

การทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้งโดยใช้ข้อมูลการทดสอบ

TESTING AND PREDICTION OF TEMPERATURE OF  
DRY TYPE TRANSFORMER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2543

ISBN 974-622-746-7

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้งโดยใช้ข้อมูลการทดสอบ

TESTING AND PREDICTION OF TEMPERATURE OF  
DRY TYPE TRANSFORMER



ไพโรจน์ ดีชื่น  
PHAIROTE TEECHUEN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2543

ISBN 974-622-746-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้เฉพาะงานวิจัยเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 35969  
วัน, เดือน, ปี- 3 ก.ค. 2543

**TESTING AND PREDICTION OF TEMPERATURE OF  
DRY TYPE TRANSFORMER**



**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**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อค 2000 ษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงหรือเผยแพร่เอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ISBN 974-622-746-7



เอกสาร **COPYRIGHT 2000** ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่าการ **SCHOOL OF GRADUATE STUDIES** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้งโดยใช้ข้อมูลการทดสอบ
นักศึกษา	นายไพโรจน์ ตีชื่น
รหัสประจำตัว	38061256
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2543
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. สุทธิ บรรจงจิตร

### บทคัดย่อ

การทำงานของหม้อแปลงซึ่งอาจจะมีทั้งลักษณะโหลดเต็มที่ ไม่มีโหลดหรือโหลดมากกว่าปกติ โดยเฉพาะในกรณีลักษณะโหลดมากกว่าปกติหรือโหลดเต็มที่จะมีความร้อนเกิดขึ้นในตัวหม้อแปลงสูง เป็นผลทำให้ฉนวนของขดลวดตัวนำมีอายุการใช้งานสั้นลง ดังนั้นการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงเมื่อมีโหลดในกรณีดังกล่าวจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการเสนอผลงานวิจัยโดยการสร้างซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์เพื่อใช้ทำนายค่าอุณหภูมิฮ็อตสปอตของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้งเมื่อมีสภาวะของโหลดต่างกัน และวิธีการทดสอบความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้งขนาด 1000 kVA 24 kV จุดประสงค์ 1) เพื่อกำหนดโหลดการใช้งานของหม้อแปลงให้เกิดประโยชน์สูงสุด กล่าวคือ ค่าอุณหภูมิฮ็อตสปอตนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาความสามารถในการรับโหลดของหม้อแปลงว่าสามารถเพิ่มภาระให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าได้เต็มที่เท่าไรจึงไม่ทำให้หม้อแปลงเกิดความเสียหายเนื่องจากผลของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และ 2) เพื่อการป้องกันอันตรายเนื่องจากความร้อนสูงที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงเกินพิกัดขณะต่อโหลดได้ซึ่งถ้ามีค่ามากก็จะทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงสั้นลงหรือเป็นผลทำให้ฉนวนคาสต์เรซินของขดลวดตัวนำเสื่อมสภาพลง ซึ่งกว่านั้นสามารถทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ การทดสอบอุณหภูมินี้เป็นการทดสอบโดยใช้วิธีการตัดวงจรตลอดช่วงระยะเวลา 24 ชั่วโมง ตามวัฏจักรโหลดที่จำลองขึ้นที่สภาวะต่างๆกัน โดยทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งทำให้เห็นพฤติกรรมของความร้อนได้จริงและการพิจารณาความร้อนในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้งหรือค่าผลลัพธ์ที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับผลจากการทำนายโดยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Testing and Prediction of Temperature of Dry Type Transformer
Student	Mr. Phairote Teechuen
Student ID.	38061256
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2000
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Sulee Bunjongjit

### ABSTRACT

In transformer operation which may be operated at full load, no load or overload, especially when transformer operated at full load or overload will develop more heat in the transformer, this causes the reduction of the life expectancy of winding – insulator. So the prediction of temperature of transformer will be important to know, when transformer is loaded at difference condition. This thesis presents the results of thermal testing of dry type transformer at 1000 kVA rated capacity, high voltage 24 kV and to create the software computer program to used prediction of hottest spot temperatures of dry type transformers, when it is operated at anyother condition of loads. The main purpose of this thesis was : 1) To define load transformer for using in the most efficiency, this of temperature values are used to predict the dry type transformer loading capability and to find maximum load during the run time which at this load the transformer will not be failed or insulation system not failure ; and 2) To protect faults occur from heat by using overload, which this causes the reduction of the life expectancy of winding – cast resin insulator. Moreover, this thesis also presents the prediction of transformer life expectancy. The temperature test used on short circuit test method during 24 hours, short the low – voltage winding and varies with the values from simulated load duty cycle at anyother condition of loads. Install sufficient number of thermocouples in prototype transformer to the hottest spot temperatures is measured, placement of thermocouples should be circumferentially around the coil and should include the portion of the lead in contact with insulation within the coil. The thermal considerations in specifying dry type transformer or characteristic of heat form the testing will be compared with the results form the prediction by software computer.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้อย่างดีเพราะได้รับความเมตตา กรุณาและคำปรึกษา จาก รศ.ดร. นิพนธ์ สุขุม รศ.ศุภี บรรจงจิตร ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึก ซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ บริษัทไทยโทรไฟ แมนูแฟคเจอร์ส จำกัด ซึ่งตั้งอยู่เลขที่ 177 หมู่ที่ 3 ตำบลกระแสบน อำเภอแกลง จังหวัดระยอง โดยเฉพาะผู้ที่มีรายชื่อดังต่อไปนี้

1. นายประเชษฐ์ จิรธรรมกุล ผู้จัดการฝ่ายบุคคล
2. นายปรีชา คุ่มครอง ผู้จัดการโรงงาน
3. นายพัลลภ พูลวิทยกิจ ผู้จัดการโรงงาน
4. นายพิทยา วิศวกรทดสอบ

ขอขอบคุณบุคคลดังกล่าวข้างต้นที่กรุณาให้ความช่วยเหลืออนุญาติให้ดำเนินการทดสอบ งานวิจัยและยังสนับสนุนทางด้านอุปกรณ์ในการทดสอบต่างๆ พร้อมทั้งแนะนำด้านฐานข้อมูลที่ ใช้ทำการวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณผู้อำนวยการศูนย์อนุรักษ์พลังงานแห่งประเทศไทย นายสมชาย พงศ์พิบูลย์ศักดิ์ ผู้จัดการบริษัทมิตรเทคนิค คอนซัลแต้นส์ จำกัดที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำต่างๆตลอดจนฐานข้อมูล ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณนายศราวิน ทัทสิกรณ์ ผู้จัดการบริษัทโรบอติกส์จำกัดที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำ ด้านซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ ตลอดจนฐานข้อมูลที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณอาจารย์สิริวิษ ทัตสวน จากโรงเรียนเซนต์จอห์น โปลีเทคนิคที่ช่วยเหลือให้ คำแนะนำต่างๆ ตลอดจนฐานข้อมูลที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณอาจารย์อารีย์ เพชรหวน จากมหาวิทยาลัยเซนต์จอห์นที่ช่วยเหลือด้านการพิมพ์ วิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ผู้วิจัยขอกราบบูชาคุณบิดามารดา ที่คอยให้แรงบันดาลใจทำให้ผู้วิจัยทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จนสำเร็จ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณทุกท่านสำหรับความห่วงใยและความช่วยเหลือที่มีให้กับผู้วิจัย จนสามารถทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี จึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ไพโรจน์ ตี๋ชื่น

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 กล่าวนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 วิธีการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้จากวิทยานิพนธ์.....	2
1.6 หลักการใหม่ในวิทยานิพนธ์.....	3
1.7 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 กล่าวนำ.....	4
2.2 ความร้อนหรืออุณหภูมิแบบเอกซ์โปเนนเชียล.....	4
2.3 ไลน์ดิงใหม่คอนสแตนท์.....	5
2.4 ผลของการทำโหลดเกินต่อหม้อแปลง.....	6
2.5 การคาดการณ์ถึงอายุการใช้งาน.....	7
2.6 การต่อโหลดต่อเนื่อง.....	7
2.7 ทฤษฎีจากบทความ [1] .....	10
2.8 ทฤษฎีจากบทความ [2] .....	11
2.9 ทฤษฎีจากข้อกำหนดในมาตรฐาน IEEE [3] .....	12
2.10 ทฤษฎีจากข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC [4] .....	13
<b>บทที่ 3 ผลของการทำนายความร้อนโดยทฤษฎี.....</b>	<b>21</b>
3.1 อีแชนภูมิแสดงขั้นตอนในการคำนวณของโปรแกรมทั้งหมด.....	21
3.2 ตัวอย่างการทดสอบโปรแกรม.....	23

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดสอบหม้อแปลงกำลังแรงดัน.....	95
4.1 กล่าวนำ.....	95
4.2 ตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล.....	96
4.3 ผลการทดสอบส่วนที่ 1 .....	102
4.4 ผลการทดสอบส่วนที่ 2 .....	102
4.5 ผลการทดสอบส่วนที่ 3 .....	112
บทที่ 5 วิเคราะห์ผลงานวิจัย.....	115
5.1 วิเคราะห์ผลของการทำนายอุณหภูมิโดยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์.....	115
5.2 วิเคราะห์ Load duty cycle จากการใช้งานจริงของหม้อแปลงขนาด 1000 kVA , 1250 kVA.....	116
5.3 วิเคราะห์การเปรียบเทียบผลการทดสอบทางปฏิบัติ (ทุกตำแหน่ง).....	117
5.4 วิเคราะห์การเปรียบเทียบผลการทดสอบทางปฏิบัติ (ตำแหน่งที่ 4) กับ การทำนายโดยซอฟต์แวร์ที่พิกัดและ Load duty cycle เดียวกัน .....	118
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	119
6.1 สรุปผลการทดสอบ .....	119
6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ .....	120
6.3 ประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ .....	121
เอกสารอ้างอิง.....	127
ภาคผนวก.....	128
ภาคผนวก ก. โปรแกรมภาษาปาสคาล ดันแบบในการคำนวณฮ็อตสเปสปีด.....	129
ภาคผนวก ข. คุณสมบัติของหม้อแปลง Dynacast .....	141
ภาคผนวก ค. ข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับหม้อแปลงแบบแห้ง .....	143
ภาคผนวก ง. ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการทดสอบ 24 ชั่วโมง เมื่อหม้อแปลง มีการต่อโหลดลักษณะต่างๆ (Vary Loads) และวงจรทดสอบ.....	147
ภาคผนวก จ. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์ .....	154
ประวัติผู้เขียน.....	164

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางการเปรียบเทียบขุมหมุมิของจนวนตามมาตรฐาน IEEE , IEC .....	15
2.2 ตารางการเปรียบเทียบของขุมหมุมิฮือตเทศสปีดกับจนวนเปอร์เซ็นต์ ของการคาคการณ์ถึงอายุการใช้งาน.....	15
4.1 ตารางแสดงแผ่นป้ายประจำเครื่องของหมือแปลงชนิดแห้ง.....	95
6.1 ตารางสรุปเปรียบเทียบค่าขุมหมุมิฮือตเทศสปีดและเปอร์เซ็นต์ การคลาดเคลื่อน.....	126



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	แสดงกราฟของความร้อนหรือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบเอกซ์โปเนนเชียล...	18
2.2	แสดงกราฟ ของความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการต่อโหลดเต็มที่และตำแหน่งของไวน์ดิง ไทม์คอนสแตนต์.....	19
2.3	แสดงกราฟการเปรียบเทียบค่าไวน์ดิง ไทม์คอนสแตนต์ของหม้อแปลงแบบคาสต์เรซิน ต่อโหลด ณ ที่พิกัด.....	20
3.1	Load Duty Cycle ของหม้อแปลงคาสต์เรซินขนาด 50 kVA .....	29
3.2	เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากทฤษฎีต่างๆของหม้อแปลงคาสต์เรซิน 50 kVA.....	30
3.3	เปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากทฤษฎีต่างๆของหม้อแปลงคาสต์เรซิน50 kVA	31
3.4	Load Duty Cycle ของหม้อแปลงคาสต์เรซินขนาด 75 kVA .....	32
3.5	เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากทฤษฎีต่าง ๆของหม้อแปลงคาสต์เรซิน 75 kVA....	33
3.6	เปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากทฤษฎีต่างๆของหม้อแปลงคาสต์เรซิน75 kVA	34
3.7	Load Duty Cycle ของหม้อแปลงคาสต์เรซินขนาด 100 kVA .....	35
3.8	เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากทฤษฎีต่าง ๆของหม้อแปลงคาสต์เรซิน 100 kVA....	36
3.9	เปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากทฤษฎีต่างๆของหม้อแปลงคาสต์เรซิน100 kVA	37
3.10	Load Duty Cycle ของหม้อแปลงคาสต์เรซินขนาด 160 kVA .....	38
3.11	เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากทฤษฎีต่างๆของหม้อแปลงคาสต์เรซิน 160 kVA...	39
3.12	เปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากทฤษฎีต่างๆของหม้อแปลงคาสต์เรซิน160 kVA	40
3.13	Load Duty Cycle ของหม้อแปลงคาสต์เรซินขนาด 225 kVA .....	41
3.14	เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากทฤษฎีต่างๆของหม้อแปลงคาสต์เรซิน225 kVA.....	42
3.15	เปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากทฤษฎีต่างๆของหม้อแปลงคาสต์เรซิน225 kVA	43
3.16	Load Duty Cycle ของหม้อแปลงคาสต์เรซินขนาด 250 kVA .....	44
3.17	เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากทฤษฎีต่างๆของหม้อแปลงคาสต์เรซิน 250 kVA....	45
3.18	เปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากทฤษฎีต่างๆของหม้อแปลงคาสต์เรซิน250 kVA	46
3.19	Load Duty Cycle ของหม้อแปลงคาสต์เรซินขนาด 300 kVA .....	47
3.20	เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงคาสต์เรซิน 300 kVA....	48
3.21	เปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากทฤษฎีต่างๆของหม้อแปลงคาสต์เรซิน300 kVA	49
3.22	Load Duty Cycle ของหม้อแปลงคาสต์เรซินขนาด 400 kVA .....	50
3.23	เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากทฤษฎีต่างๆของหม้อแปลงคาสต์เรซิน 400 kVA....	51



## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.52 Load Duty Cycle ของหม้อแปลงคาสต์เรซินขนาด 2500 kVA .....	80
3.53 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากทฤษฎีต่างๆของหม้อแปลงคาสต์เรซิน 2500 kVA.....	81
3.54 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากทฤษฎีต่างๆของหม้อแปลงคาสต์เรซิน2500 kVA	82
3.55 Load Duty Cycle ของหม้อแปลงคาสต์เรซินขนาด 10000 kVA .....	83
3.56 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากทฤษฎีต่างๆของหม้อแปลงคาสต์เรซิน10000 kVA...	84
3.57 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากทฤษฎีต่างๆของหม้อแปลงคาสต์เรซิน10000kVA	85
3.58 Load Duty Cycle ของหม้อแปลงคาสต์เรซินขนาด 15000 kVA .....	86
3.59 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากทฤษฎีต่างๆของหม้อแปลงคาสต์เรซิน15000 kVA....	87
3.60 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากทฤษฎีต่างๆของหม้อแปลงคาสต์เรซิน15000kVA	88
3.61 Load Duty Cycle ที่ใช้งานจริงจากอาคารสำนักงานของหม้อแปลงคาสต์เรซิน ขนาด 1000 kVA .....	89
3.62 เปรียบเทียบอุณหภูมิผลทางทฤษฎีต่างๆ ที่ใช้งานจริงจากอาคารสำนักงาน ของหม้อแปลงคาสต์เรซิน 1000 kVA .....	90
3.63 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นผลทางทฤษฎีต่างๆ ที่ใช้งานจริงจากอาคาร สำนักงานของหม้อแปลงคาสต์เรซิน 1000 kVA .....	91
3.64 Load Duty Cycle ที่ใช้งานจริงจากอาคารสำนักงานของหม้อแปลงคาสต์เรซิน ขนาด 1250 kVA .....	92
3.65 เปรียบเทียบอุณหภูมิผลทางทฤษฎีต่างๆ ที่ใช้งานจริงจากอาคารสำนักงาน ของหม้อแปลงคาสต์เรซิน 1250 kVA .....	93
3.66 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นผลทางทฤษฎีต่างๆ ที่ใช้งานจริงจากอาคาร สำนักงานของหม้อแปลงคาสต์เรซิน 1250 kVA .....	94
4.1 แสดงตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลที่ส่วนต่างๆ ของหม้อแปลง.....	97
4.2 Load Duty Cycle ที่ใช้ในการทดสอบหม้อแปลงคาสต์เรซินที่ช่วงเวลาต่างๆ.....	98
4.3 แสดงการทดสอบหม้อแปลงขณะลัดวงจรด้วยแท่งทองแดงเมื่อหม้อแปลงมีการ ต่อโหลดลักษณะต่างๆ .....	99
4.4 แสดงด้านข้างของหม้อแปลงขณะทำการทดสอบอุณหภูมิหรือความร้อน.....	99
4.5 แสดงตำแหน่งของ Ambient และเครื่องมือวัดอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะ ทำการทดสอบ.....	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
 ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 แสดงตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลบริเวณด้านข้างของหม้อแปลงขณะทำการทดสอบ.....	100
4.7 แสดงการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลตำแหน่งที่ 1, 4, 7, 8 ขณะทำการทดสอบหม้อแปลง.....	101
4.8 แสดงตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลบริเวณด้านล่างของหม้อแปลงขณะทำการทดสอบ.....	101
4.9 แสดงกราฟเปรียบเทียบผลของการทดสอบตำแหน่งที่ 4, 1, 2, 8, 7, 11 เมื่อหม้อแปลงมีการต่อโหลดลักษณะต่างๆ กัน.....	103
4.10 แสดงกราฟเปรียบเทียบผลของการทดสอบตำแหน่งที่ 3, 10, 9, 5, 6 เมื่อหม้อแปลงมีการต่อโหลดลักษณะต่างๆ กัน.....	104
4.11 แสดงกราฟเปรียบเทียบผลของการทดสอบตำแหน่งที่ 4, 8, 9, 5, เมื่อหม้อแปลงมีการต่อโหลดลักษณะต่างๆ กัน.....	105
4.12 แสดงกราฟเปรียบเทียบผลของการทดสอบตำแหน่งที่ 1, 7, 3, 6, เมื่อหม้อแปลงมีการต่อโหลดลักษณะต่างๆ กัน.....	106
4.13 แสดงกราฟเปรียบเทียบผลของการทดสอบตำแหน่งที่ 2, 10, 11, 12 เมื่อหม้อแปลงมีการต่อโหลดลักษณะต่างๆ กัน.....	107
4.14 แสดงกราฟเปรียบเทียบผลของการทดสอบตำแหน่งที่ 16, 13, 17, 14, 18, 15 เมื่อหม้อแปลงมีการต่อโหลดลักษณะต่างๆ กัน.....	108
4.15 แสดงกราฟเปรียบเทียบผลของการทดสอบตำแหน่งที่ 19, 22, 23, 20, 24, 21 เมื่อหม้อแปลงมีการต่อโหลดลักษณะต่างๆ กัน.....	109
4.16 แสดงกราฟเปรียบเทียบผลของการทดสอบตำแหน่งที่ 25, 28, 26, 29, 27, 30 เมื่อหม้อแปลงมีการต่อโหลดลักษณะต่างๆ กัน.....	110
4.17 แสดงตำแหน่งที่สามารถวัดอุณหภูมิที่ส่วนต่างๆ (เฟส A,B,C) ของหม้อแปลงทดสอบ.....	111
4.18 แสดงวิธีการหาค่าไวน์ดิงไทม์คอนสแตนต์ (Tw) และอุณหภูมิเกรเดียนต์ของหม้อแปลงทดสอบ.....	113
4.19 แสดงกราฟเปรียบเทียบผลจากการทดสอบตำแหน่งที่ 4 กับผลทางทฤษฎีเมื่อหม้อแปลงมีการต่อโหลดลักษณะต่างๆ กัน (Vary Loads) ..... <small>เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี</small>	114

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.1 แสดงกราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากผลการทดสอบตำแหน่งที่ 4, 1, 8, 7 เมื่อหม้อแปลงมีการต่อโหลดลักษณะต่างๆ.....	123
6.2 แสดงกราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากผลการทดสอบตำแหน่งที่ 19, 25, 16 เมื่อหม้อแปลงมีการต่อ โหลดลักษณะต่างๆ.....	124
6.3 แสดงกราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากผลการทดสอบตำแหน่งที่ 4 กับผลทางทฤษฎีเมื่อหม้อแปลงมีการต่อ โหลดลักษณะต่างๆ.....	125



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 กล่าวนำ

ปัจจุบันนี้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้งมีความปลอดภัยสูงซึ่งคุณลักษณะพิเศษของหม้อแปลงชนิดนี้เมื่อติดไฟแล้วจะสามารถดับได้เองเมื่อความร้อนลดลง นอกจากนี้หม้อแปลงแบบแห้งสามารถติดตั้งภายในอาคารสูงได้ จึงได้ถูกนำมาใช้งานให้เหมาะสมกับโรงแรม โรงพยาบาล ศูนย์การค้า คอนโดมิเนียม อาคารสำนักงาน โรงงาน และสถานที่ที่ต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าซึ่งโดยปกติแล้วหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้งอาจทำงานในลักษณะโหลดมากกว่าปกติ โหลดเต็มที่หรือไม่มีโหลด โดยเฉพาะในกรณีลักษณะโหลดมากกว่าปกติ หรือโหลดเต็มที่นั้นจะมีความร้อนเกิดขึ้นในตัวหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้งสูง ซึ่งทำให้อุณหภูมิของหม้อแปลงเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จนวนที่หุ้มขดลวดตัวนำเกิดความเสียหาย เป็นผลทำให้ฉนวนของขดลวดตัวนำมีอายุการใช้งานสั้นลง [1-2] ดังนั้นอุณหภูมิของหม้อแปลงจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ฉะนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการทดสอบหาอุณหภูมิหรือความร้อนในส่วนต่างๆของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้งที่มีฉนวนเป็นคาสต์เรซิน (Cast Resin Transformers with Copper Winding) ในขณะที่มีการต่อโหลดในลักษณะต่างๆ กันโดยการทดสอบแบบลัดวงจร

### 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1.2.1 เพื่อวิจัยหาความร้อนหรืออุณหภูมิในส่วนต่างๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้งที่ได้จากการทดสอบขณะที่มีการต่อโหลดในลักษณะต่าง ๆ กัน (Vary Load) ซึ่งการทดสอบหม้อแปลงโดยใช้วิธีลัดวงจรตลอดระยะเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งการทดสอบลักษณะนี้ยังไม่ปรากฏว่ามีบุคคลใดทดสอบมาก่อน และผู้วิจัยต้องการให้มีข้อมูลปรากฏในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เพื่อให้ผู้ที่สนใจได้ศึกษาได้อย่างกว้างขวางในอนาคต

1.2.2 เพื่อศึกษาและค้นคว้าวิจัยทฤษฎี จากบทความ [1,2] และข้อกำหนดในมาตรฐาน IEEE [3] , IEC [4] แล้วใช้หลักการนี้ไปทำนายอุณหภูมิในส่วนต่างๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้งให้เป็นที่ยอมรับและนำไปใช้งานกันอย่างแพร่หลายต่อไป

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.3 เพื่อวิจัหาค่าอุณหภูมิ แล้วนำไปเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้ทางปฏิบัติกับผลที่ได้ทางทฤษฎีว่ามีความแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด

1.2.4 เพื่อหาแนวทางว่าอุณหภูมิฮอตเทสสป็อด ที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับโหลดที่นำมาต่อเข้ากับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้ง ตามเงื่อนไขที่กำหนดหรือไม่

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ทำการวิเคราะห์ความร้อน หรืออุณหภูมิฮอตเทสสป็อดทางทฤษฎีในรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้ง

1.3.2 หาวิธีการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้ง เพื่อหาความร้อนและพิจารณาอุณหภูมิในส่วนต่างๆของหม้อแปลงโดยการทดสอบเป็นแบบลัดวงจร และทางปฏิบัติให้ค่าอุณหภูมิออกมาตามที่ได้ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลที่ตำแหน่งต่างๆของหม้อแปลง

### 1.4 วิธีการวิจัย

1.4.1 ค้นคว้าทฤษฎีจากบทความ [1,2] และข้อกำหนดของ IEEE [3] , IEC [4] รวมทั้งบทความวารสารต่างๆ และตำราทางวิชาการที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับอุณหภูมิฮอตเทสสป็อด

1.4.2 ทำการติดต่อบริษัทไทยทราไฟแมนูแฟคเจอร์ริง จำกัด ที่จังหวัดระยอง พร้อมทั้งเตรียมเครื่องมืออุปกรณ์ ในการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้ง

1.4.3 กำหนดวันเวลาในการทดสอบหาอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้ง

1.4.4 สรุปผลการทดสอบและวิจารณ์

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้จากวิทยานิพนธ์

1.5.1 สามารถนำหลักการของทฤษฎีจากบทความ [1,2] และข้อกำหนดในมาตรฐาน IEEE [3], IEC [4] มาใช้ประโยชน์ในการทำนายหาอุณหภูมิในส่วนต่างๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้งได้

1.5.2 ประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดสอบหาอุณหภูมิของหม้อแปลงแบบแห้งได้

1.5.3 สามารถลดและป้องกันอันตรายที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้งได้

1.5.4 สามารถที่จะกำหนดโหลดการใช้งานของหม้อแปลงให้เกิดประโยชน์สูงสุดได้

1.5.5 เป็นพื้นฐานในการศึกษาหาอุณหภูมิที่ส่วนต่างๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้ง ซึ่งสามารถรู้ได้ว่าอุณหภูมิหรือความร้อนที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับโหลดที่นำมาต่อเข้ากับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้ง

1.5.6 เป็นพื้นฐานในการออกแบบหม้อแปลงให้มีประสิทธิภาพที่สุดได้ ซึ่งถ้าออกแบบไม่ดีแล้วจะทำให้หม้อแปลงเกิดความร้อนขณะใช้งานได้ง่าย เป็นผลทำให้หม้อแปลงมีอายุการใช้งานสั้นลง

## 1.6 หลักการใหม่ในวิทยานิพนธ์

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้ง โดยใช้วิธีตัดวงจร ซึ่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเพื่อที่จะหาอุณหภูมิในส่วนต่างๆ ของหม้อแปลงขณะมีโหลดลักษณะต่างๆ กันตลอดระยะเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดสอบไปเปรียบเทียบกับทางทฤษฎีว่าใกล้เคียงกันมากน้อยเพียงใด สามารถใช้ทฤษฎีมาประยุกต์ใช้งานจริงได้หรือไม่ ถ้าได้จะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดสอบและลดอันตรายที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้งได้ ซึ่งการทดสอบทางปฏิบัตินี้ยังไม่เคยมีข้อมูลปรากฏให้เห็นเด่นชัด

## 1.7 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ ได้ศึกษาวิจัยเพื่อทดสอบหาอุณหภูมิในส่วนต่างๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้งโดยใช้วิธีตัดวงจร ซึ่งรายละเอียดที่กล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็นบทๆ ได้ดังนี้ คือ

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงแนวทางต่างๆ ไปที่นำมาสู่งานวิจัย วัตถุประสงค์ ขอบเขต วิธีการวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย หลักการใหม่ที่ได้นำเสนอและรายละเอียดในแต่ละบทอย่างคร่าวๆ

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการพื้นฐานพร้อมทั้งทฤษฎีต่างๆ

บทที่ 3 ผลของการทำนายความร้อนโดยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์

บทที่ 4 ผลการทดสอบและการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ

บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลงานวิจัย

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 กล่าวนำ

สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย กล่าวคือ วัตต์ดิงไทม์คอนสแตนต์ ทฤษฎีที่ใช้หาอุณหภูมิข้อผิดพลาด อุณหภูมิแบบเอกซ์โปเนนเชียล ผลของการทำโพลกิ้นต่อหม้อแปลง เปรอ์เซ็นต์ของการคาดการณ์ถึงอายุการใช้งานและการต่อโพลคต่อเนื้อง

### 2.2 ความร้อนหรืออุณหภูมิแบบเอกซ์โปเนนเชียล (Exponential) ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้ง

การทำงานของหม้อแปลงซึ่งอาจจะมีทั้งลักษณะโพลคเต็มๆ ไม่มีโพลคหรือโพลคมากกว่าปกติโดยเฉพาะในกรณีลักษณะโพลคมากกว่าปกติหรือโพลคเต็มๆ จะมีความร้อนเกิดขึ้นในตัวหม้อแปลงสูง ซึ่งเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าการสูญเสียต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งหมดมีโพลคหรือไม่มีโพลคก็ตาม การสูญเสียนี้จะแปรสภาพเป็นพลังงานในรูปความร้อน ซึ่งจะทำความร้อนของขดลวดตัวนำในหม้อแปลงมีอุณหภูมิสูงขึ้น

ดังนั้นในการต่อโพลคที่มีการเปลี่ยนแปลงย่อมทำให้ความร้อนเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะทำความร้อนเปลี่ยนแปลงตามการต่อโพลคด้วยจึงกล่าวได้ว่าการต่อโพลค ความร้อนและอายุการใช้งานนั้นมีความสัมพันธ์กัน ฉะนั้นการระบายความร้อนให้เร็วที่สุดจึงเป็นสิ่งสำคัญ ถ้าหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้งทุกขนาด (kVA) มีการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน ก็จะสามารถจ่ายโพลคได้เพิ่มอีกถึงประมาณ 40 เปรอ์เซ็นต์อย่างต่อเนื่อง หรือกล่าวได้ว่าหม้อแปลงสามารถเพิ่มกำลังไฟฟ้าได้ถึง 40 เปรอ์เซ็นต์ นั่นเอง เช่น สมมุติหม้อแปลงแบบแห้งเดิมมีขนาด 2,000 kVA ระบายความร้อนโดยใช้อากาศธรรมชาติเมื่อมีการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนจะสามารถจ่ายโพลคได้อีกประมาณ 800 kVA จึงเสมือนว่าได้หม้อแปลงที่มีพิคกเป็น 2,800 kVA [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- $c_{xy}$  = ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับความร้อน และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของขดลวดตัวนำ หรือวัสดุที่ใช้พัน เช่น ทองแดงจะมีค่าเท่ากับ  $195\text{ }^{\circ}\text{C}$  และอะลูมิเนียมจะมีค่าเท่ากับ  $87.5\text{ }^{\circ}\text{C}$
- $S$  = ความหนาแน่นของกระแส ( $\text{A} / \text{mm}^2$ )

ค่าไวน์ดิงไทม์คอนสแตนต์ที่มีค่าน้อย หมายถึง ว่าเมื่อทำการต่อโหลดจะทำให้หม้อแปลงมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยปกติแล้วหม้อแปลงที่เป็นแบบคาสต์เรซิน จะมีค่าเฉลี่ยของไวน์ดิงไทม์คอนสแตนต์ประมาณ 45 นาทีโดยพิจารณาที่ค่าความหนาแน่นของกระแส 2 ถึง 3 แอมแปร์ต่อตารางมิลลิเมตร [1]

นอกจากนี้ค่าฮอตสปอตเกรเดียนต์ (Hottest spot gradient) จะมีลักษณะที่สัมพันธ์กับรูปกราฟที่แสดงถึงอุณหภูมิขดลวด (Winding temperature) ดังนั้นถ้าในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดก็จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความร้อนบนขดลวดด้วย โดยส่วนมากแล้วในหม้อแปลงมักจะนิยมใช้ทองแดงเป็นขดลวดตัวนำหรือวัสดุในการสร้าง แต่ในกรณีที่ขดลวดตัวนำหรือวัสดุเป็นอะลูมิเนียมก็จะมีค่าไวน์ดิงไทม์คอนสแตนต์ของหม้อแปลงแบบคาสต์เรซิน ประมาณ 21 นาที ซึ่งจะสามารถแสดงได้ใน รูปที่ 2.3 แสดงกราฟการเปรียบเทียบค่าไวน์ดิงไทม์คอนสแตนต์ที่มีขดลวดตัวนำต่างชนิดกัน [1]

#### 2.4 ผลของการทำโหลดเกินต่อหม้อแปลง

ในการทำโหลดเกินต่อหม้อแปลงย่อมจะทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงสั้นลง ดังนั้นในกรณีที่ต่อโหลดมากกว่าปกติหรือลักษณะโหลดเต็มที่ ความร้อนก็จะมีค่ามากด้วย ทำให้หม้อแปลงเกิดความเสียหายขึ้น ซึ่งความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับหม้อแปลงนั้นจะมีสาเหตุอันเนื่องมาจากฉนวน (Insulation) ที่นำมาใช้กับขดลวดเกิดความเสียหายหรือฉนวนเสื่อมสภาพลงนั่นเอง โดยที่ฉนวนจะเสียหายได้ก็เนื่องมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นและได้สะสมไว้ในขณะที่หม้อแปลงทำงาน ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับโหลดที่นำมาต่อเข้ากับหม้อแปลง ดังนั้นในการต่อโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงย่อมทำให้ความร้อนเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะทำให้การคาดการณ์ถึงอายุการใช้งาน (Life Expectancy) เปลี่ยนแปลงตามการต่อโหลดด้วย จึงพอจะกล่าวได้ว่า อายุการใช้งาน ความร้อนที่เกิดขึ้น และลักษณะของการต่อโหลดเข้ากับหม้อแปลงมีความสัมพันธ์กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 การคาดการณ์ถึงอายุการใช้งาน

จำนวนปีของอายุการใช้งานของหม้อแปลงจะต้องมีองค์ประกอบต่างๆ มาประกอบกันซึ่งนอกจากจะขึ้นอยู่กับการใช้งานแล้วยังขึ้นอยู่กับวัสดุหรือขดลวดตัวนำที่นำมาสร้างหรือวัสดุฉนวนและกระบวนการผลิตของบริษัทผู้ผลิตอีกด้วย โดยที่วัสดุฉนวนที่นำมาสร้างถ้าแตกต่างกันการทนทานต่อระดับความร้อนหรืออุณหภูมิก็จะแตกต่างกัน ซึ่งในปัจจุบันหม้อแปลงที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและติดตั้งในอาคารก็คือ หม้อแปลงชนิดแห้ง ซึ่งมีวัสดุฉนวนที่เป็นแบบคาสต์เรซิน (Dry type transformer cast – resin insulation system) ซึ่งหม้อแปลงชนิดแห้งนี้ใช้ฉนวน Class F พิจารณาได้จาก ตารางที่ 2.1 ฉนวนชนิดนี้จะทนทานต่อค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องได้ถึง 155 องศาเซลเซียส นอกจากนี้แล้วถ้าหม้อแปลงชนิดแห้งนี้มีอุณหภูมิใช้งานต่ำกว่า 155 องศาเซลเซียส อยู่ 6 องศาเซลเซียส จะทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า แต่ในทางกลับกัน ถ้าอุณหภูมิใช้งานสูงกว่า 155 องศาเซลเซียส อยู่ 6 องศาเซลเซียส จะทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงจะลดลงครึ่งหนึ่ง และอุณหภูมิที่ฉนวนสามารถทนทาน ซึ่งได้กล่าวมานี้จะเรียกว่า อุณหภูมิฮอตสปอต (hottest spot temperature)

วิธีการที่ง่ายที่สุดในการพิจารณาถึงผลของอุณหภูมิและอายุเวลาการใช้งาน ซึ่งจะอธิบายในเทอมของเปอร์เซ็นต์ของการคาดการณ์ถึงอายุการใช้งาน จะสามารถพิจารณาได้จากตารางที่ 2.2 โดยในตารางที่ 2.2 อุณหภูมิฮอตสปอตสูงกว่า 195 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่า 115 องศาเซลเซียส จะแสดงว่าเปอร์เซ็นต์การคาดการณ์ถึงอายุการใช้งานจะมีค่าเท่ากับ 1 และ 10,000 [1]

## 2.6 การต่อโหลดต่อเนื่อง

เนื่องจากค่าอุณหภูมิฮอตสปอตจะขึ้นอยู่กับโหลดที่นำมาต่อกับหม้อแปลง ดังนั้นอายุการใช้งานของหม้อแปลงจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลา ส่วนในกรณีที่เป็นการต่อโหลดต่อเนื่องและ คงที่นั้นอุณหภูมิของหม้อแปลงจะเสถียรภาพ หรือความร้อนที่เกิดขึ้นมีค่าคงที่นั่นเอง และค่าอุณหภูมิฮอตสปอตนี้ จะขึ้นอยู่กับลักษณะของการต่อโหลด โดยอุณหภูมิฮอตสปอตจะเป็นค่าผลบวกของอุณหภูมิสถานะแวดล้อม (Ambient temperature) และอุณหภูมิของขดลวดที่เพิ่มขึ้น เมื่อต่อโหลด (winding temperature rise) และอุณหภูมิฮอตสปอตเกรเดียนต์ (Hottest spot gradient) จะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิของสถานะแวดล้อมไม่ขึ้นอยู่กับการต่อโหลด ส่วนอุณหภูมิขดลวดและฮอตสปอตเกรเดียนต์จะขึ้นโดยตรงกับการต่อโหลด ในกรณีที่หม้อแปลงมีการต่อโหลดต่อเนื่องและคงที่ ซึ่งจะสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\theta_c = \left( \frac{L_1}{L_o} \right)^{1.6} \times \theta_{co} \quad (2.2)$$

$$\theta_h = \left( \frac{L_1}{L_o} \right)^{1.6} \times \theta_{ho} \quad (2.3)$$

โดยที่

- $\theta_c$  = อุณหภูมิของขดลวดที่เพิ่มขึ้นเมื่อต่อโหลด (°C)  
 $\theta_h$  = อุณหภูมิของฮีตเทสปีดเกรเดียนต์เมื่อต่อโหลด (°C)  
 $L_1$  = ค่าของโหลดใช้งานที่นำมาต่อ (kVA)  
 $L_o$  = ค่าพิกัด kVA ของหม้อแปลงบนแผ่นป้ายประจำเครื่อง (kVA)  
 $\theta_{co}$  = อุณหภูมิการเพิ่มของขดลวด (°C) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับฉนวนที่ได้แสดงบนแผ่นป้ายประจำเครื่อง สำหรับคาสต์เรซินจะมีค่าเท่ากับ 80 °C  
 $\theta_{ho}$  = ค่าการออกแบบของอุณหภูมิฮีตเทสปีดเกรเดียนต์ (°C) สำหรับคาสต์เรซินจะมีค่าเท่ากับ 30 °C

ดังนั้น อุณหภูมิฮีตเทสปีดจะสามารถหาได้จากสมการ

$$\theta_H = \theta_a + \theta_c + \theta_h \quad (2.4)$$

โดยที่

- $\theta_H$  = อุณหภูมิฮีตเทสปีด (°C)  
 $\theta_a$  = อุณหภูมิสภาวะแวดล้อม (°C)

ในกรณีที่หม้อแปลงมีลักษณะการต่อของโหลดเป็นสภาวะต่างๆ กันหรือโหลดต่อเนื่องและไม่คงที่ จะสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\theta_{H_1} = \left( \frac{L_1}{L_o} \right)^{1.6} \times (\theta_{co} + \theta_{ho}) + \theta_a \quad (2.5)$$

โดยที่

$$\theta_{H_1} = \text{อุณหภูมิฮอตเทสที่จุด (°C) ในขณะที่ต่อโหลดในสภาวะช่วง } L_1$$

เนื่องจากค่าอุณหภูมิฮอตเทสที่จุดจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงโหลด ซึ่งจะไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นกราฟของความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเวลาจึงเป็นสิ่งจำเป็น ทั้งนี้เพราะกราฟนี้จะสามารถนำไปหาค่าไวน์ดิงไทม์คอนสแตนต์ (winding time constant) แต่ในกรณีหม้อแปลงต่อ โหลดเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา (load duty cycle) จะสามารถหาค่าเฉลี่ยของโหลดที่ต่อเข้ากับหม้อแปลงได้จากสมการดังนี้

$$L_{rms} = \sqrt{\frac{L_1^2 t_1 + L_2^2 t_2 + L_3^2 t_3 + \dots + L_N^2 t_N}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_N}} \times 1000 \quad (2.6)$$

โดยที่

$$L_{rms} = \text{ค่าเฉลี่ยของโหลดที่ต่อเข้ากับหม้อแปลง หรือสมมูลโหลดต่อเนื่อง (kVA)}$$

$$L_N = \text{โหลดที่นำมาต่อเข้ากับหม้อแปลงในช่วงเวลา } t_N \text{ (kVA)}$$

$$t_N = \text{ช่วงเวลาที่ใช้ในการต่อโหลด } L_N \text{ เข้ากับหม้อแปลง (ชั่วโมง)}$$

ดังนั้นเมื่อกรณีพิจารณาถึงสมมูลโหลดต่อเนื่อง อุณหภูมิฮอตเทสที่จุดก็จะมีค่า

$$\theta_{H_1} = \left( \frac{L_{rms}}{L_o} \right)^{1.6} \times (\theta_{co} + \theta_{ho}) + \theta_a \quad (2.7)$$

โดยที่

$$\theta_{H_1} = \text{อุณหภูมิฮอตเทสที่จุด (°C) ในขณะที่ต่อโหลดในสภาวะช่วง } L_{rms}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 ทฤษฎีจากบทความ [1]

ในลักษณะการต่อโหลดที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาหรือการต่อโหลดเข้ากับหม้อแปลงในสภาวะต่างๆ กัน ย่อมทำให้มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความร้อนบนขดลวดด้วย ทั้งนี้เพราะการขยายตัวและหดตัวของอุณหภูมิภายในหม้อแปลงไม่ได้เป็นสมการเส้นตรง แต่เป็นสมการแบบเอกซ์โปเนนเชียล (Exponential) ดังที่กล่าวมาข้างต้น จะสามารถแสดงการหาค่าอุณหภูมิฮอตเทสสปอต (Hottest spot temperature) ในรูปของสมการได้ดังนี้

$$\theta_H = \frac{(\theta_{co} + \theta_{ho}) \left( \frac{L_I}{L_o} \right)^{1.6} \left[ \ln^{-1} \left( \frac{t_I}{T_w \left( \frac{L_I}{L_o} \right)^{-0.4}} \right) - 1 \right] + \theta_s}{\ln^{-1} \left( \frac{t_I}{T_w \left( \frac{L_I}{L_o} \right)^{-0.4}} \right)} + \theta_a \quad (2.8)$$

โดยที่

- $\theta_H$  = อุณหภูมิฮอตเทสสปอต (°C)  
 $\theta_{co}$  = อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของขดลวด (°C) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับจำนวนที่ได้แสดงบนแผ่นประจำเครื่อง สำหรับคาสต์เรซินจะมีค่าเท่ากับ 80 °C  
 $\theta_{ho}$  = ค่าการออกแบบของอุณหภูมิฮอตเทสสปอตเกรดเดียนด์ (°C) สำหรับคาสต์เรซินจะมีค่าเท่ากับ 30 °C  
 $L_I$  = ค่าของโหลดใช้งานที่นำมาต่อ (kVA)  
 $L_o$  = ค่าพิกัด kVA ของหม้อแปลงบนแผ่นป้ายประจำเครื่อง (kVA)  
 $t_I$  = ช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการต่อโหลด  $L_I$  เข้ากับหม้อแปลง (นาที)  
 $T_w$  = ค่าไวน์ดิงไทม์คอนสแตนต์ (นาที) สำหรับหม้อแปลงแบบคาสต์เรซินมีค่าเท่ากับ 45 นาที และใช้ขดลวดทองแดงในการสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับจุดเริ่มต้นของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากโหลด ( $\theta_c + \theta_h$ ) (°C) มีด้านการคำนวณที่  
 ไม่ว่าการณีใดๆ ที่  $\theta_a$  อีกทั้งห้ = มิให้ดูอุณหภูมิสภาวะแวดล้อม (°C) ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8 ทฤษฎีจากบทความ [2]

ในการพิจารณาความร้อนหรืออุณหภูมิฮอตสปอต ทฤษฎีนี้จะใช้ค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดสอบแบบลัดวงจร และการทดสอบโดยการเปิดวงจร มาพิจารณาร่วมด้วย ดังนั้นการต่อโหลดเข้ากับหม้อแปลงในลักษณะต่างๆกัน จะสามารถแสดงหาค่าอุณหภูมิฮอตสปอต (Hottest spot temperature) ในรูปของสมการได้ดังนี้

$$\theta'_c = \theta_c \left[ \frac{\theta_{HS} + T_A + T_k}{\theta_c + T_{AT} + T_k} \right]^N \quad (2.9)$$

$$\theta_{HS} = \theta'_c \left[ 1 + \left( \frac{\theta_E}{\theta'_c} \right)^{\frac{1}{N}} \right]^N \quad (2.10)$$

$$\theta'_{HS} = \theta_{HS} + T_A \quad (2.11)$$

โดยที่

- $\theta_c$  = ค่าอุณหภูมิฮอตสปอตที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการทดสอบแบบลัดวงจร ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $\theta'_c$  = ค่าอุณหภูมิฮอตสปอตที่เพิ่มขึ้น (ค่าอุณหภูมิคำนวณ) เนื่องจากการทดสอบแบบลัดวงจร ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $\theta_E$  = ค่าอุณหภูมิฮอตสปอตที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการทดสอบแบบเปิดวงจร ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $\theta_{HS}$  = ค่าอุณหภูมิฮอตสปอตที่เพิ่มขึ้น ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $\theta'_{HS}$  = ค่าอุณหภูมิฮอตสปอต ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_A$  = อุณหภูมิสภาวะแวดล้อม ( $^{\circ}\text{C}$ ) , มีค่าเท่ากับ  $30^{\circ}\text{C}$
- $T_{AT}$  = อุณหภูมิสภาวะแวดล้อมขณะทดสอบแบบลัดวงจร ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_k$  =  $234.5^{\circ}\text{C}$  สำหรับใช้ทองแดงเป็นวัสดุในการสร้าง,  $225^{\circ}\text{C}$  สำหรับใช้อลูมิเนียมเป็นวัสดุในการสร้าง

$N$  = 0.8 สำหรับการระบายความร้อนโดยใช้อากาศธรรมชาติ, 0.9 สำหรับการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในท้องถิ่นเท่านั้น ไม่สามารถนำออกนอกระบบได้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ทำซ้ำหรือเผยแพร่ข้อมูลใดๆไปยังผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต

