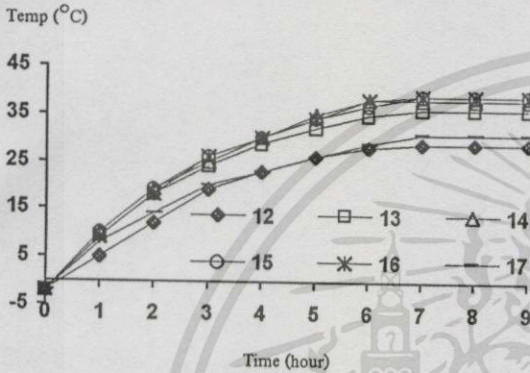
รูปที่ 10 ผลของอุณหภูมิตั้งเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 1,2,3,4,5 11 เมื่อเป็นการทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น

รูปที่ 14 ผลของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 1,2,3,4,5,11 เมื่อเป็นการทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น

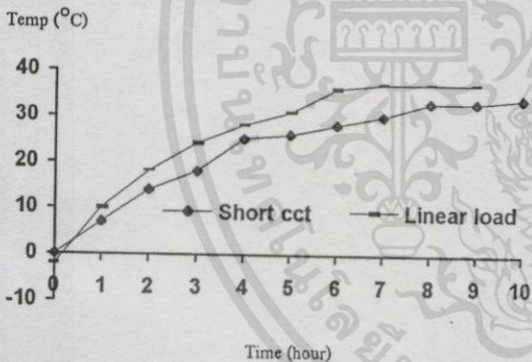
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



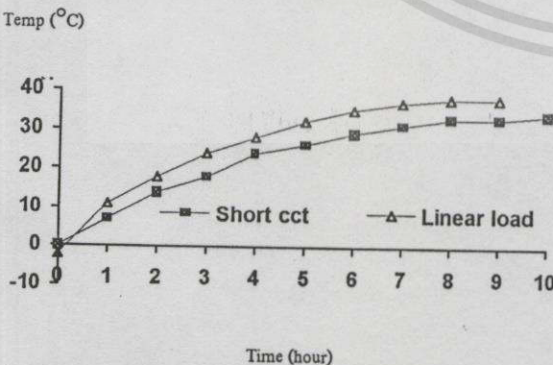
รูปที่15 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 6,7,8,9,10 เมื่อเป็นการทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น



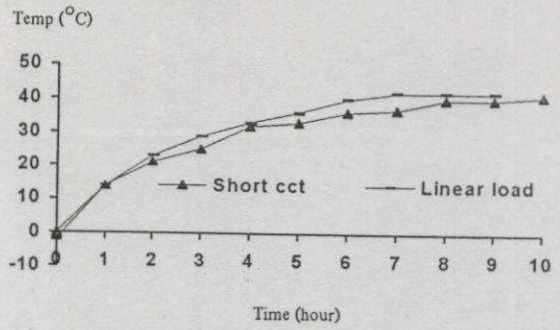
รูปที่16 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 12,13,14, 15,16,17 เมื่อเป็นการทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น



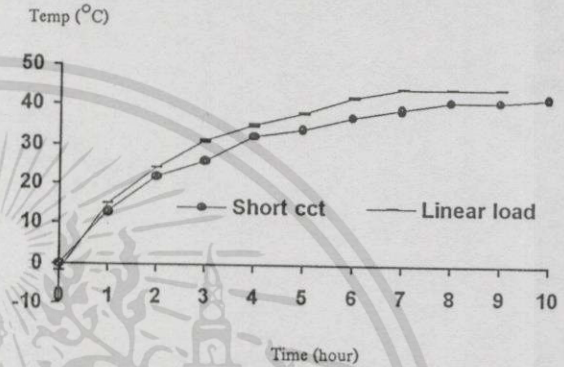
รูปที่17 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจรกับ โหลดเชิงเส้น



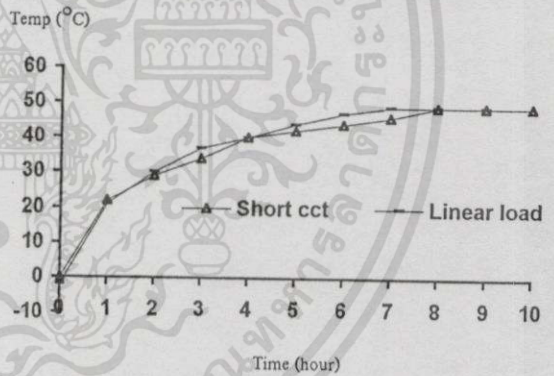
รูปที่18 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจรกับ โหลดเชิงเส้น



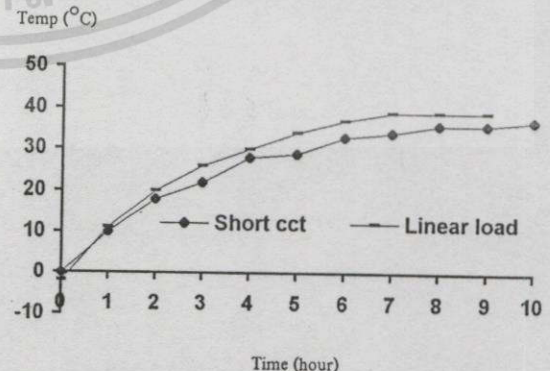
รูปที่19 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบ ลัดวงจรกับ โหลดเชิงเส้น



รูปที่20 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 4 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจรกับ โหลดเชิงเส้น