## 2.9 ทฤษฎีจากข้อกำหนดในมาตรฐาน IEEE [3]

เนื่องจากค่าอุณหภูมิฮอตสปอตจะขึ้นอยู่กับโหลดที่นำมาต่อเข้ากับหม้อแปลง ดังนั้นอายุการใช้งานของหม้อแปลงจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลา โดยที่อุณหภูมิฮอตสปอตจะเป็นค่าผลบวกของอุณหภูมิสถานะแวดล้อม และอุณหภูมิของขดลวดที่เพิ่มขึ้นเมื่อต่อโหลดและอุณหภูมิฮอตสปอตเกรเดียนต์ ดังนั้นอุณหภูมิสถานะแวดล้อมไม่ขึ้นอยู่กับการต่อโหลด ส่วนอุณหภูมิของขดลวดที่เพิ่มขึ้น และอุณหภูมิฮอตสปอตเกรเดียนต์จะขึ้นโดยตรงกับการต่อโหลด ซึ่งในลักษณะการต่อโหลดที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา หรือการต่อโหลดเข้ากับหม้อแปลงในสถานะต่างๆ กันจะสามารถแสดงการหาค่า อุณหภูมิฮอตสปอต (Hottest spot temperature) ในรูปของสมการได้ดังนี้

$$\theta_{gi} = \theta_{gr} \left[ \frac{L_1}{L_r} \right]^{2m} \quad (2.12)$$

$$\theta_{gu} = \theta_{gr} \left[ \frac{L_2}{L_r} \right]^{2m} \quad (2.13)$$

$$\theta_g = (\theta_{gu} - \theta_{gi}) \left( 1 - e^{-t/\tau_w} \right) + \theta_{gi} \quad (2.14)$$

$$\theta_{wi} = \theta_{wr} \left[ \frac{L_1}{L_r} \right]^{2m} \quad (2.15)$$

$$\theta_{wu} = \theta_{wr} \left[ \frac{L_2}{L_r} \right]^{2m} \quad (2.16)$$

$$\theta_w = (\theta_{wu} - \theta_{wi}) \left( 1 - e^{-t/\tau_w} \right) + \theta_{wi} \quad (2.17)$$

$$\theta_h = \theta_g + \theta_w + \theta_a \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$\theta_{gi}$	=	อุณหภูมิฮอตสปอตเกรเดียนต์ ช่วงเวลาเริ่มต้น ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\theta_{gu}$	=	อุณหภูมิฮอตสปอตเกรเดียนต์ ช่วงเวลาตอนปลาย ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\theta_{gr}$	=	ค่าการออกแบบของอุณหภูมิฮอตสปอตเกรเดียนต์ สำหรับ คาสต์เรซิน จะมีค่าเท่ากับ $30^{\circ}\text{C}$
$L_1$	=	ค่าของโหลดใช้งานที่นำมาต่อ (kVA) ช่วงเวลาเริ่มต้น
$L_2$	=	ค่าของโหลดใช้งานที่นำมาต่อ (kVA) ช่วงเวลาตอนปลาย
$L_r$	=	ค่าพิกัด kVA ของหม้อแปลงบนแผ่นป้ายประจำเครื่อง (kVA)
$m$	=	ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดการระบายความร้อน เช่น การระบายความร้อน โดยใช้อากาศธรรมชาติ จะมีค่าเท่ากับ 0.8 และ 1.0 สำหรับการติดตั้ง พัดลมระบายความร้อน
$\theta_g$	=	อุณหภูมิฮอตสปอตเกรเดียนต์ ( $^{\circ}\text{C}$ )
$t_1$	=	ช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการต่อโหลด $L_1$ เข้ากับหม้อแปลง (นาที)
$\tau_w$	=	ค่าไวน์คิงใหม่คอนสแตนต์ (นาที) จะเป็นค่าเวลาที่ต้องการของขดลวด ที่อุณหภูมิมีค่า 63 เฟอร์เซนต์ ของอุณหภูมิสูงสุดที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก ทำการต่อโหลดที่พิกัด หรือโหลดเต็มที่ (Full load) สำหรับหม้อแปลง แบบคาสต์เรซินมีค่าเท่ากับ 45 นาที
$\theta_{wi}$	=	อุณหภูมิของขดลวดที่เพิ่มขึ้นเมื่อต่อโหลดช่วงเวลาเริ่มต้น ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\theta_{wu}$	=	อุณหภูมิของขดลวดที่เพิ่มขึ้นเมื่อต่อโหลดช่วงเวลาตอนปลาย ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\theta_{wr}$	=	อุณหภูมิของขดลวดที่เพิ่มขึ้นซึ่งจะขึ้นอยู่กับฉนวนที่ได้แสดงบนแผ่นป้าย ประจำเครื่อง สำหรับคาสต์เรซินจะมีค่าเท่ากับ $80^{\circ}\text{C}$
$\theta_w$	=	อุณหภูมิของขดลวดที่เพิ่มขึ้นเมื่อต่อโหลด ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\theta_h$	=	อุณหภูมิฮอตสปอต ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\theta_a$	=	อุณหภูมิสภาวะแวดล้อม ( $^{\circ}\text{C}$ )

## 2.10 ทฤษฎีจากข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC [4]

ในลักษณะการต่อโหลดที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาหรือการต่อโหลดเข้ากับหม้อแปลงใน  
สภาวะต่างๆ กันจะสามารถแสดงการหาค่าอุณหภูมิฮอตสปอต (Hottest spot temperature)  
ในรูปของสมการได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของ บริษัท อีทีอี จำกัด การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ถือว่าผิดกฎหมาย บริษัท อีทีอี จำกัด ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\theta_{wh} = (\theta_{whu} - \theta_{whi}) \left(1 - e^{-t_1/\tau}\right) + \theta_{whi} + \theta_{ad} \quad (2.19)$$

$$\theta_{wh} = \theta_{whu} - (\theta_{whu}) e^{-t_1/\tau} - \theta_{whi} + (\theta_{whi}) e^{-t_1/\tau} + \theta_{whi} + \theta_{ad} \quad (2.20)$$

$$\theta_{wh} = \theta_{whu} - (\theta_{whu}) e^{-t_1/\tau} + (\theta_{whi}) e^{-t_1/\tau} + \theta_{ad} \quad (2.21)$$

$$\theta_{wh} = (\theta_{whi} - \theta_{whu}) e^{-t_1/\tau} + \theta_{whu} + \theta_{ad} \quad (2.22)$$

$$\theta_{whu} = (Z)(\theta_{wr})(K_n)^q \quad (2.23)$$

$$K_n = \frac{L_l}{L_r} \quad (2.24)$$

โดยที่

- $\theta_{wh}$  = อุณหภูมิอากาศทดสอบ (°C)
- $\theta_{whu}$  = อุณหภูมิอากาศทดสอบ ที่เพิ่มขึ้นช่วงเวลาตอนปลาย (°C)
- $\theta_{whi}$  = อุณหภูมิอากาศทดสอบ ที่เพิ่มขึ้นช่วงเวลาเริ่มต้น (°C)
- $t_1$  = ช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการต่อโหลด  $L_l$  เข้ากับหม้อแปลง (นาที)
- $\tau$  = ค่าไวน์ดิงไทม์คอนสแตนต์ (นาที) จะมีค่า 30 นาที, 45 นาที, 60 นาที สำหรับหม้อแปลงแบบคาสต์เรซิน มีค่าเท่ากับ 45 นาที โดยเฉลี่ย
- $\theta_{ad}$  = อุณหภูมิสถานะแวดล้อม (°C) จะมีค่า 20 °C, 30 °C, 40 °C แต่โดยเฉลี่ยแล้วใช้ที่ค่า 30 °C
- $Z$  = อัตราส่วนระหว่าง  $\frac{\text{อุณหภูมิอากาศทดสอบของขดลวดที่เพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ } 115^\circ\text{C}}{\text{อุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดที่เพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ } 100^\circ\text{C}}$
- $\theta_{wr}$  = ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดที่เพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ 100 °C
- $K_n$  = อัตราส่วนระหว่าง  $\frac{L_l}{L_r}$
- $L_l$  = ค่าของโหลดใช้งานที่นำมาต่อ (kVA)
- $L_r$  = ค่าพิคก kVA ของหม้อแปลงบนแผ่นป้ายประจำเครื่อง (kVA)
- $q$  = ค่าคงที่เท่ากับ 1.6 สำหรับหม้อแปลงระบายความร้อนโดยใช้  
อากาศธรรมชาติ และระบายความร้อนโดยการติดตั้งพัดลม

ตารางที่ 2.1 ตารางการเปรียบเทียบอุณหภูมิของฉนวนตามมาตรฐาน IEEE, IEC

อุณหภูมิของฉนวน (°C)	อุณหภูมิฮ็อตสเปคของ ขดลวดที่เพิ่มขึ้น (°C)		อุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวด ที่เพิ่มขึ้น (°C)	
	IEEE	IEC	IEEE	IEC
(A) 105	-	65	-	60
(E) 120	-	80	-	75
(B) 130	90	90	60	80
(F) 150	110	-	80	-
(F) 155	-	115	-	100
(H) 180	-	140	-	125
(H) 185	145	-	115	-
(C) 200	160	-	130	-
(C) 220	180	180	150	150

ตารางที่ 2.2 ตารางการเปรียบเทียบของอุณหภูมิฮ็อตสเปคกับจำนวนเปอร์เซ็นต์ของการ  
คาดการณ์ถึงอายุการใช้งาน

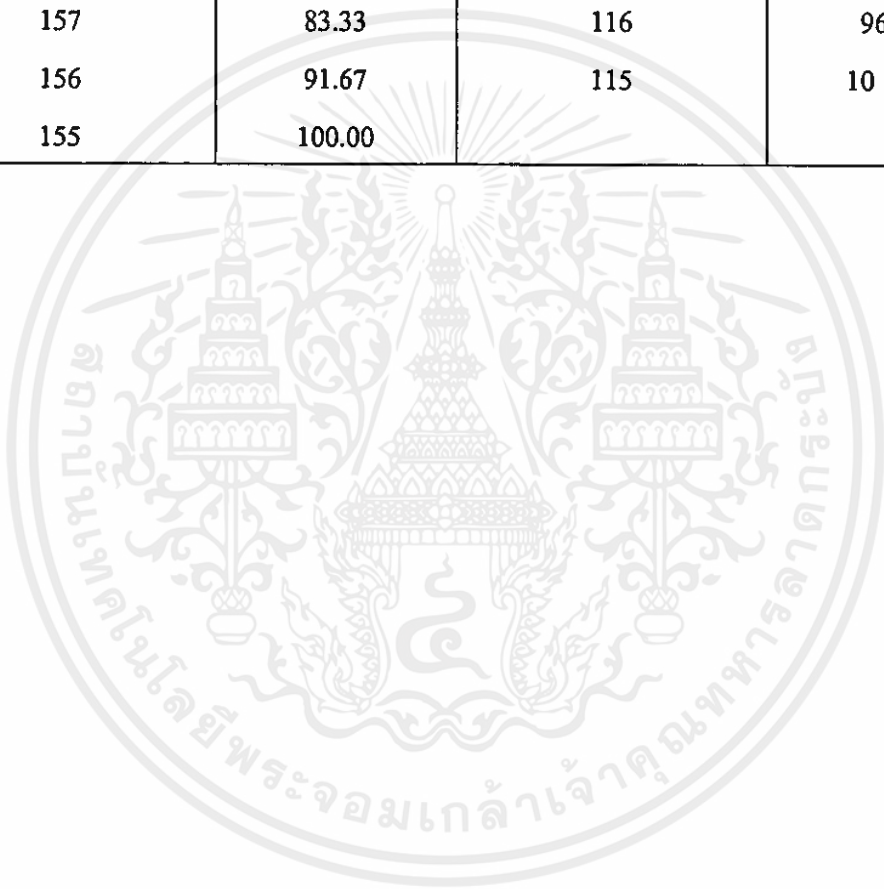
$\theta_H$ อุณหภูมิฮ็อตสเปค ของหม้อแปลงชนิดแห้ง (°C)	$P$ เปอร์เซ็นต์ของ การคาดการณ์ถึง อายุการใช้งาน	$\theta_H$ อุณหภูมิฮ็อตสเปค ของหม้อแปลงชนิดแห้ง (°C)	$P$ เปอร์เซ็นต์ของ การคาดการณ์ถึง อายุการใช้งาน
195	1.00	154	117
194	1.17	153	133
193	1.30	152	150
192	1.43	151	167
191	1.56	150	183
190	1.82	149	200
189	2.08	148	233
188	2.34	147	267
187	2.60	146	300
186	2.86	145	333

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

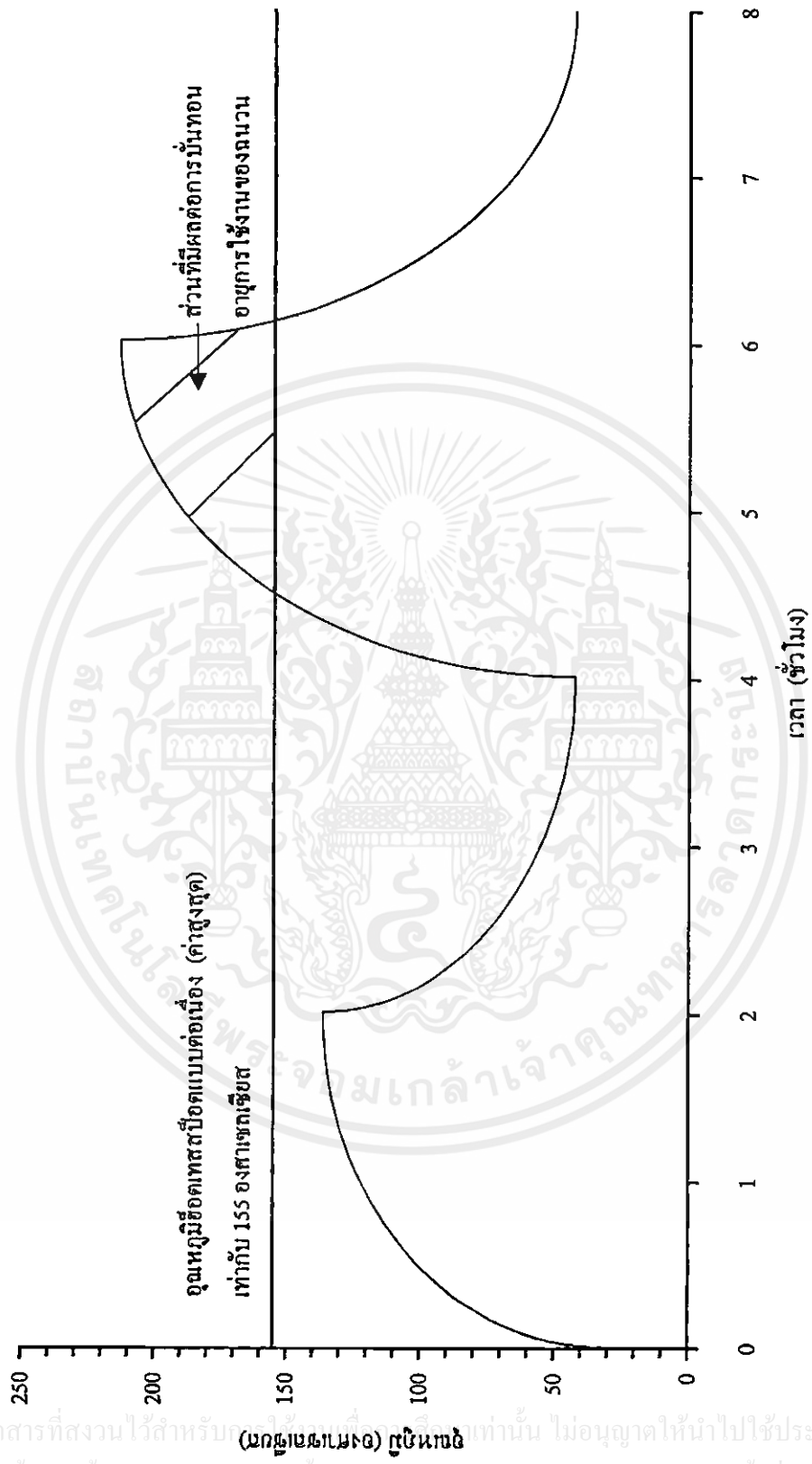
$\theta_H$ อุณหภูมิฮ็อตเทสปีด ของหม้อแปลงชนิดแห้ง ( $^{\circ}\text{C}$ )	$P$ เปอร์เซ็นต์ของการ คาดการณ์ถึงอายุ การใช้งาน	$\theta_H$ อุณหภูมิฮ็อตเทสปีด ของหม้อแปลงชนิดแห้ง ( $^{\circ}\text{C}$ )	$P$ เปอร์เซ็นต์ของ การคาดการณ์ถึง อายุการใช้งาน
185	3.13	144	367
184	3.65	143	400
183	4.17	142	467
182	4.69	141	533
181	5.21	140	600
180	5.73	139	667
179	6.25	138	733
178	7.29	137	800
177	8.33	136	933
176	9.38	135	1067
175	10.42	134	1200
174	11.46	133	1333
173	12.50	132	1467
172	14.58	131	1600
171	16.67	130	1867
170	18.75	129	2133
169	20.83	128	2400
168	22.92	127	2667
167	25.00	126	2933
166	29.17	125	3200
165	33.33	124	3733
164	37.50	123	4267
163	41.67	122	4800
162	45.83	121	5333
161	50.00	120	5867

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

$\theta_H$ อุณหภูมิฮีสตเทสปีด ของหม้อแปลงชนิดแห้ง ( $^{\circ}\text{C}$ )	$P$ เปอร์เซ็นต์ของ การคาดการณ์ถึง อายุการใช้งาน	$\theta_H$ อุณหภูมิฮีสตเทสปีด ของหม้อแปลงชนิดแห้ง ( $^{\circ}\text{C}$ )	$P$ เปอร์เซ็นต์ของ การคาดการณ์ถึง อายุการใช้งาน
160	58.33	119	6400
159	66.67	118	7467
158	75.00	117	8533
157	83.33	116	9600
156	91.67	115	10 000
155	100.00		

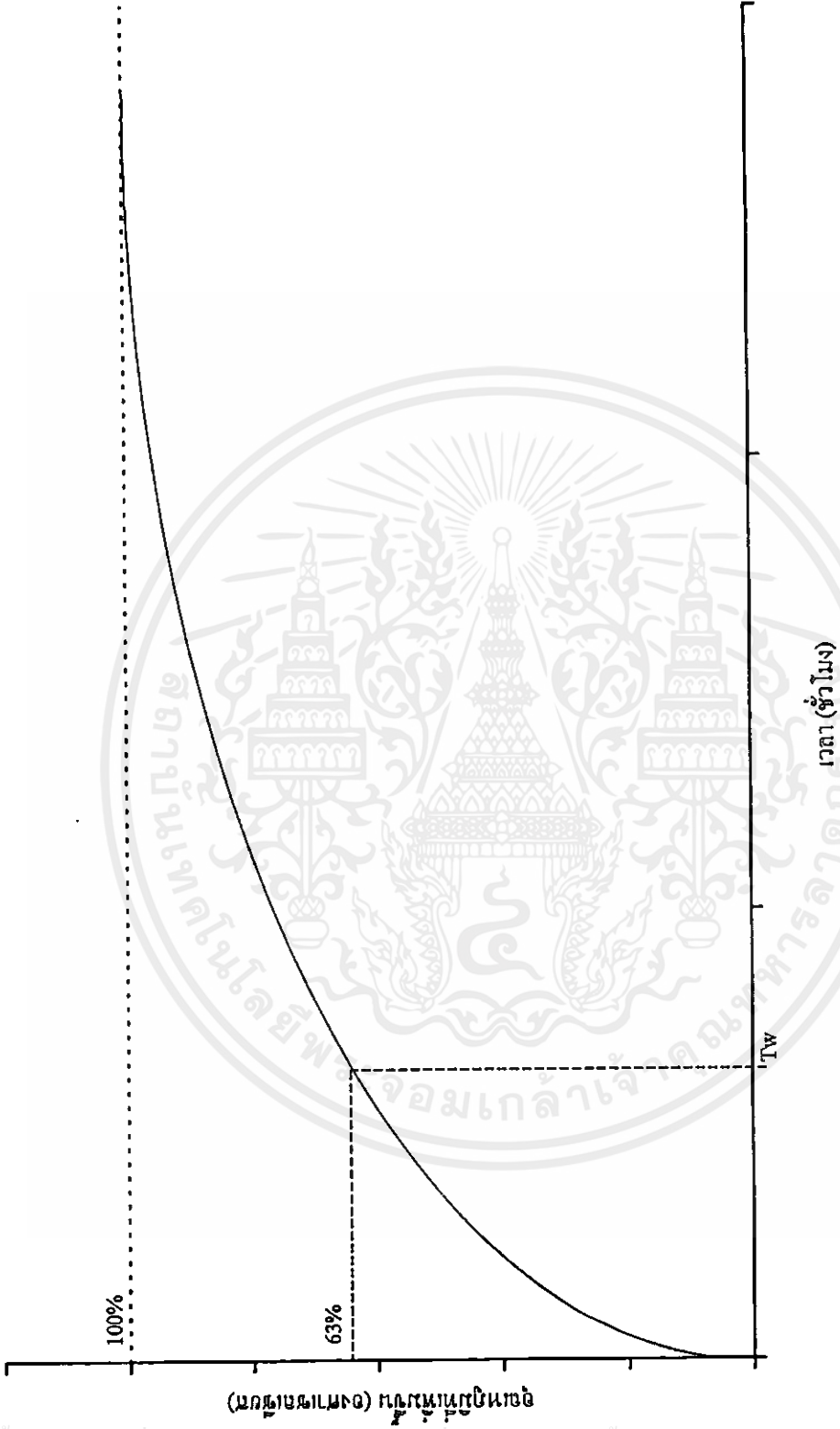


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



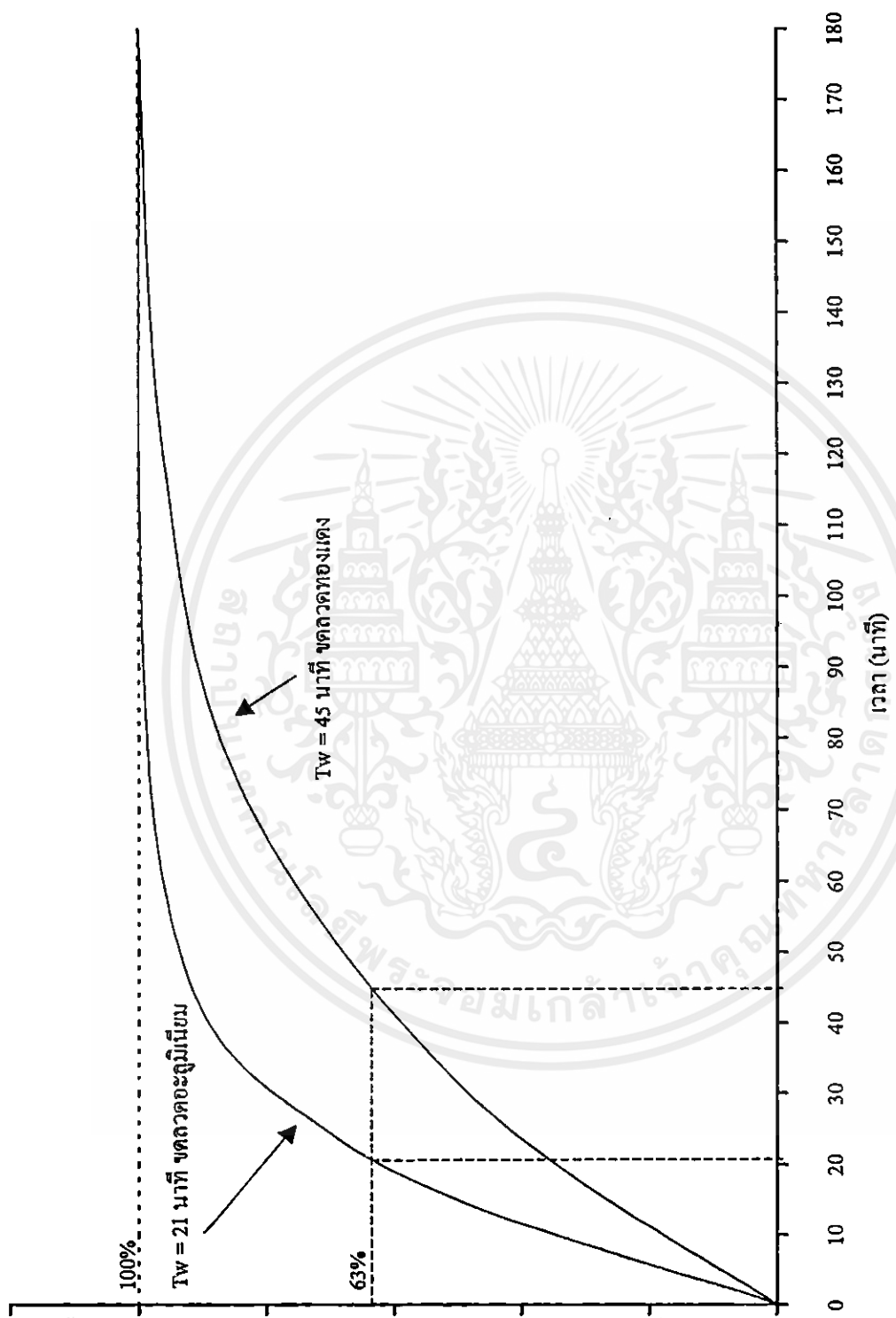
รูปที่ 2.1 แสดงกราฟของความร้อนหรือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบเอกซ์โปเนนเชียล (Exponential)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีฉุกเฉินที่อาจเกิดขึ้นเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงกราฟของความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการต่อโหลดเต็มทีและตำแหน่งของไวต์ลิงก์ที่มีคอนสแตนท์

- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แสดงกราฟการเปรียบเทียบค่าไวรัลดิ้งไทรม์คอนสแตนต์ของหม้อแปลงแบบคาส์เรซิน ต่อโหลด ณ ที่พิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ซึ่งลิขสิทธิ์และการใช้งานที่ถูกต้องตามกฎหมายของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# ผลของการทำนายความร้อนโดยทฤษฎี

ในการใช้งานหม้อแปลงในสภาวะโดยทั่วไปนั้น เราจะพบว่าบ่อยครั้งความเสียหายที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงนั้นมีสาเหตุมาจากการใช้งานที่สภาวะโหลดเกินพิกัด (OVERLOAD) ที่เกิดขึ้นบ่อยๆ ครั้ง ซึ่งทำให้อุณหภูมิของหม้อแปลงเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว อันอาจก่อให้เกิดความเสียหายขึ้นกับฉนวนเรซินที่หุ้มขดลวดอยู่ และทำให้เกิดการกัดฉนวน ทำความเสียหายกับหม้อแปลงโดยรวมได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีการที่ว่าทำอะไรถึงจะใช้หม้อแปลงได้อย่างคุ้มค่าและไม่ทำให้หม้อแปลงเกิดความเสียหาย โดยการพิจารณาผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงของแต่ละสภาพการใช้นั้นๆ ว่าก่อให้เกิดความเสียหายต่อหม้อแปลงตัวนั้นหรือไม่ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการสร้างโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อใช้ในการคำนวณค่าอุณหภูมิฮ็อตสปอตที่เกิดขึ้นที่ขดลวดตัวนำของหม้อแปลง มาใช้แทนการวัดจากอุปกรณ์จริง เช่น เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouples) ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่สะดวกและสิ้นเปลืองกว่า ประโยชน์อีกอย่างที่ได้สำหรับโปรแกรมนี้คือ จะช่วยในการตัดสินใจของผู้ผลิตในการพิจารณาการออกแบบหม้อแปลง เพื่อให้ได้ต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุด เนื่องจากการที่ได้ทราบอุณหภูมิของหม้อแปลงอันเนื่องมาจากการต่อโหลดในลักษณะต่างๆ กัน

สำหรับโปรแกรมสำเร็จรูปเป็นซอฟต์แวร์รันบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล เพียงแต่ป้อนค่าอินพุตตามข้อมูลของผู้ผลิตให้เข้ากับตัวหม้อแปลง ซึ่ง เราเรียกว่า ค่าพิกัดต่างๆ และค่าตัวแปรต่างๆ เข้าไป โปรแกรมก็จะแสดงค่าอุณหภูมิฮ็อตสปอตของหม้อแปลงเทียบกับเวลาโดยเฉพาะ ค่าอุณหภูมิฮ็อตสปอตที่ใช้ในการทำนายอายุของหม้อแปลงตัวนั้นด้วย ก่อนที่จะมาพิจารณาโปรแกรมควรศึกษาถึงคุณสมบัติของหม้อแปลงคาสต์เรซินหรือ โครงสร้างการยึดเหนี่ยวระหว่างขดลวดและเรซินซึ่งได้แสดงไว้ในภาคผนวกและศึกษาหลักการหรือทฤษฎีจากสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆ ของหม้อแปลง คาสต์เรซินกับตัวแปรค่าต่างๆ ที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 สามารถนำมาเขียนโปรแกรมคำนวณค่าอุณหภูมิฮ็อตสปอตได้ ซึ่งเขียนด้วยภาษาปาสคาล ดังกล่าวในบทนี้

### 3.1 แผนภูมิแสดงขั้นตอนในการคำนวณของโปรแกรมทั้งหมด

นำมาเสนอทั้งมีทฤษฎีจากบทความ [1] ทฤษฎีจากบทความ [2] ทฤษฎีจากข้อกำหนดในมาตรฐาน IEEE [3] ทฤษฎีจากข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC [4] ดังแสดงในหน้า 25 ถึงหน้า 28 ตามลำดับ วิธีการใส่ข้อมูลการใช้โปรแกรมทั้ง 4 ทฤษฎี ดังนี้

### 3.1.1 ทฤษฎีจากบทความ [1]

สามารถเขียนลำดับขบวนการทำนายอุณหภูมิหรือวิธีการใส่ข้อมูลที่จำเป็นในการคำนวณค่าเริ่มต้น ซึ่งข้อมูลดังกล่าวได้แก่

1. ป้อนค่าอุณหภูมิการเพิ่มของขดลวดซึ่งขึ้นอยู่กับฉนวนบนแผ่นป้ายประจำเครื่อง
2. ป้อนค่าการออกแบบของอุณหภูมิฮอตเทสสป็อดเกรเดียนต์
3. ป้อนค่าจุดเริ่มต้นของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการต่อโหลด
4. ป้อนค่าอุณหภูมิสภาวะแวดล้อม
5. ป้อนค่า kVA ของโหลดใช้งานที่นำมาต่อเข้ากับหม้อแปลง
6. ป้อนค่าพิทช์ kVA ของหม้อแปลงบนแผ่นป้ายประจำเครื่อง
7. ป้อนค่าระยะเวลาที่ใช้ในการต่อโหลดเข้ากับหม้อแปลง
8. ป้อนค่าไว้นัดตั้ง ไทม์คอนสแตนต์ซึ่งขึ้นอยู่กับว่าหม้อแปลงเป็นขดลวดทองแดง

หรืออะลูมิเนียม

### 3.1.2 ทฤษฎีจากบทความ [2]

สามารถเขียนลำดับขบวนการทำนายอุณหภูมิหรือวิธีการใส่ข้อมูลที่จำเป็นในการคำนวณค่าเริ่มต้น ซึ่งข้อมูลดังกล่าวได้แก่

1. ป้อนค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของการระบายความร้อน (ระบายความร้อนโดยใช้อากาศธรรมชาติหรือการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน)
2. ป้อนค่าอุณหภูมิฮอตเทสสป็อด ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการทดสอบแบบลัดวงจร
3. ป้อนค่าอุณหภูมิฮอตเทสสป็อด ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการทดสอบแบบเปิดวงจร
4. ป้อนค่าอุณหภูมิสภาวะแวดล้อม
5. ป้อนค่าอุณหภูมิสภาวะแวดล้อมขณะทดสอบแบบลัดวงจร
6. ป้อนค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้สร้างหม้อแปลง (ทองแดงหรือ

อะลูมิเนียม)

### 3.1.3 ทฤษฎีจากข้อกำหนดในมาตรฐาน IEEE [3]

สามารถเขียนลำดับขบวนการทำนายอุณหภูมิหรือวิธีการใส่ข้อมูลที่จำเป็นในการคำนวณค่าเริ่มต้น ซึ่งข้อมูลดังกล่าวได้แก่

1. ป้อนค่าการออกแบบของอุณหภูมิฮอตเทสสป็อดเกรเดียนต์
2. ป้อนค่าอุณหภูมิของขดลวดที่เพิ่มขึ้นซึ่งขึ้นอยู่กับฉนวนบนแผ่นป้ายประจำเครื่อง
3. ป้อนค่าอุณหภูมิสภาวะแวดล้อม
4. ป้อนค่า kVA ของโหลดใช้งานที่นำมาต่อเข้ากับหม้อแปลงช่วงเริ่มต้น
5. ป้อนค่า kVA ของโหลดใช้งานที่นำมาต่อเข้ากับหม้อแปลงช่วงคอนปลาย
6. ป้อนค่าพิทช์ kVA ของหม้อแปลงบนแผ่นป้ายประจำเครื่อง

7. ป้อนค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของกำรระบายความร้อน (ระบายความร้อนโดยใช้อากาศธรรมชาติหรือการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน)
8. ป้อนค่าระยะเวลาที่ใช้ในการต่อโหลดเข้ากับหม้อแปลง
9. ป้อนค่าไวน์ดิงไทม์คอนสแตนต์ ซึ่งขึ้นอยู่กับว่าหม้อแปลงเป็นขดลวดทองแดงหรืออะลูมิเนียม

### 3.1.4 ทฤษฎีจากข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC [4]

สามารถเขียนลำดับขบวนการทำนายอุณหภูมิหรือวิธีการใส่ข้อมูลที่เป็นในการคำนวณค่าเริ่มต้น ซึ่งข้อมูลดังกล่าวได้แก่

1. ป้อนค่าอุณหภูมิฮอตเทสทีดที่เพิ่มขึ้นช่วงเริ่มต้น
2. ป้อนค่าอุณหภูมิสภาวะแวดล้อม
3. ป้อนค่าระยะเวลาที่ใช้ในการต่อโหลดเข้ากับหม้อแปลง
4. ป้อนค่าไวน์ดิงไทม์คอนสแตนต์ ซึ่งขึ้นอยู่กับว่าหม้อแปลงเป็นขดลวดทองแดงหรืออะลูมิเนียม
5. ป้อนค่าอัตราส่วนระหว่าง อุณหภูมิฮอตเทสทีด ของขดลวดที่เพิ่มขึ้นกับค่าอุณหภูมิฮอตเทสทีดเฉลี่ยของขดลวดที่เพิ่มขึ้น
6. ป้อนค่าอุณหภูมิฮอตเทสทีดเฉลี่ยของขดลวดที่เพิ่มขึ้น
7. ป้อนค่า kVA ของโหลดใช้งานที่นำมาต่อเข้ากับหม้อแปลง
8. ป้อนค่าพิคก kVA ของหม้อแปลงบนแผ่นป้ายประจำเครื่อง
9. ป้อนค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของการระบายความร้อน (ระบายความร้อนโดยใช้อากาศธรรมชาติหรือการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน)

### 3.2 ตัวอย่างการทดสอบโปรแกรม

หลังจากเขียนโปรแกรมเสร็จแล้วได้นำตัวอย่าง Load Duty Cycle ของหม้อแปลงในระบบไฟฟ้ากำลัง [13] เท่ากับ 12 ตัวอย่าง และตัวอย่างในแนวความคิดเท่ากับ 8 ตัวอย่าง พร้อมทั้งยกตัวอย่าง Load Duty Cycle ของหม้อแปลงซึ่งเป็นข้อมูลในการใช้งานจริงๆ จากอาคารสำนักงานเท่ากับ 2 ตัวอย่าง นำมาเป็นเครื่องมือในการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคำนวณ โดยในการทดสอบโปรแกรมจะใช้ตัวอย่างหม้อแปลงขนาดต่างๆ กัน หรือมีการเปลี่ยนแปลงขนาดพิคก และมีการเปลี่ยนแปลง Load Duty Cycle เพื่อที่จะได้เห็นอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตามโหลดการใช้งานตามหม้อแปลงขนาดต่างๆ ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ดังนั้นในการทำนายอุณหภูมิเพื่อนำข้อมูลหรือผลอุณหภูมิฮอตเทสทีดที่ทำนายจากซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับทฤษฎีต่างๆ กับการทดสอบจริงว่าอุณหภูมิมีความใกล้เคียงกันมากน้อยเพียงใด และเส้นกราฟมีลักษณะขนานกัน แสดงว่าซอฟต์แวร์หรือทฤษฎีสามารถนำไปใช้งานหรือทำนายอุณหภูมิหม้อแปลงได้ เพื่อพิจารณา

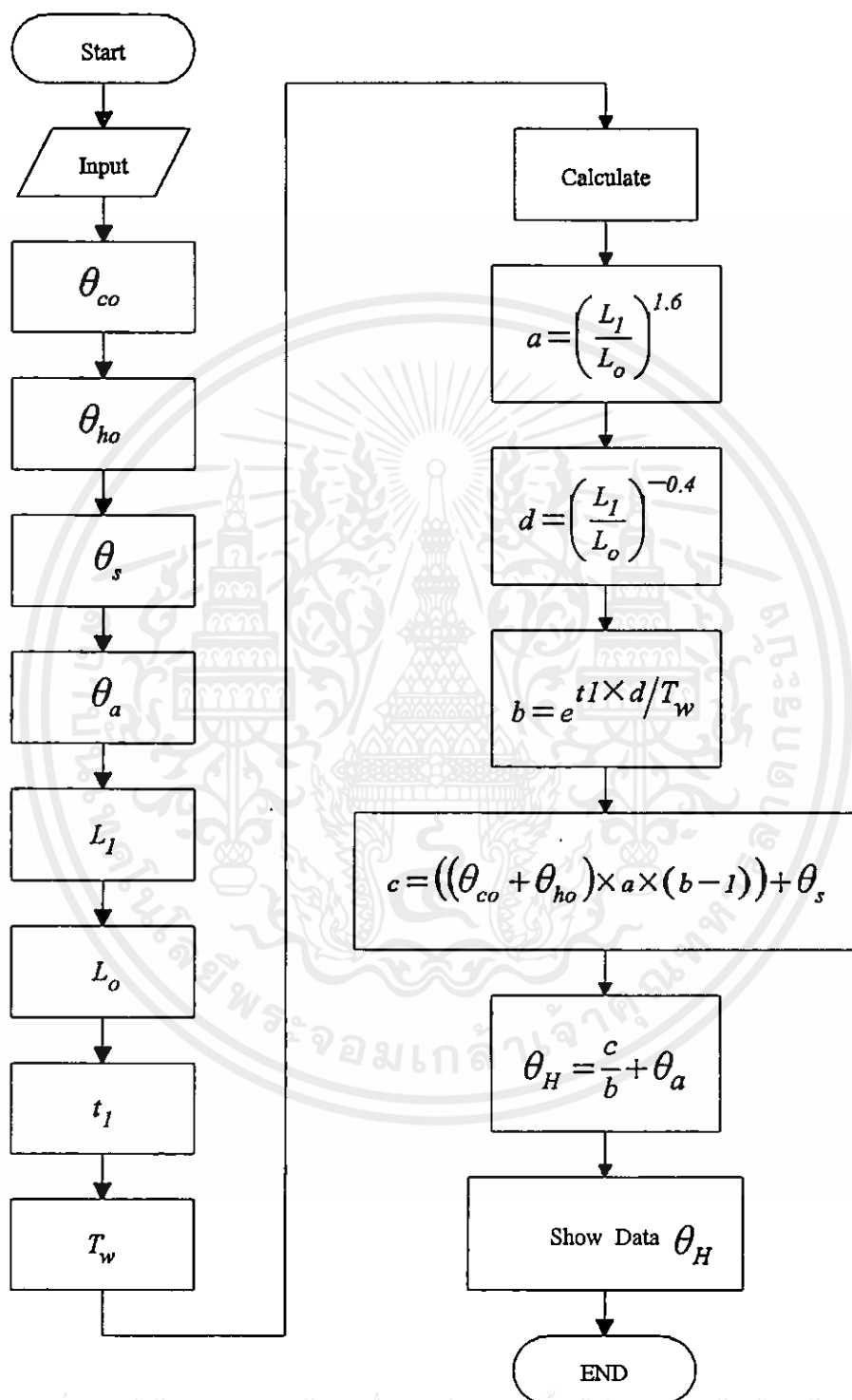
ความสามารถกำหนดโหลดการใช้งานของหม้อแปลงให้เกิดประโยชน์สูงสุดได้ นำเสนอตัวอย่างของหม้อแปลงคาสต์เรซิน (Cast Resin Transformers) รวมทั้งหมดเท่ากับ 20 ตัวอย่าง และมีพิถีพิถันแตกต่างกันไปซึ่งมีลักษณะการต่อโหลด (Load Duty Cycle) ในสภาวะต่างๆ กัน ผลการทดสอบการใช้งานของโปรแกรม ดังแสดงได้ในหน้า 29 ถึงหน้า 88 สามารถอธิบายว่าขบวนการทดสอบหม้อแปลงโดยการรัน โปรแกรมเพื่อการเปรียบเทียบแบ่งการทดสอบดังนี้ เช่น

1. หม้อแปลงพิกัด 50 kVA ผลการเปรียบเทียบทฤษฎีต่างๆ อยู่ในรูปที่ 3.1-3.3
2. หม้อแปลงพิกัด 75 kVA ผลการเปรียบเทียบทฤษฎีต่างๆ อยู่ในรูปที่ 3.4-3.6
3. หม้อแปลงพิกัด 100 kVA ผลการเปรียบเทียบทฤษฎีต่างๆ อยู่ในรูปที่ 3.7-3.9
4. หม้อแปลงพิกัด 160 kVA ผลการเปรียบเทียบทฤษฎีต่างๆ อยู่ในรูปที่ 3.10-3.12
5. หม้อแปลงพิกัด 225 kVA ผลการเปรียบเทียบทฤษฎีต่างๆ อยู่ในรูปที่ 3.13-3.15
6. หม้อแปลงพิกัด 250 kVA ผลการเปรียบเทียบทฤษฎีต่างๆ อยู่ในรูปที่ 3.16-3.18
7. หม้อแปลงพิกัด 300 kVA ผลการเปรียบเทียบทฤษฎีต่างๆ อยู่ในรูปที่ 3.19-3.21
8. หม้อแปลงพิกัด 400 kVA ผลการเปรียบเทียบทฤษฎีต่างๆ อยู่ในรูปที่ 3.22-3.24
9. หม้อแปลงพิกัด 500 kVA ผลการเปรียบเทียบทฤษฎีต่างๆ อยู่ในรูปที่ 3.25-3.27
10. หม้อแปลงพิกัด 630 kVA ผลการเปรียบเทียบทฤษฎีต่างๆ อยู่ในรูปที่ 3.28-3.30
11. หม้อแปลงพิกัด 750 kVA ผลการเปรียบเทียบทฤษฎีต่างๆ อยู่ในรูปที่ 3.31-3.33
12. หม้อแปลงพิกัด 800 kVA ผลการเปรียบเทียบทฤษฎีต่างๆ อยู่ในรูปที่ 3.34-3.36
13. หม้อแปลงพิกัด 1000 kVA ผลการเปรียบเทียบทฤษฎีต่างๆ อยู่ในรูปที่ 3.37-3.39
14. หม้อแปลงพิกัด 1250 kVA ผลการเปรียบเทียบทฤษฎีต่างๆ อยู่ในรูปที่ 3.40-3.42
15. หม้อแปลงพิกัด 1500 kVA ผลการเปรียบเทียบทฤษฎีต่างๆ อยู่ในรูปที่ 3.43-3.45
16. หม้อแปลงพิกัด 1600 kVA ผลการเปรียบเทียบทฤษฎีต่างๆ อยู่ในรูปที่ 3.46-3.48
17. หม้อแปลงพิกัด 2000 kVA ผลการเปรียบเทียบทฤษฎีต่างๆ อยู่ในรูปที่ 3.49-3.51
18. หม้อแปลงพิกัด 2500 kVA ผลการเปรียบเทียบทฤษฎีต่างๆ อยู่ในรูปที่ 3.52-3.54
19. หม้อแปลงพิกัด 10000 kVA ผลการเปรียบเทียบทฤษฎีต่างๆ อยู่ในรูปที่ 3.55-3.57
20. หม้อแปลงพิกัด 15000 kVA ผลการเปรียบเทียบทฤษฎีต่างๆ อยู่ในรูปที่ 3.58-3.60

ส่วนตัวอย่างหน้า 89 ถึงหน้า 94 สามารถเพิ่ม Load Duty Cycle โดยใช้ข้อมูลจริงจากอาคารสำนักงานที่มีการวิเคราะห์พลังงานจากศูนย์อนุรักษ์พลังงานแห่งประเทศไทย (ECCT) โดยใช้หม้อแปลงคาสต์เรซินขนาด 1000 kVA และ 1250 kVA ตามลำดับ และมีการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนด้วย สามารถอธิบายว่าขบวนการทดสอบหม้อแปลงโดยการรัน โปรแกรมเพื่อการเปรียบเทียบแบ่งการทดสอบดังนี้ เช่น

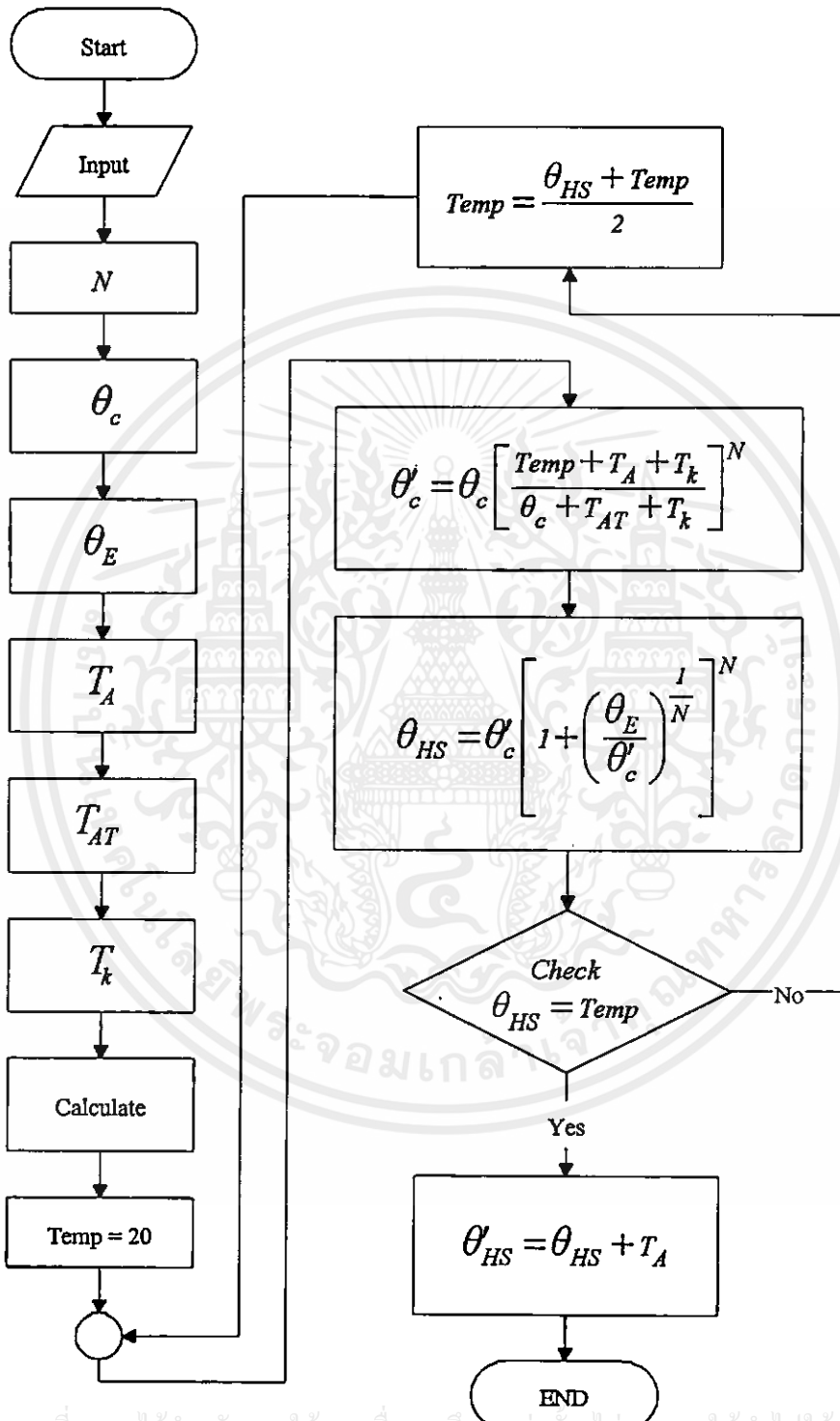
1. หม้อแปลงพิกัด 1000 kVA ผลการเปรียบเทียบทฤษฎีต่างๆ อยู่ในรูปที่ 3.61-3.63
2. หม้อแปลงพิกัด 1250 kVA ผลการเปรียบเทียบทฤษฎีต่างๆ อยู่ในรูปที่ 3.64-3.66

## แผนภูมิแสดงขั้นตอนในการคำนวณของโปรแกรม Theorem 1



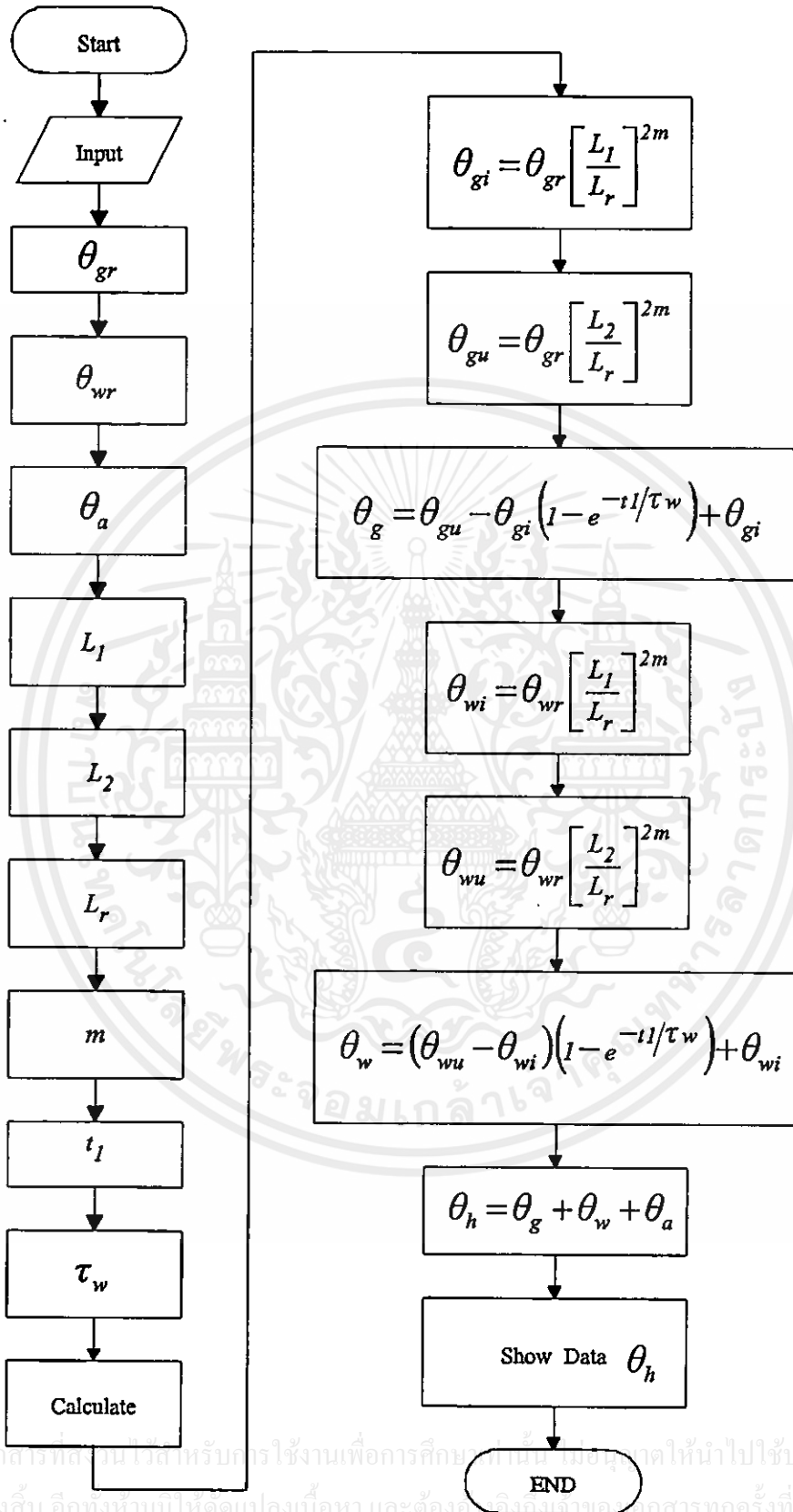
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## แผนภูมิแสดงขั้นตอนในการคำนวณของโปรแกรม Theorem 2

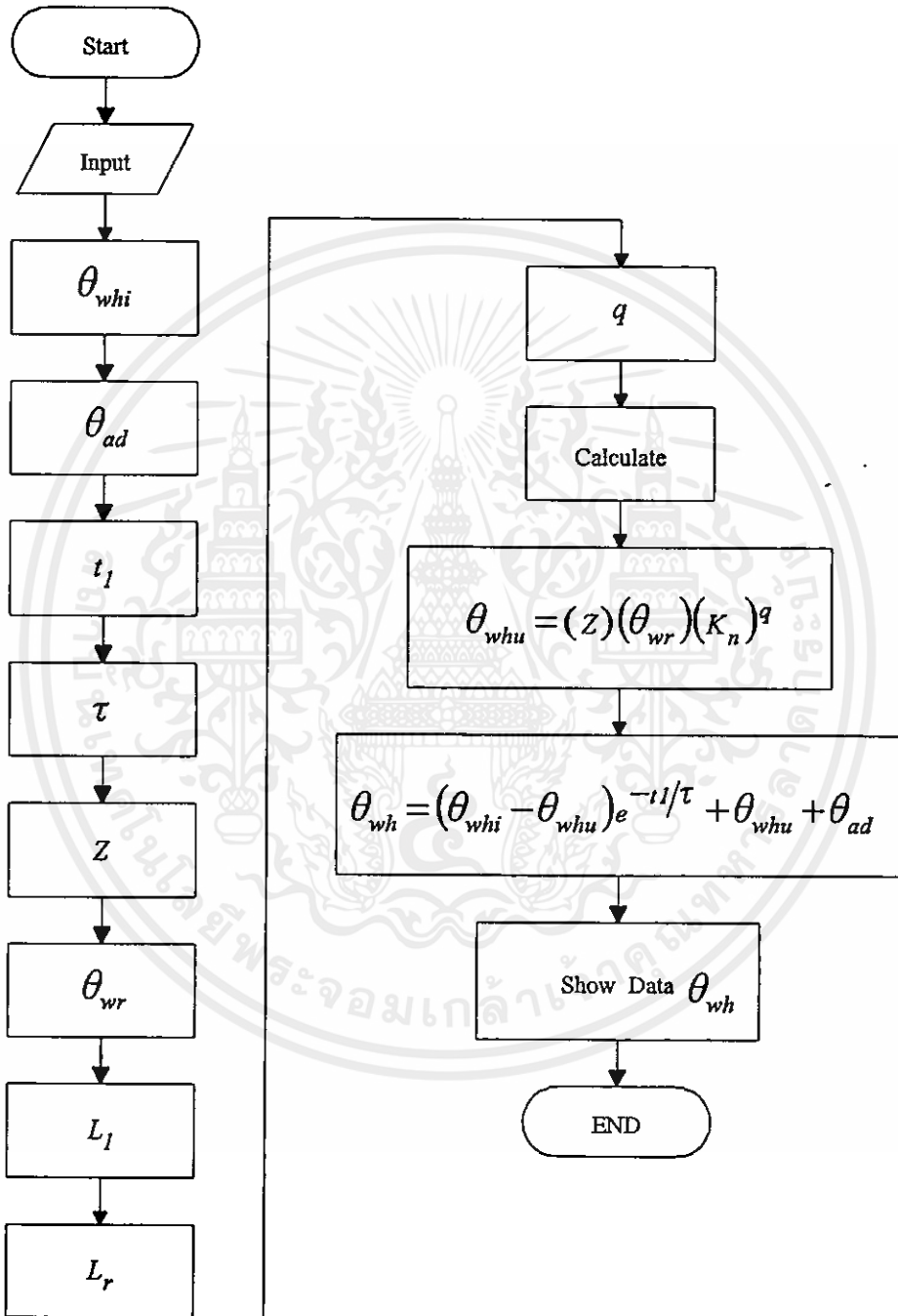


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

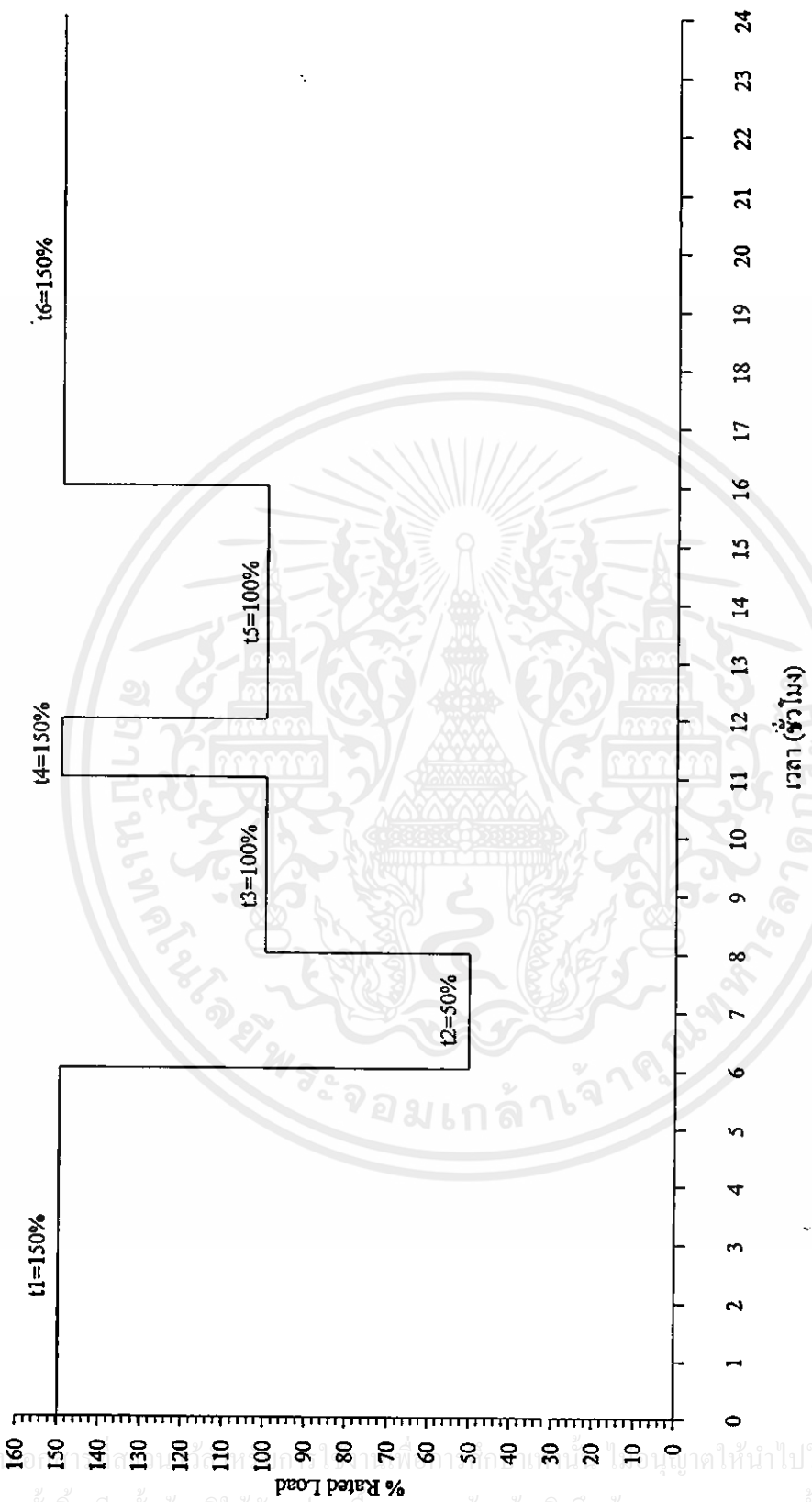
### แผนภูมิแสดงขั้นตอนในการคำนวณของโปรแกรม Theorem 3



## แผนภูมิแสดงขั้นตอนในการคำนวณของโปรแกรม Theorem 4

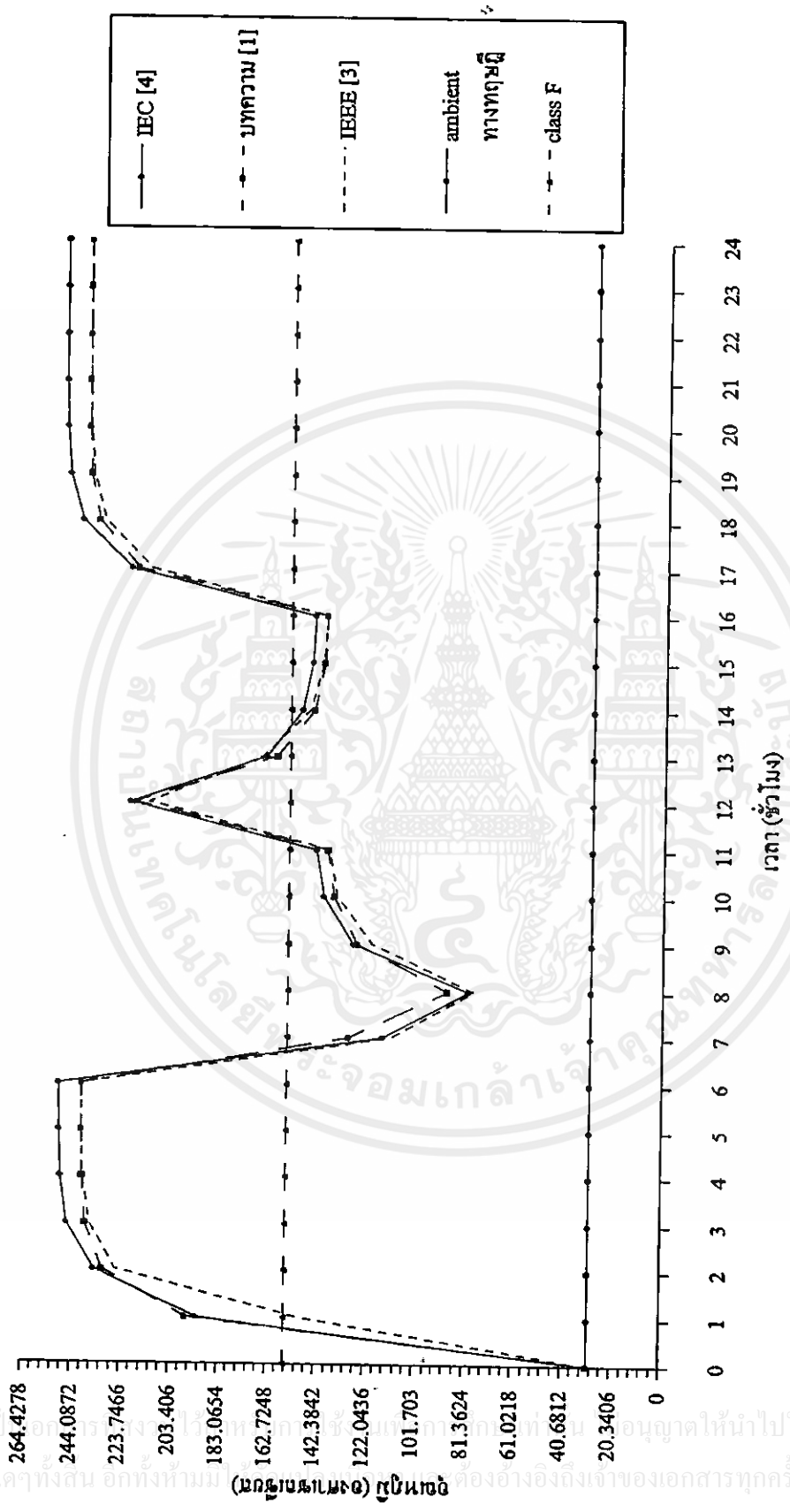


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



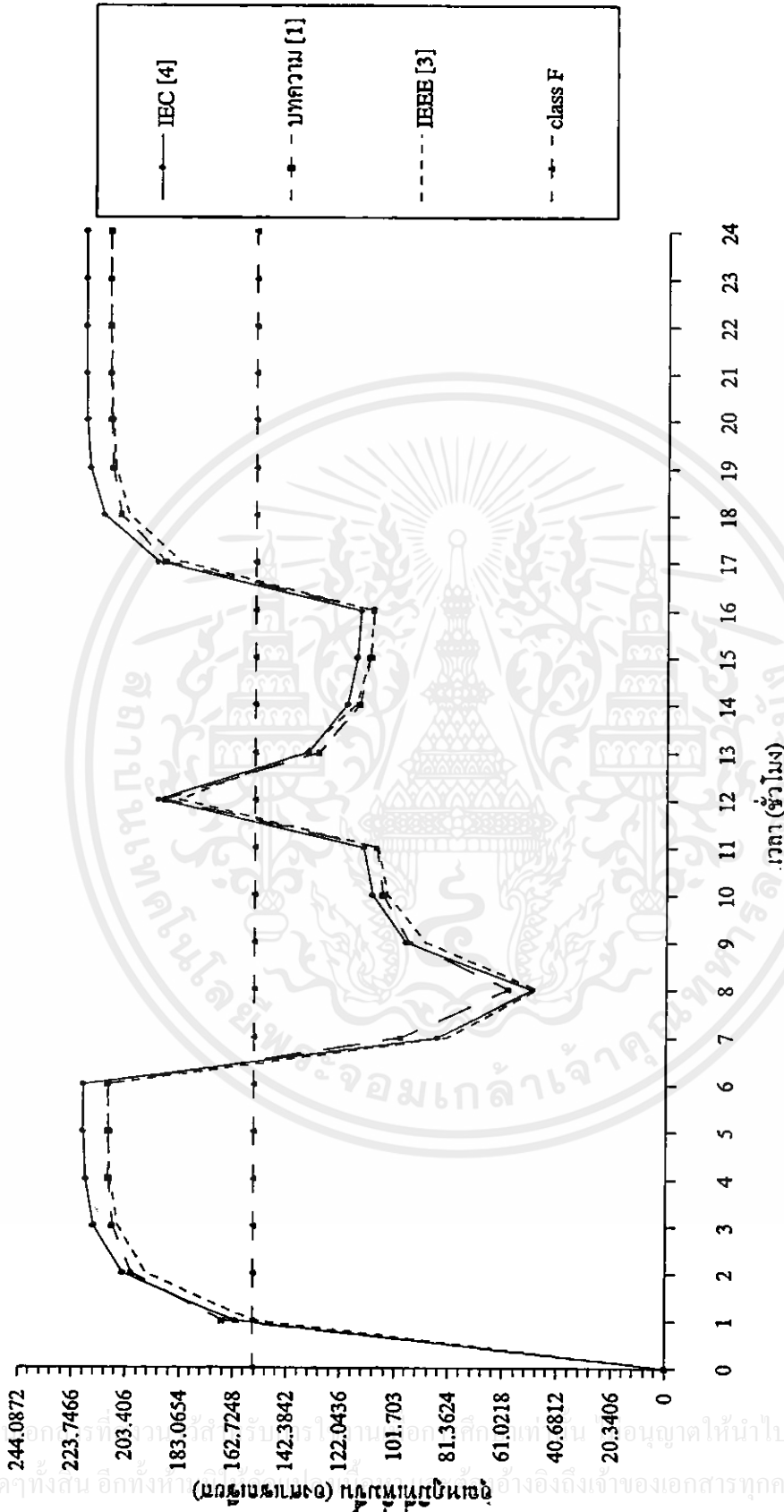
รูปที่ 3.1 Load Duty Cycle ของหม้อแปลงกำลังรีซินขนาด 50 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 ไม่ว่าจะตีพิมพ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



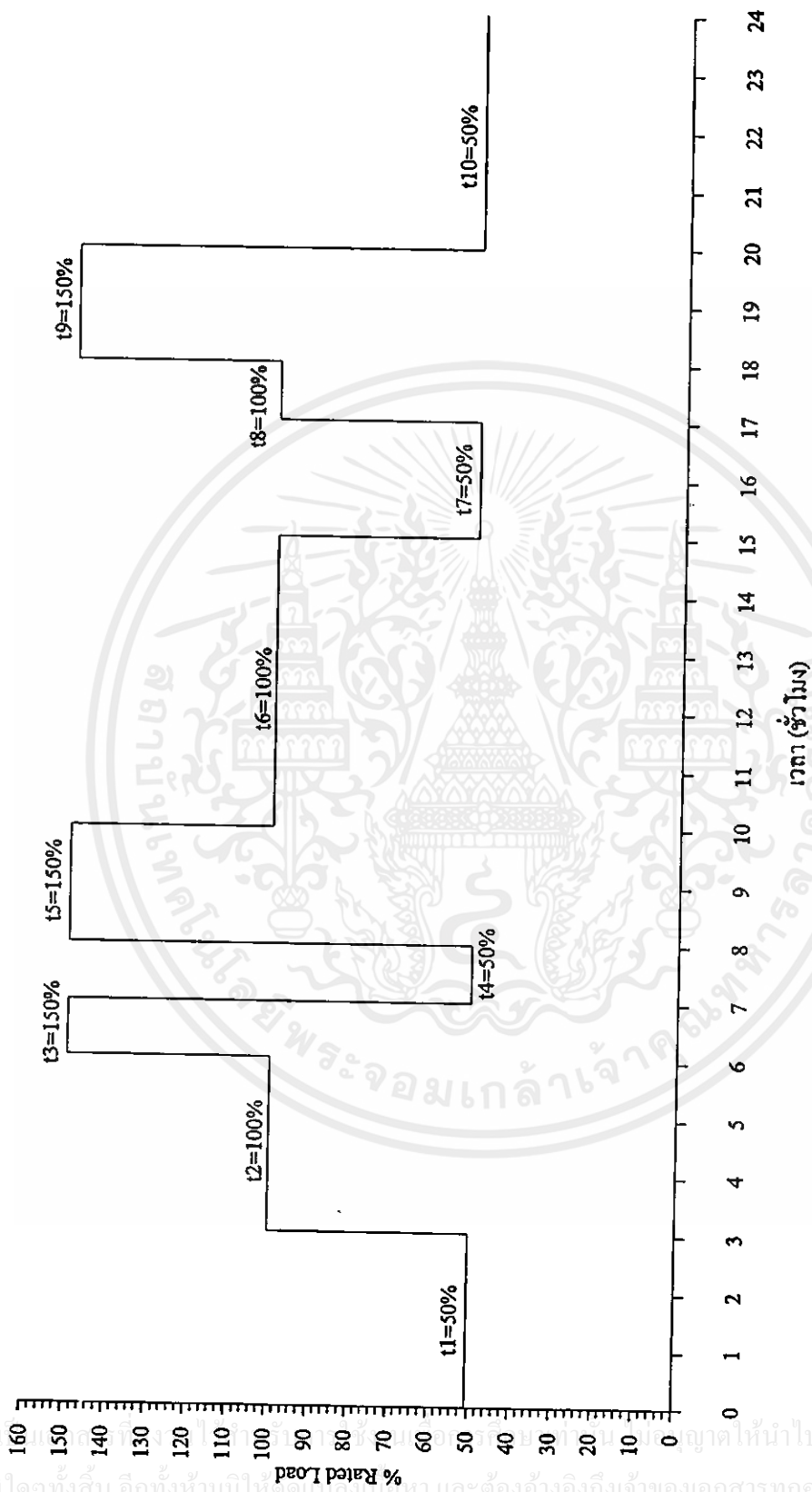
รูปที่ 3.2 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงกำลังขนาด 50 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาซึ่งหากมีการนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



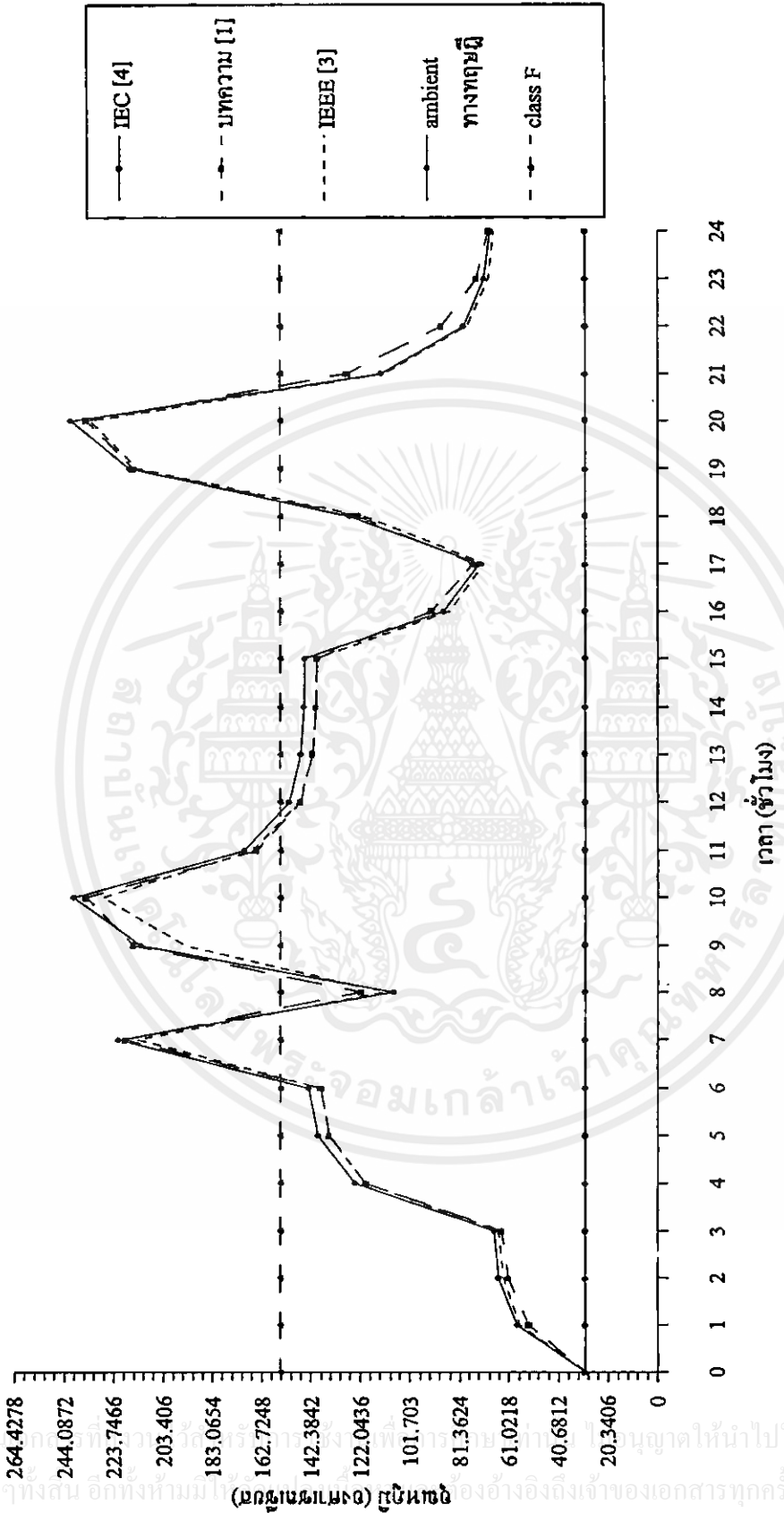
รูปที่ 3.3 เปรียบเทียบขุมหมุ่ที่เพิ่มขึ้น ที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงคาสต์เรซินขนาด 50 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไว้สำหรับใช้ในงานวิชาการเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้  
 อย่างอื่นถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

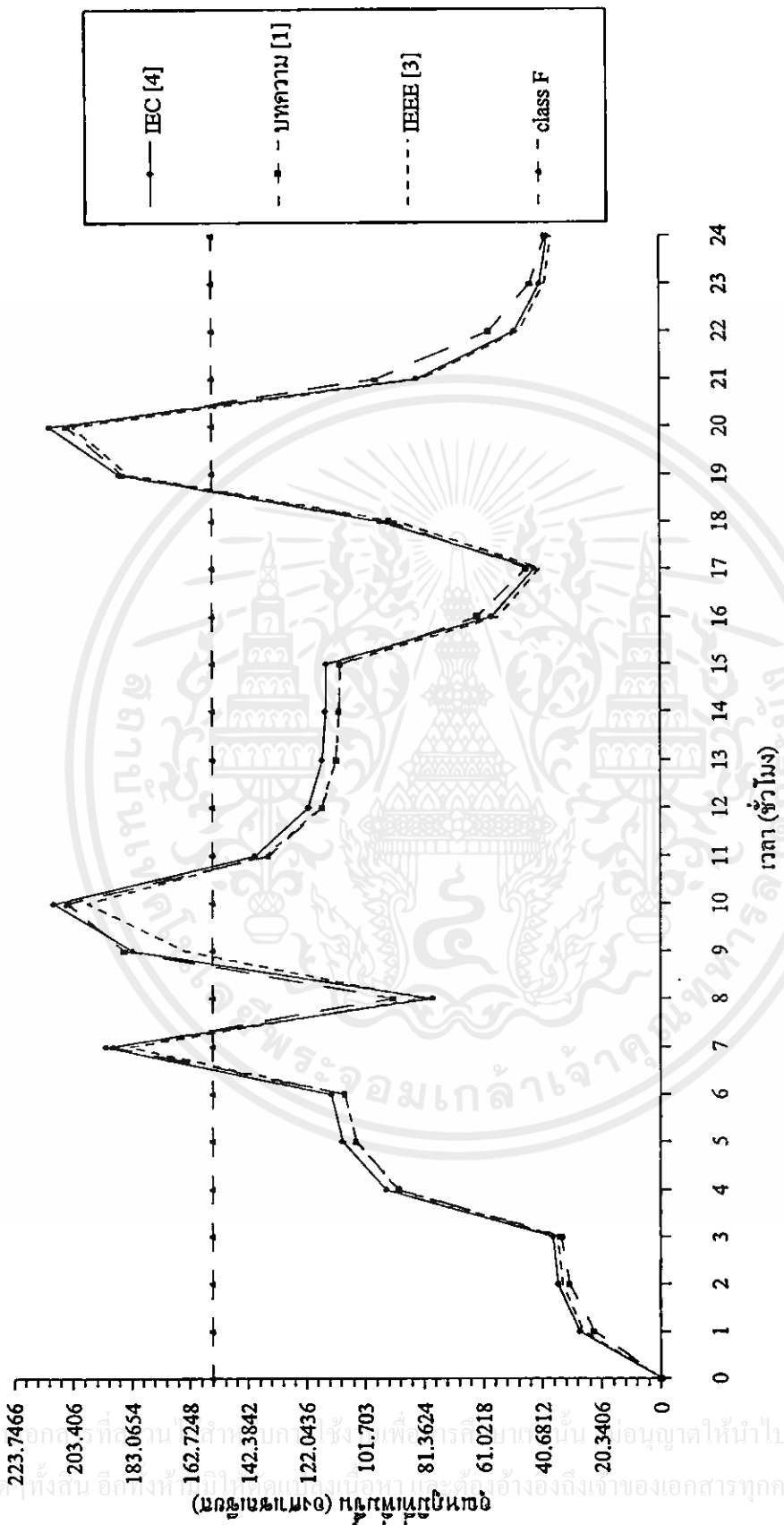


รูปที่ 3.4 Load Duty Cycle ของหม้อแปลงกำลัง 75 kVA

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

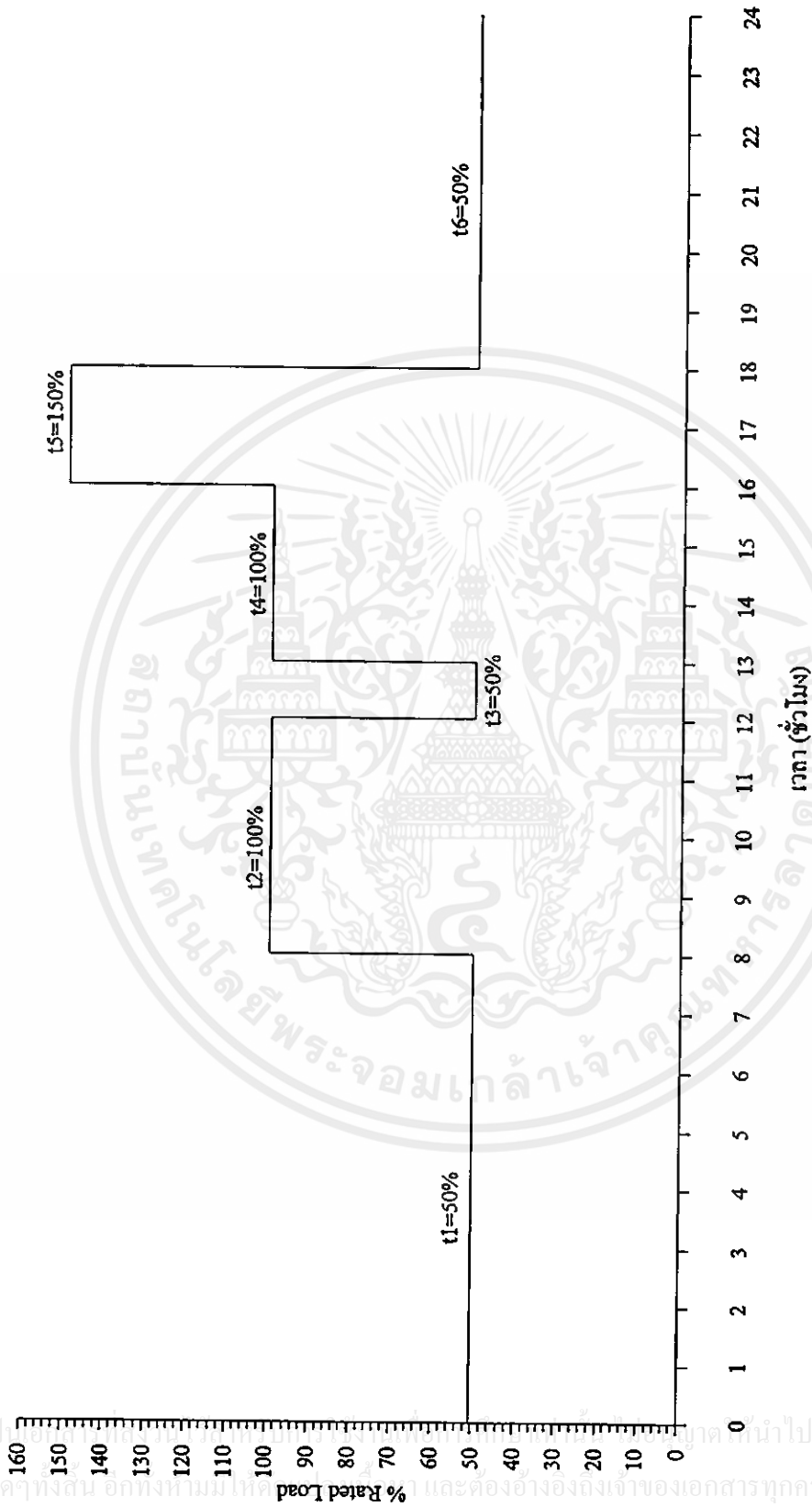


รูปที่ 3.5 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงกำลังขนาด 75 kVA

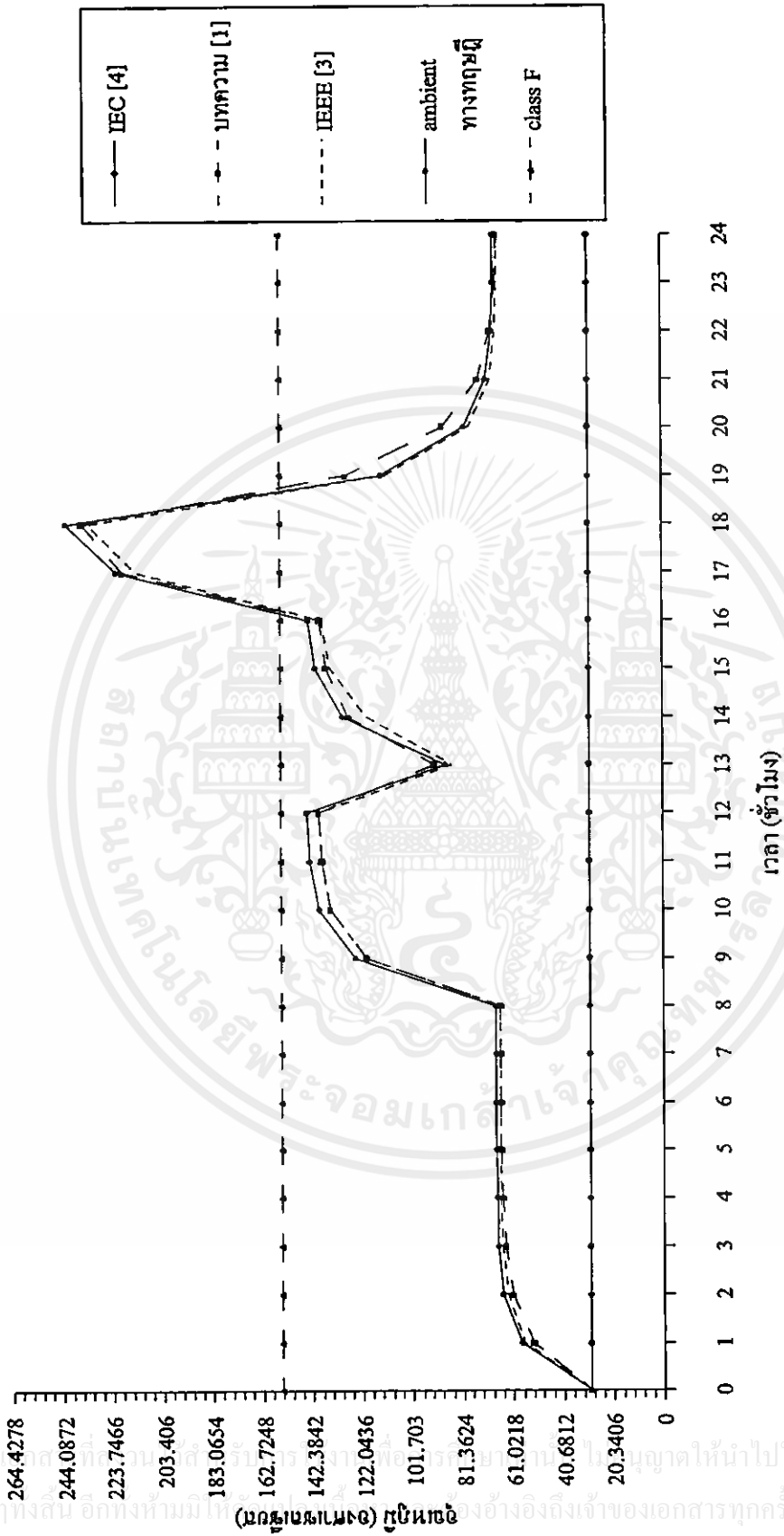


รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบขุมหมุ่ที่เพิ่มงึนที่ไดจากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงศาสต์รชึนขนาด 75 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

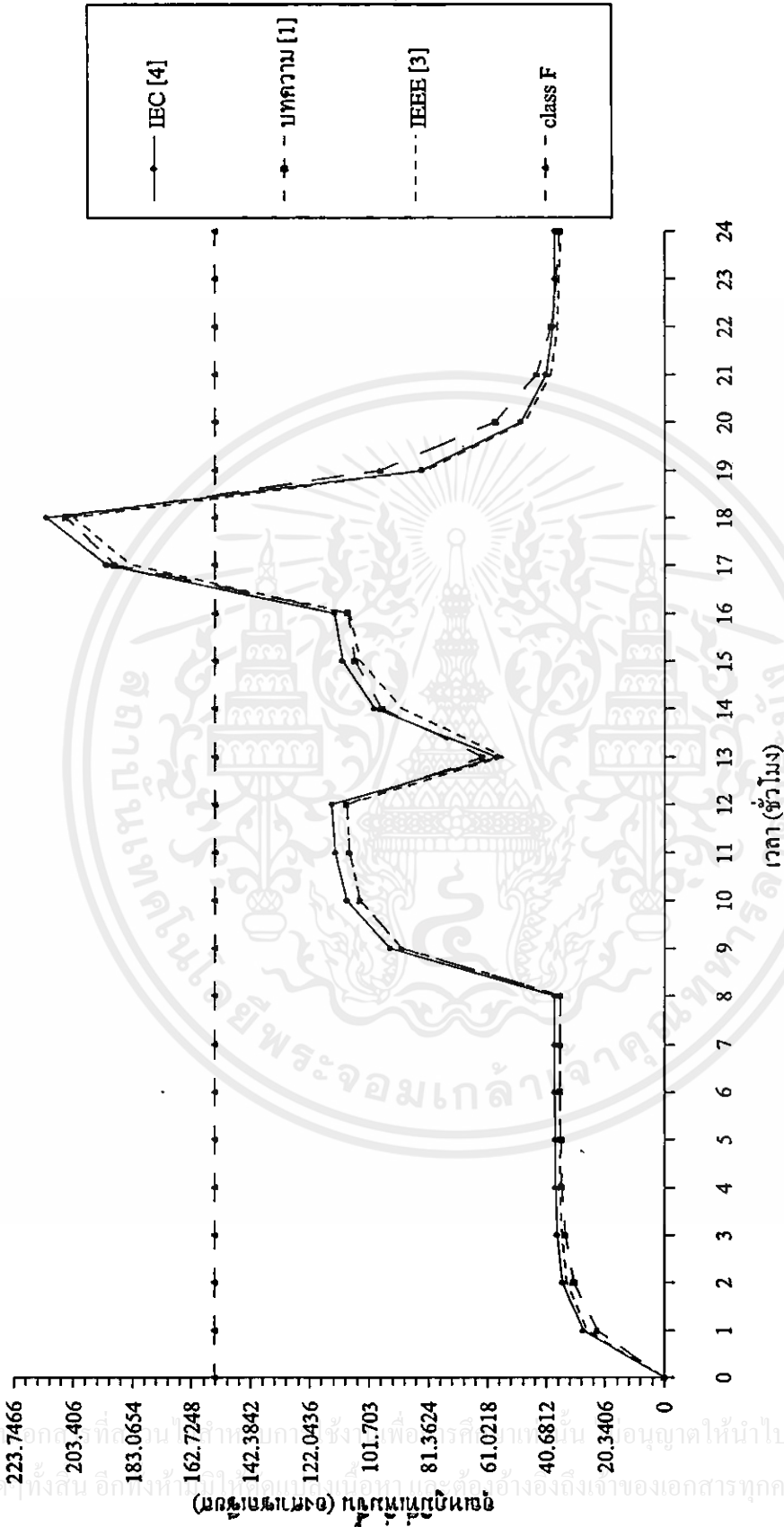


รูปที่ 3.7 Load Duty Cycle ของหม้อแปลงคาบศรชัณขนาด 100 kVA

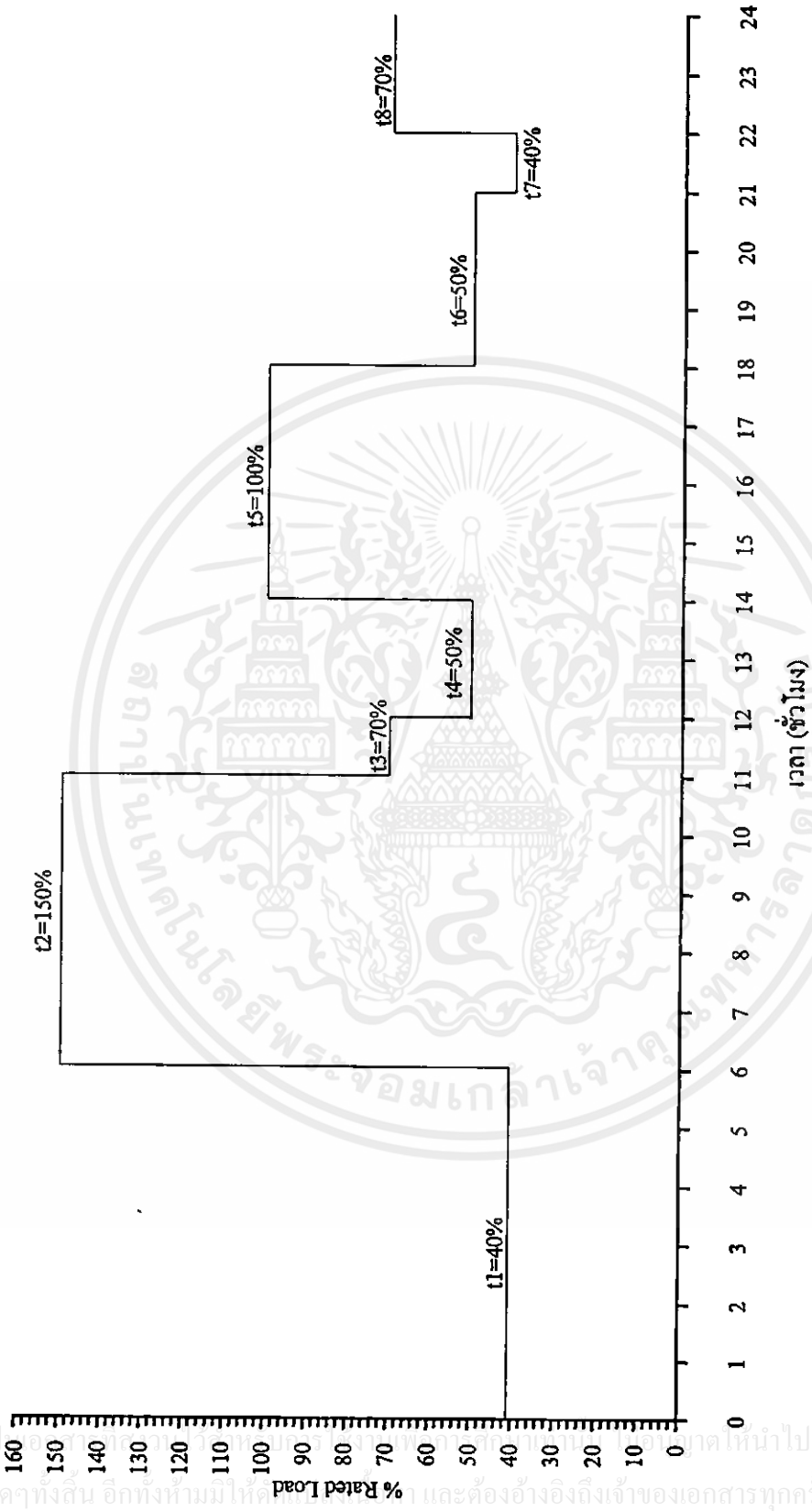


รูปที่ 3.8 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงกำลังระดับแรงดัน 100 kVA