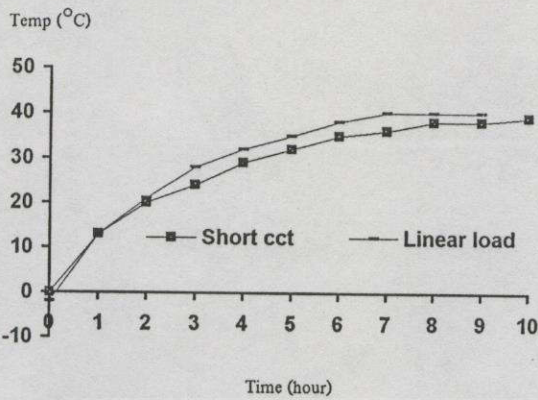


รูปที่21 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 5 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจรกับ โหลดเชิงเส้น

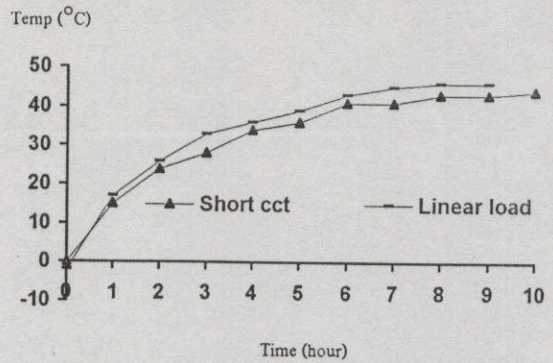


รูปที่22 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 6 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจรกับ โหลดเชิงเส้น

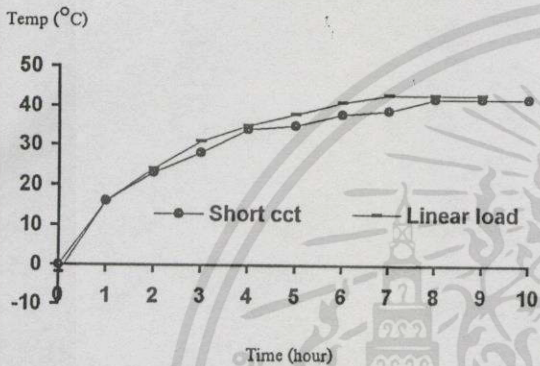
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



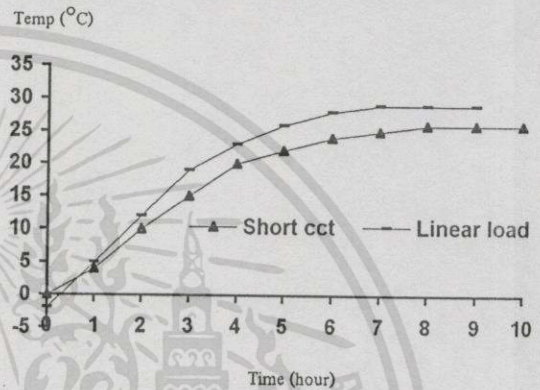
รูปที่23 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 7 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจรกับ โหลดเชิงเส้น



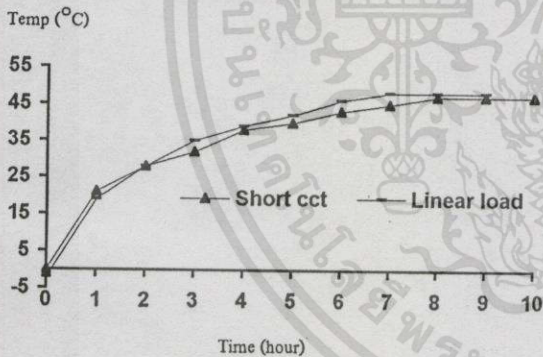
รูปที่27 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 11 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจรกับ โหลดเชิงเส้น



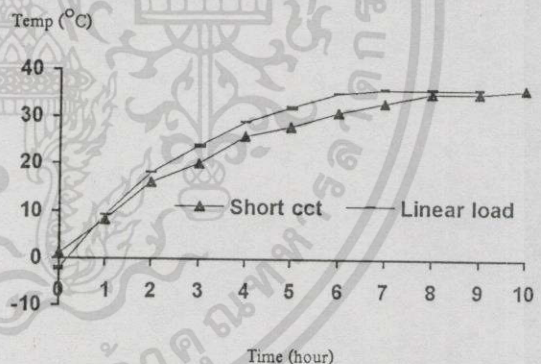
รูปที่24 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 8 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจรกับ โหลดเชิงเส้น



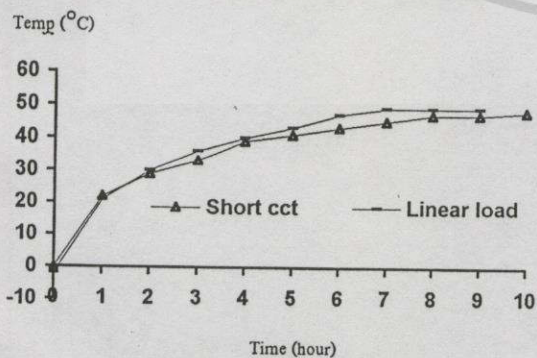
รูปที่28 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 12 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจรกับ โหลดเชิงเส้น



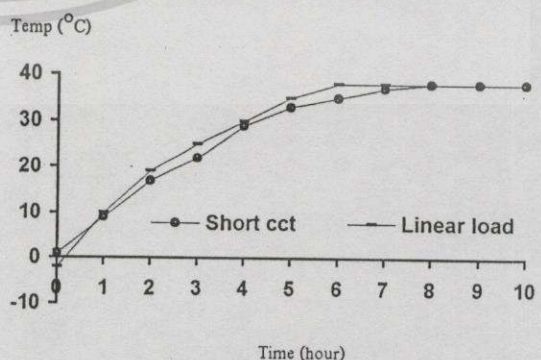
รูปที่25 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 9 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจรกับ โหลดเชิงเส้น



รูปที่29 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 13 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจรกับ โหลดเชิงเส้น

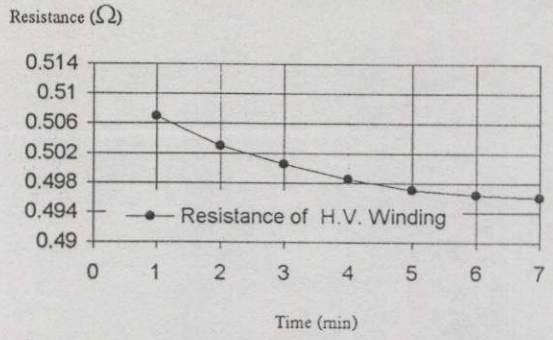
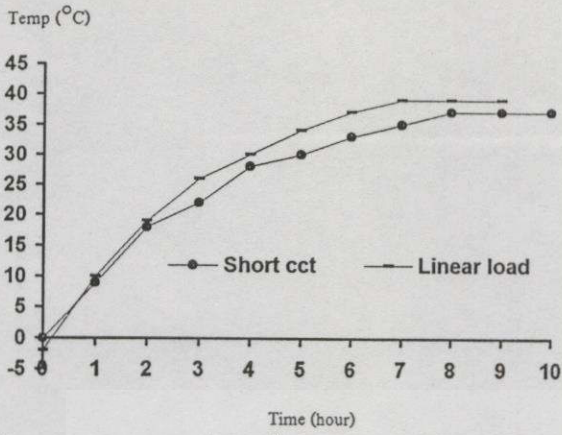


รูปที่26 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 10 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจรกับ โหลดเชิงเส้น

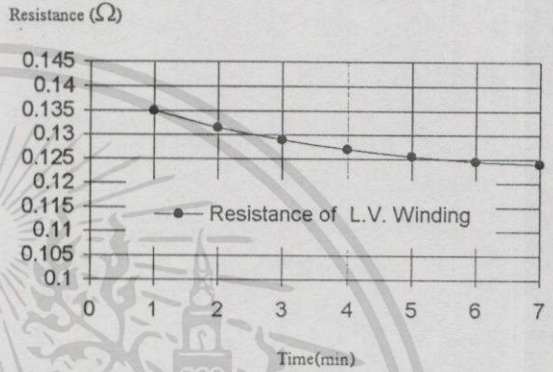


รูปที่30 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 14 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจรกับ โหลดเชิงเส้น

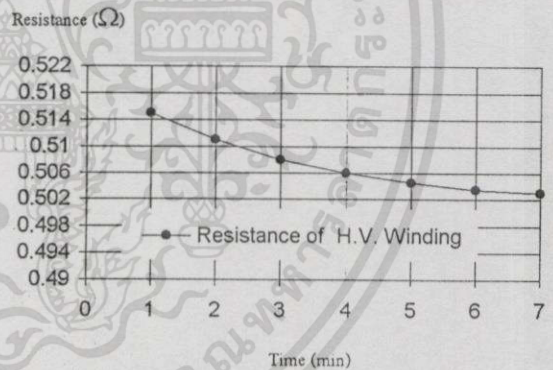
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



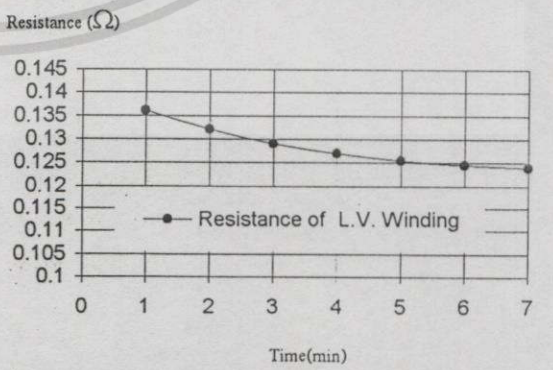
รูปที่34 ผลของความต้านทานที่วัดได้ต่อช่วงเวลา หลังจากตัดกระแสไฟฟ้าของขดลวดแรงสูง โดยทดสอบแบบลัดวงจร



รูปที่35 ผลของความต้านทานที่วัดได้ต่อช่วงเวลา หลังจากตัดกระแสไฟฟ้าของขดลวดแรงดันต่ำ โดยทดสอบแบบลัดวงจร

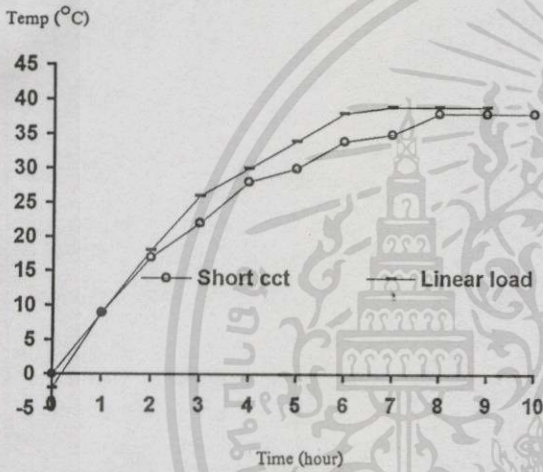


รูปที่36 ผลของความต้านทานที่วัดได้ต่อช่วงเวลา หลังจากตัดกระแสไฟฟ้าของขดลวดแรงสูง โดยทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น