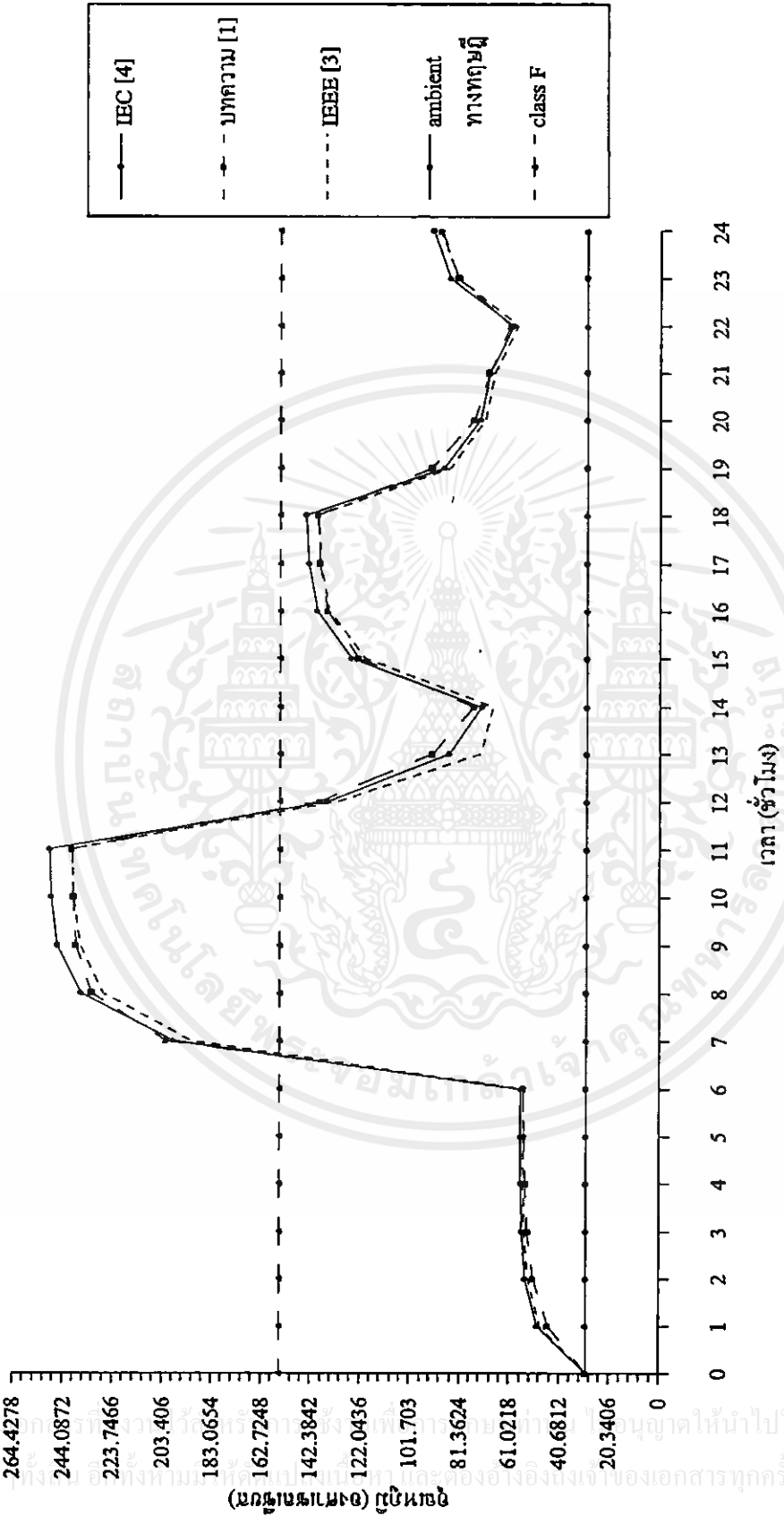
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้งานภายในหน่วยงานเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่ไปให้ประชาชนภายนอกได้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งนี้ เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



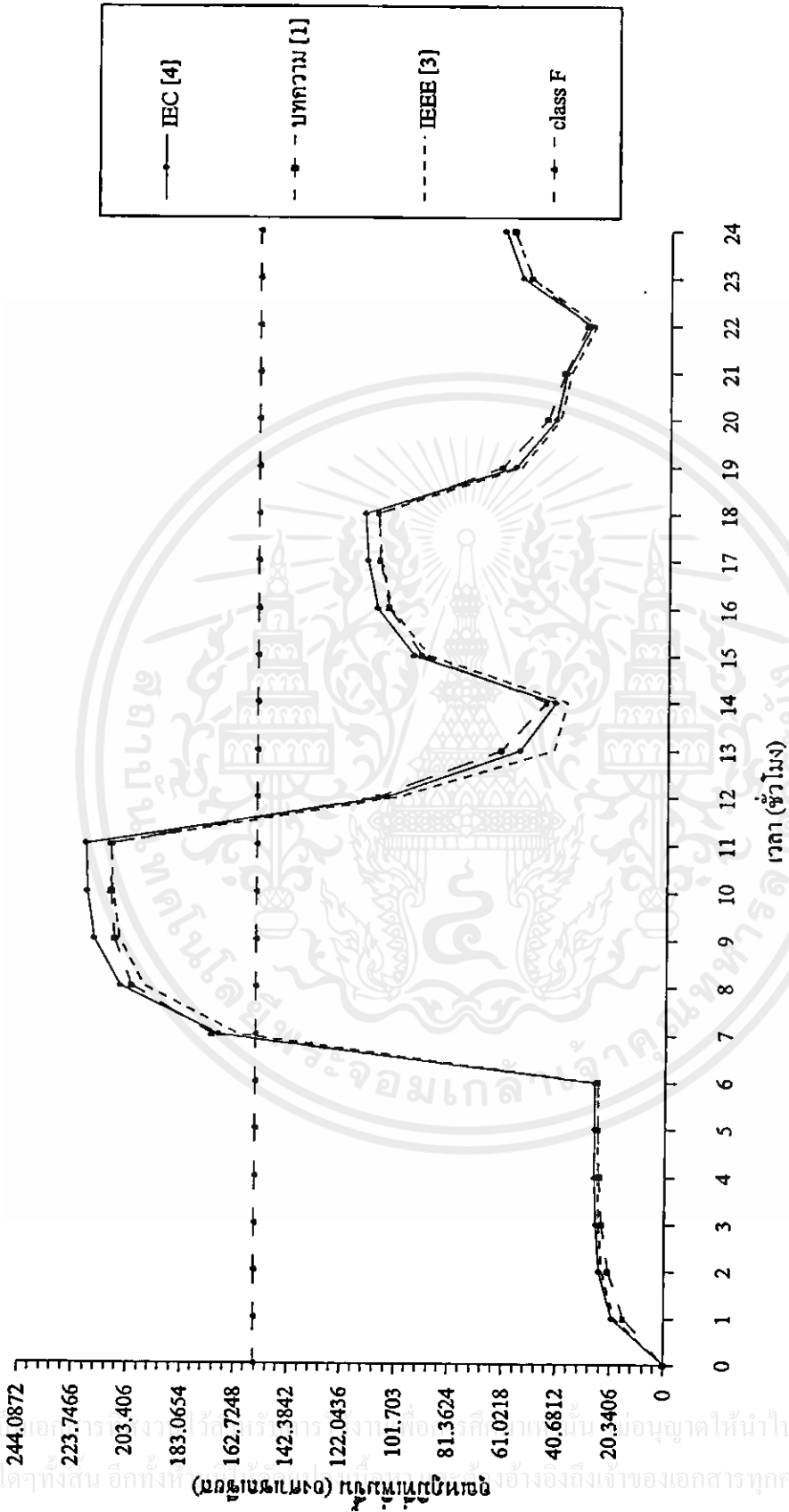
รูปที่ 3.9 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงกำลังเรติเนนขนาด 100 KVA



รูปที่ 3.10 Load Duty Cycle ของหม้อแปลงกำลังเรตขนาด 160 kVA

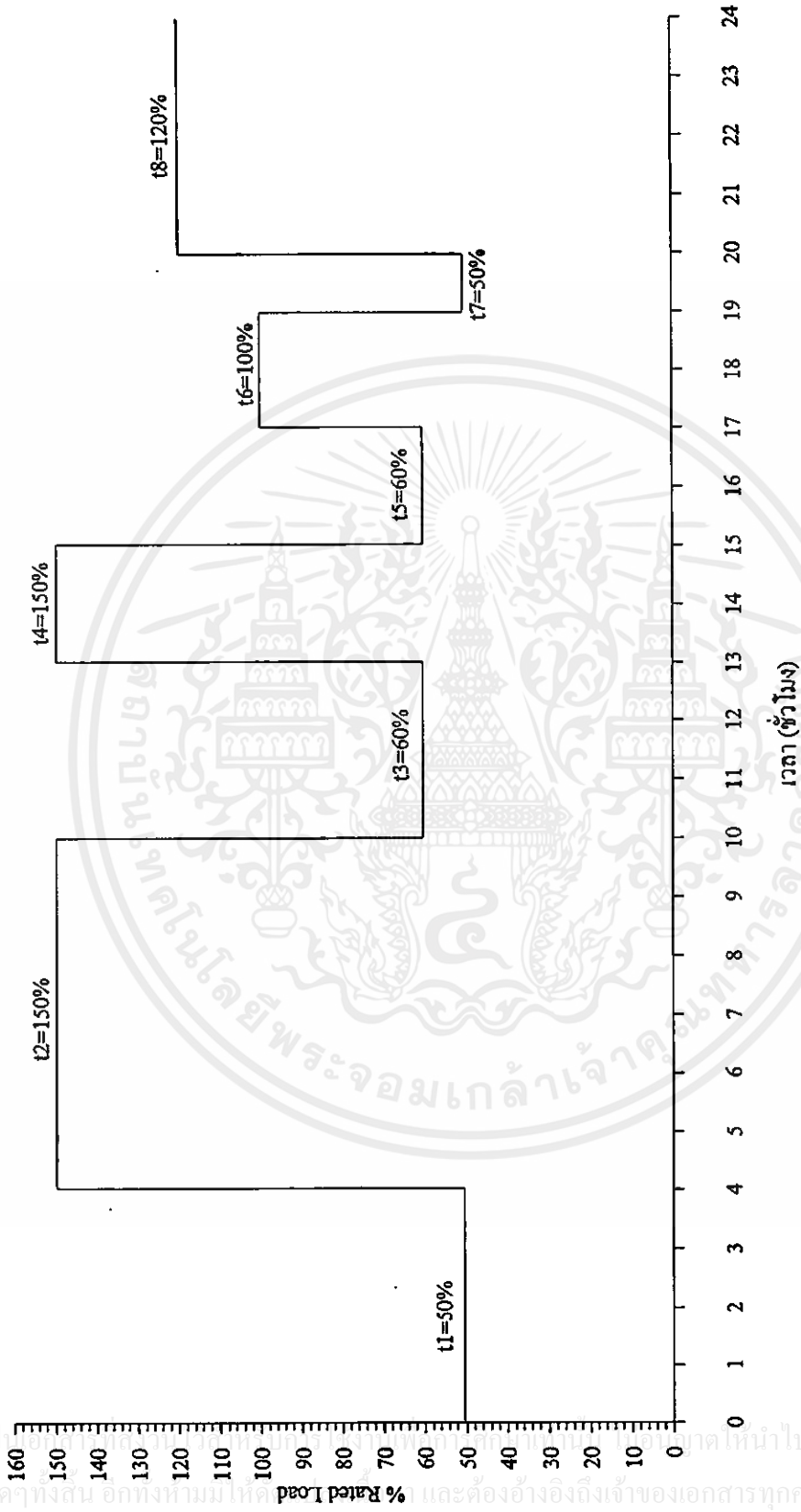


รูปที่ 3.11 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงกำลังขนาด 160 kVA



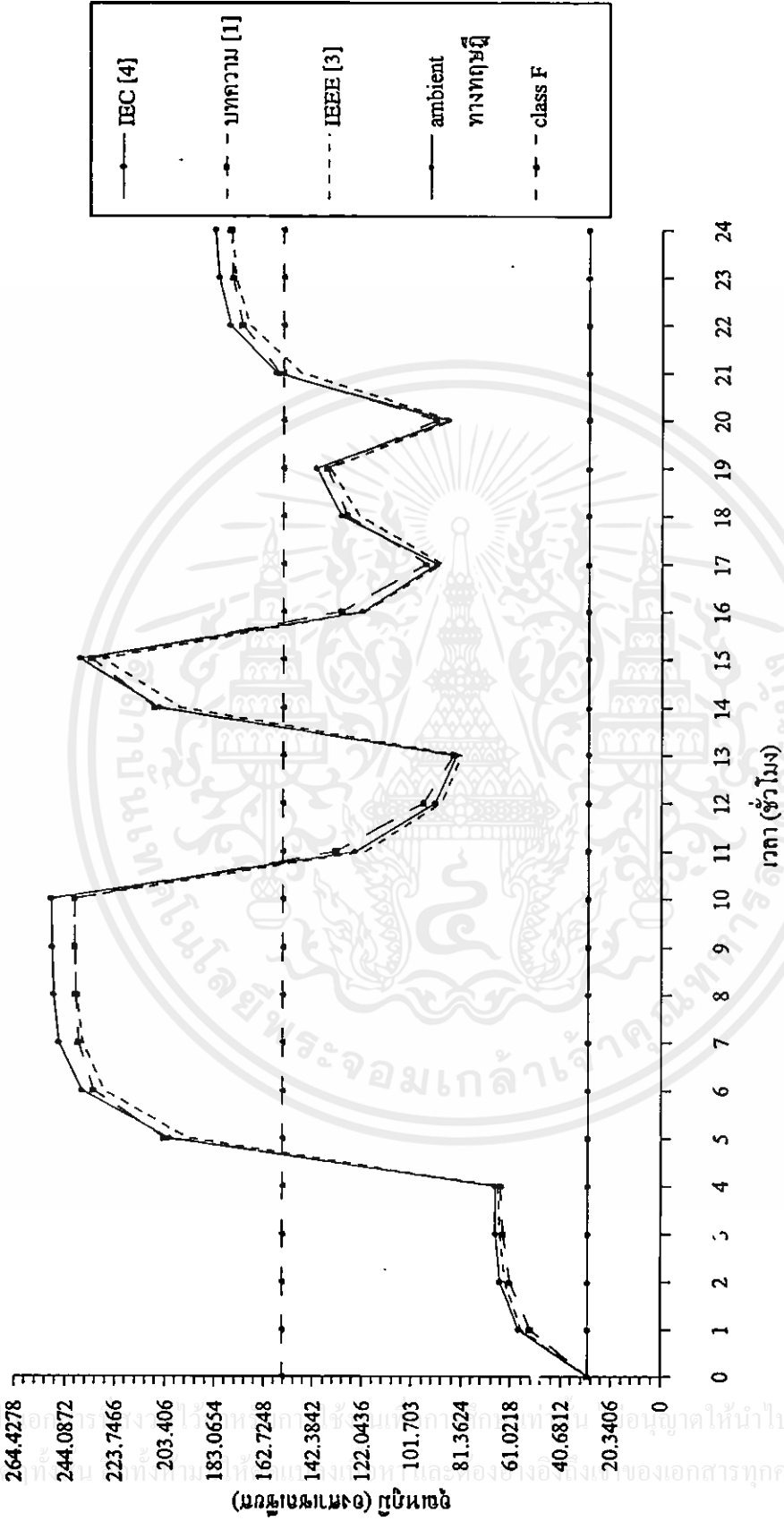
รูปที่ 3.12 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงกำลังขนาด 160 KVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



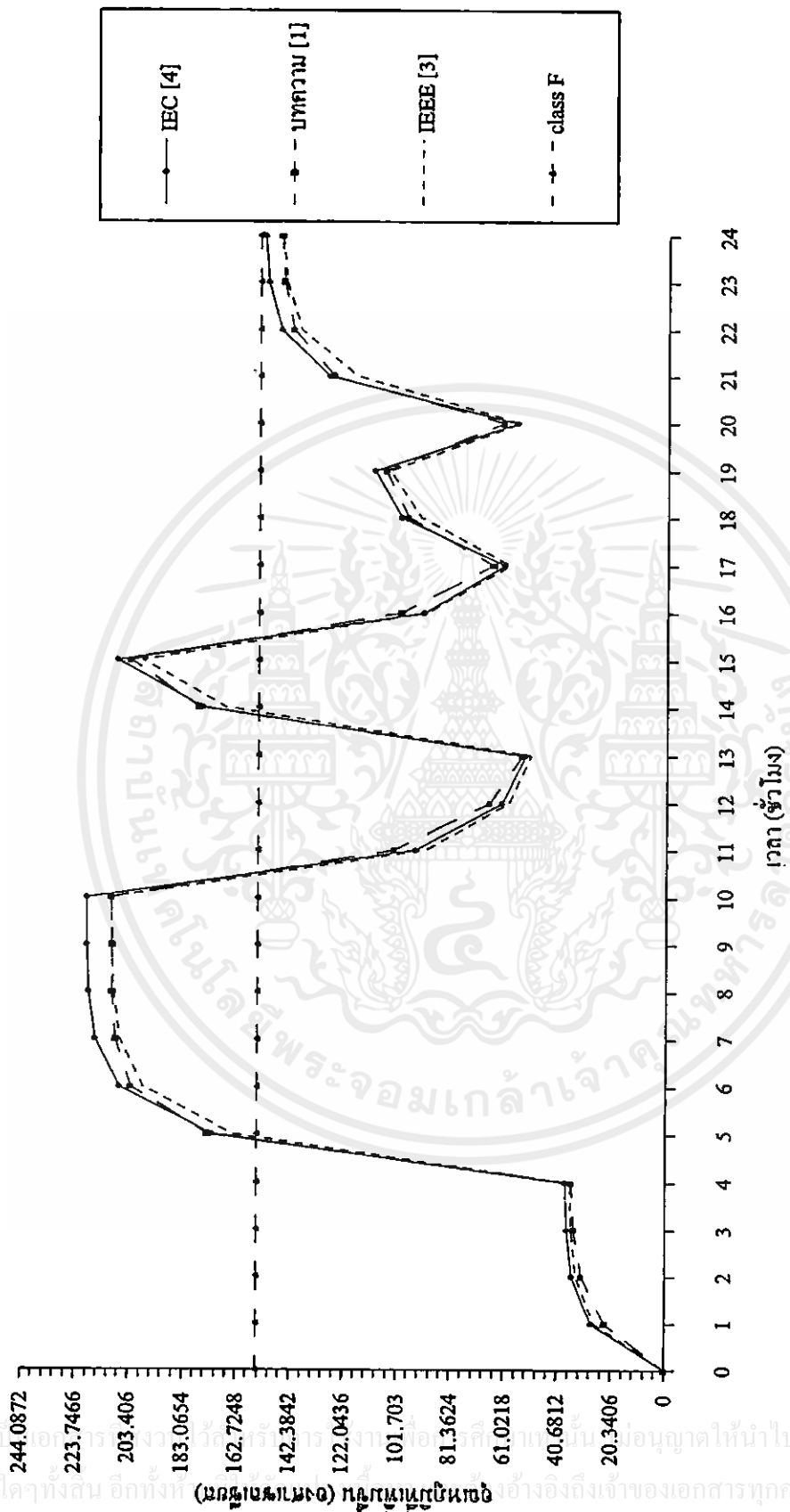
รูปที่ 3.13 Load Duty Cycle ของหม้อแปลงคาสต์เรซินขนาด 225 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

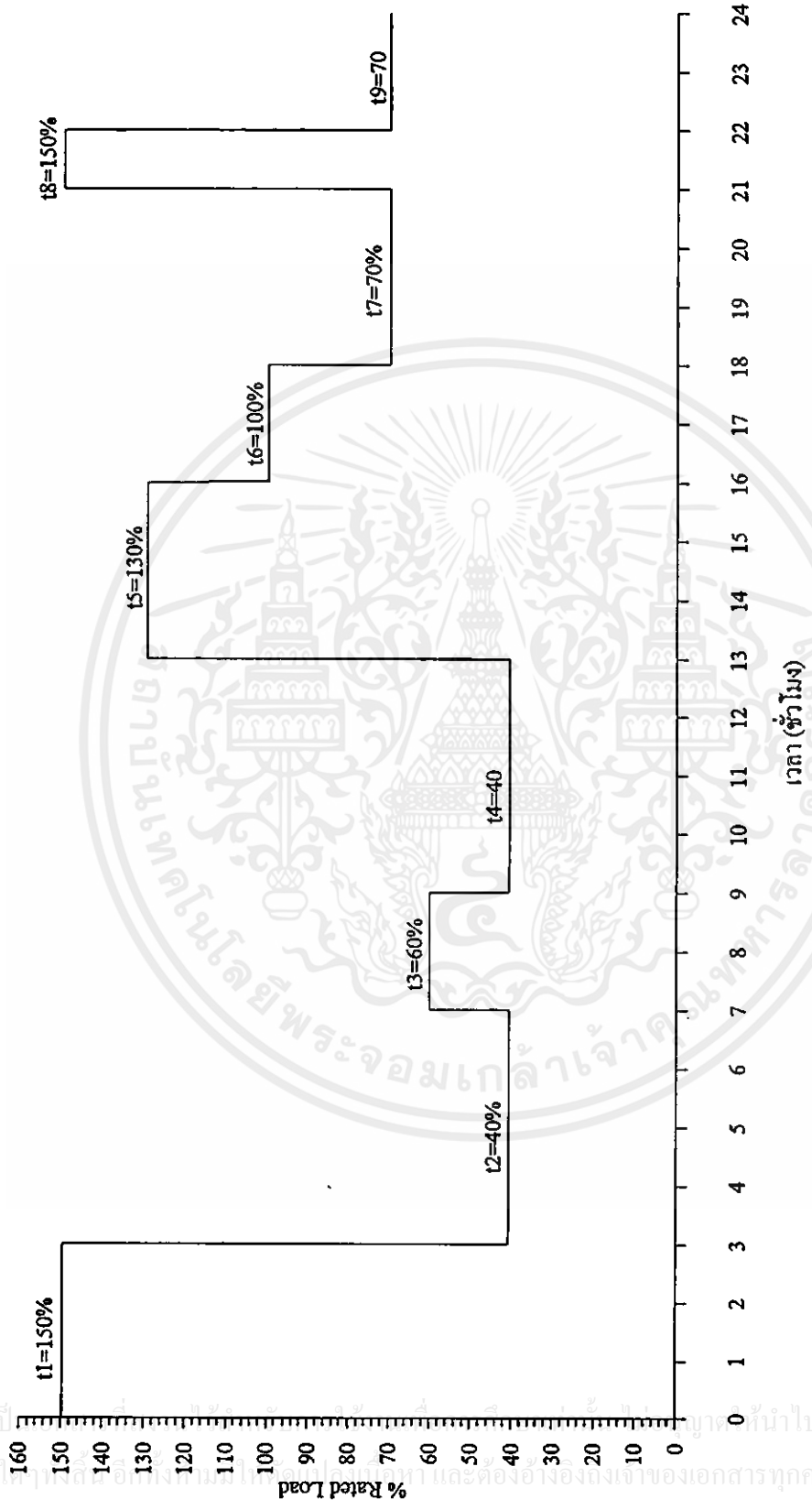


รูปที่ 3.14 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงกำลัง 225 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัทที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการดำเนินงานของบริษัทเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากบริษัท

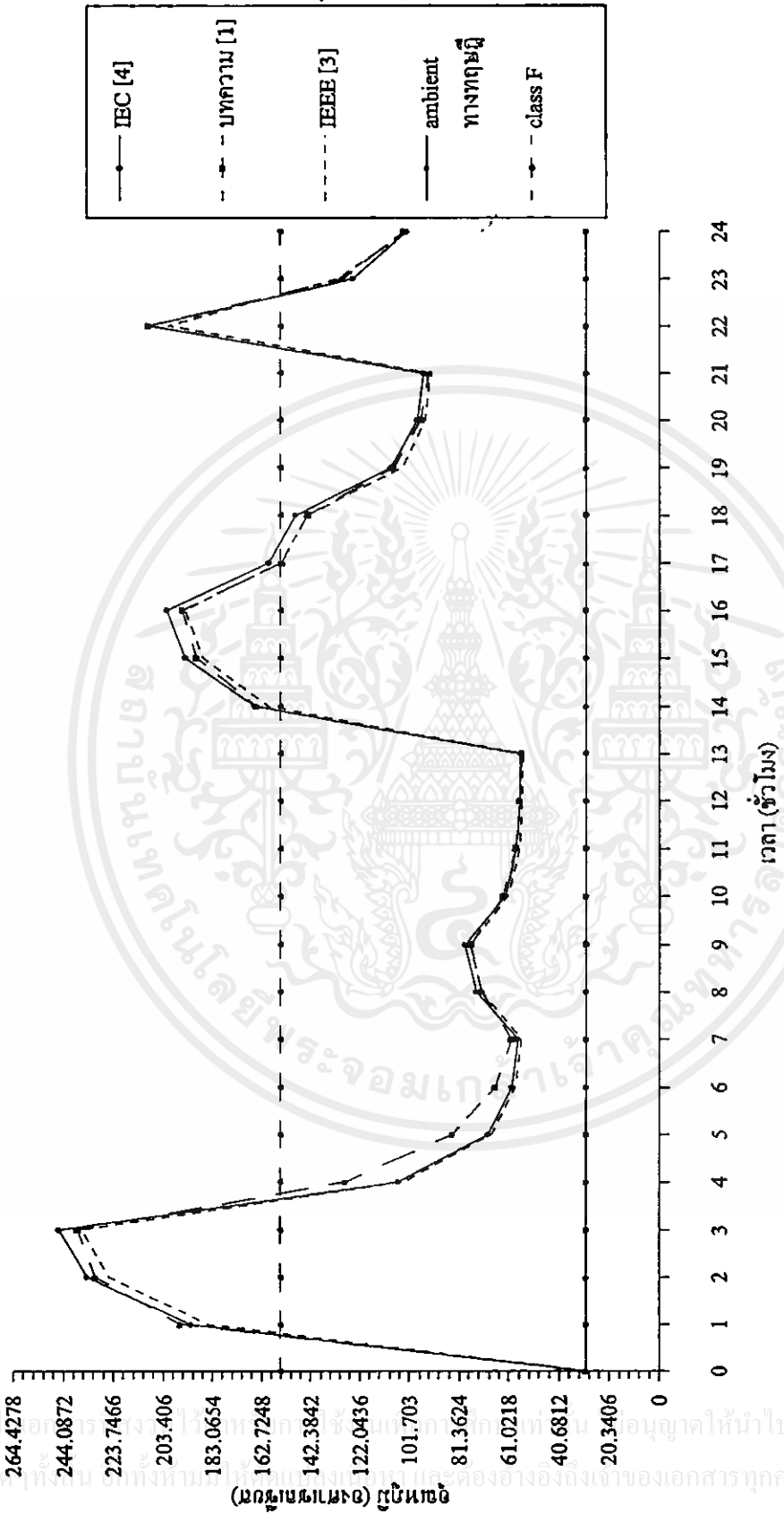


รูปที่ 3.15 เปรียบเทียบขีดความสามารถที่เพิ่มขึ้นที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงกำลังแรงดันขนาด 225 kVA



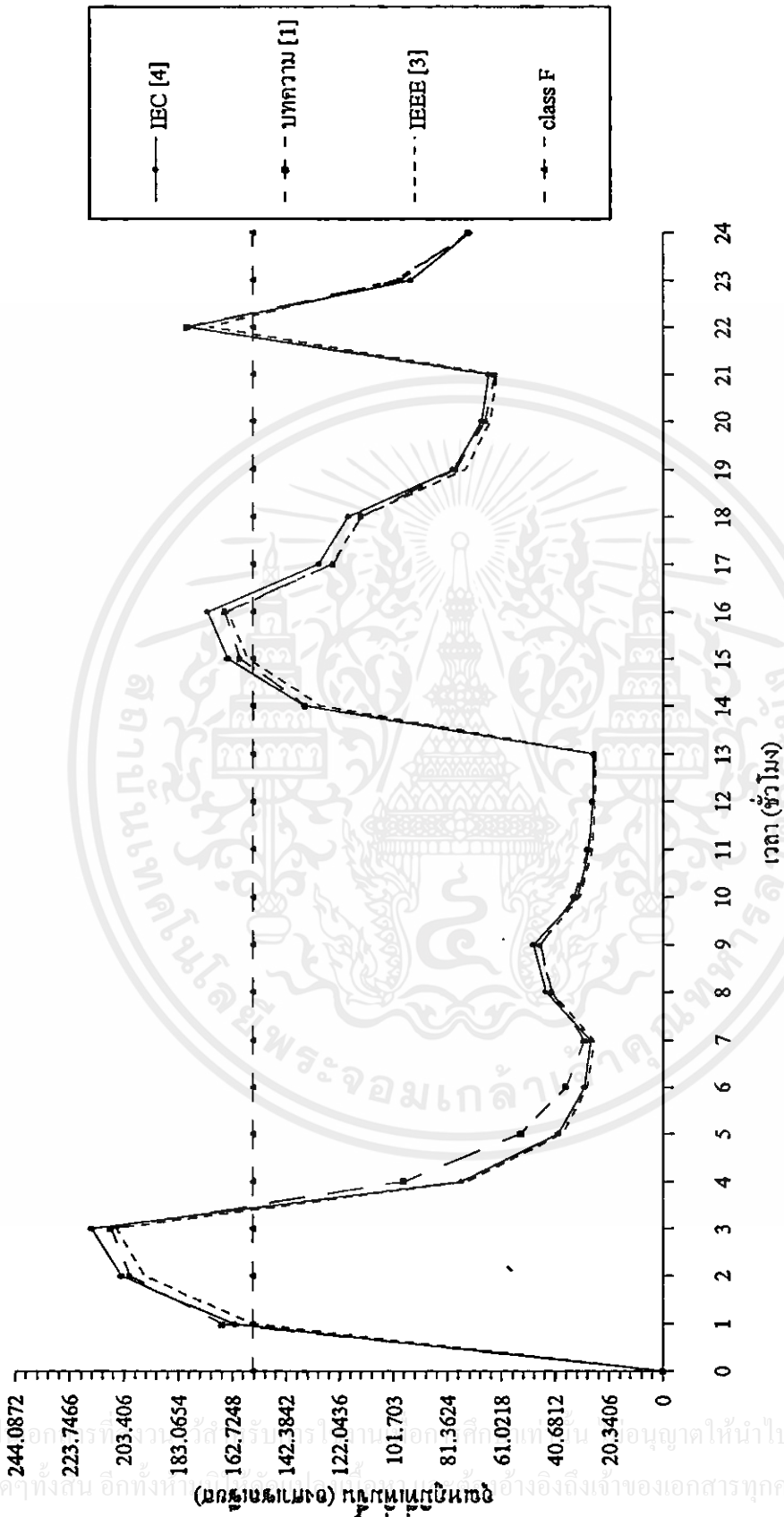
รูปที่ 3.16 Load Duty Cycle ของหม้อแปลงกำลัง 250 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



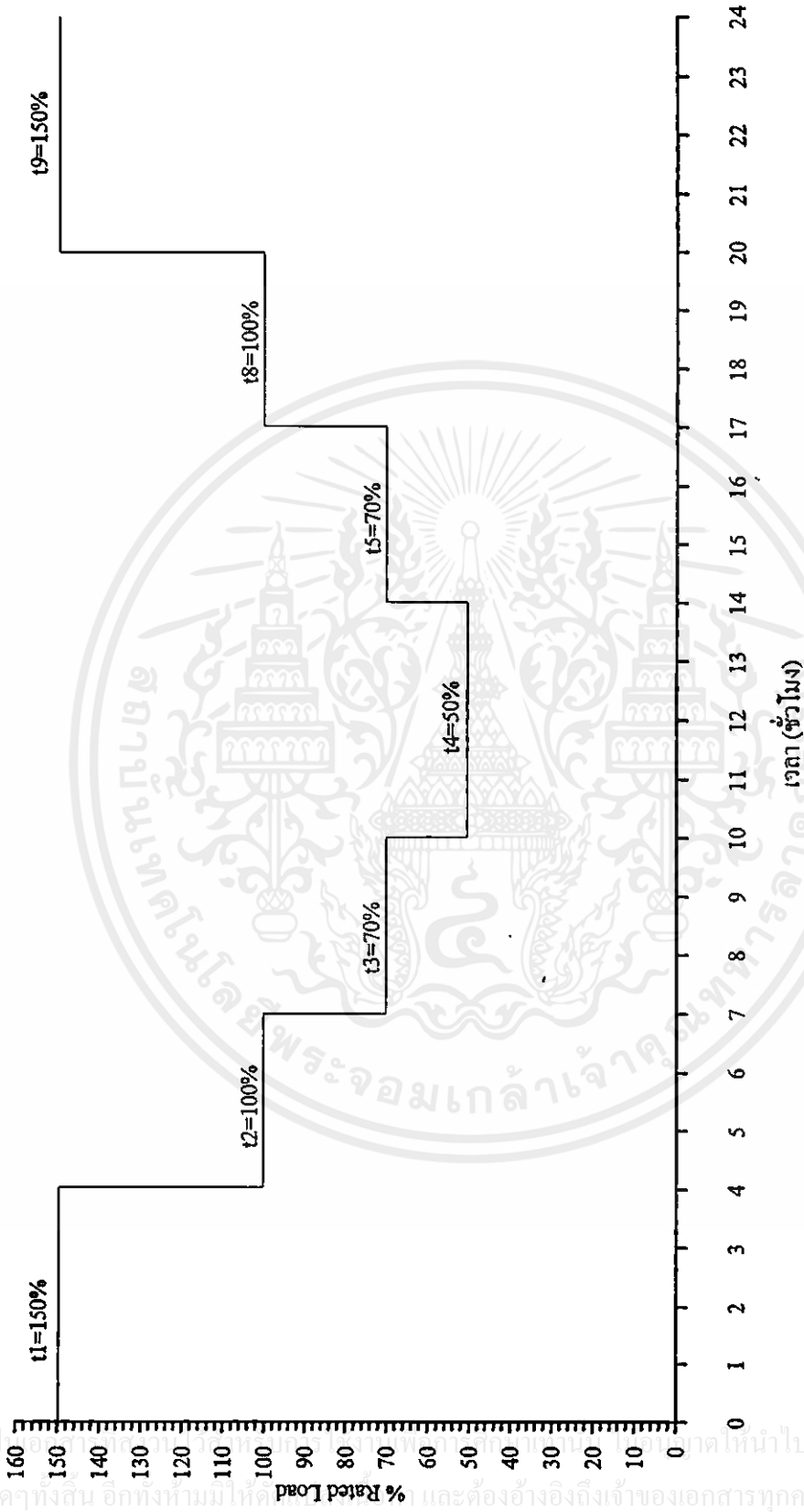
รูปที่ 3.17 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงกำลังขนาด 250 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าการตีพิมพ์ในที่สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาตให้ทำซ้ำและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



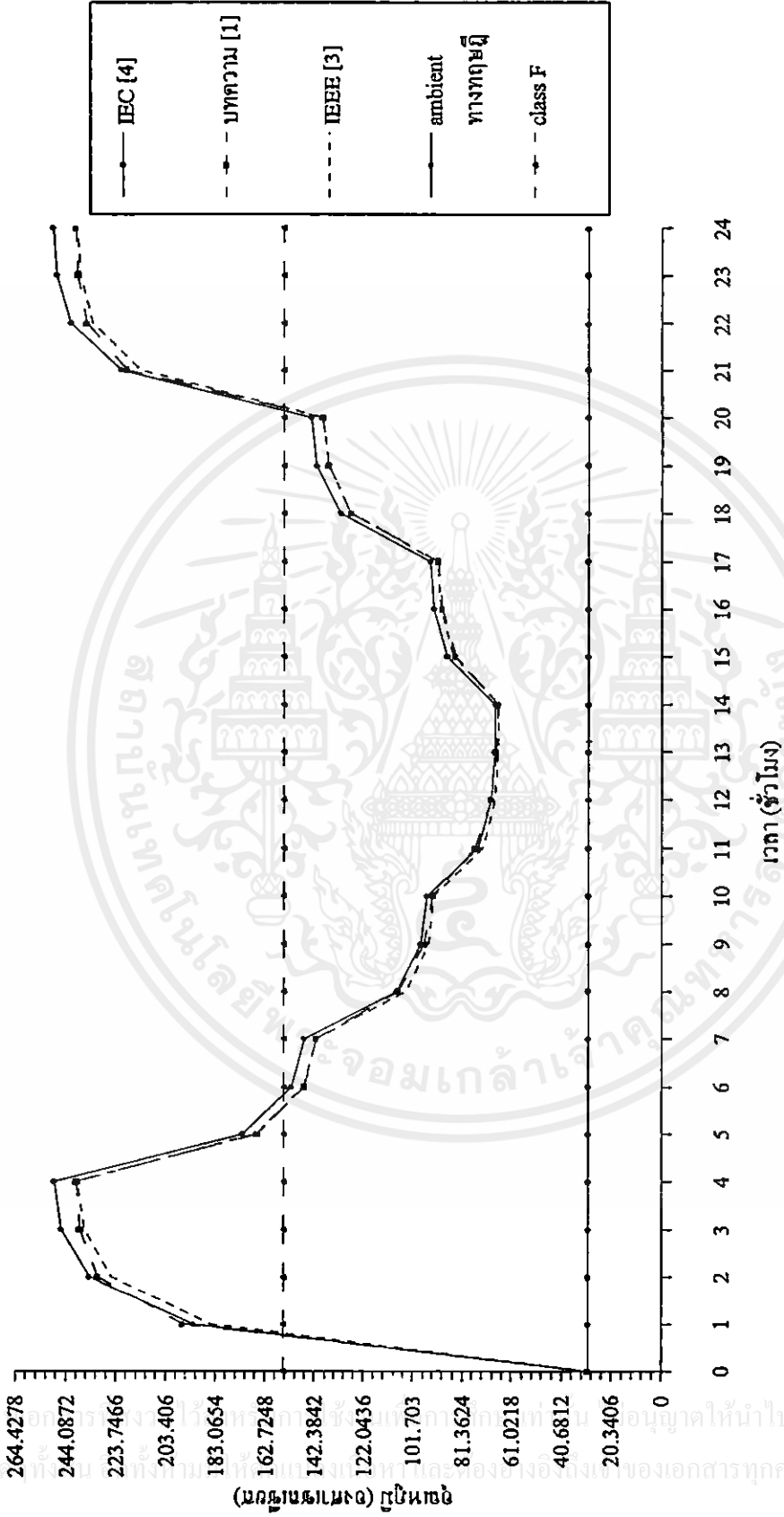
รูปที่ 3.18 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงกำลังเรตติ้งขนาด 250 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไว้สำหรับใช้ในการสอนเอกสารที่เขียนอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะพิมพ์หรือทำในรูปแบบอื่นใดก็ตามโดยไม่จำเป็นต้องแจ้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

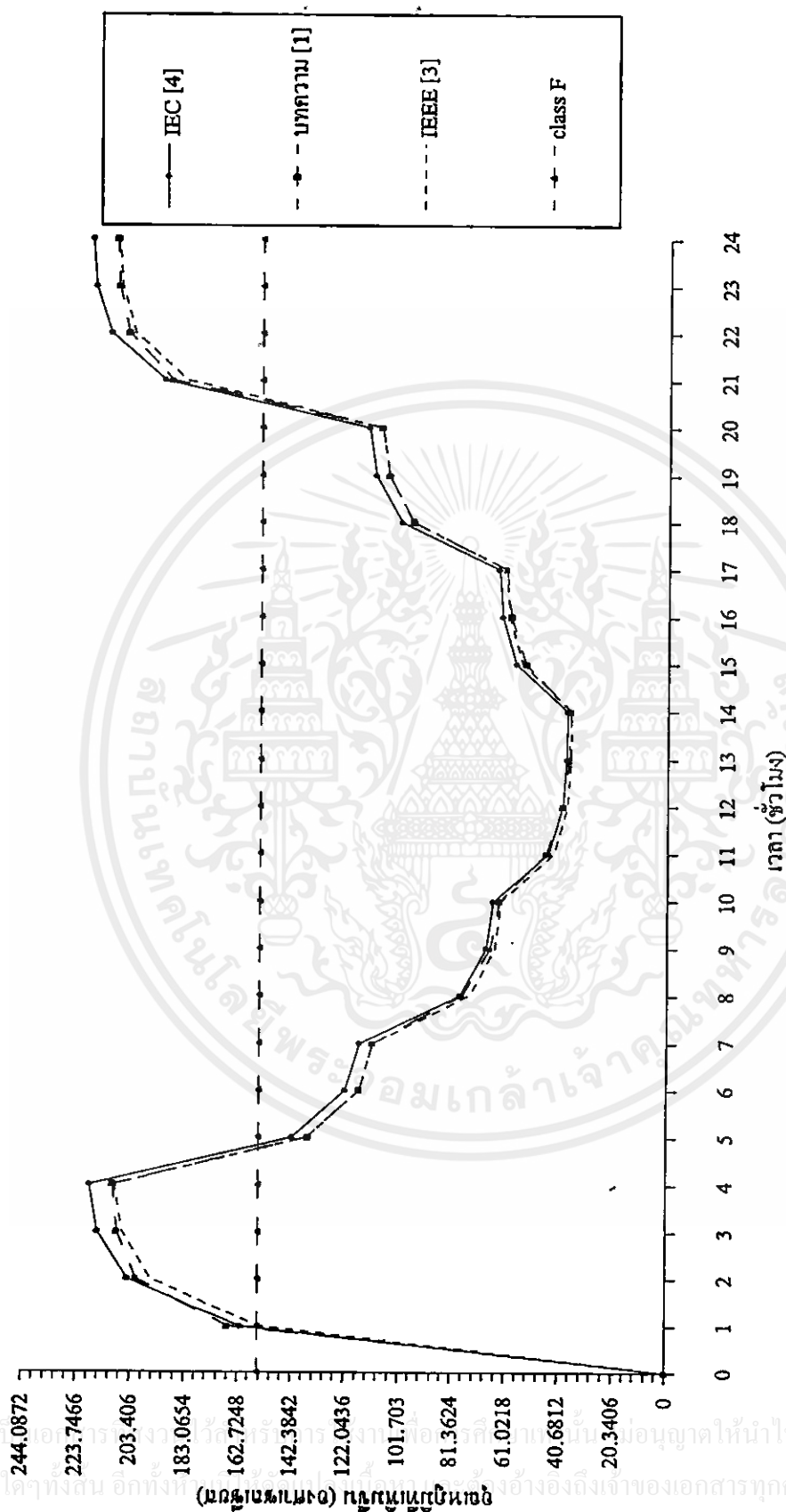


รูปที่ 3.19 Load Duty Cycle ของหม้อแปลงคาบตาดำรีตขนาด 300 kVA

เอกสารนี้เป็นข้อมูลเบื้องต้นเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกข้อมูลไปเผยแพร่ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

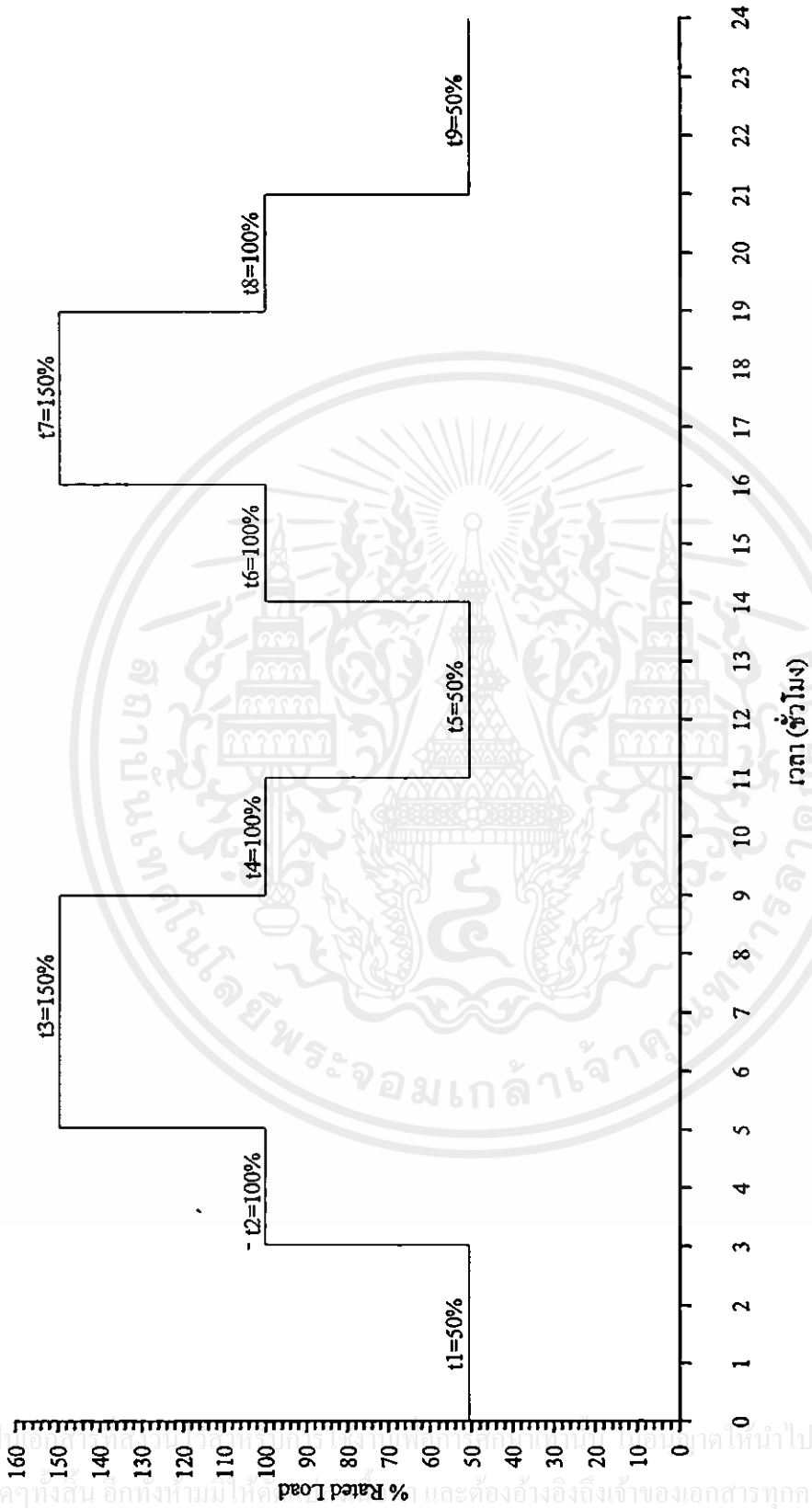


รูปที่ 3.20 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงคาสต์เรซินขนาด 300 kVA