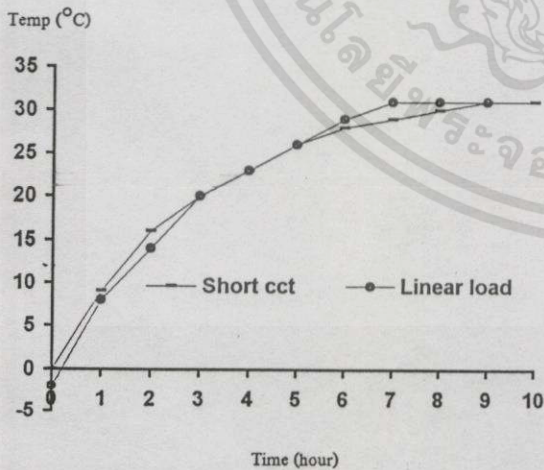


รูปที่37 ผลของความต้านทานที่วัดได้ต่อช่วงเวลา หลังจากตัดกระแสไฟฟ้าของขดลวดแรงดันต่ำโดยทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น

รูปที่31 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 15 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจรกับโหลดเชิงเส้น



รูปที่32 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 16 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจรกับโหลดเชิงเส้น



รูปที่33 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 17 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจรกับโหลดเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากรูปที่ 7, 8, 10, 11 เป็นผลของอุณหภูมิของขดลวดแรงดันสูงและแรงดันต่ำในสภาวะทดสอบแบบ ถัดวงจรและโหลดเชิงเส้น ผลการทดสอบทั้งสองเงื่อนไขพบว่าอุณหภูมิขดลวดด้านบนสูงกว่าขดลวดด้านล่างตลอดช่วงการทดสอบ เพราะฉะนั้นค่าอุณหภูมิที่สูงมีผลทำให้จำนวนด้านบนเสื่อมสภาพเร็วกว่าบริเวณ ตำแหน่งอื่นๆ

จากรูปที่ 9, 12 เป็นผลของอุณหภูมิน้ำมันที่ระดับต่างๆ ซึ่งเห็นว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 16 จะมีค่าสูงสุด ส่วนตำแหน่งที่ 17 เป็นตำแหน่งของเบ้าน้ำมันที่ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิน้ำมันบริเวณด้านบนที่ผู้ผลิตออกแบบสร้างขึ้น ซึ่งค่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่บริเวณเบ้าน้ำมันนี้ ลบด้วยอุณหภูมิแวดล้อมก็คืออุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน ( $\Theta_{or}$ ) จากรูปกราฟที่ 33 จะพบว่า การทดสอบแบบใช้โหลดเชิงเส้น ใช้เวลาน้อยกว่า 1 ชั่วโมง (โหลดเชิงเส้นใช้เวลา 9 ชั่วโมง ส่วนแบบถัดวงจรใช้เวลา 10 ชั่วโมง) สาเหตุความแตกต่างกันของทั้ง 2 วิธีนั้น เกิดจากระดับแรงดันไฟฟ้าที่เป็นแหล่งจ่ายให้กับหม้อแปลงมีการเปลี่ยนแปลงช่วงขณะทดสอบ และระบบการหมุนเวียนของน้ำมันภายในถังหม้อแปลงที่แตกต่างกันบ้าง

เมื่อทราบค่า  $\Theta_{or}$  แล้วก็สามารถคำนวณค่าเวลาความร้อนคงตัวของน้ำมัน ( $\tau_0$ ) โดยพิจารณาที่ ประมาณร้อยละ 63 ของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน ซึ่งสามารถแสดงผลลัพธ์ที่ได้ดังตารางที่ 2 ตารางที่ 2 ค่าการทดสอบหาอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนที่ตำแหน่ง 17 และค่าเวลาความร้อนของน้ำมันคงตัว

ค่าอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน ( $\Theta_{or}$ ) โดยวิธีการถัดวงจร	31 °C
ค่าอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน ( $\Theta_{or}$ ) โดยใช้โหลดเชิงเส้น	31 °C
$\tau_0$ จากการทดสอบ โดยถัดวงจร	3 hours
$\tau_0$ จากการทดสอบ โดยใช้โหลดเชิงเส้น	3 hours

#### หมายเหตุ

- อุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน = อุณหภูมิของน้ำมัน - อุณหภูมิแวดล้อม

ทดสอบแบบถัดวงจร พิจารณาชั่วโมงสุดท้ายของการทดสอบ (ชั่วโมงที่ 10)

$$\Theta_{or} = \text{อุณหภูมิน้ำมันด้านบน (ตำแหน่ง 17) - อุณหภูมิแวดล้อม} = 61 \text{ }^{\circ}\text{C} - 30 \text{ }^{\circ}\text{C} = 31 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

- ที่ร้อยละ 63 ของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน (ตำแหน่งที่ 17) ที่เวลา 10 ชั่วโมง =  $0.63 \times 25 \text{ }^{\circ}\text{C} = 19.53 \text{ }^{\circ}\text{C}$