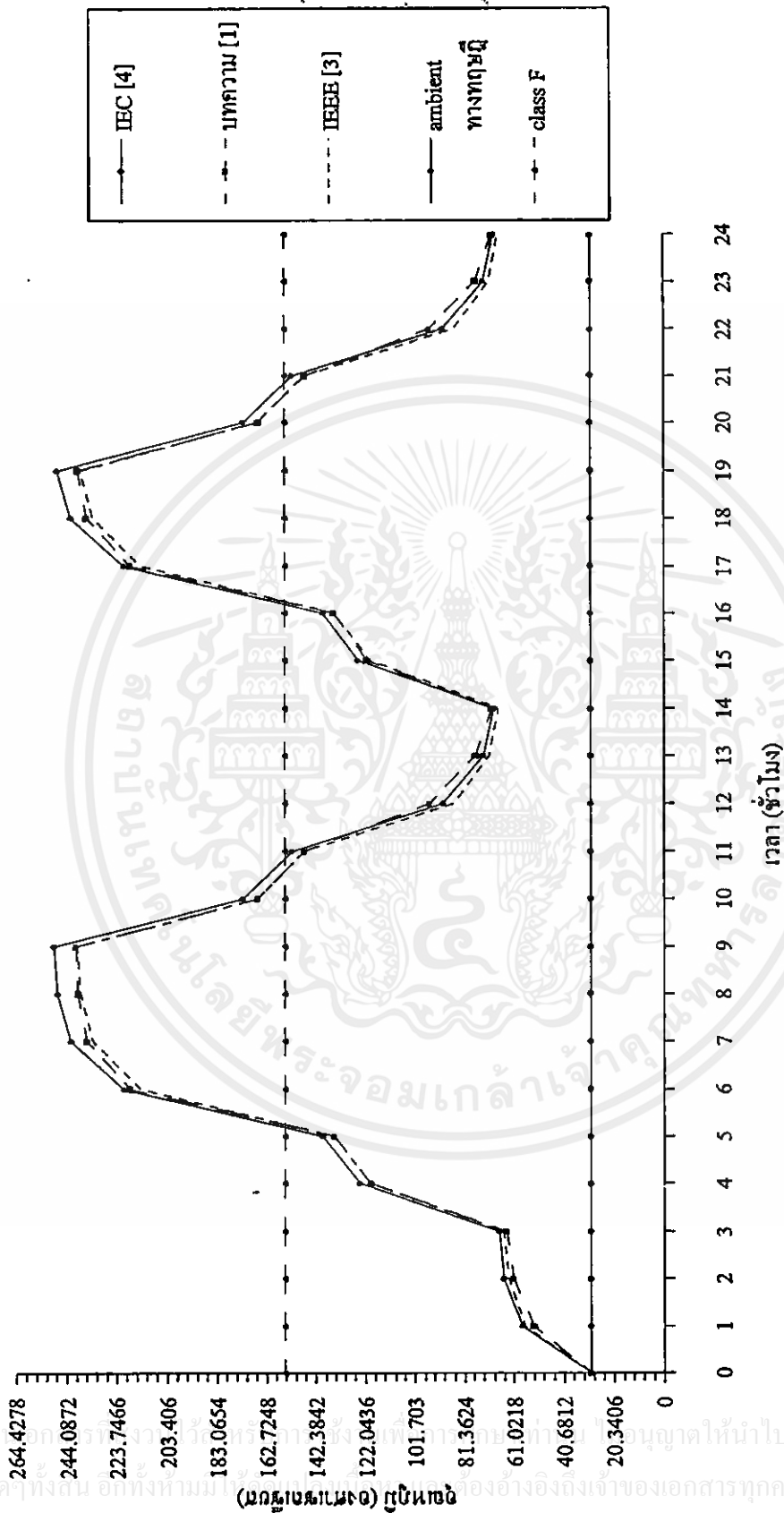


รูปที่ 3.21 เปรียบเทียบขบวนการที่เพิ่มขึ้น ที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงกำลัง 300 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 ไม่สามารถเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

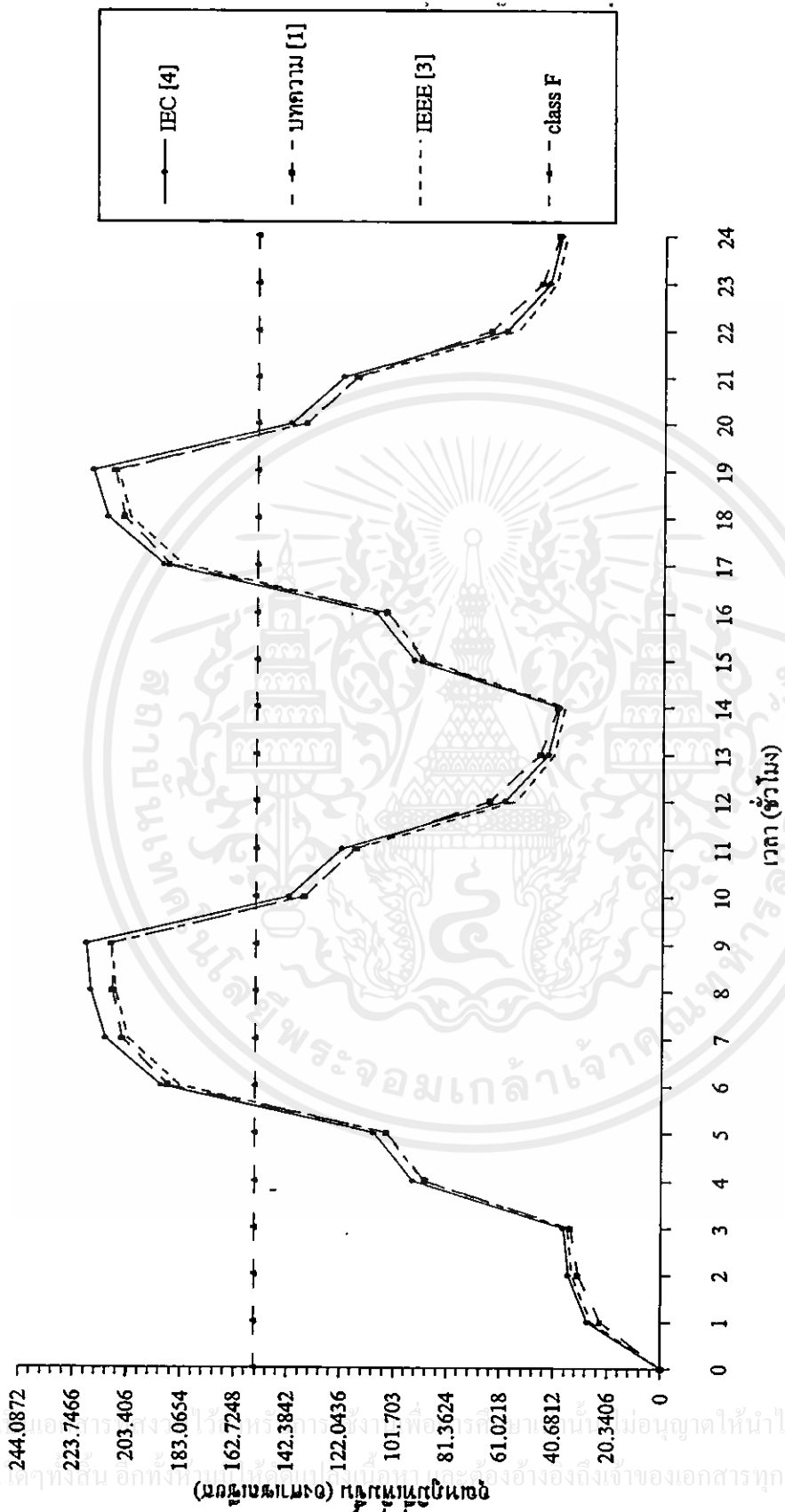


รูปที่ 3.22 Load Duty Cycle ของหม้อแปลงคาบศักรินขนาด 400 kVA



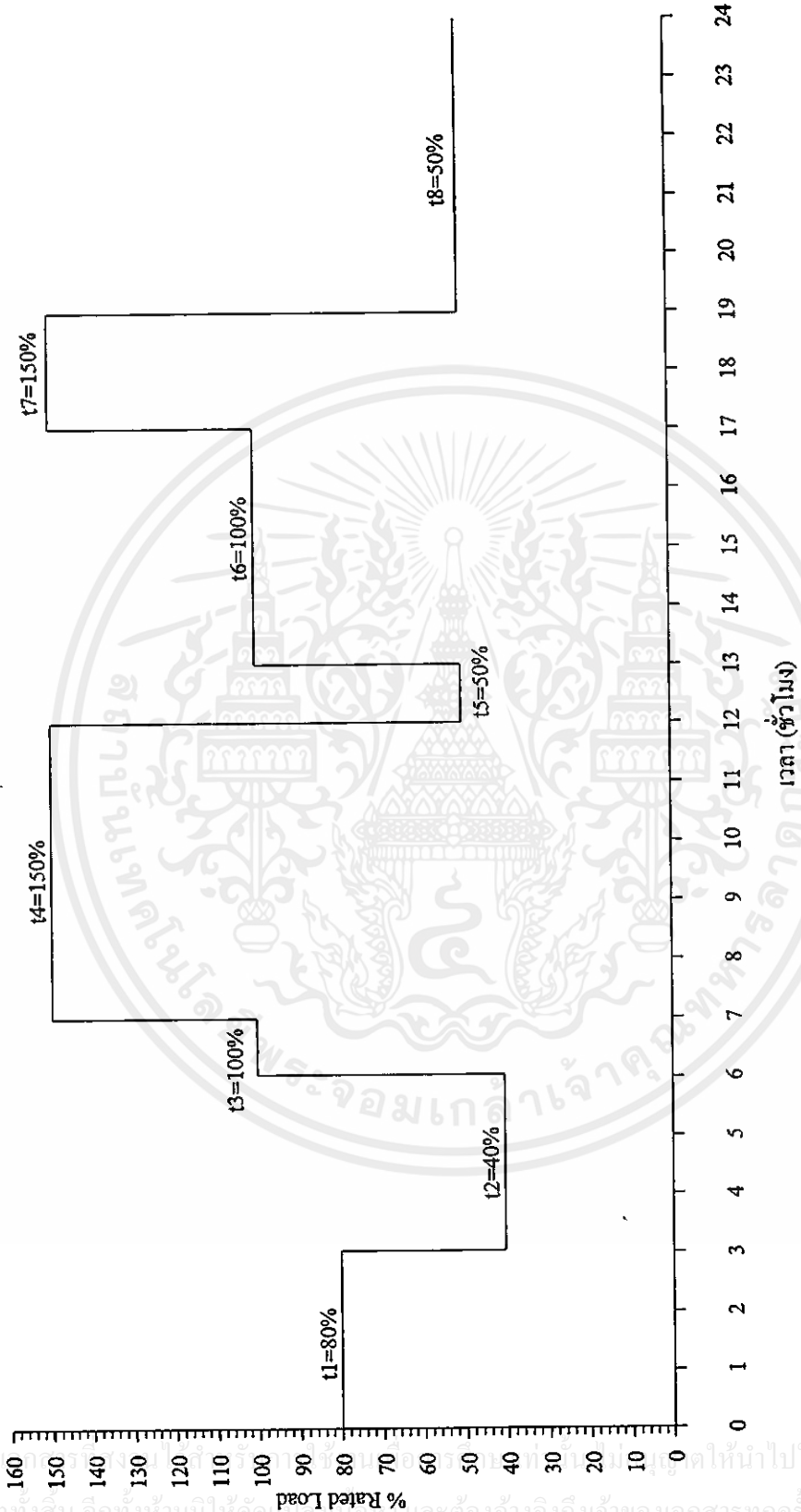
รูปที่ 3.23 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงคาสต์เรซินขนาด 400 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น การอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นกรณีที่มีการขออนุญาตอย่างถูกต้องจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



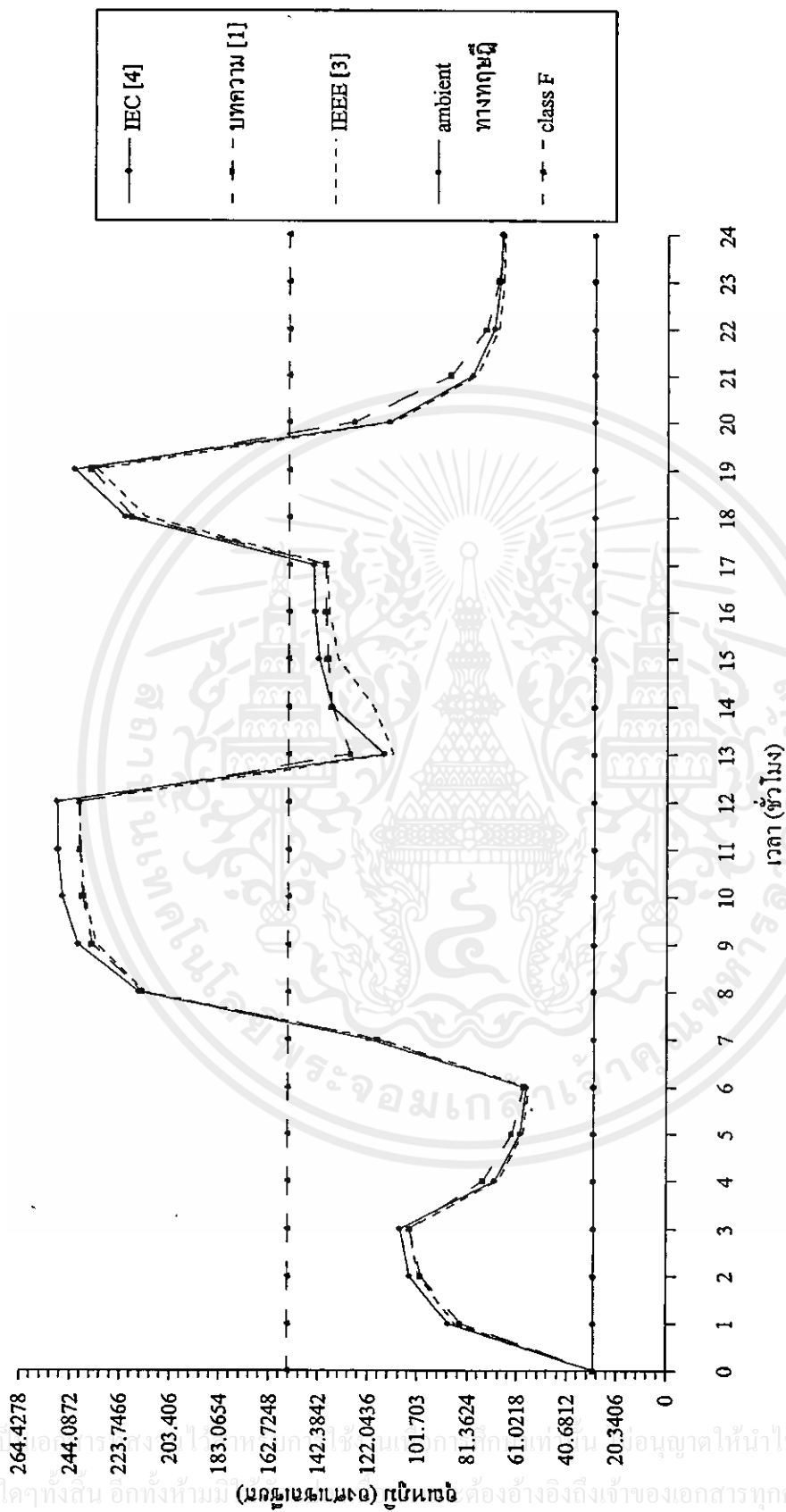
รูปที่ 3.24 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงกำลังขนาด 400 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารของโรงเรียนวิศวกรรมพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 ไม่ควรเผยแพร่ในที่สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

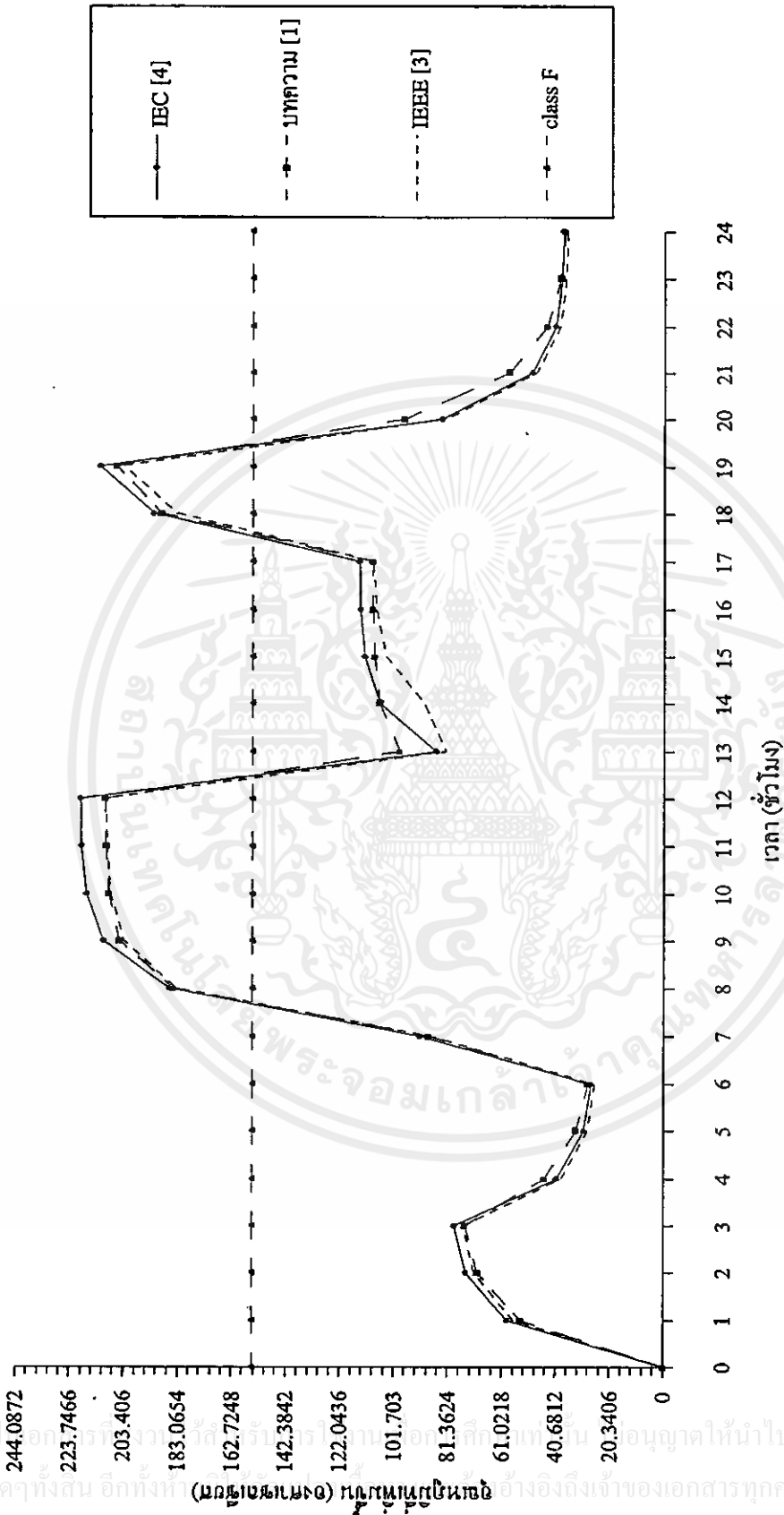


รูปที่ 3.25 Load Duty Cycle ของหม้อแปลงตากาศ์เรตซ์ขนาด 500 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

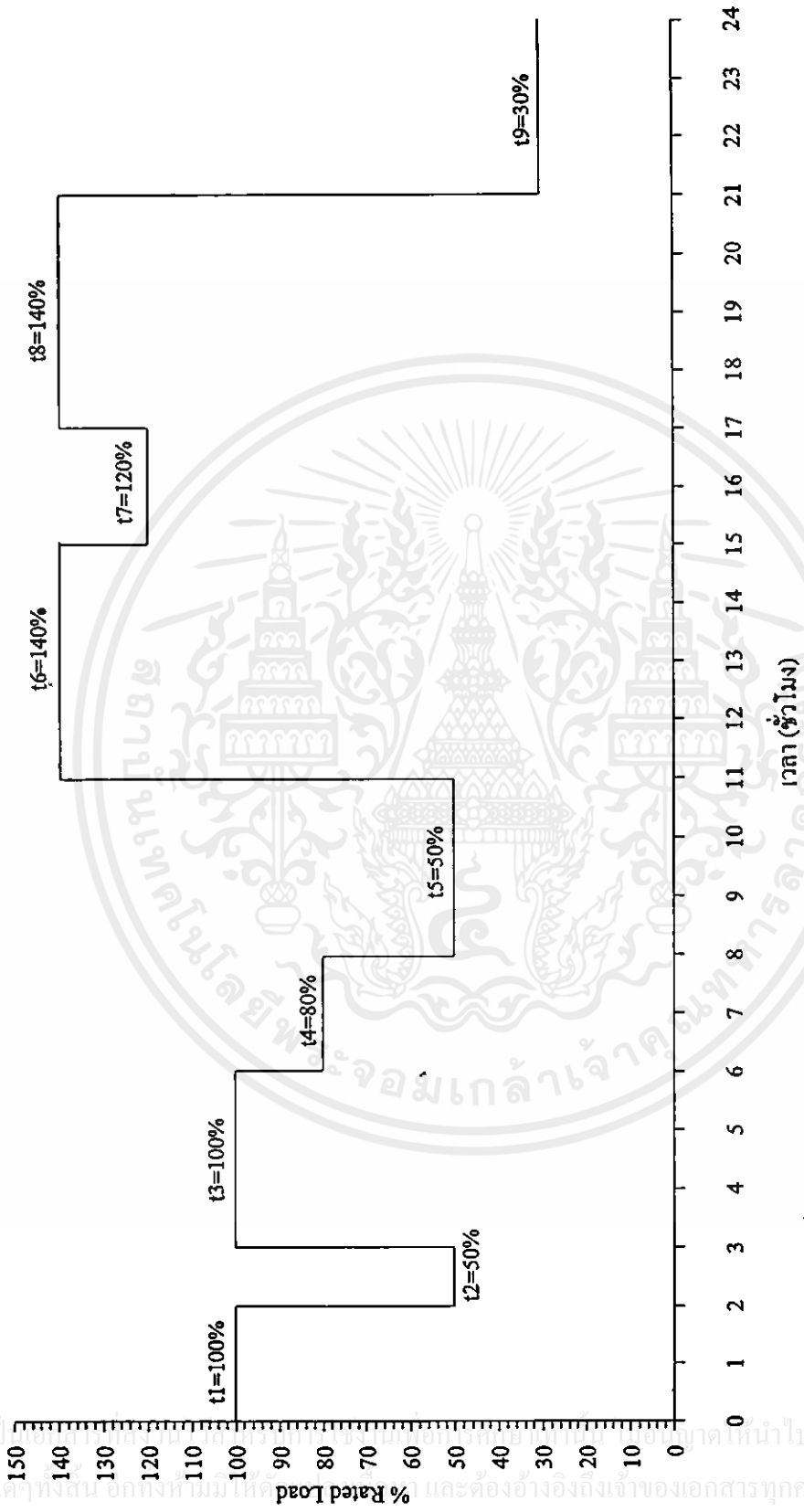


รูปที่ 3.26 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงคลาสรุ่นขนาด 500 kVA



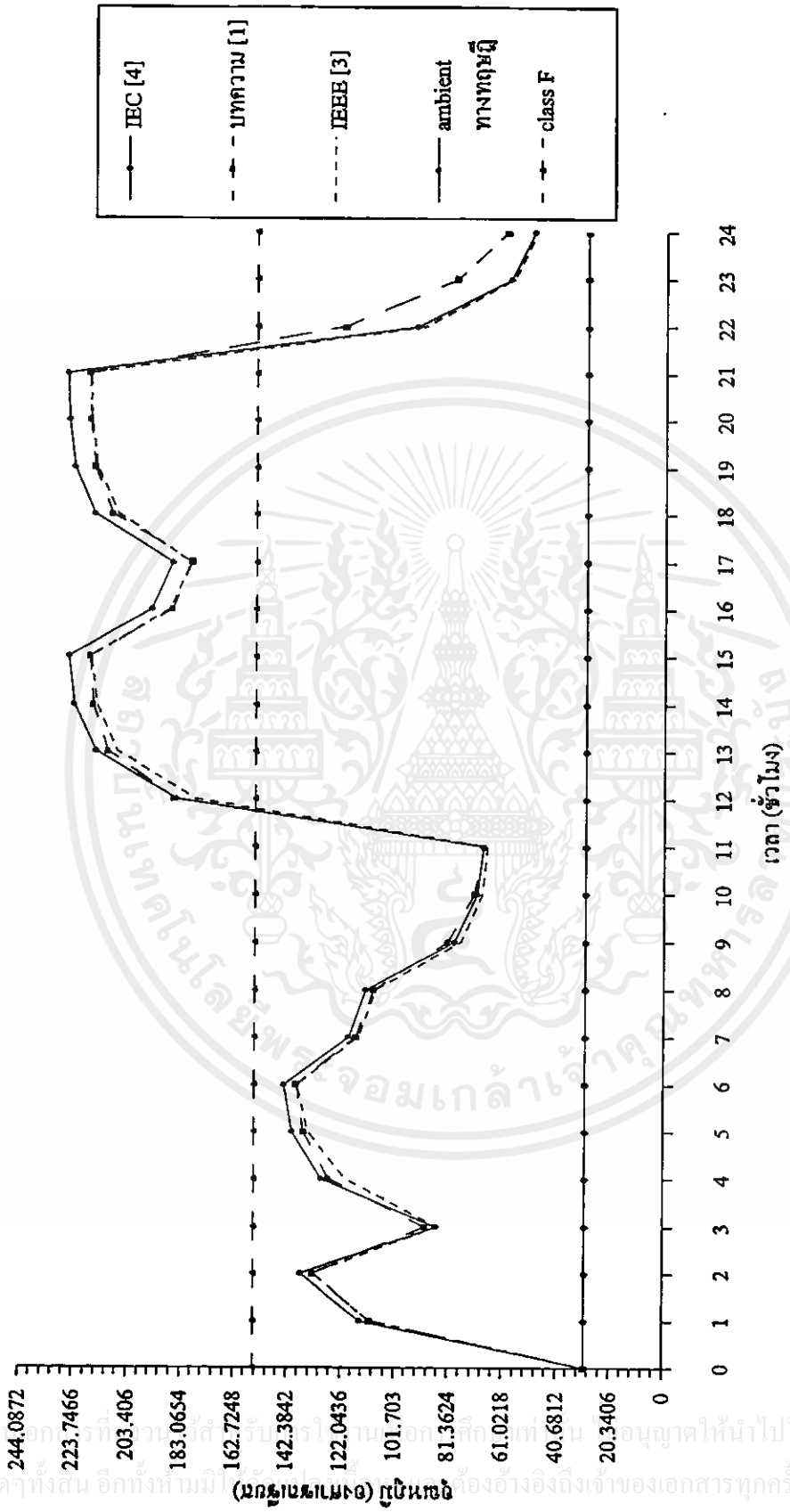
รูปที่ 3.27 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงกำลังระดับแรงดัน 500 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไว้สำหรับใช้อ่านโดยนักศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำไปเผยแพร่หรือแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

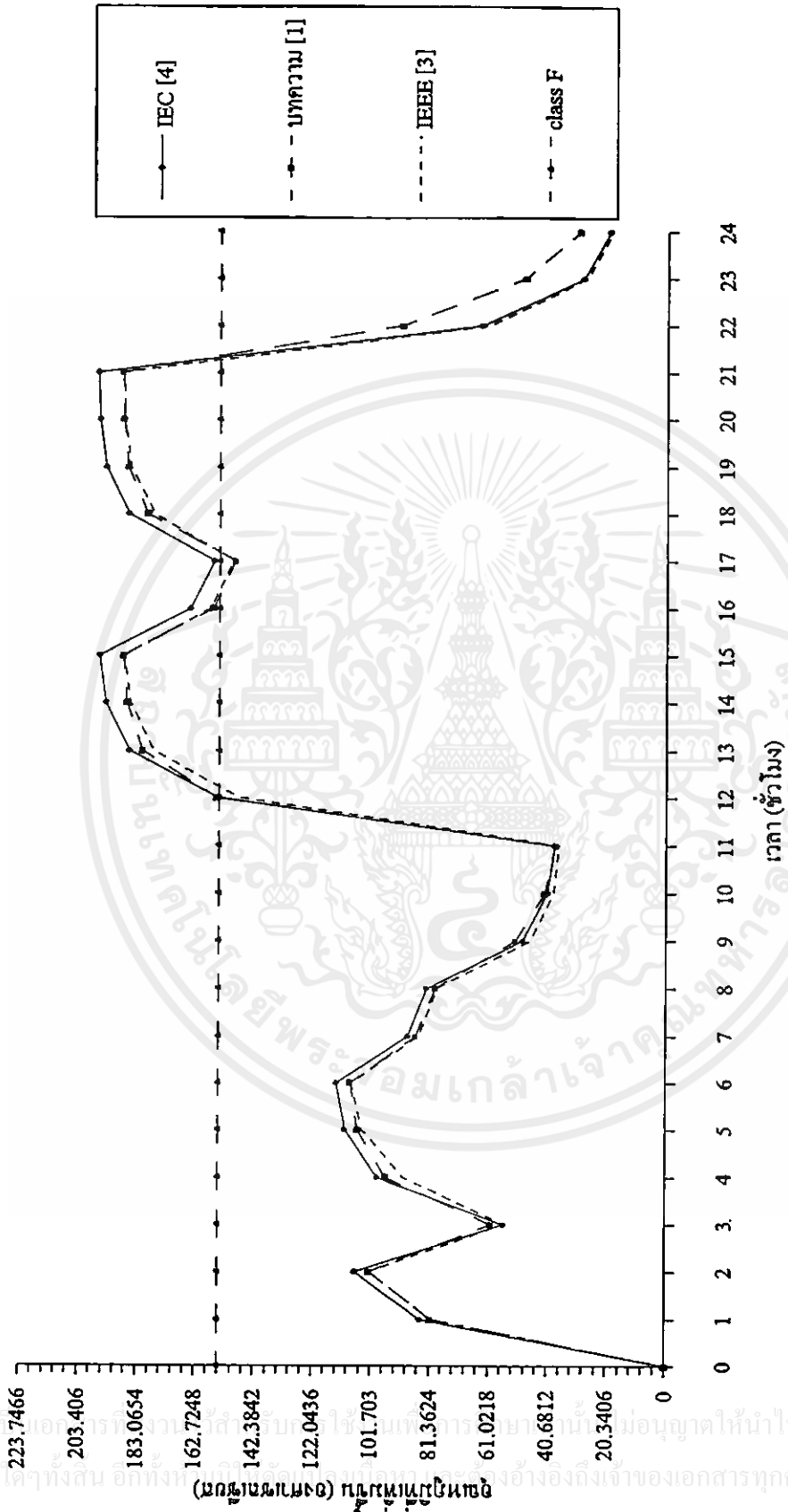


รูปที่ 3.28 Load Duty Cycle ของหม้อแปลงกาศัดเรขินขนาด 630 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในเชิงวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะพิมพ์ให้ทางอื่น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

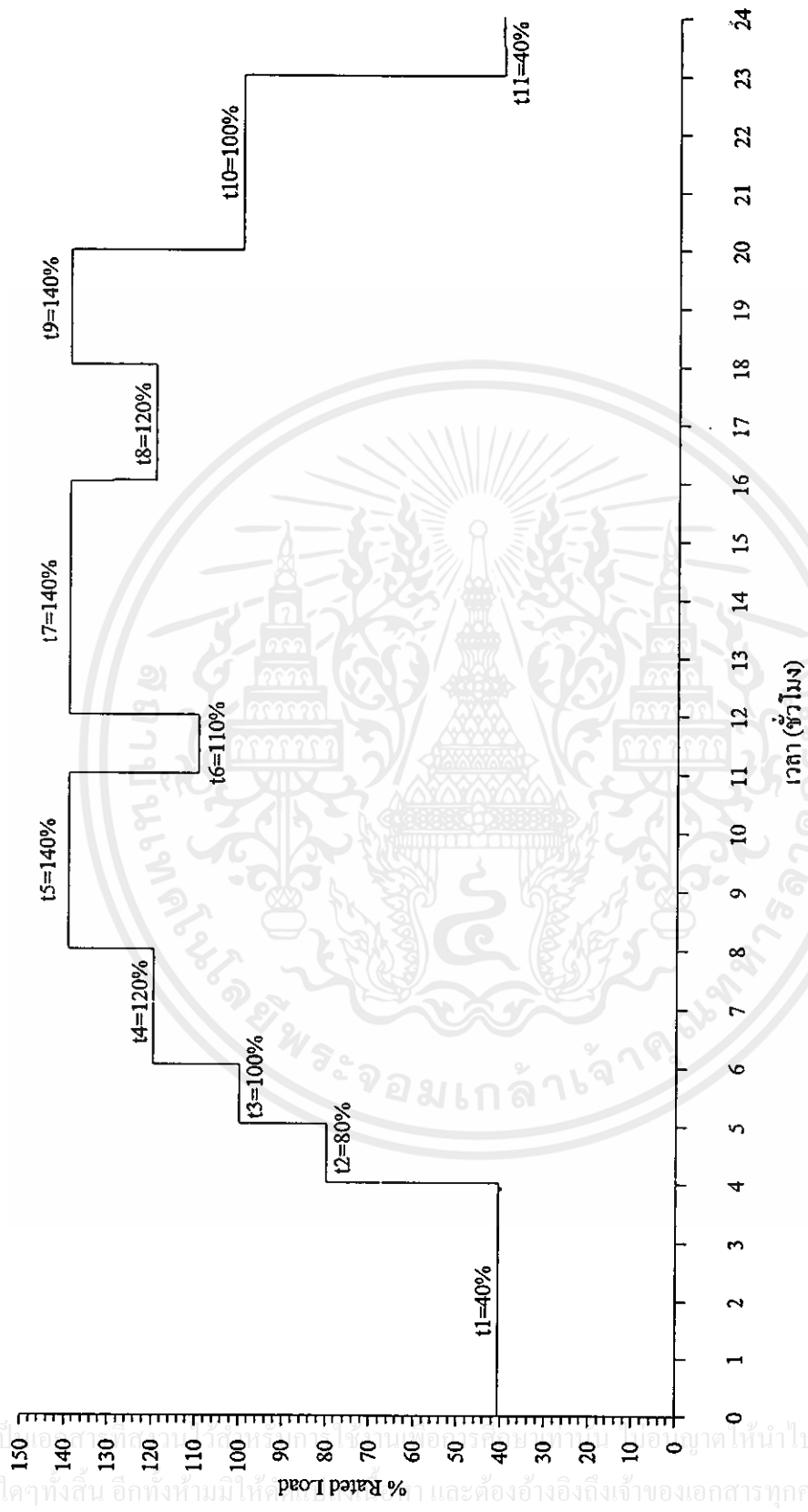


รูปที่ 3.29 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงกำลังระดับแรงดัน 630 kVA



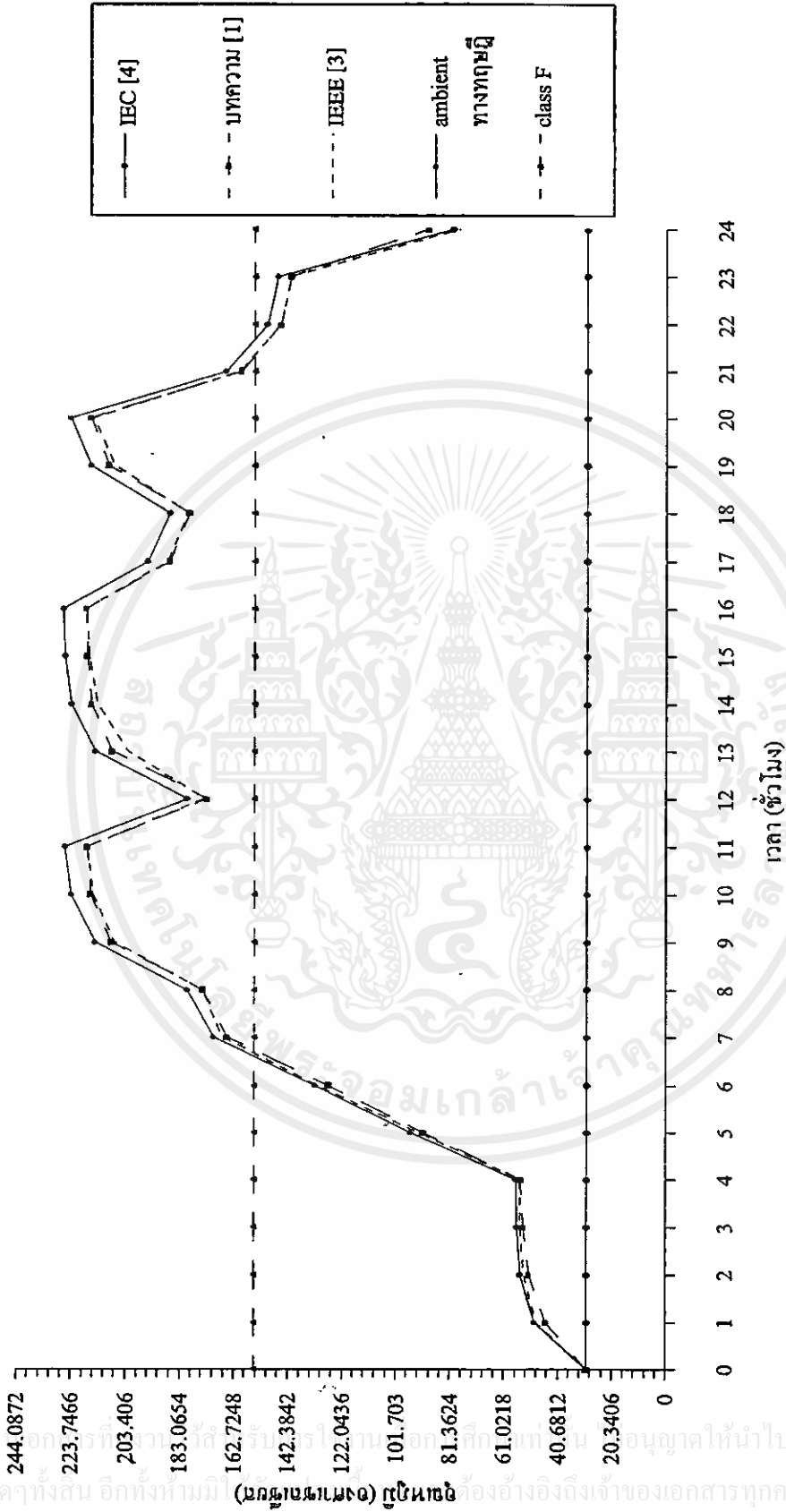
รูปที่ 3.30 เปรียบเทียบขุมขุมที่มีเพิ่มขึ้น ที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงคาสต์เรซินขนาด 630 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายโดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังสงวนลิขสิทธิ์ของเอกสารฉบับนี้ไว้ด้วย

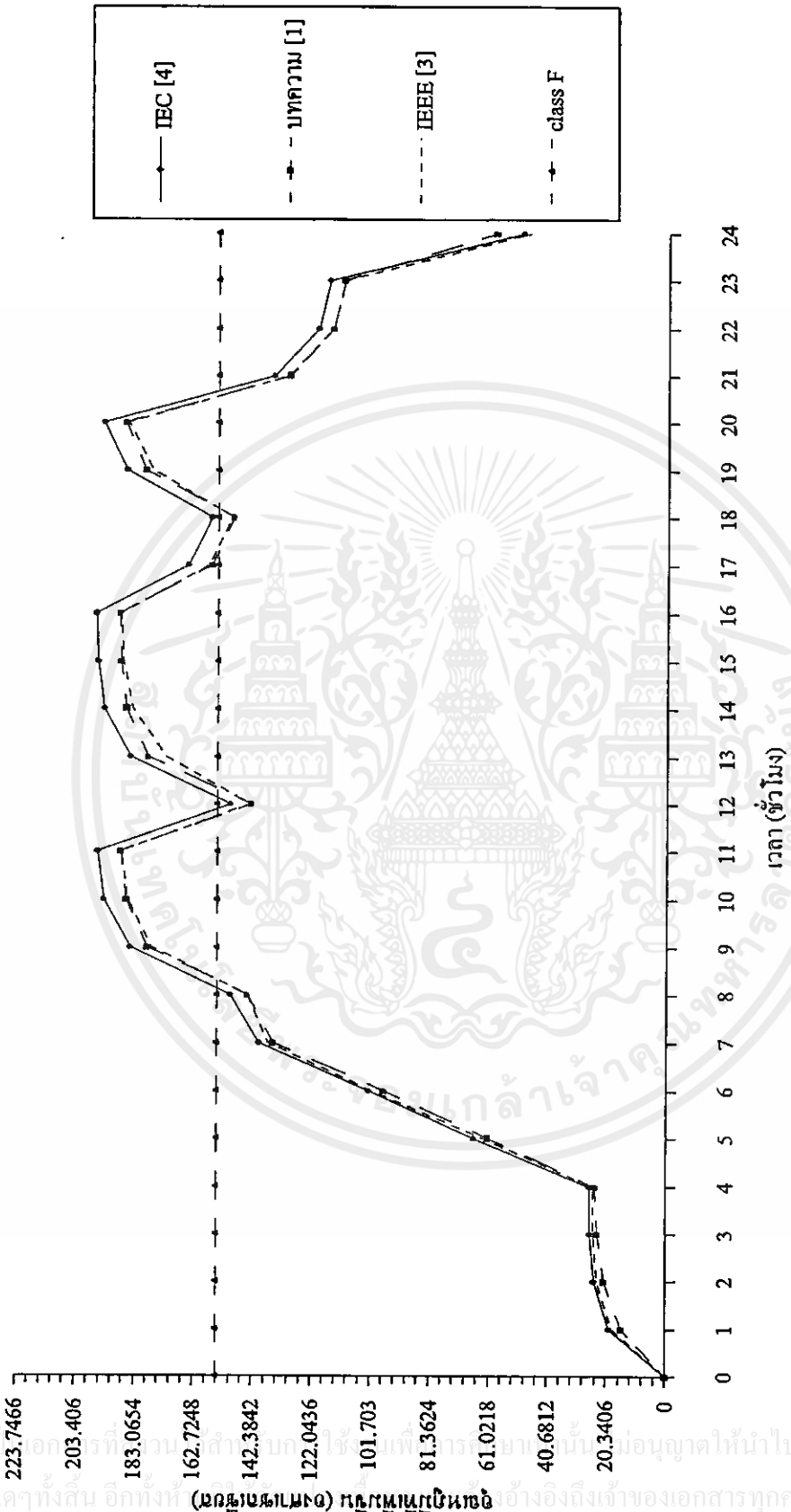


รูปที่ 3.31 Load Duty Cycle ของหม้อแปลงกำลัง 750 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

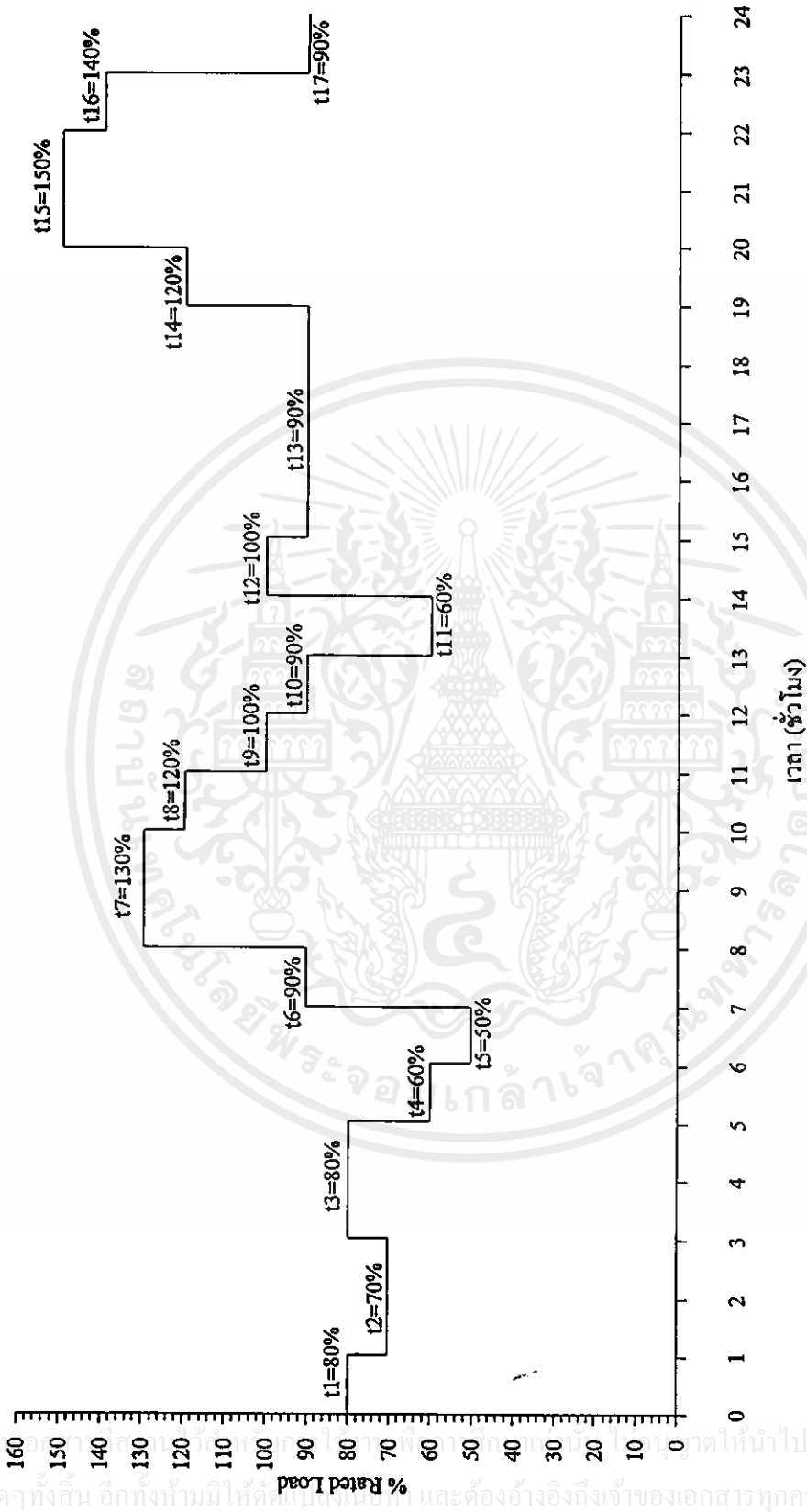


รูปที่ 3.32 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงกำลังเรตติ้งขนาด 750 kVA