- จากกราฟรูปที่ 33 จะได้ ( $\tau_0$ )  $\approx$  3 ชั่วโมง

ทดสอบโดยใช้โหลดเชิงเส้น พิจารณาชั่วโมงสุดท้ายของการทดสอบ (ชั่วโมงที่ 9)

$$\Theta_{or} = \text{อุณหภูมิน้ำมันด้านบน (ตำแหน่ง 17) - อุณหภูมิแวดล้อม} = 65 \text{ }^{\circ}\text{C} - 34 \text{ }^{\circ}\text{C} = 31 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

- ที่ร้อยละ 63 ของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน (ตำแหน่งที่ 17) ที่เวลา 10 ชั่วโมง =  $0.63 \times 25 \text{ }^{\circ}\text{C} = 19.53 \text{ }^{\circ}\text{C}$

- จากกราฟรูปที่ 33 จะได้ ( $\tau_0$ )  $\approx$  3 ชั่วโมง

จะเห็นว่าค่าพารามิเตอร์  $\Theta_{or}$  และ  $\tau_0$  ของการทดสอบทั้ง 2 แบบมีค่าเท่ากันก็แสดงว่าสามารถใช้ การทดสอบโดยวิธีการถัดวงจรแทนการทดสอบแบบใช้โหลดเชิงเส้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จากรูปที่ 34-37 จากข้อมูลที่ได้นำไปเขียนกราฟ เพื่อหาค่าความต้านทาน ณ จุดตัดกระแสไฟฟ้า โดยใช้หลักการเขียนรูปกราฟผังรูปที่ 1 จากนั้นใช้สมการที่ 1, 2 เพื่อหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ย ( $\Theta_{w2}$ ) โดยกำหนดค่าให้ k เท่ากับ 234.5 และนำไปหาค่า  $\Theta_{wr}$  ค่าต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าการคำนวณหาค่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉลี่ยของขดลวด

ตำแหน่งที่ทดสอบ	$\Theta_{w1}$ °C	$R_{t1}$ $\Omega$	$\Theta_{w2}$ °C	$R_{t2}$ $\Omega$	$\Theta_{wr}$ °C
ขดแรงดันต่ำ(ลัดวงจร)	31	0.1206	73.708	0.14	44.708
ขดแรงดันสูง(ลัดวงจร)	31	0.4417	73.677	0.5127	43.677
ขดแรงดันต่ำ(โหลดเชิงเส้น)	31	0.1206	79	0.1424	45
ขดแรงดันสูง(โหลดเชิงเส้น)	31	0.4417	78.3055	0.5204	45.3055

#### หมายเหตุ

ทดสอบโดยใช้วิธีการลัดวงจร

$$\Theta_{wr}(L.V.) = \Theta_{w2}(L.V.) - \text{อุณหภูมิแวดล้อม} = 73.708^{\circ}\text{C} - 29^{\circ}\text{C} = 44.708^{\circ}\text{C}$$

$$\Theta_{wr}(H.V.) = \Theta_{w2}(H.V.) - \text{อุณหภูมิแวดล้อม} = 73.677^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C} = 43.677^{\circ}\text{C}$$

ทดสอบโดยใช้โหลดเชิงเส้น

$$\Theta_{wr}(L.V.) = \Theta_{w2}(L.V.) - \text{อุณหภูมิแวดล้อม} = 79^{\circ}\text{C} - 34^{\circ}\text{C} = 45^{\circ}\text{C}$$

$$\Theta_{wr}(H.V.) = \Theta_{w2}(H.V.) - \text{อุณหภูมิแวดล้อม} = 78.3055^{\circ}\text{C} - 33^{\circ}\text{C} = 45.3055^{\circ}\text{C}$$

\* ค่าความต้านทานที่ได้จากการทดสอบและจากการเขียนกราฟ เป็นค่าความต้านทานที่จุดต่อทางแรงดันสูงและแรงดันต่ำของหม้อแปลง

จากผลการคำนวณเห็นว่าค่าพารามิเตอร์  $\Theta_{wr}$  ของการทดสอบแบบ โหลดเชิงเส้นมีค่าใกล้เคียงกับวิธีการลัดวงจร ซึ่งแสดงว่าสามารถใช้การทดสอบโดยวิธีลัดวงจรแทนการทดสอบแบบใช้โหลดเชิงเส้นได้

- จากรูปที่ 3, 4, 7, 8 เป็นอุณหภูมิขดลวดแรงดันต่ำและแรงดันสูงที่ได้จากการทดสอบทั้งสองสภาวะ จะเห็นว่าที่ขดลวดแรงดันต่ำที่ตำแหน่ง 5 และขดลวดแรงดันสูงที่ตำแหน่ง 10 มีค่าอุณหภูมิสูงกว่าที่ตำแหน่งอื่นๆ

- จากตารางที่ 4 เป็นผลการเปรียบเทียบจากการทดสอบค่า  $g_r$  จากทั้งสองเงื่อนไขจะมีค่าเท่าๆกัน ซึ่งหมายความว่า สามารถแทนการทดสอบโดยใช้โหลดจริงด้วยวิธีการลัดวงจรได้ และผลการคำนวณจากทั้งสองวิธีก็มีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก ส่วนผลจากการคำนวณมีค่าสูงกว่าทดสอบเล็กน้อย ซึ่งสาเหตุมาจากการผลการเขียนกราฟหาค่าความต้านทาน ณ จุดตัดกระแสไฟฟ้า ( $R_{t2}$ ) ผิดพลาดบ้างเล็กน้อย รวมถึงข้อผิดพลาดอันเนื่องมาจากเครื่องมือที่ใช้วัดค่าความต้านทานลวดตัวนำ

ตารางที่ 4 ผลของค่าการทดสอบและการคำนวณค่า  $g_r$  ในสภาวะทดสอบวิธีการลัดวงจรและใช้โหลดเชิงเส้น

วิธีการทดสอบและการคำนวณ	$g_r(H.V.), ^{\circ}\text{C}$	$g_r(L.V.), ^{\circ}\text{C}$
ทดสอบโดยวิธีการลัดวงจร	10	11
ทดสอบโดยใช้โหลดเชิงเส้น	10	10
จากการคำนวณ( สมการที่ 4,5) โดยใช้ข้อมูลพื้นฐานจากการทดสอบแบบลัดวงจร	11.677	12.708
จากการคำนวณ( สมการที่ 4,5) โดยใช้ข้อมูลพื้นฐานจากการทดสอบใช้โหลดเชิงเส้น	11.3055	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารทูลงวันเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ

ทดสอบโดยใช้วิธีการลัดวงจร พิจารณาชั่วโมงที่ 10

$$\odot_{gr}(\text{test}) = \text{อุณหภูมิขดลวดแรงดันต่ำ(ตำแหน่ง5)} - \text{อุณหภูมิน้ำมันด้านบน(ตำแหน่ง16)} = 49^{\circ}\text{C} - 38^{\circ}\text{C} = 11^{\circ}\text{C}$$

$$\odot_{gr}(\text{test}) = \text{อุณหภูมิขดลวดแรงดันสูง(ตำแหน่ง10)} - \text{อุณหภูมิน้ำมันด้านบน(ตำแหน่ง16)} = 48^{\circ}\text{C} - 38^{\circ}\text{C} = 10^{\circ}\text{C}$$

$$\odot_{gr}(\text{L.V.})_{\text{calculated}} = \odot_{wr} - \frac{\odot_{ir} + \odot_{br}}{2} = 44.708 - \frac{38 + 26}{2} = 12.708^{\circ}\text{C}$$

$$\odot_{gr}(\text{H.V.})_{\text{calculated}} = \odot_{wr} - \frac{\odot_{ir} + \odot_{br}}{2} = 43.677 - \frac{38 + 26}{2} = 11.677^{\circ}\text{C}$$

ทดสอบโดยใช้แบบโหลดเชิงเส้น พิจารณาชั่วโมงที่ 9

$$\odot_{gr}(\text{test}) = \text{อุณหภูมิขดลวดแรงดันต่ำ(ตำแหน่ง5)} - \text{อุณหภูมิน้ำมันด้านบน(ตำแหน่ง16)} = 49^{\circ}\text{C} - 39^{\circ}\text{C} = 10^{\circ}\text{C}$$

$$\odot_{gr}(\text{test}) = \text{อุณหภูมิขดลวดแรงดันสูง(ตำแหน่ง10)} - \text{อุณหภูมิน้ำมันด้านบน(ตำแหน่ง16)} = 49^{\circ}\text{C} - 39^{\circ}\text{C} = 10^{\circ}\text{C}$$

$$\odot_{gr}(\text{L.V.})_{\text{calculated}} = \odot_{wr} - \frac{\odot_{ir} + \odot_{br}}{2} = 45 - \frac{39 + 29}{2} = 11^{\circ}\text{C}$$

$$\odot_{gr}(\text{H.V.})_{\text{calculated}} = \odot_{wr} - \frac{\odot_{ir} + \odot_{br}}{2} = 45.3055 - \frac{39 + 29}{2} = 11.3055^{\circ}\text{C}$$

3.2.4 จากรูปที่ 7-9 เป็นผลลัพธ์จากการทดสอบที่เวลา 10 ชั่วโมงของการทดสอบโดยวิธีการลัดวงจร และรูปที่ 14-16 ที่เวลา 9 ชั่วโมงของการทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น เมื่อนำผลลัพธ์ที่ได้มาทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิเพิ่มกับระดับความสูงของขดลวดและระดับน้ำมัน ได้ดังรูปกราฟที่ 38 a) - d) ได้รับความสัมพันธ์ดังสมการที่ 12-17 ดังต่อไปนี้

เมื่อทดสอบโดยวิธีการลัดวงจร

- จากรูปที่ 7 ได้สมการอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ(y) ต่อความสูงของขดลวดแรงดันต่ำ(x)

$$Y = -4 \times 10^{-7} X^3 + 0.0005 X^2 + 0.0454 X + 33.541 \quad (12)$$

- จากรูปที่ 8 ได้สมการอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง(y) ต่อความสูงของขดลวดแรงดันสูง(x)

$$Y = -1 \times 10^{-5} X^3 + 0.0022 X^2 - 0.0148 X + 37.07 \quad (13)$$

- จากรูปที่ 9 ได้สมการอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน(y) ต่อความสูงของขดลวด(x)

$$Y = 2.5063 \ln(x) + 26.336 \quad (14)$$

เมื่อทดสอบแบบใช้โหลดเชิงเส้น

- จากรูปที่ 14 ได้สมการอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ(y) ต่อความสูงของขดลวดแรงดันต่ำ(x)