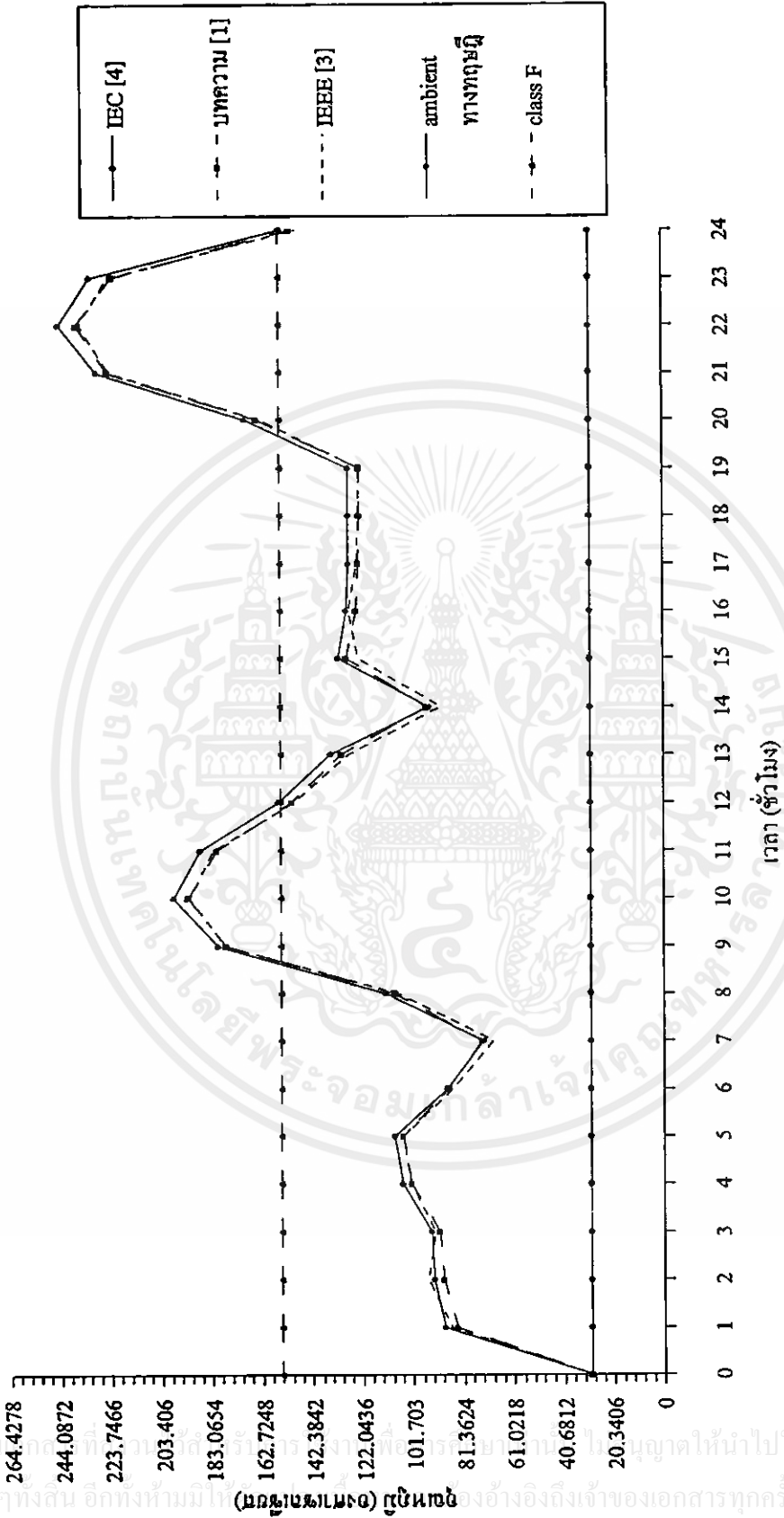


รูปที่ 3.33 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงกำลังระดับแรงดัน 750 kVA

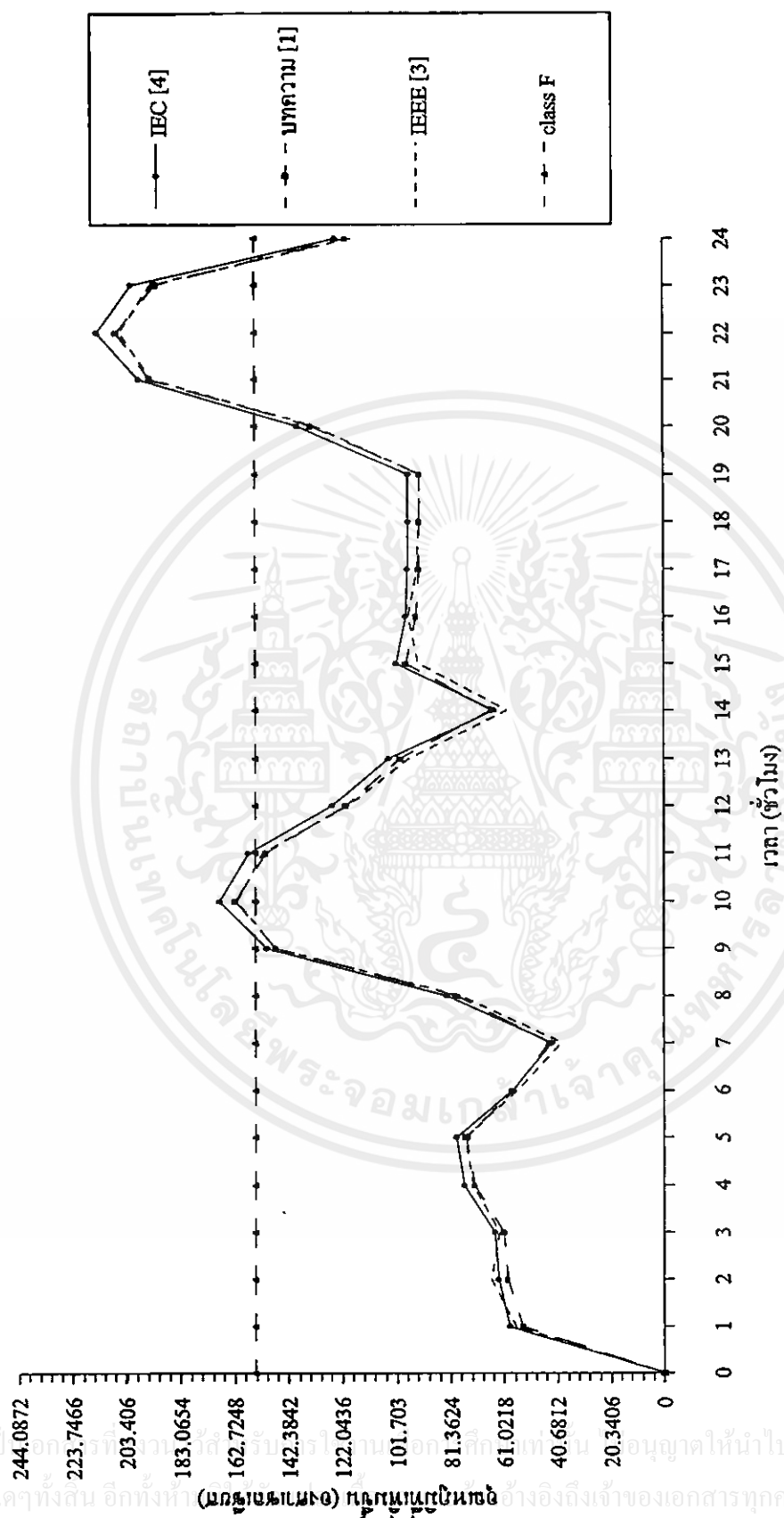
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... (เอกสารฉบับนี้) ...



รูปที่ 3.34 Load Duty Cycle ของหม้อแปลงขนาดรีซินขนาด 800 kVA

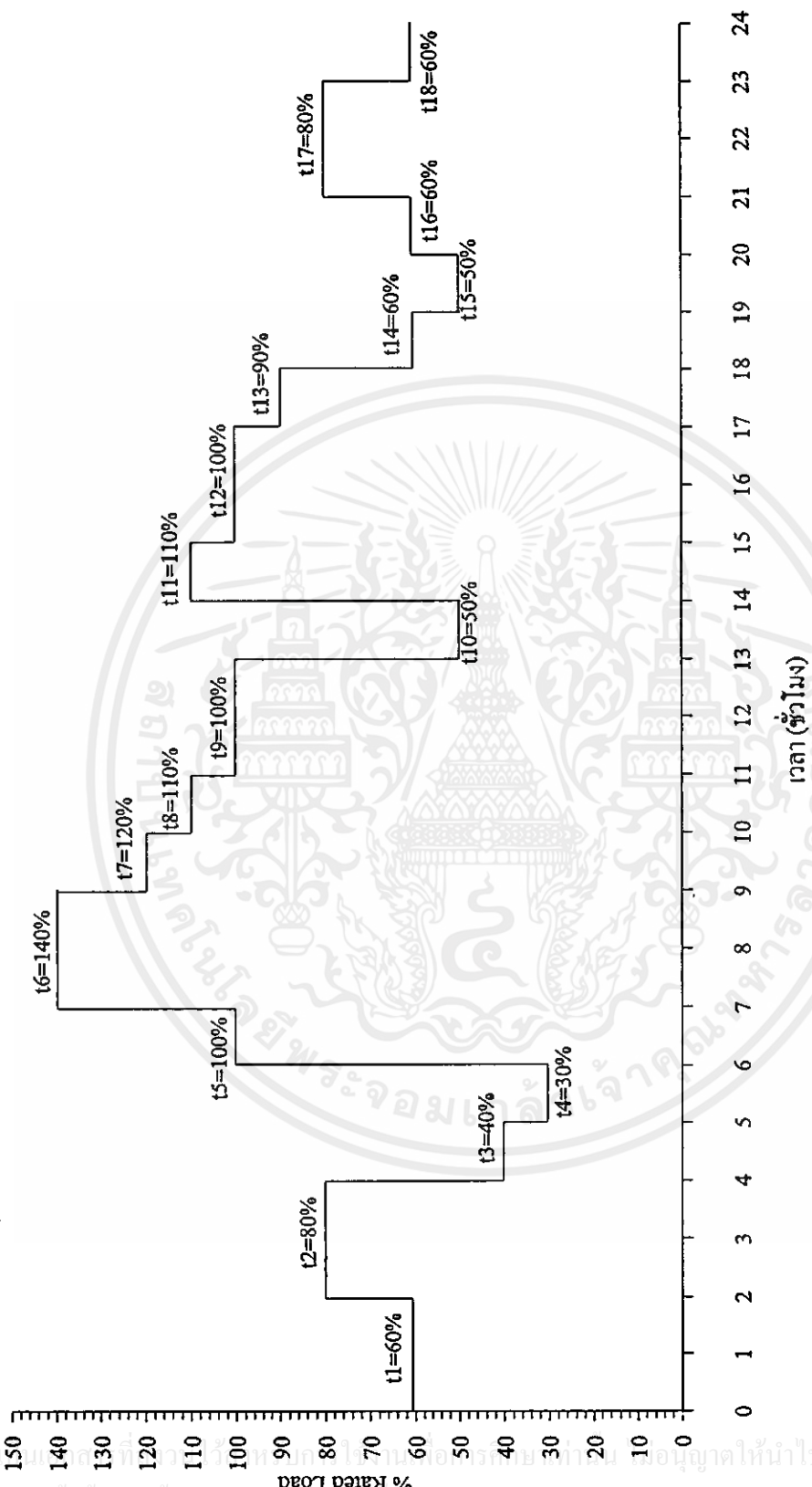


รูปที่ 3.35 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงกำลังรีซินขนาด 800 kVA



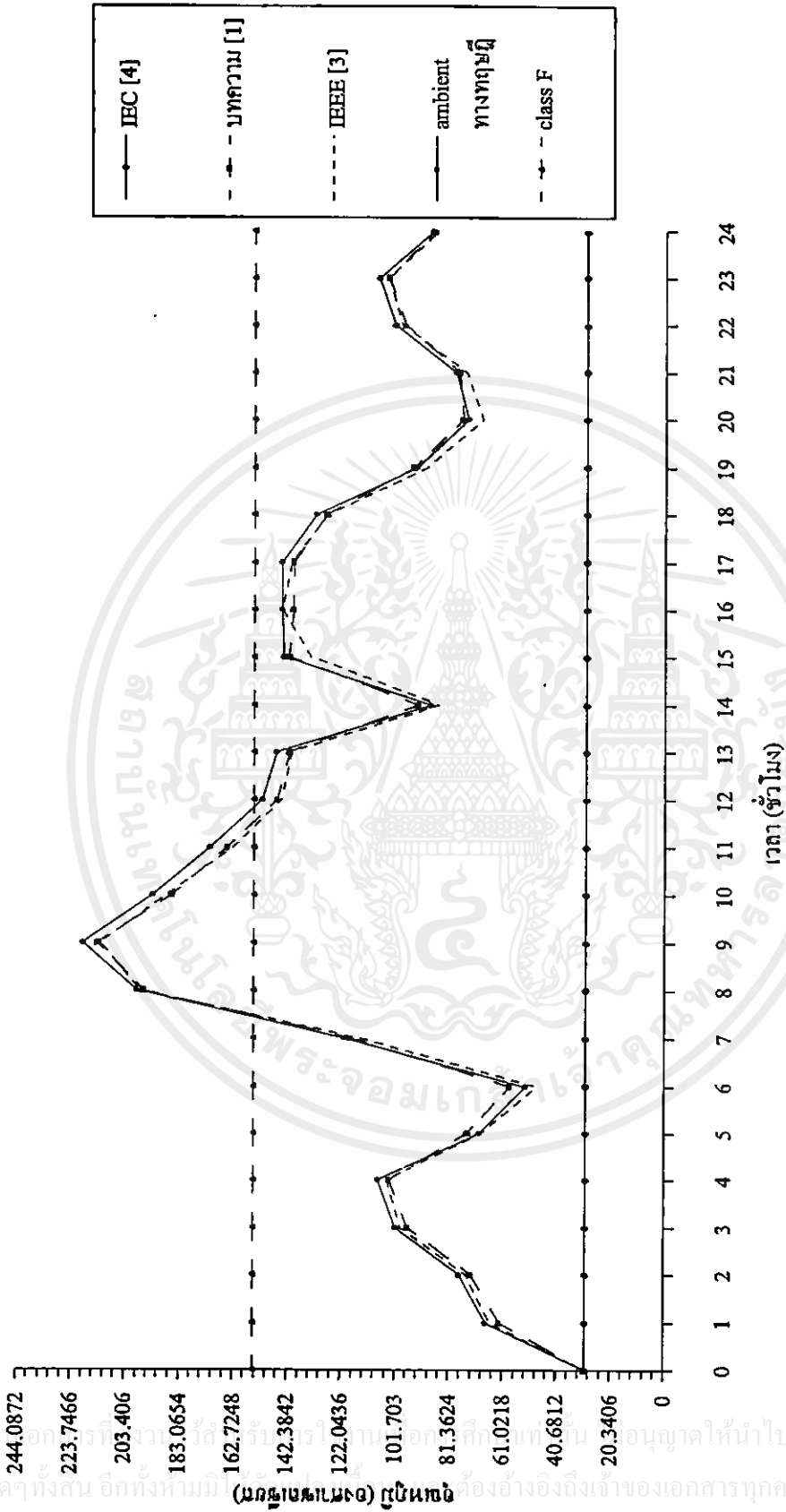
รูปที่ 3.36 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงกำลังรีซินขนาด 800 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไว้สำหรับใช้งานเอกสารที่ออกให้ท่านที่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำเอกสารนี้ไปทำซ้ำหรือดัดแปลงในทางใดๆอย่างอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

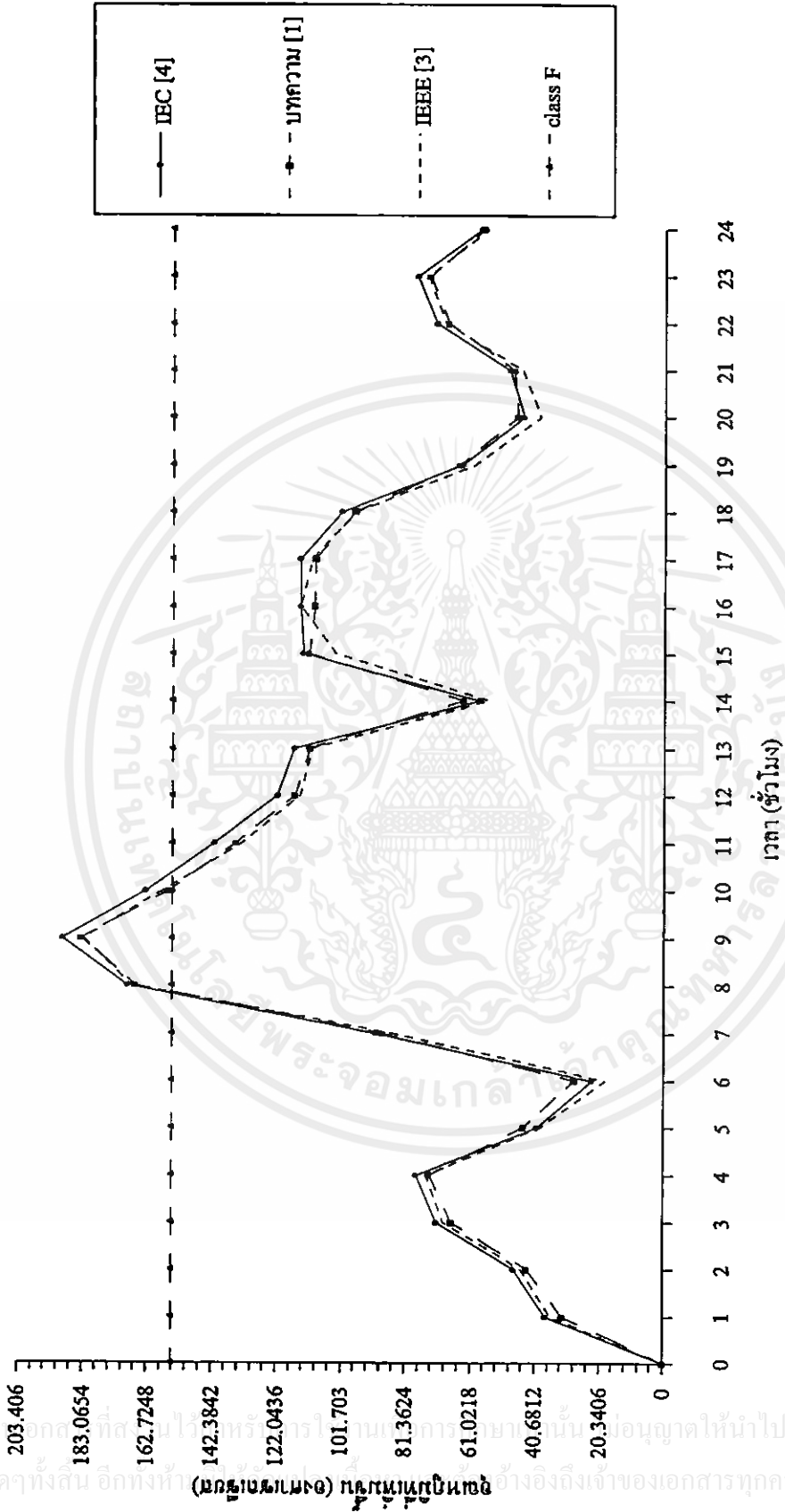


รูปที่ 3.37 Load Duty Cycle ของหม้อแปลงตากัดรีซินขนาด 1000 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและพัฒนาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

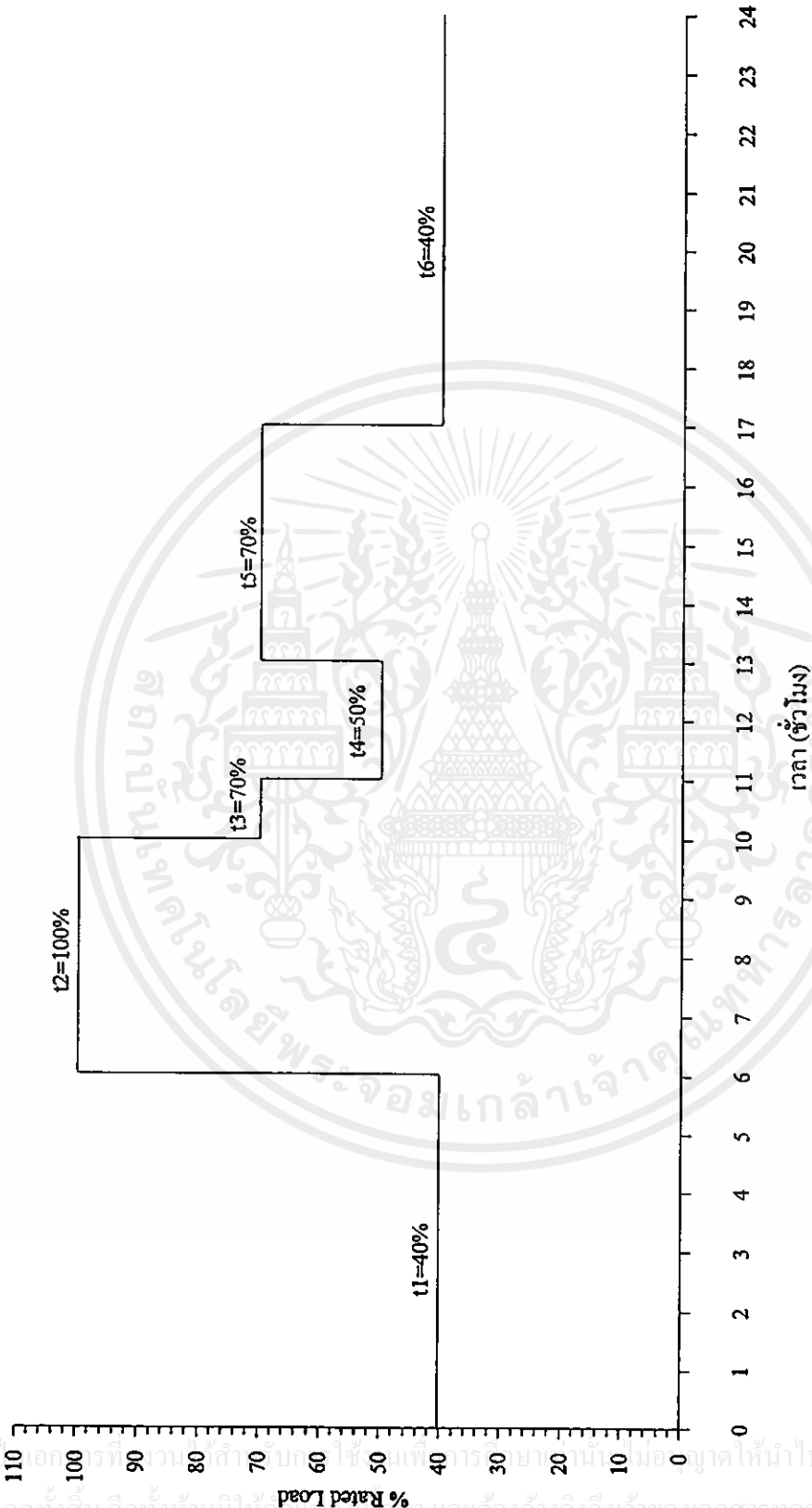


รูปที่ 3.38 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงกำลังรีตินขนาด 1000 kVA

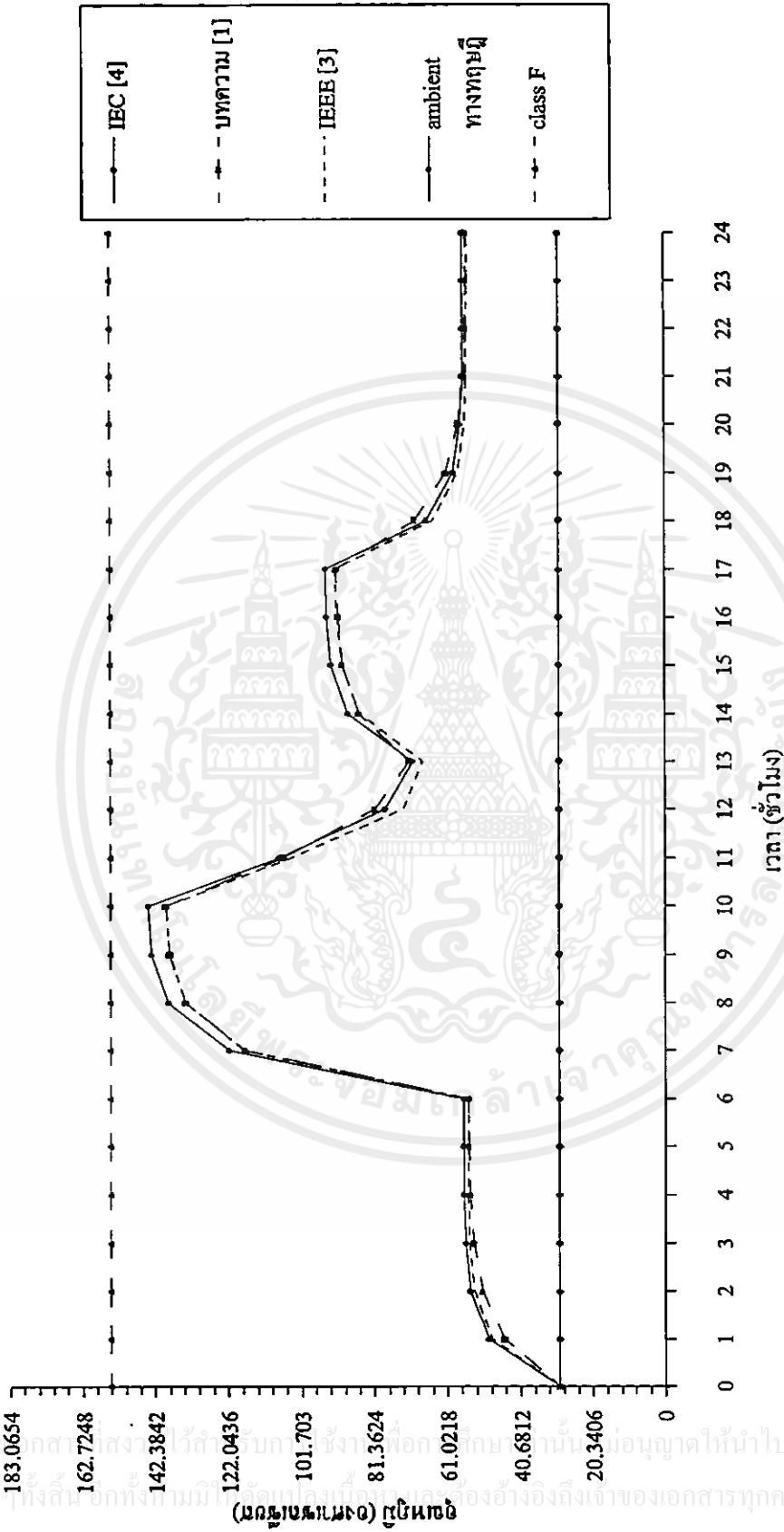


รูปที่ 3.39 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงกำลังรีซินขนาด 1000 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานและการเผยแพร่โดยไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

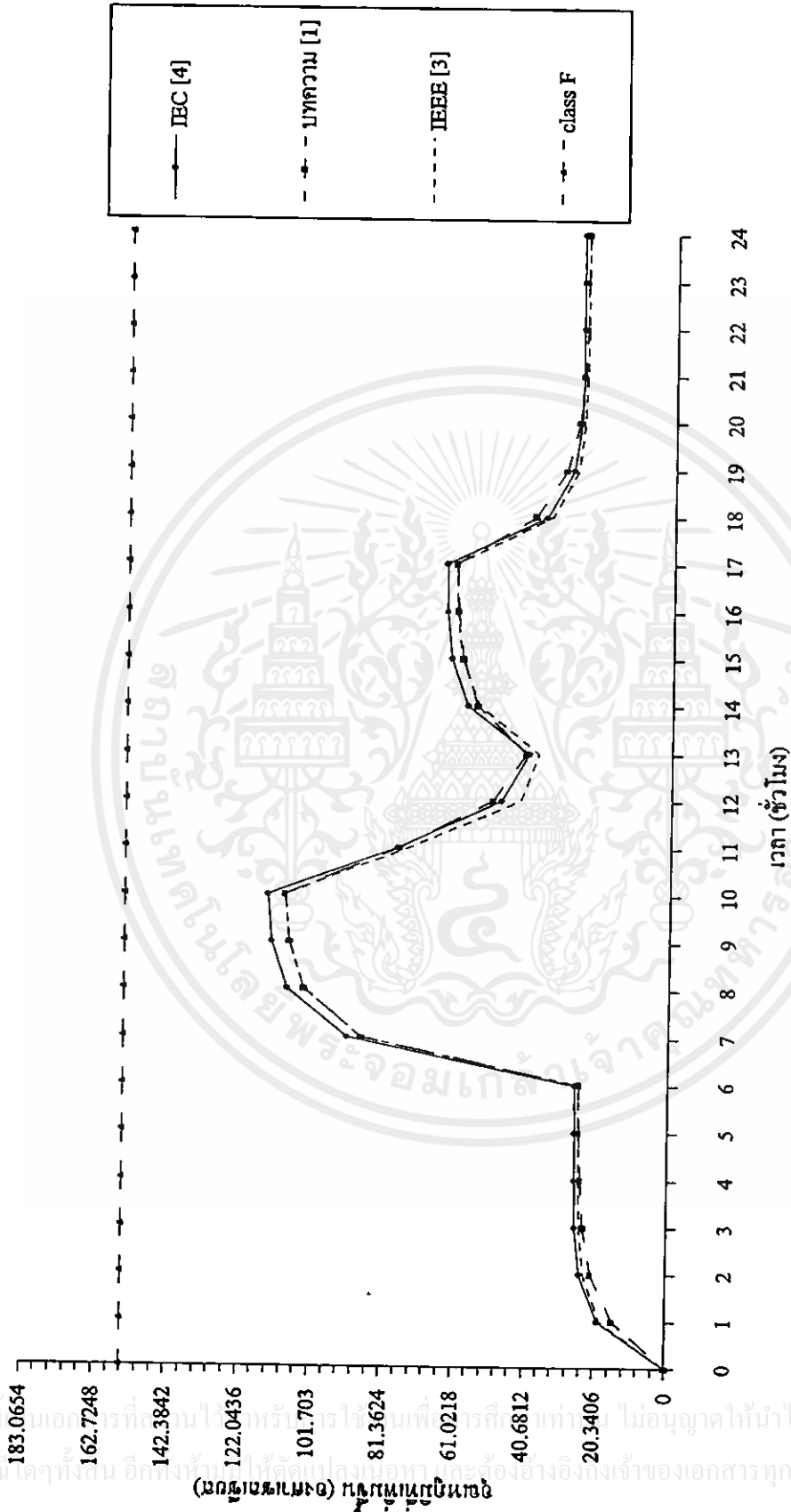


รูปที่ 3.40 Load Duty Cycle ของหม้อแปลงคลาสิร์ชนิด 1250 kVA



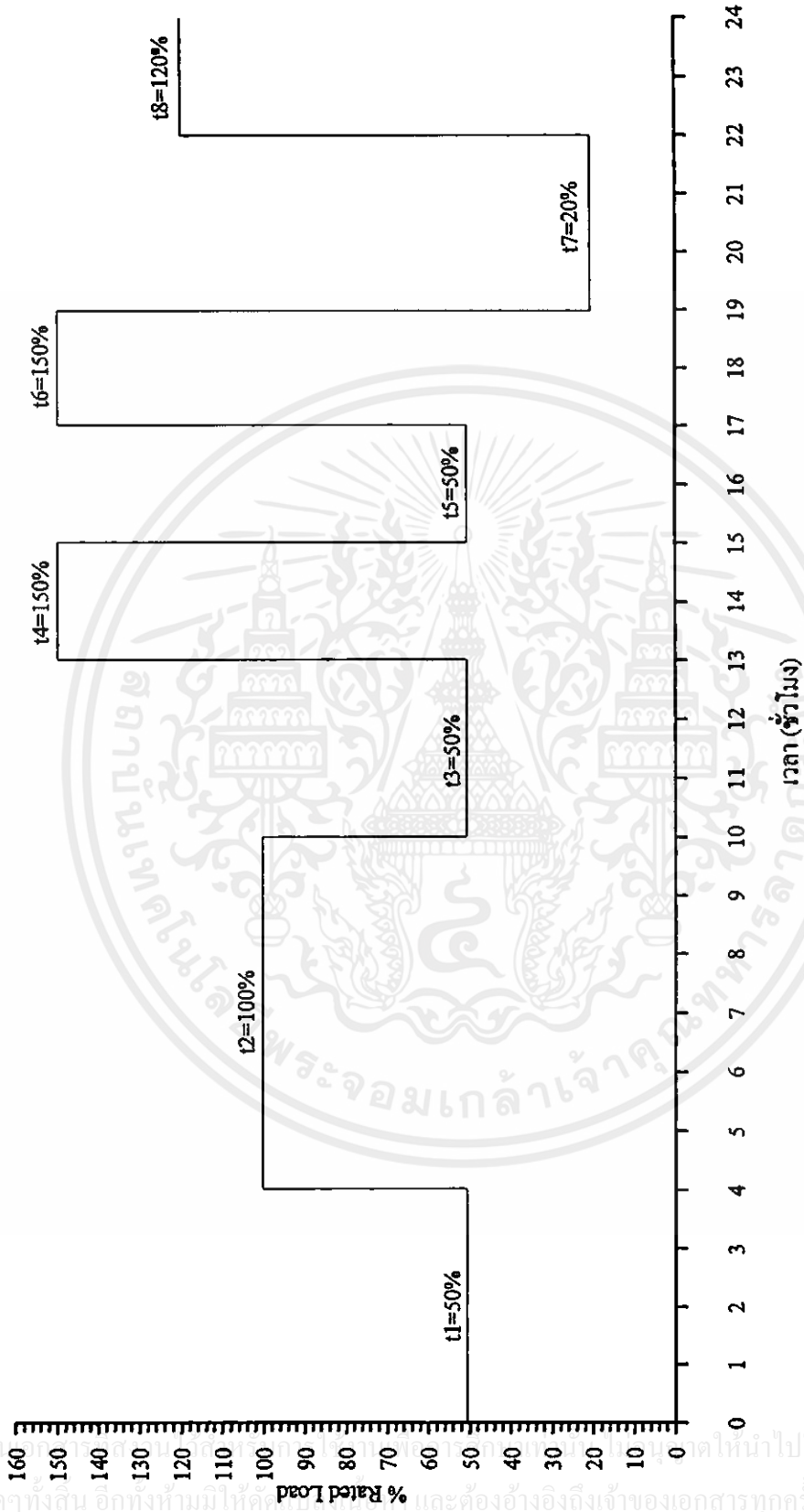
รูปที่ 3.41 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงกำลังขนาด 1250 KVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ว่าค่าข้างบนนี้ที่ออกให้เป็นการอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ยกเว้นกรณีที่มีการแจ้งก่อนและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

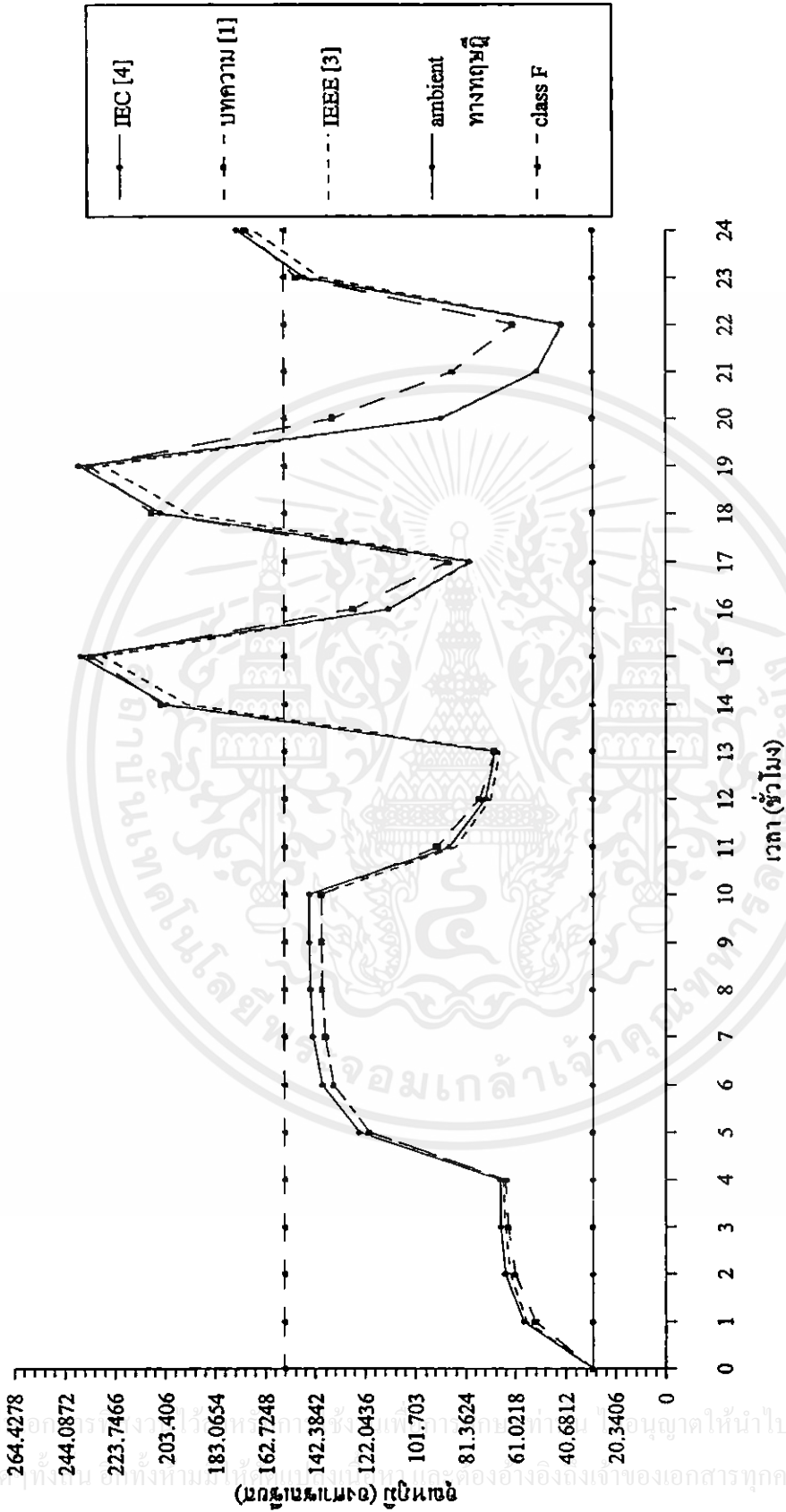


รูปที่ 3.42 เปรียบเทียบขบวนการที่เพิ่มขึ้นที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงขนาด 1250 kVA

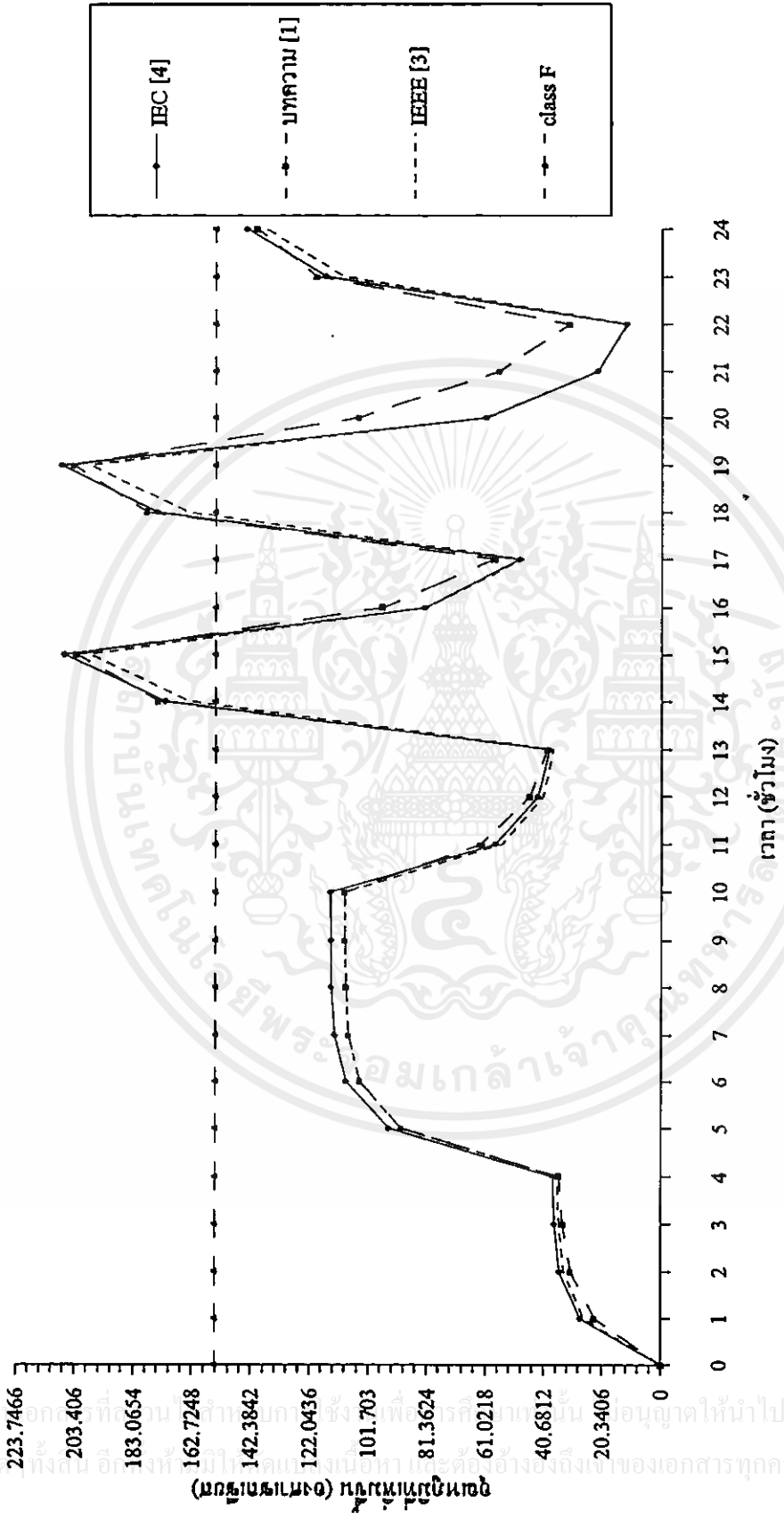
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เท่านั้นเพื่อวัตถุประสงค์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังเป็นการละเมิดลิขสิทธิ์และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
(มคอ.บด.มร.๑) มคอ.บด.มร.๑