$$Y = 0.0881x + 35.989 \quad (15)$$

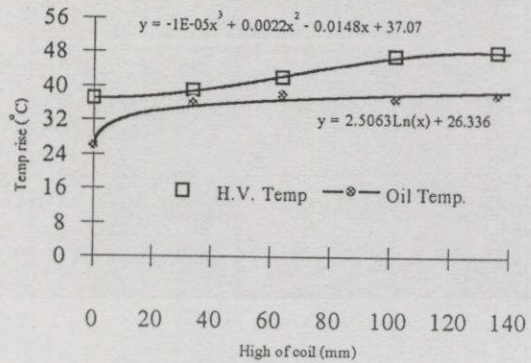
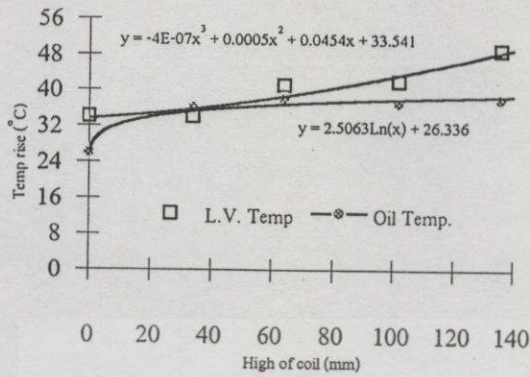
- จากรูปที่ 15 ได้สมการอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง(y) ต่อความสูงของขดลวดแรงดันสูง(x)

$$Y = 0.1x + 36.383 \quad (16)$$

- จากรูปที่ 16 ได้สมการอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน(y) ต่อความสูงของขดลวด(x)

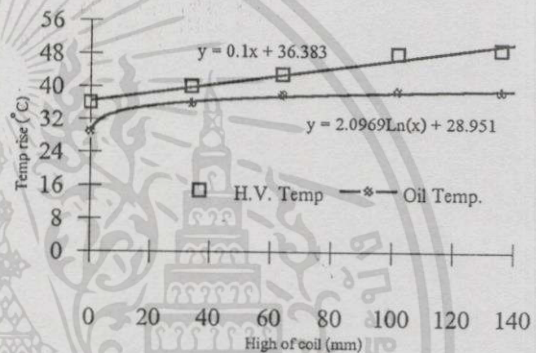
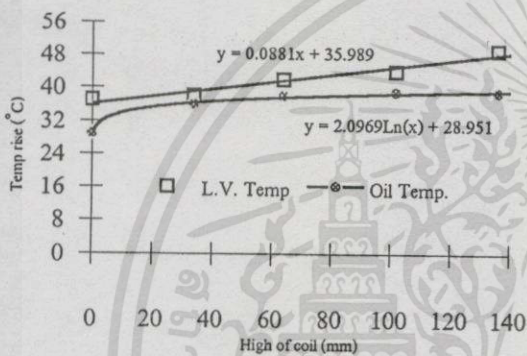
$$Y = 2.0969 \ln(x) + 28.951 \quad (17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a)

b)



c)

d)

- รูปที่ 38 a) ผลของอุณหภูมิเพิ่มที่ระดับความสูงต่างๆ ของขดลวดแรงดันต่ำและน้ำมันของการทดสอบโดยวิธีการลัดวงจร
- b) ผลของอุณหภูมิเพิ่มที่ระดับความสูงต่างๆ ของขดลวดแรงดันสูงและน้ำมันของการทดสอบโดยวิธีการลัดวงจร
- c) ผลของอุณหภูมิเพิ่มที่ระดับความสูงต่างๆ ของขดลวดแรงดันต่ำและน้ำมันของการทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น
- d) ผลของอุณหภูมิเพิ่มที่ระดับความสูงต่างๆ ของขดลวดแรงดันสูงและน้ำมันของการทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น

จากผลการทดสอบทั้งสองเงื่อนไขเห็นว่าความชันของเส้นอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดค่อนข้างจะเป็นเชิงเส้นตรงและมีค่าเท่าๆกัน และเส้นของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันค่อนข้างจะโค้งคล้ายๆกัน ซึ่งผลที่ได้จะสามารถทำให้ทราบว่าอุณหภูมิน้ำมันที่ระดับกลางถึงกับด้านบนถึงมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงว่าระบบการหมุนเวียนของน้ำมันในหม้อแปลงที่ออกแบบ ONAN ไม่ค่อยดีนัก พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบนี้จะสามารถนำไปทำนายอุณหภูมิจุดร้อนสุดของขดลวดและอุณหภูมิน้ำมันที่สภาวะคงตัวและสภาวะชั่วขณะโดยใช้สมการที่ 8-11

ข้อมูลเฉพาะของเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

1. เครื่องแสดงผลอุณหภูมิ ชี่ห้อ DIGICON รุ่น ID-7, CA(K), ช่วงการวัดอุณหภูมิ 0-400 °C
2. เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K โครเมล/อลูเมล ช่วงการวัดอุณหภูมิ -270 ถึง 1,372 °C

#### 4.สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบหาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ สามารถแยกสรุปได้เป็นข้อๆดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. อุณหภูมิที่ด้านบนของขดลวด มีค่ามากกว่าที่ระดับต่ำรองลงมา และอุณหภูมิมีลักษณะค่อนข้างจะเป็นเชิงเส้นตรงตลอดความสูง
2. อุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่ระดับความสูงเดียวกับขดลวดด้านบน จะมีค่าอุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิที่ระดับต่ำรองลงมา และอุณหภูมิมักจะเป็นเส้นโค้ง
3. อุณหภูมิของขดลวดแรงดันไฟฟ้าต่ำ จะมีค่าใกล้เคียงกับที่แรงดันไฟฟ้าสูง
4. อุณหภูมิของขดลวดจะมีค่ามากกว่าอุณหภูมิที่น้ำมัน เมื่อพิจารณาระยะเวลาความสูงเดียวกัน

ผลที่ได้จากการทดสอบทำให้ทราบว่าจุดที่ร้อนสุดของหม้อแปลงอยู่ที่ขดลวดด้านบนที่เป็นจุดที่มีการถ่ายเทความร้อนไม่ดีนัก เพราะฉะนั้นเมื่อออกแบบหม้อแปลง น่าจะออกแบบให้มีร่องน้ำมันที่มีขนาดกว้างเพื่อที่จะให้น้ำมันหม้อแปลงมีการหมุนเวียนที่บริเวณขดลวดมากเป็นพิเศษ แต่ต้องคำนึงถึงการFlash over ด้วย จากการทดสอบหาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ จะทำให้สามารถนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นประโยชน์มากสำหรับงานออกแบบหม้อแปลง การป้องกันหม้อแปลงหรือป้องกันอุปกรณ์ที่นำมาต่อรวมด้วยกับหม้อแปลง และยังสามารถนำข้อมูลจำเพาะที่ได้จากการทดสอบนี้ใช้ในการทำนายอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะใช้งานของหม้อแปลงที่ออกแบบ(design)เดียวกันทุกๆตัว

ซึ่งในการทดลองนี้ใช้หม้อแปลงระดับแรงดันไฟฟ้า 380V/220V, 10kVA สาเหตุอันเนื่องมาจากการจัดหาโหลดที่นำมาทดลองที่มีปริมาณไม่มากนักและเป็นการป้องกันอันตรายที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำไปยังตัวเทอร์โมคัปเปิล แต่จะเป็นแนวทางการพัฒนาในการใช้หม้อแปลงที่มีขนาด(kVA)ใหญ่ และแรงดันไฟฟ้าสูง(kV)ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังสามารถอาศัยหลักการที่นำเสนอ นำไปทดสอบใช้กับการออกแบบหม้อแปลงที่จ่ายให้กับโหลดที่เป็นประเภทไม่เชิงเส้น(Non-linear load) ได้

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัท พงษ์พิมาณการไฟฟ้า จำกัด ที่สนับสนุนอุปกรณ์สำหรับงานวิจัยนี้จนสามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

## 6. เอกสารอ้างอิง

1. "IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immerse Overhead and Pad-Mounted Distribution Transformers Rated 500 kVA and Less with 65 °C or 55 °C Average Winding Rise", ANSI/IEEE C57.91-1981.
2. "Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformer", IEC 354-1991.
3. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม "มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง" มอก. 384-2524 กรุงเทพมหานคร, 2524
4. สิริวิช ทัดสวน, บุญเลิศ สื่อเฉย, ศุภี บรรจงจิตร "การทำนายอุณหภูมิหม้อแปลงไฟฟ้าจำหน่ายชนิดแช่น้ำมันขณะทำการต่อโหลดโดยซอฟต์แวร์ ซึ่งเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานIEEE กับค่ามาตรฐาน IEC", วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่14 ฉบับที่ 1, หน้า52-60, เมษายน 2541.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นายศิริวิช ทัดสวน เกิดเมื่อวันที่ 22 พฤศจิกายน 2511 ที่จังหวัดกาญจนบุรี สำเร็จการศึกษาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเซนต์จอห์น ปีการศึกษา 2537 ได้รับรางวัล นักศึกษาเรียนดี เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2540 มีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการยอมรับและได้รับการตีพิมพ์ นอกเหนืองานจากวิทยานิพนธ์ จำนวน 5 เรื่อง ได้แก่ 1. การทำนายอุณหภูมิหม้อแปลงไฟฟ้าจำหน่ายชนิดแช่น้ำมัน ขณะทำการต่อโหลดโดยซอฟต์แวร์ ซึ่งเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน IEEE กับค่ามาตรฐาน IEC (วิศวกรรม ลาดกระบัง ปีที่ 14 ฉบับที่ 1) 2. การทดสอบและทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้ง(ประชุมวิชาการทางไฟฟ้าครั้งที่ 21) 3. การวิเคราะห์ข้อแตกต่างของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบจุ่มน้ำมัน เมื่อออกแบบสร้างตามข้อกำหนดเดิมเปรียบเทียบกับข้อกำหนดใหม่ ตามมาตรฐานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค(วิศวกรรม ลาดกระบัง ปีที่ 16 ฉบับที่ 3) 4. การทดสอบอุณหภูมิเพิ่มเพื่อสืบสวนสมรรถนะของความร้อนและการตรวจสอบหาพารามิเตอร์จำเพาะของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบจุ่มน้ำมัน(ประชุมวิชาการทางไฟฟ้าครั้งที่ 22) 5. การทดสอบอุณหภูมิ ณ บริเวณลวดตัวนำและบริเวณน้ำมัน ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน เพื่อนำเป็นค่าบรรทัดฐานของการออกแบบหม้อแปลง(วารสารวิจัยและพัฒนา มจร ปีที่ 23 ฉบับที่ 2)

ประสบการณ์ในการทำงาน ปี พ.ศ. 2534 ถึงปัจจุบัน เป็นอาจารย์โรงเรียน เซนต์จอห์น โปล์เทคนิค และอาจารย์พิเศษ มหาวิทยาลัยเซนต์จอห์น