รูปที่ 3.43 Load Duty Cycle ของหม้อแปลงกำลังรีซินขนาด 1500 kVA

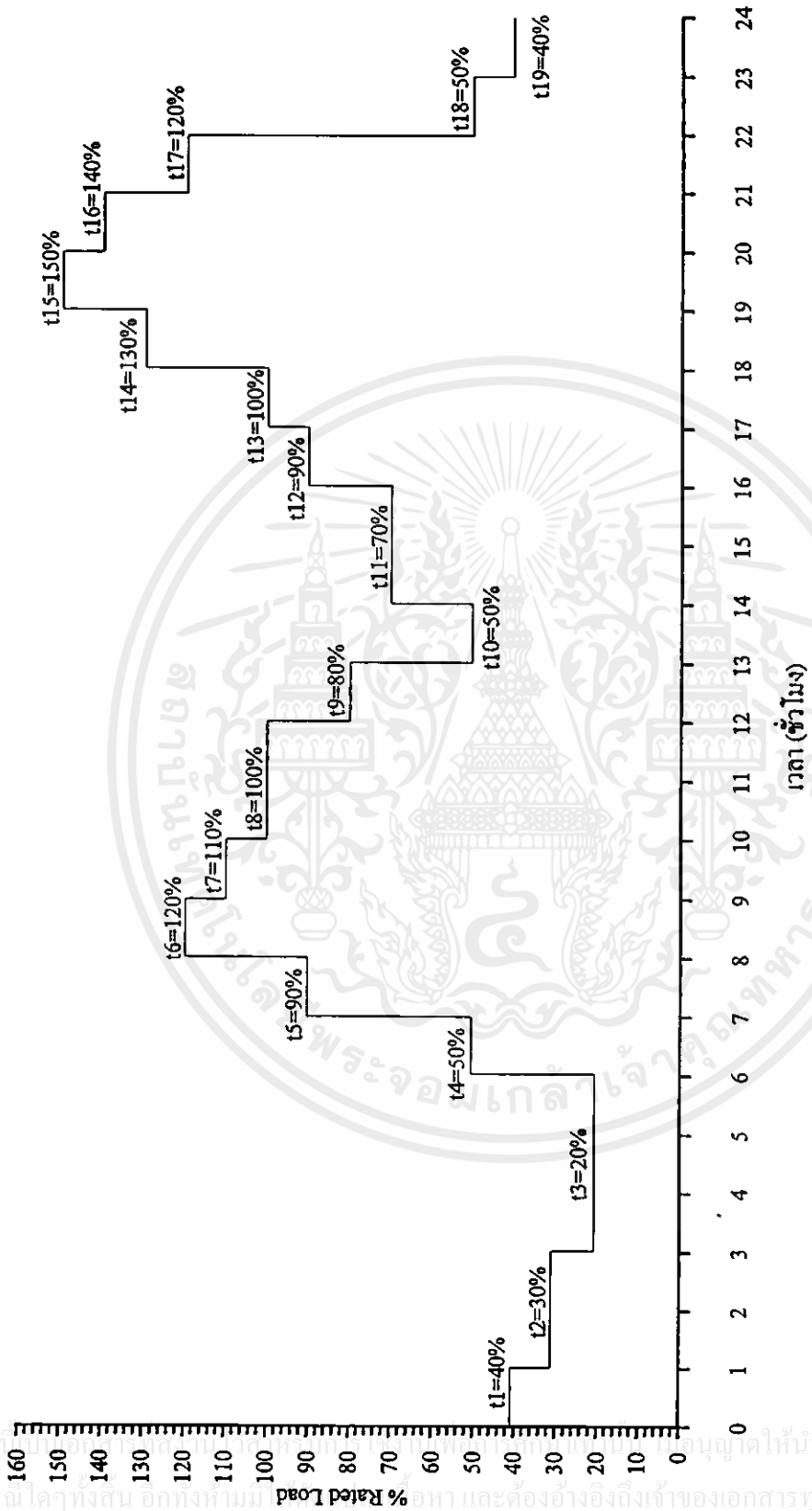


รูปที่ 3.44 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงขนาด 1500 kVA



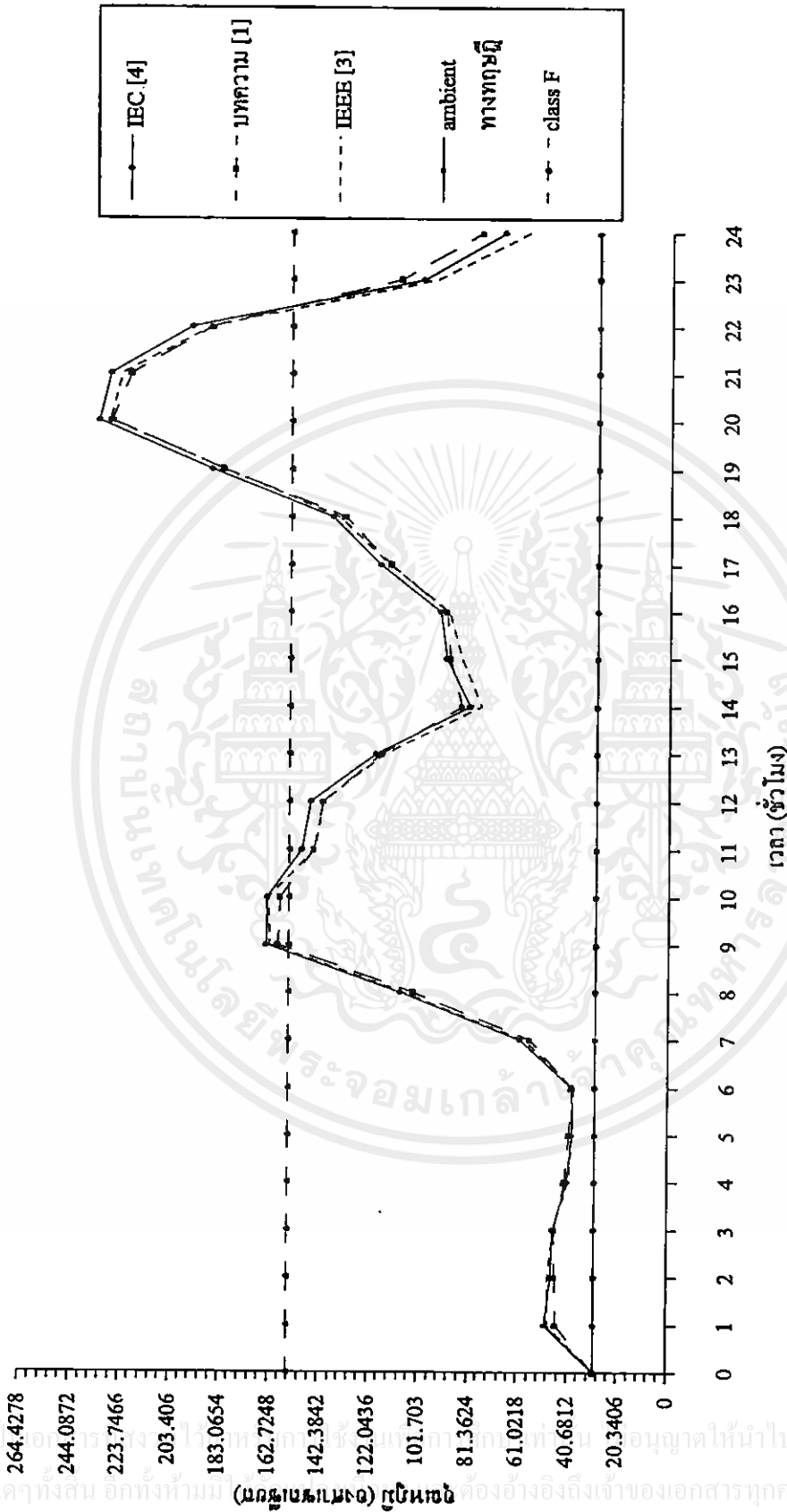
รูปที่ 3.45 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงกำลังเรตินขนาด 1500 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้เพื่อการพาณิชย์หรือการโฆษณาใดๆ โดยไม่ต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

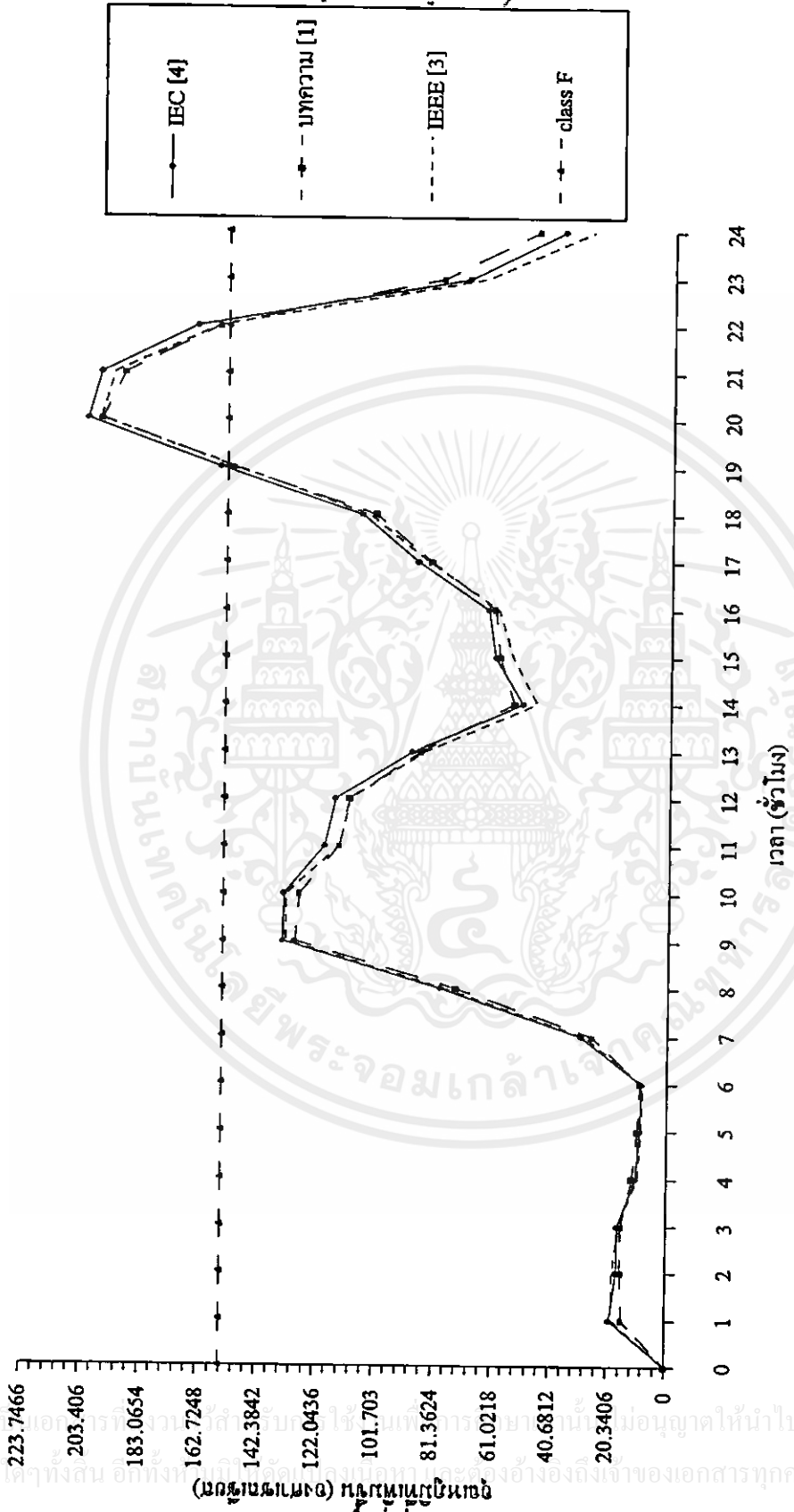


รูปที่ 3.46 Load Duty Cycle ของหม้อแปลงกำลัง 1600 kVA

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัย

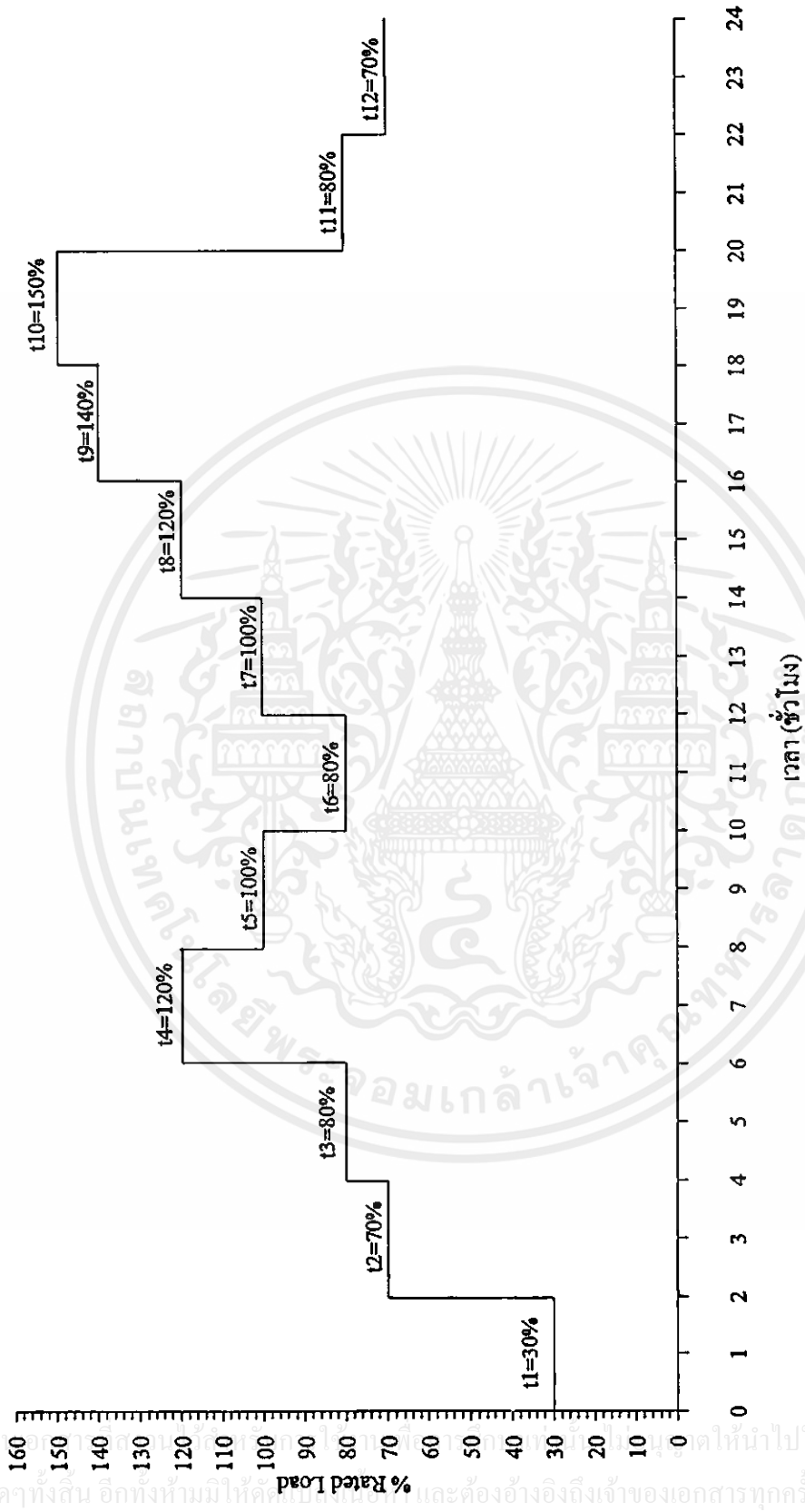


รูปที่ 3.47 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงกำลังขนาด 1600 kVA



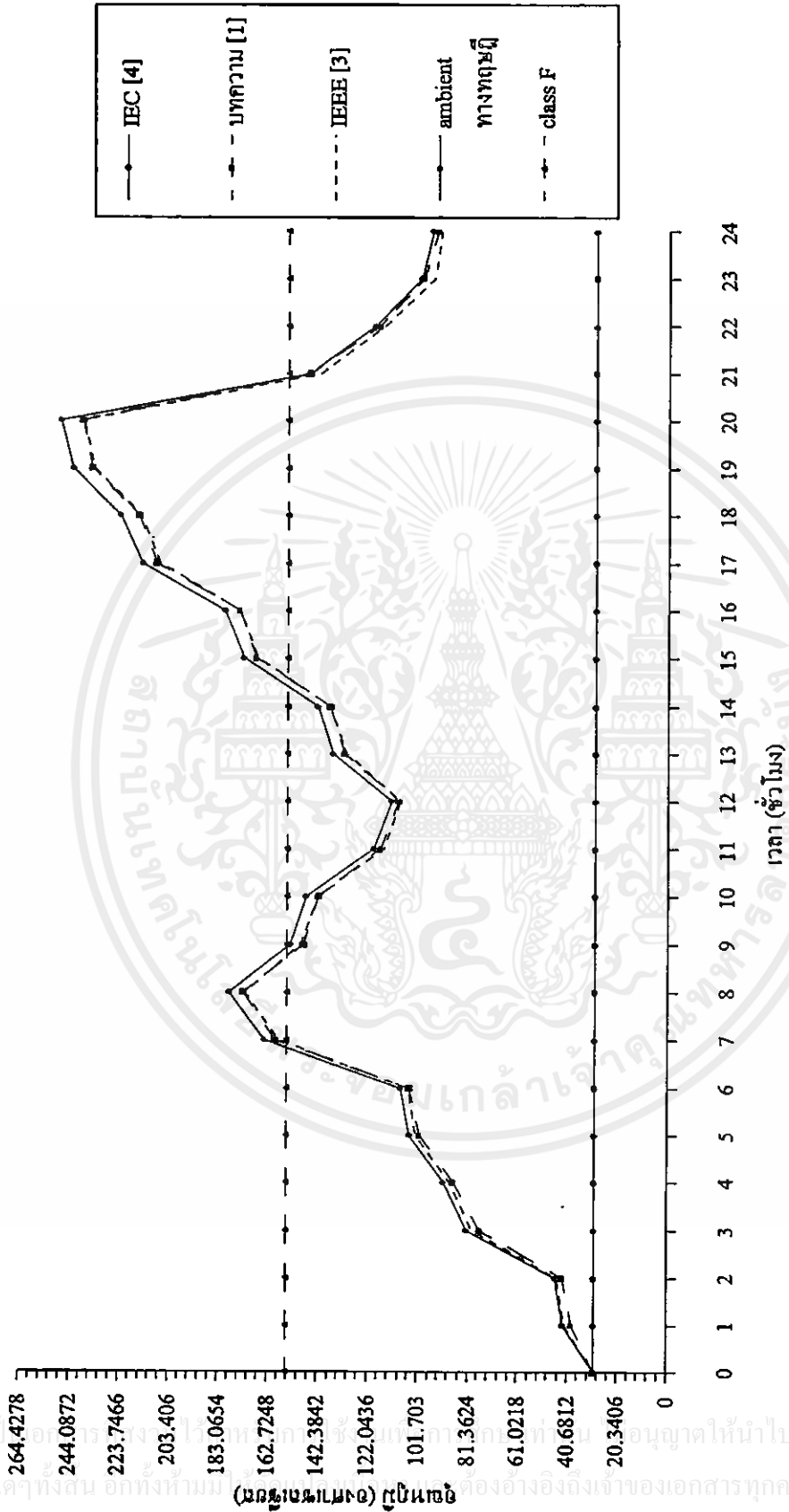
รูปที่ 3.48 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงกำลังขนาด 1600 KVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกไปลงนิตยสารหรือสิ่งพิมพ์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาต

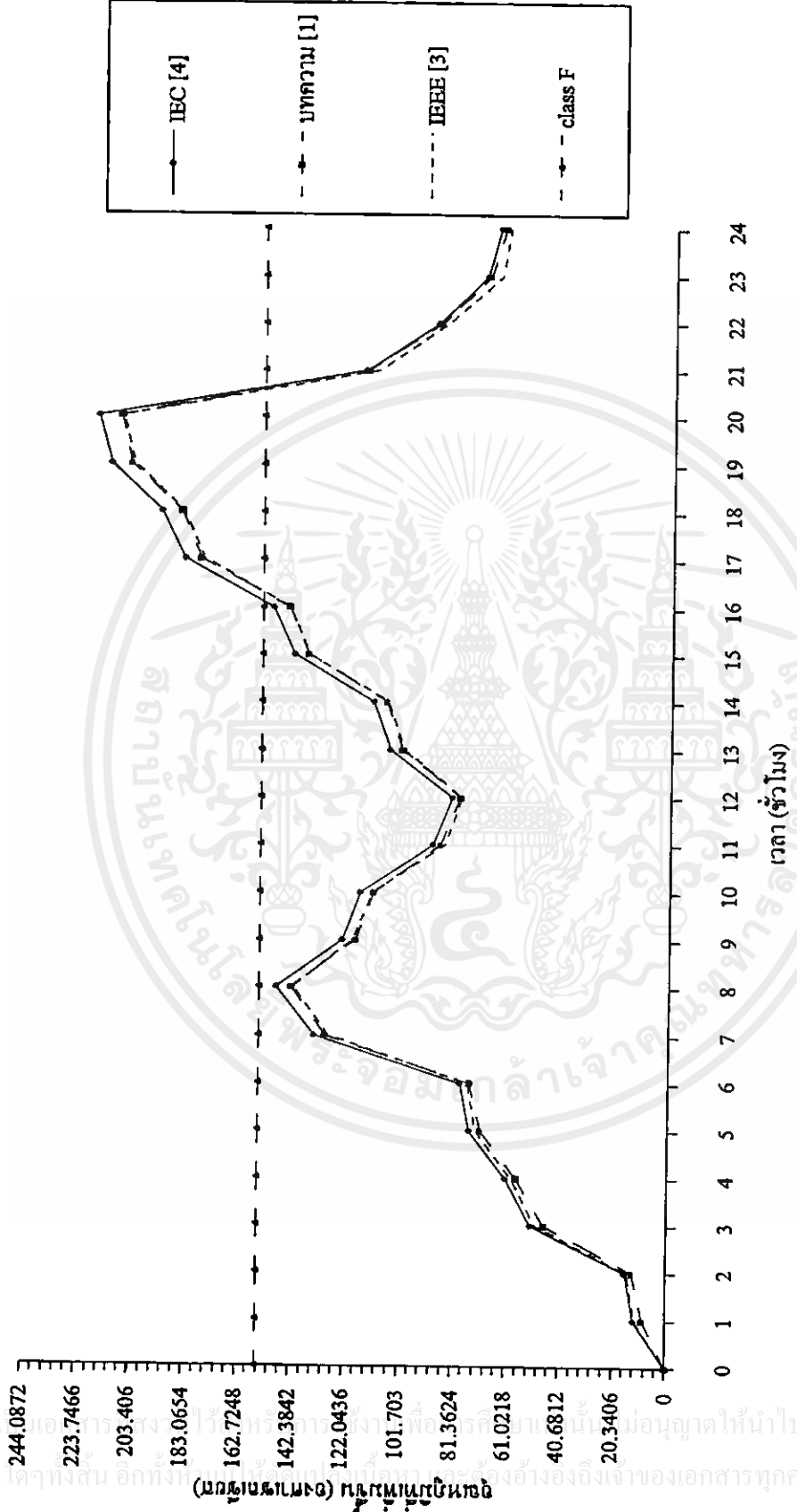


รูปที่ 3.49 Load Duty Cycle ของหม้อแปลงกำลัง 2000 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกข้อมูลไปเผยแพร่และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

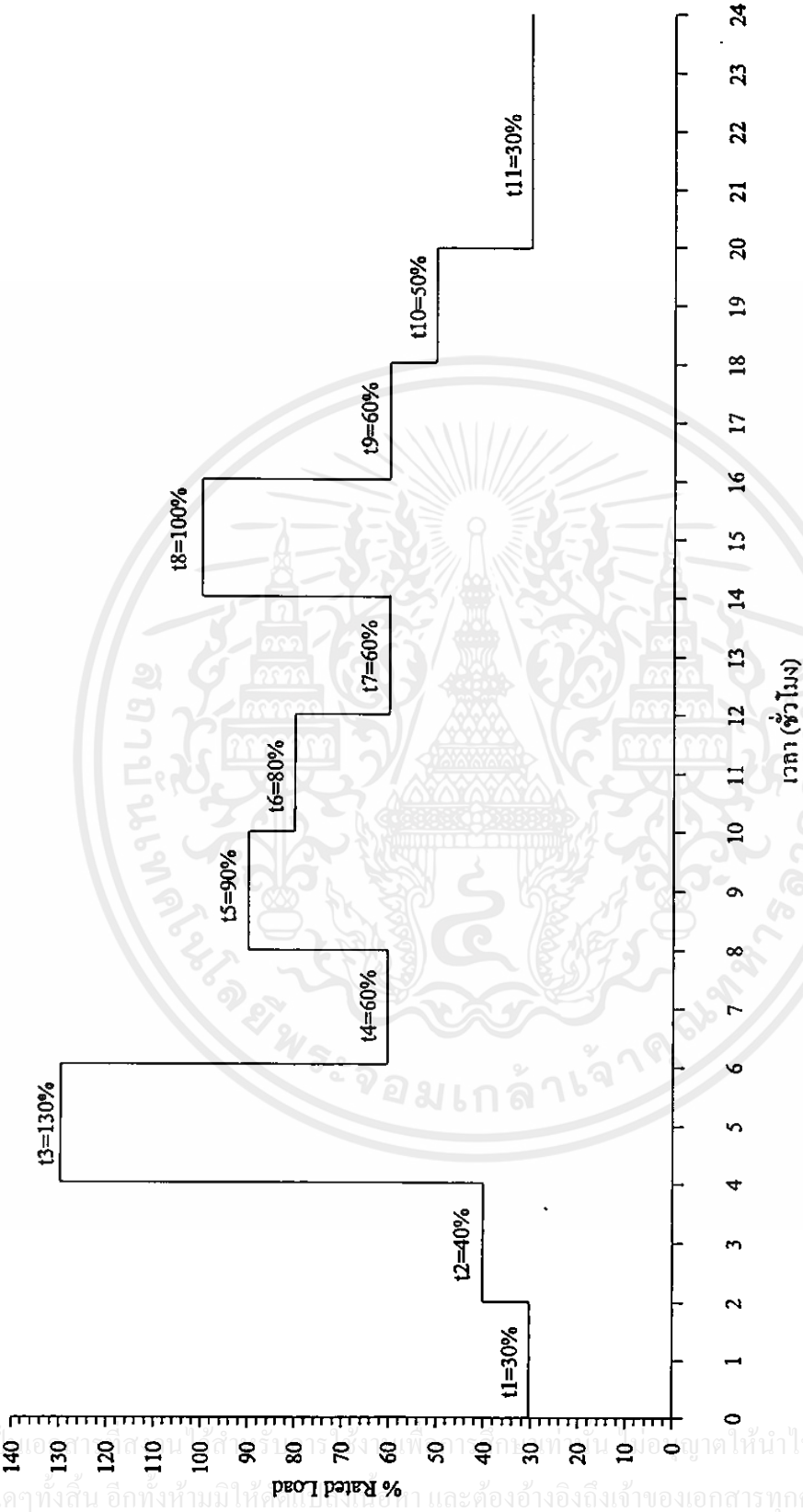


รูปที่ 3.50 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงคาบศัเรจิ้นขนาด 2000 kVA



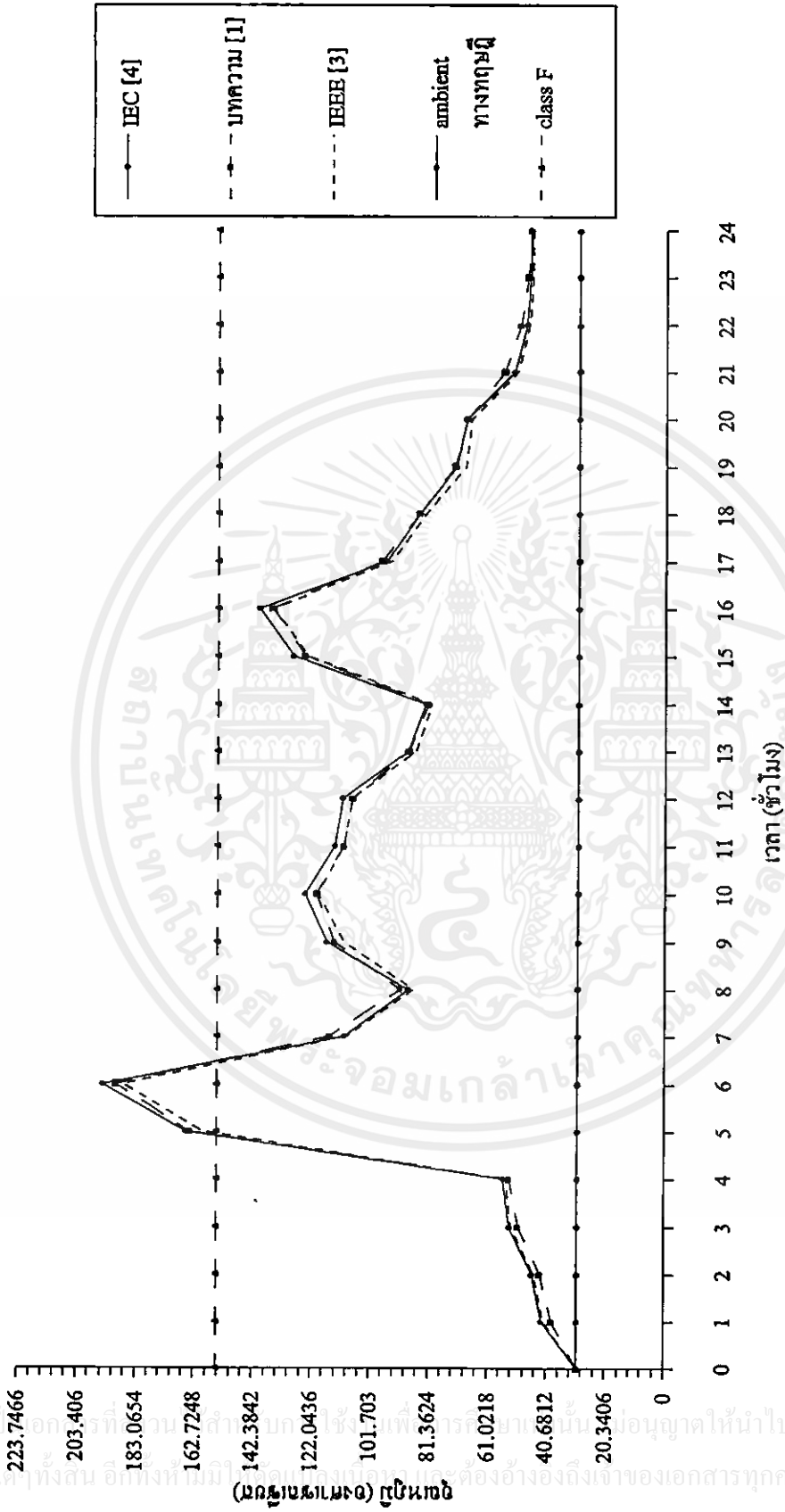
รูปที่ 3.51 เปรียบเทียบขุมหมุ่ที่เพิ่มขึ้น ที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงคาสต์รีซินขนาด 2000 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ข้อมูลไปยังสื่อต่างๆโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



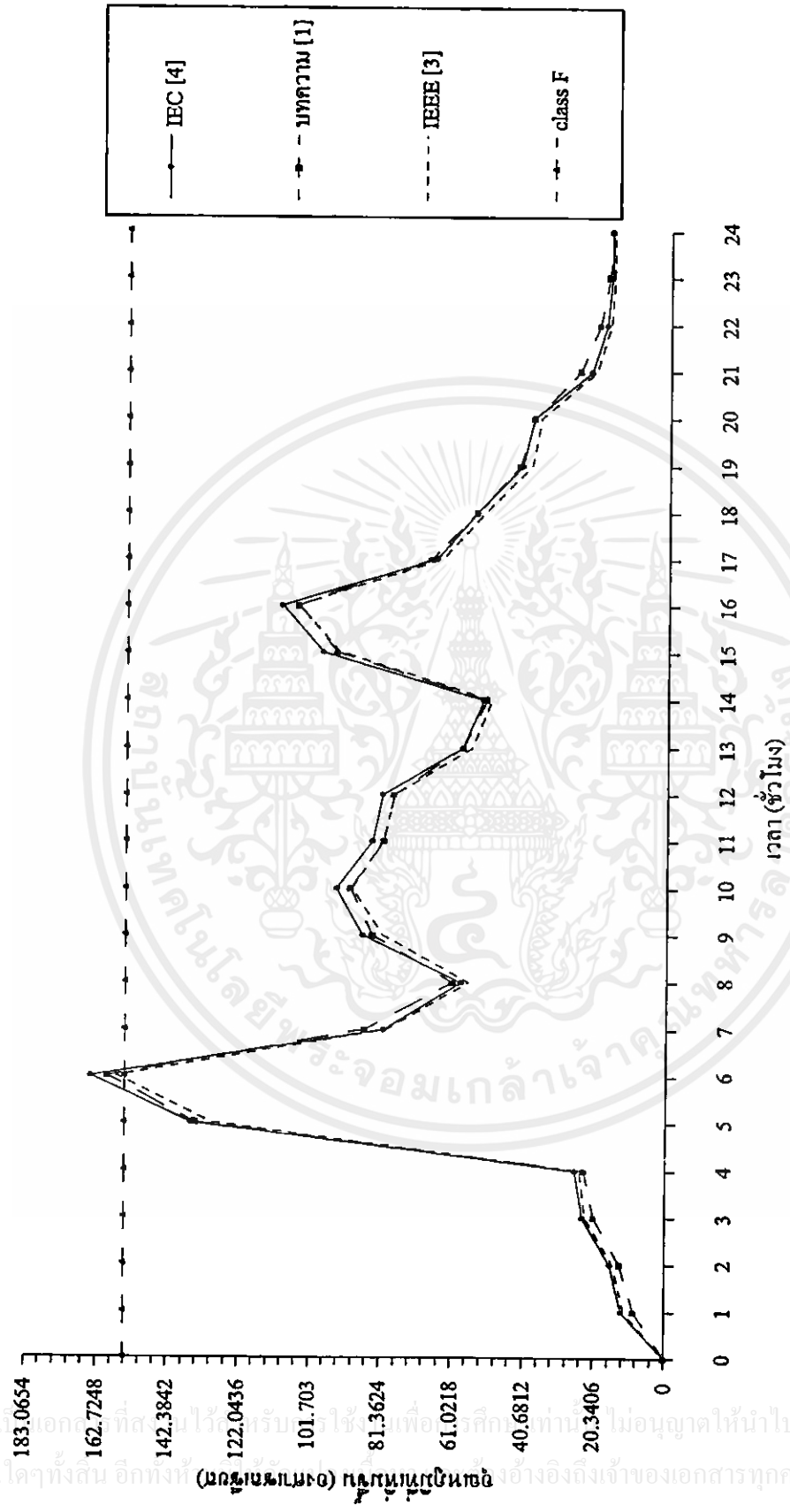
รูปที่ 3.52 Load Duty Cycle ของหม้อแปลงตากสตรัทรีขนาด 2500 kVA

เอกสารนี้เผยแพร่โดยสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนของศูนย์วิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนภาคตะวันออกเฉียงเหนือ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



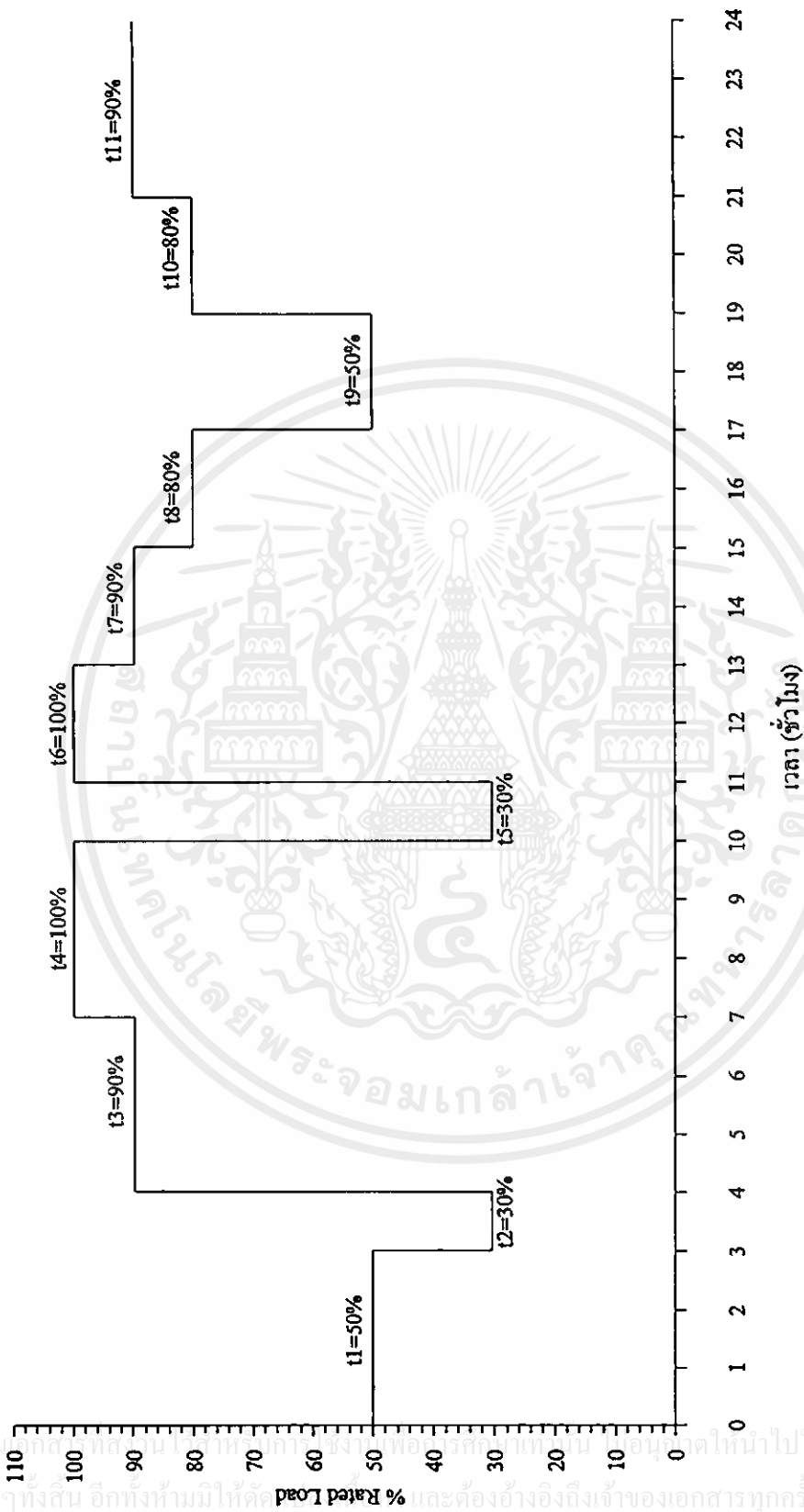
รูปที่ 3.53 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงกำลังเรซินขนาด 2500 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่...  
ไม่ว่าการพิมพ์ที่...  
ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



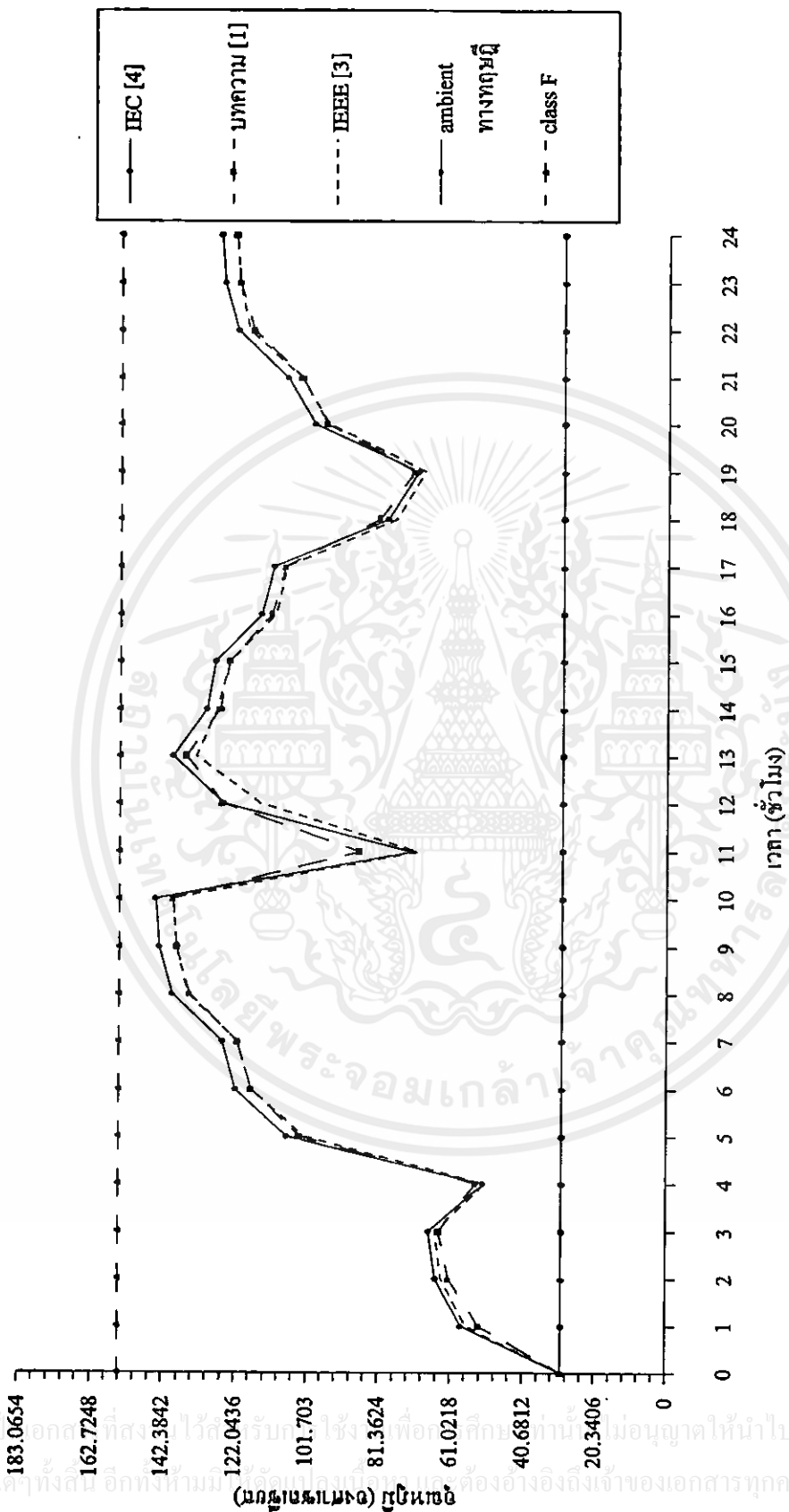
รูปที่ 3.54 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงกำลังรีติขนาด 2500 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับดูตัวอย่างเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งที่ (มคอช.มคอช.) กรุณาแจ้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

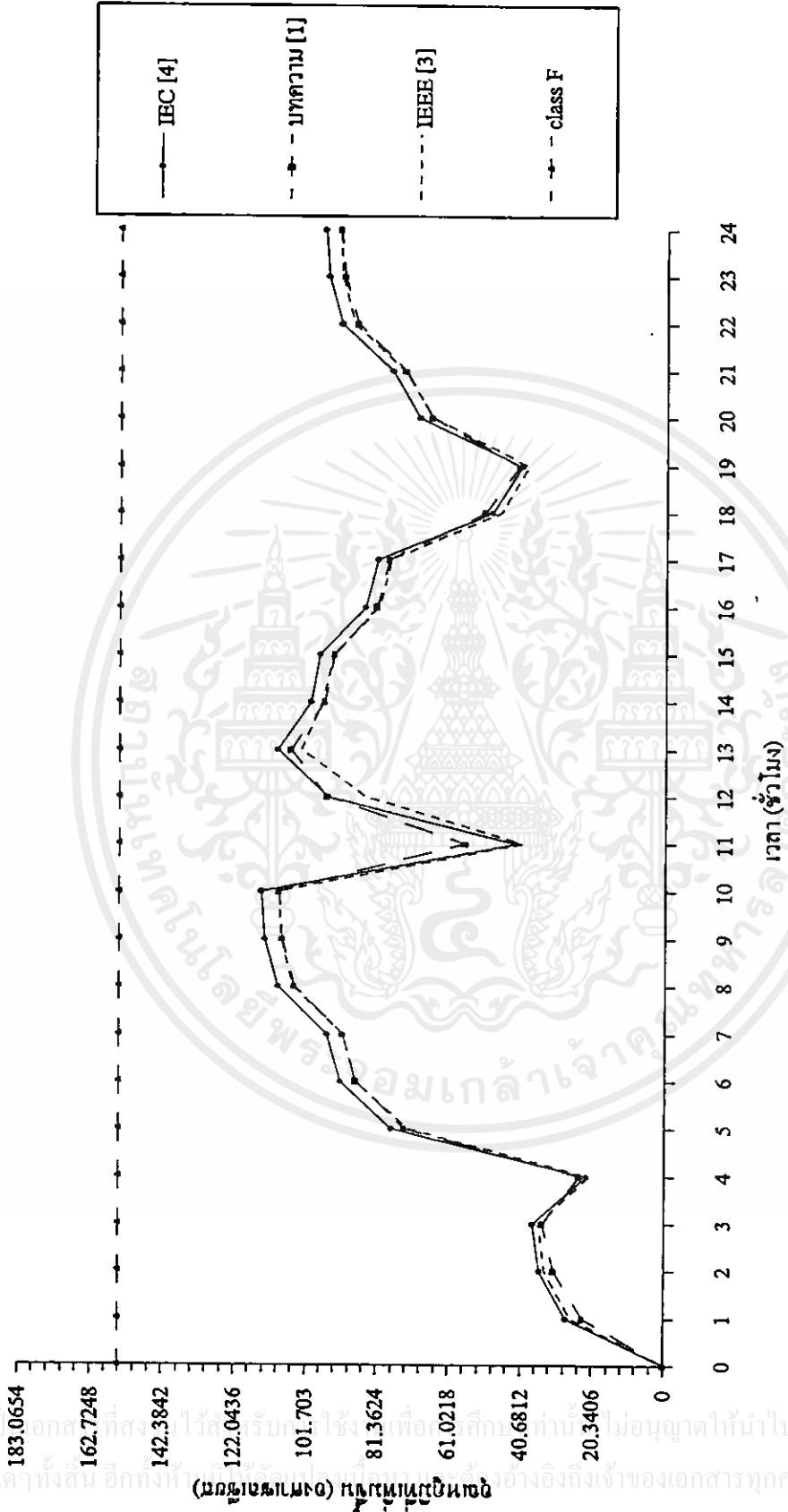


รูปที่ 3.55 Load Duty Cycle ของหม้อแปลงกำลังเรตติงขนาด 10000 kVA

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางสถาบันฯ

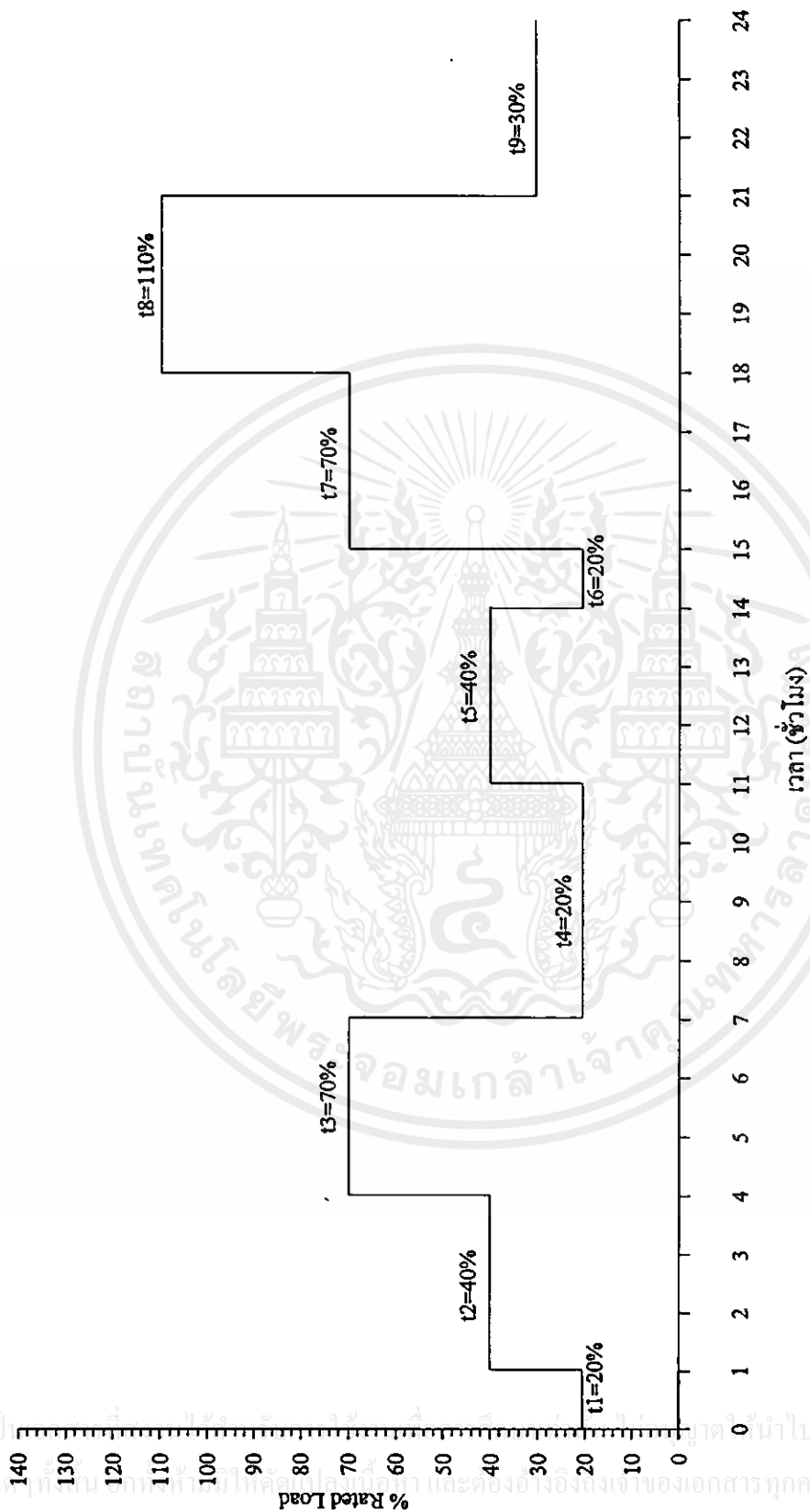


รูปที่ 3.56 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงกำลังขนาด 10000 KVA



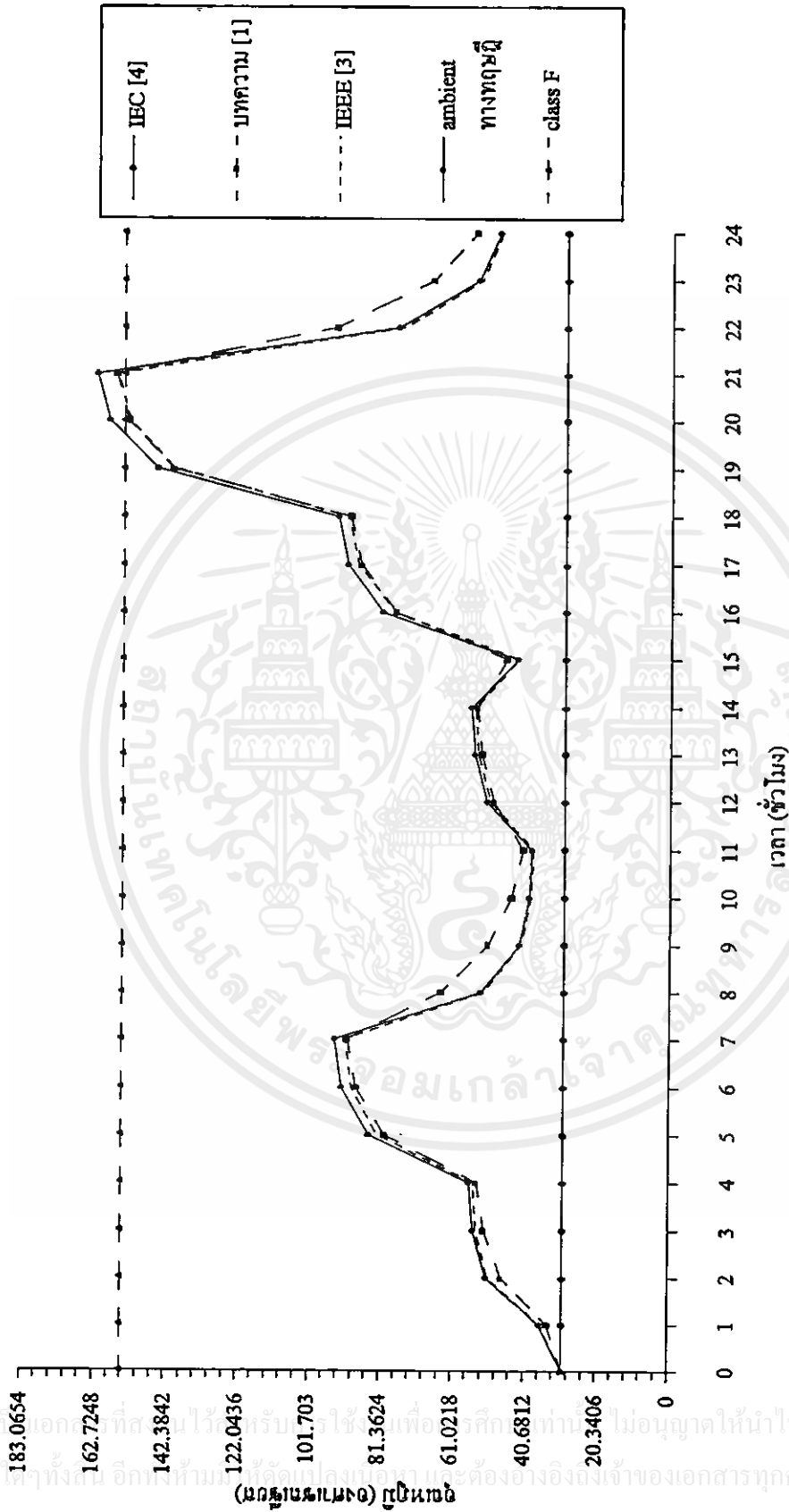
รูปที่ 3.57 เปรียบเทียบขุมเหตุที่เพิ่มขึ้นที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงกำลังเรซินขนาด 10000 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับศึกษาใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำข้อมูลไปเผยแพร่หรือแจ้งต่อผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



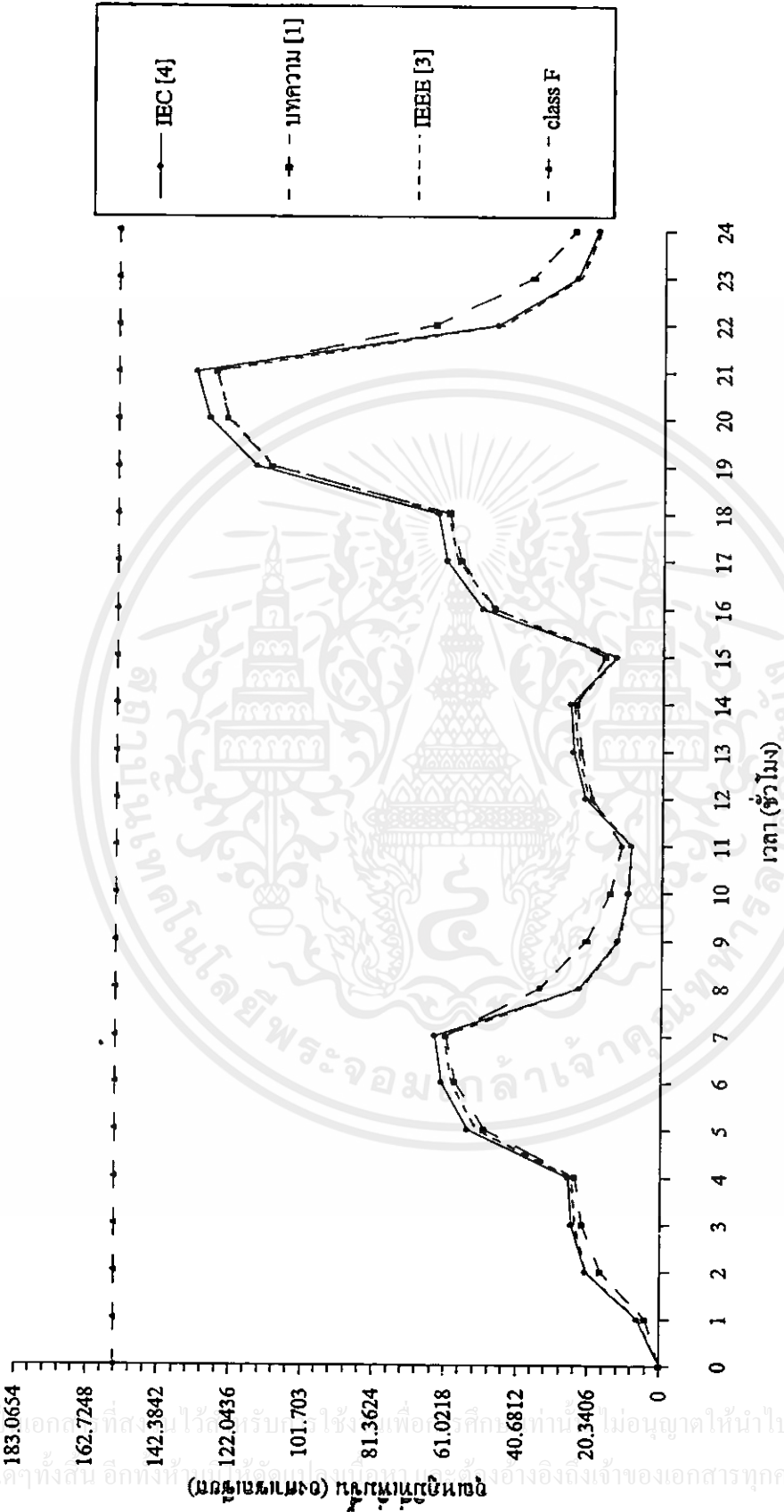
รูปที่ 3.58 Load Duty Cycle ของหม้อแปลงคาตาสต์รีขนาด 15000 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาและวิจัยของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม กรุณาติดต่อผู้จัดทำเอกสารและขอใบรับรองการนำไปใช้



รูปที่ 3.59 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงกำลังรีซินขนาด 15000 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

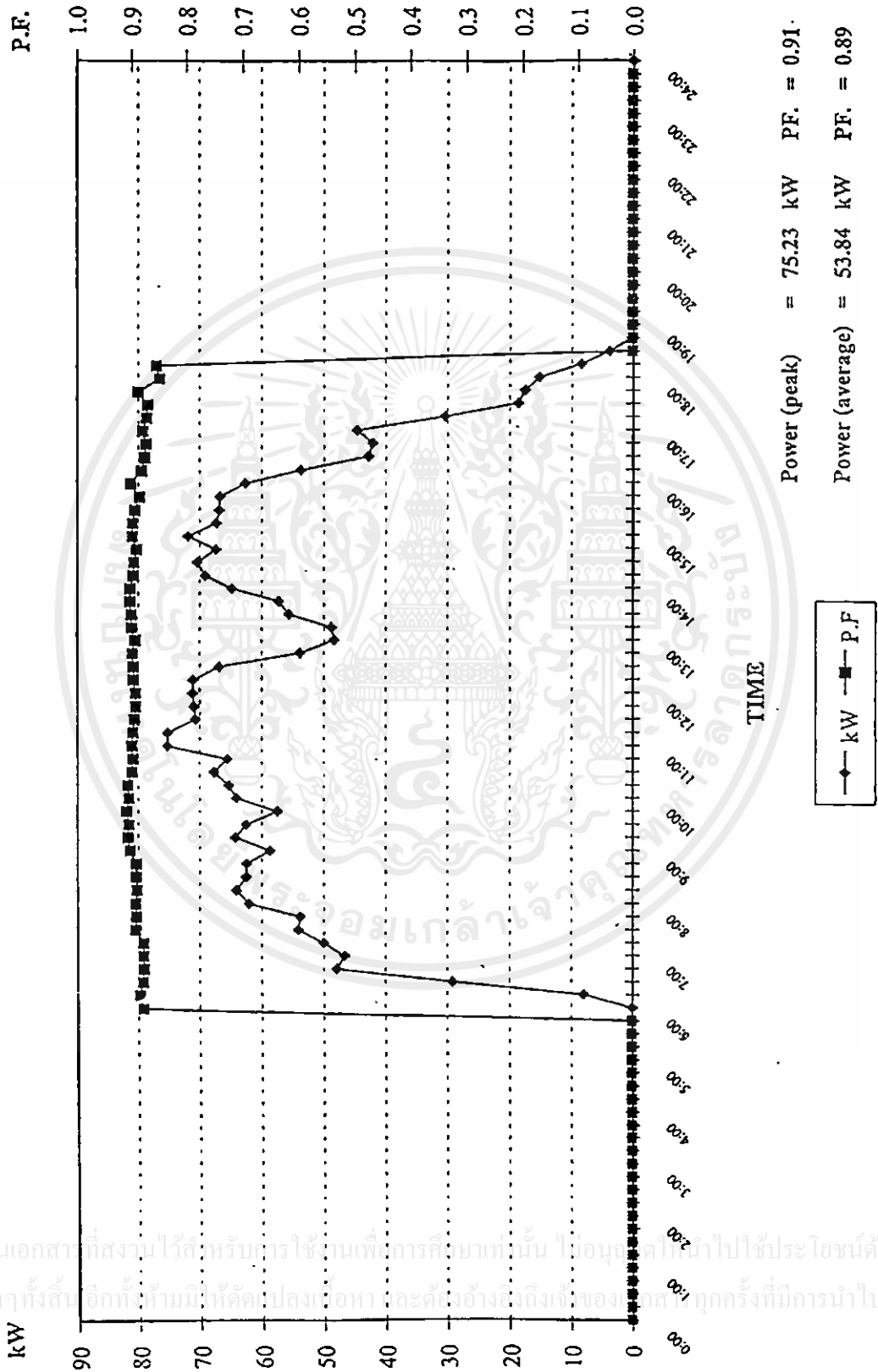


รูปที่ 3.60 เปรียบเทียบขุมข้อมูลที่เพิ่มขึ้น ที่ได้จากผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงกำลังขนาด 15000 KVA

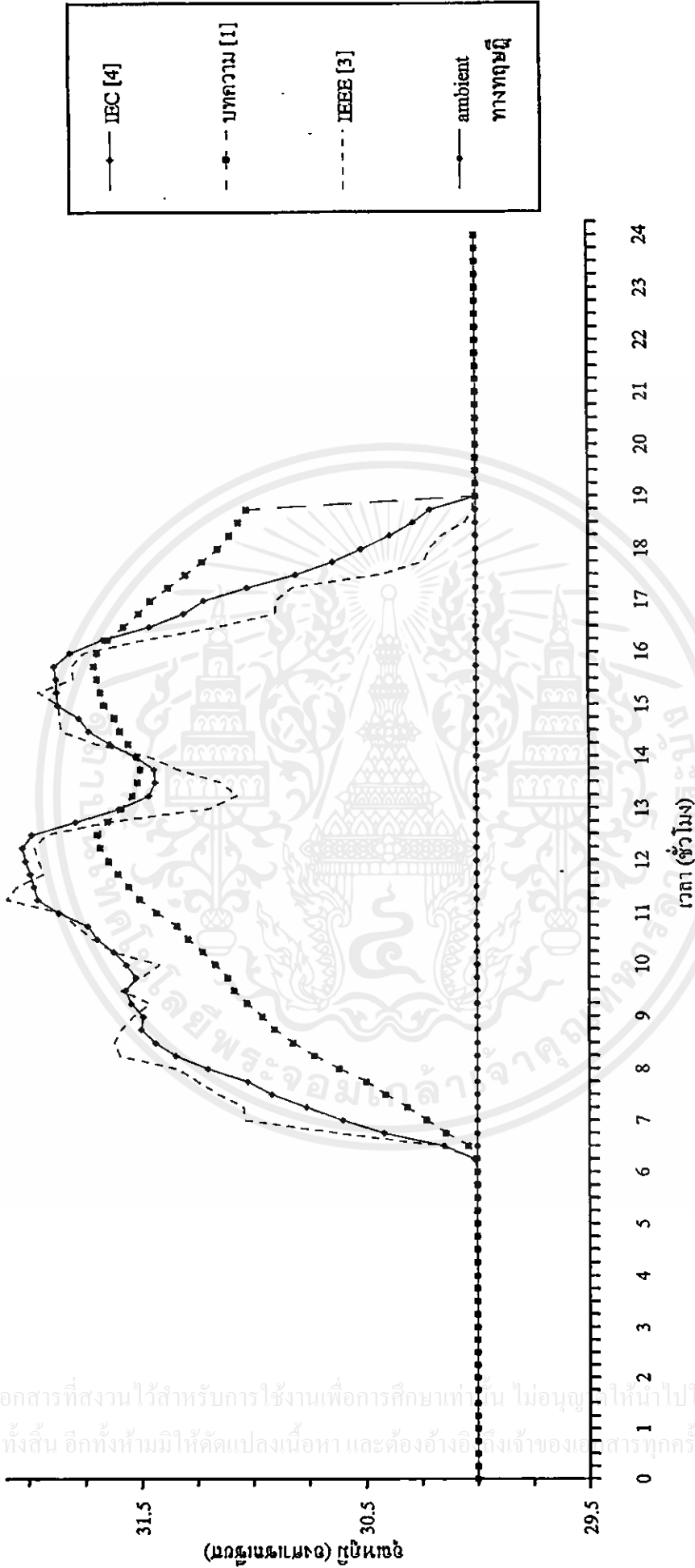
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตอย่างอังกถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(มคอช.มคอช.มคอช.) คณะวิศวกรรมศาสตร์

# DAILY LOAD CURVE Tr. 1,000 kVA

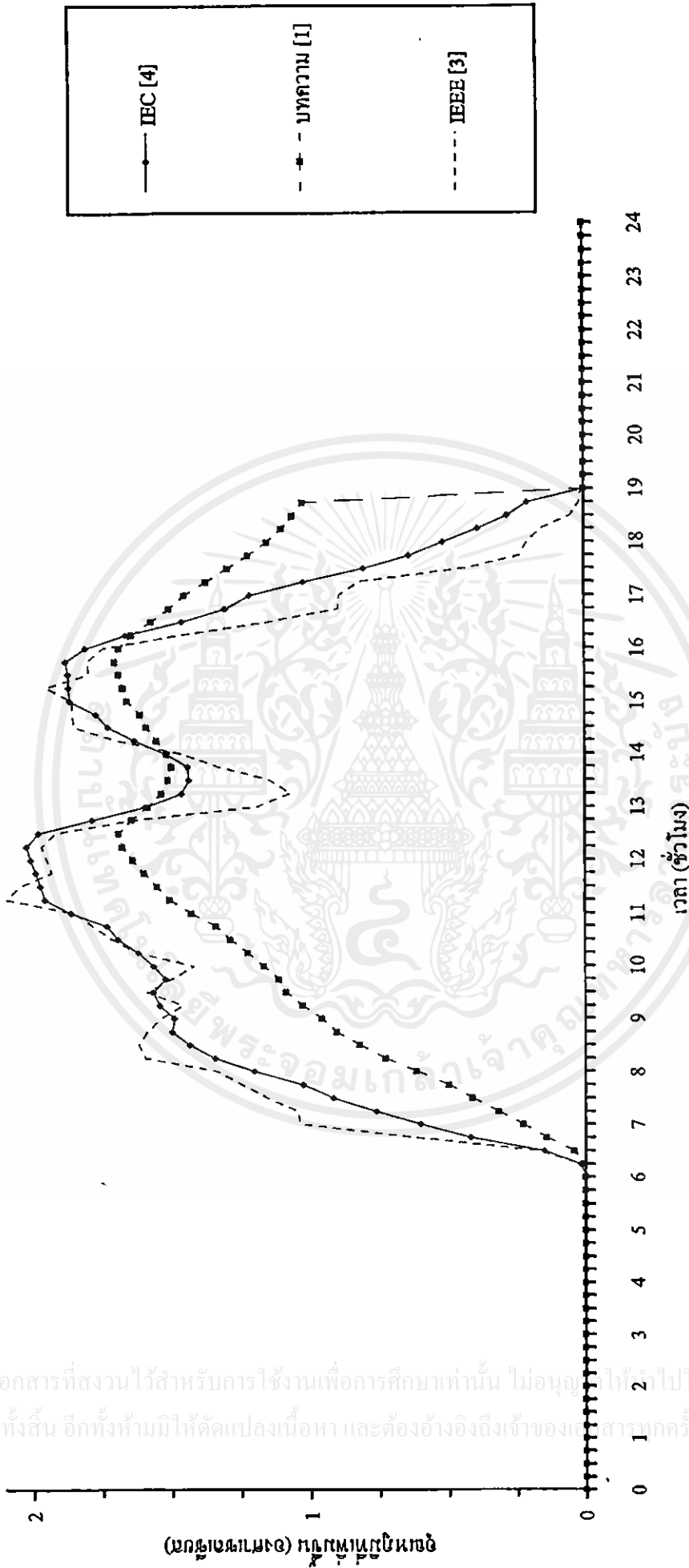


รูปที่ 3.61 Load duty Cycle ข้อมูลจริงจากอาคารสำนักงานของหม้อแปลงขนาด 1000 kVA



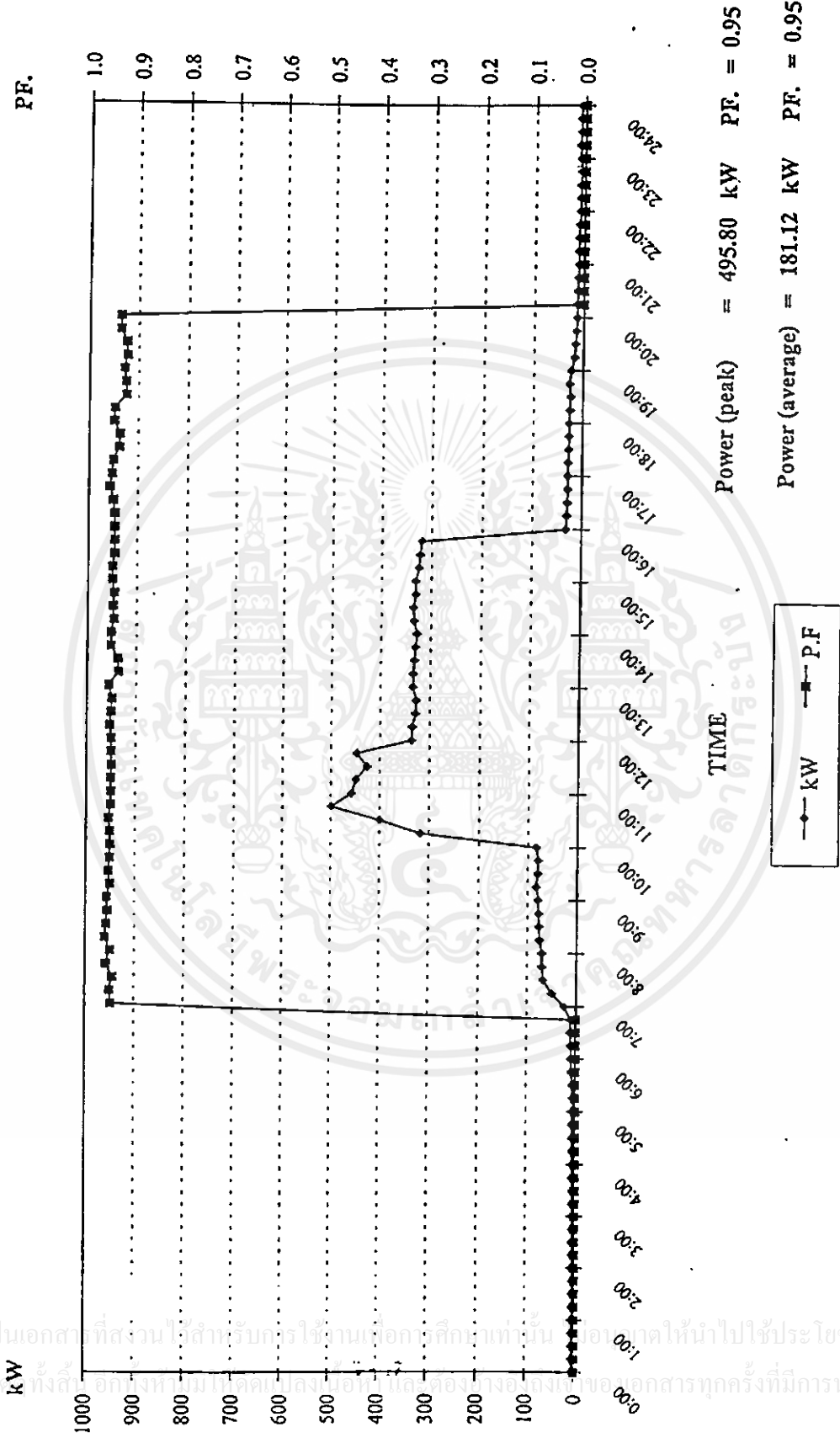
รูปที่ 3.62 เปรียบเทียบอุณหภูมิผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงกำลังรีซินขนาด 1000 kVA จากการทดสอบซอฟต์แวร์ โดยที่ class F เท่ากับ 155 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีให้นำไปใช้

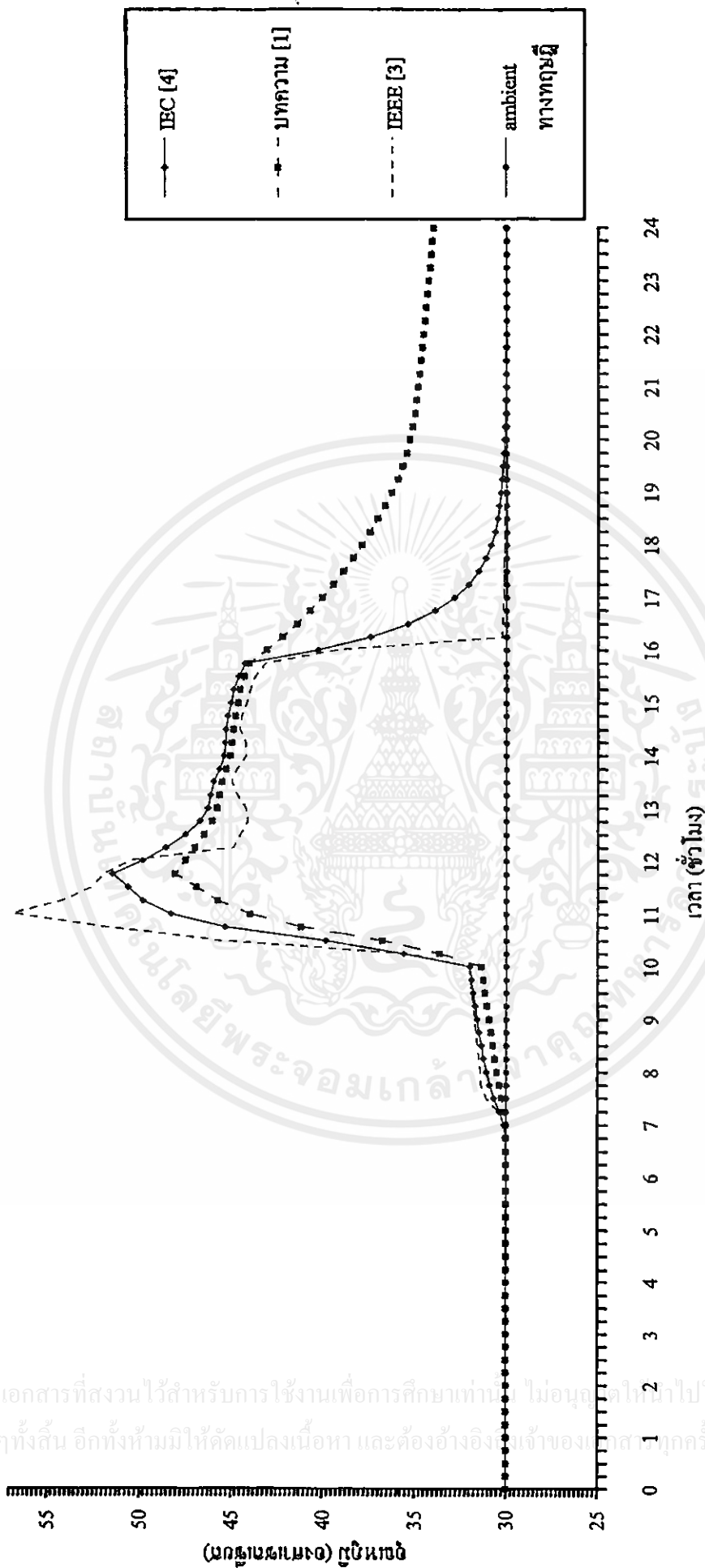


รูปที่ 3.63 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงคาสต์เรซินขนาด 1000 kVA จากการศึกษาของซอฟต์แวร์ โดยที่ class F เท่ากับ 155 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีคนนำไปใช้

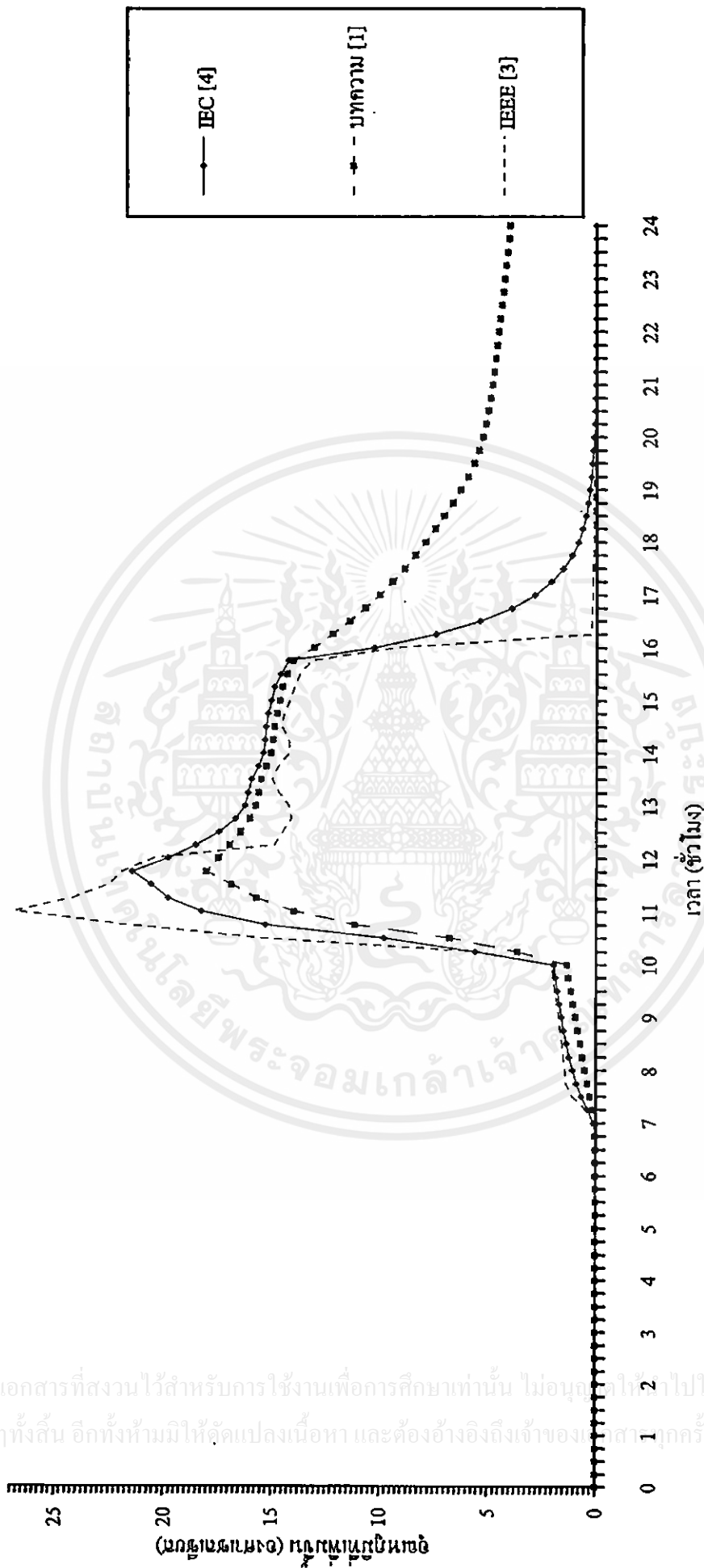


รูปที่ 3.64 Load duty Cycle ข้อมูลจริงจากอาคารสำนักงานของห้องแปลงศาสตราจารย์ขนาด 1250 kVA



รูปที่ 3.65 เปรียบเทียบอุณหภูมิผลทางทฤษฎีต่างๆ ของหม้อแปลงกำลังไฟฟ้าขนาด 1250 kVA จากการทดสอบชอร์ตเตสเตอร์ class F ทำกับ 155 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่ได้รับนำไปใช้



รูปที่ 3.66 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามเวลาที่แตกต่างกัน ของหม้อแปลงกำลังแรงดันไฟฟ้า โดยที่ class F เท่ากับ 155 °C จากการศึกษาขนาด 1250 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีคนนำไปใช้

## บทที่ 4

# ผลการทดสอบหม้อแปลงคาสต์เรซิน

### 4.1 กล่าวนำ

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ ได้ทำการทดสอบหม้อแปลงชนิดแห้ง ที่มีวัสดุฉนวนเป็นแบบคาสต์เรซิน (Dry Type Transformer Cast-Resin Insulation System) โดยการทดสอบเริ่มตั้งแต่วันที่ 8 พฤษภาคม 2541 ถึงเวลา 16.00 น. ในวันที่ 9 พฤษภาคม 2541 ซึ่งการทดสอบใช้วิธีลัดวงจรตลอดระยะเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อหม้อแปลงต่อโหลดลักษณะต่างๆกันหรือมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตลอดเวลานั้นเอง

ในการทดสอบ เพื่อจะทำนายอุณหภูมิ และทำนายหาอายุการใช้งานของหม้อแปลง โดยใช้หลักการ และทฤษฎีที่เสนอมานในบทที่ 2 สำหรับหม้อแปลงทดสอบนั้น ได้ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าไคเนคาสต์ ผลิตภัณฑ์ของ บริษัทไทยตราโพลี แมนูแฟกเจอร์ริง จำกัด ซึ่งมีเนมเพลต (Name Plate) ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงแผ่นป้ายประจำเครื่องของหม้อแปลงชนิดแห้ง

CAST RESIN TRANSFORMER (DYNACAST)	
IEC 726	FREQUENCY = 50 HZ
RATED KVA 1000	PHASE 3
RATED VOLT 12000 / 24000 - 416 V / 240	COOLING TYPE AN / AF
COPPER WINDING	TEMP. CLASS F
RATED AMPERE 48.11 - 24.06 / 1387.86	TOTAL WT. 3900 Kg
VECTOR GROUP Dyn 1	SER. NO. 971026
WINDING TIME COSTANT 45 MIN.	YEAR 1997

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล

ตำแหน่งที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลนั้น มี 12 ตำแหน่ง ที่บริเวณเฟส B ดังนี้

ตำแหน่งที่ 7,8 : บริเวณด้านบนสุดของขดลวดแรงสูง

ตำแหน่งที่ 1,4 : บริเวณด้านบนสุดของขดลวดแรงต่ำ

ตำแหน่งที่ 6,9 : บริเวณด้านล่างสุดของขดลวดแรงสูง

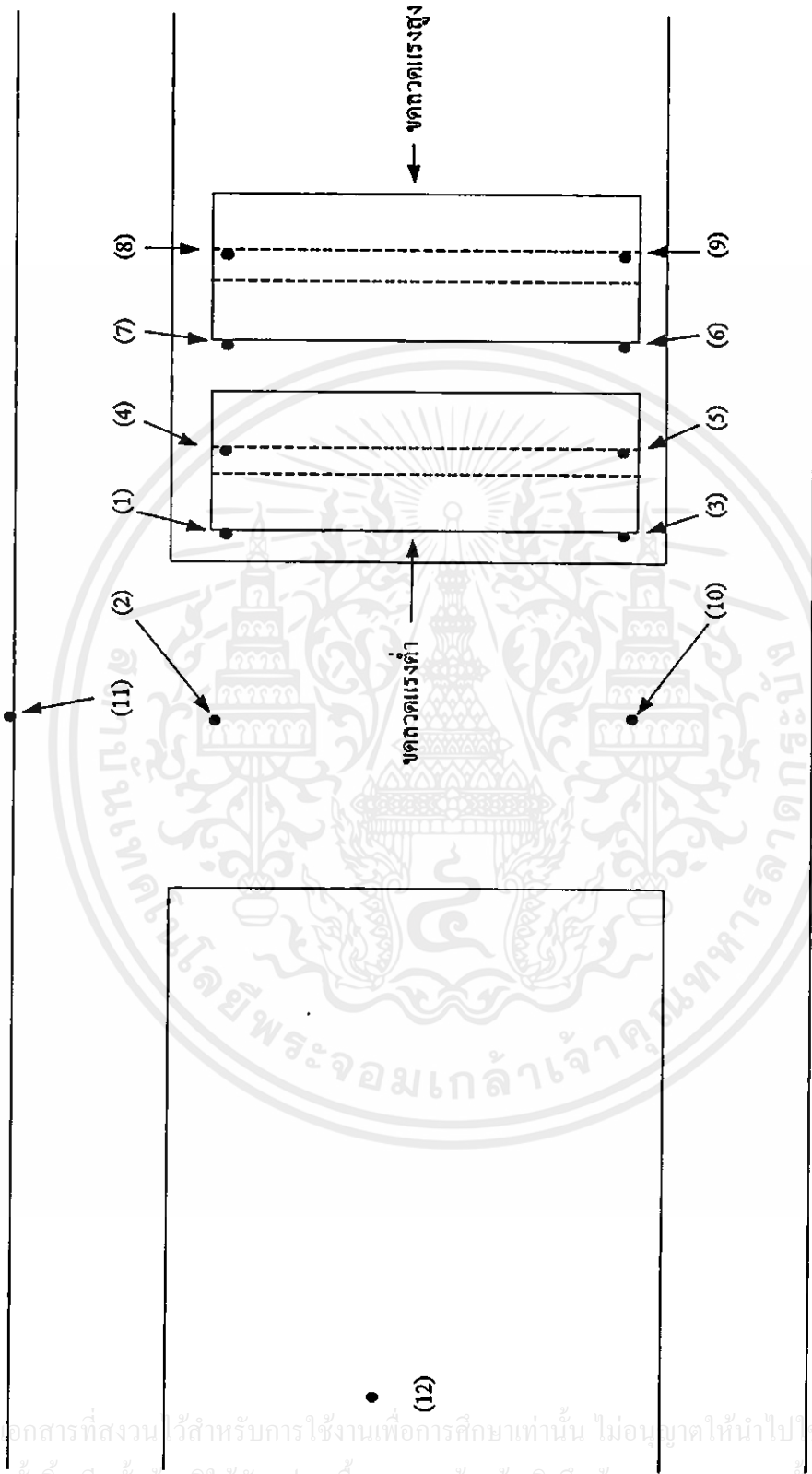
ตำแหน่งที่ 5,3 : บริเวณด้านล่างสุดของขดลวดแรงต่ำ

ตำแหน่งที่ 11 : บริเวณด้านบนสุดของ Top Yoke

ตำแหน่งที่ 2 : บริเวณด้านบนของ Top Core

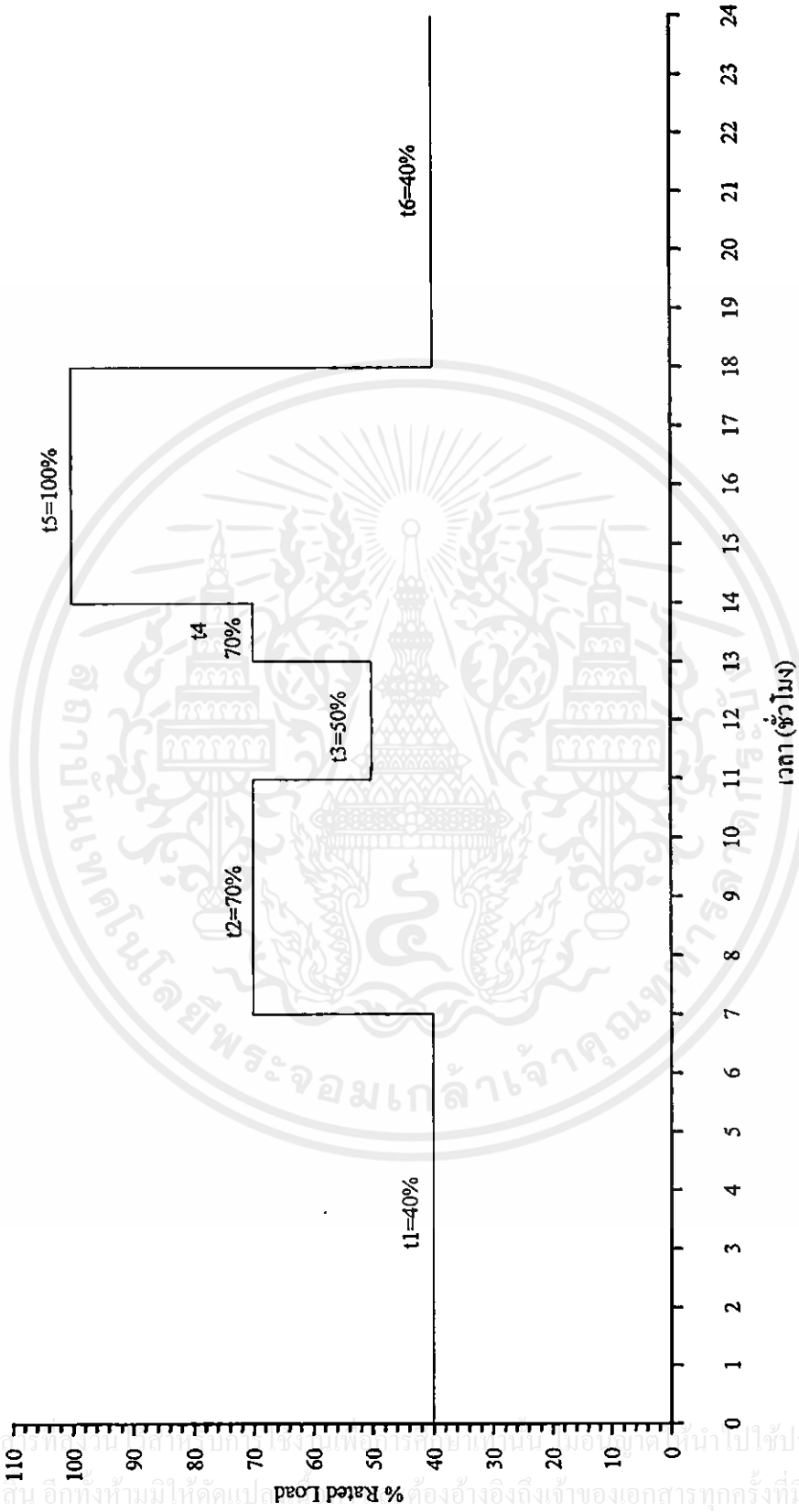
ตำแหน่งที่ 10 : บริเวณด้านล่างของ Bot Core

ส่วนตำแหน่งที่ 12 นั้นจะเป็นตำแหน่งของ Ambient ซึ่งจะวัดอุณหภูมิสภาวะแวดล้อม และจะวางเทอร์โมคัปเปิลบริเวณกึ่งกลางของหม้อแปลง ห่างจากหม้อแปลงประมาณ 2 เมตร ซึ่งตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล สามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.1 ส่วนในรูปที่ 4.2 แสดง Load Duty Cycle ที่ใช้ในการทดสอบหม้อแปลงคาสต์เรซินตามเงื่อนไขที่กำหนดโหลดลักษณะต่างๆ กัน ซึ่งกำหนดให้ใกล้เคียงกับการทำงานจริง [1]



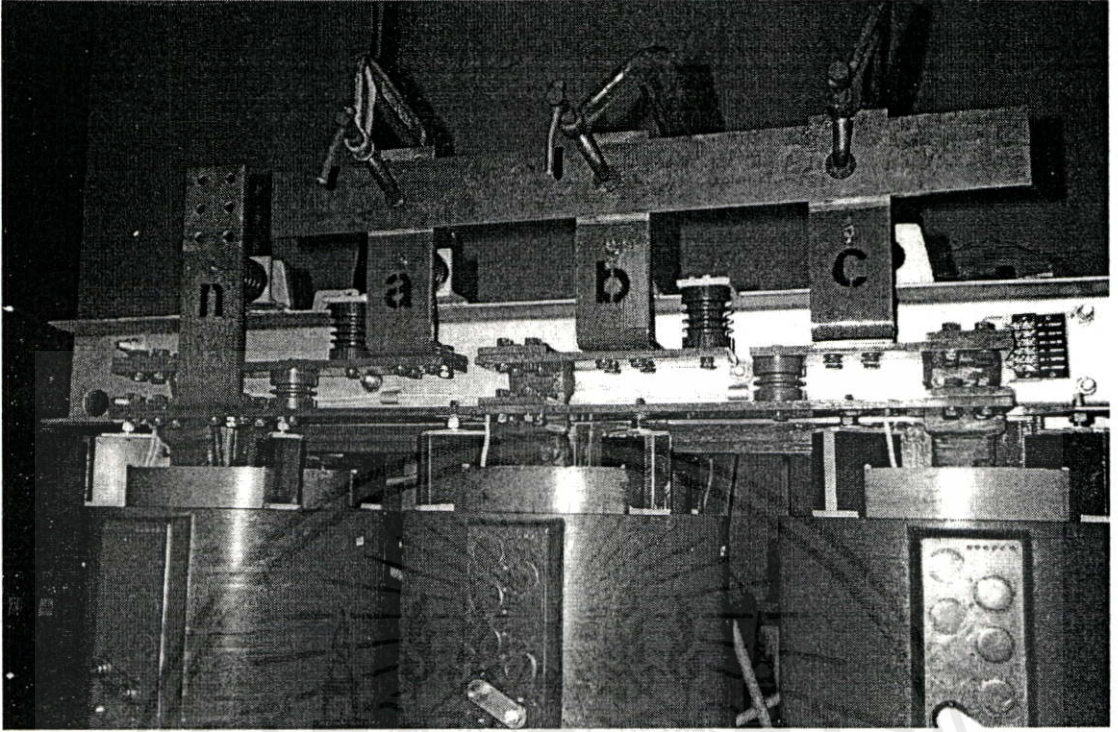
รูปที่ 4.1 แสดงตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลที่ส่วนต่างๆ (เฟส B) ของหม้อแปลงทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

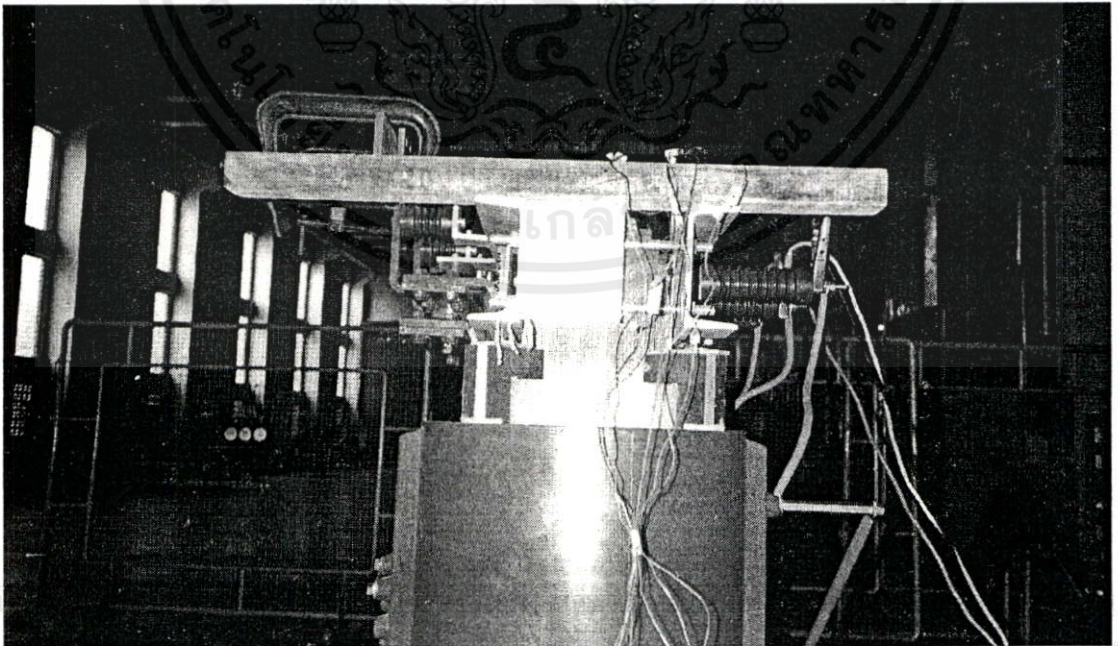


รูปที่ 4.2 แสดงกราฟ Load Duty Cycle ที่ใช้ในการทดสอบหม้อแปลงกำลังที่ช่วงเวลาที่ต่างๆ

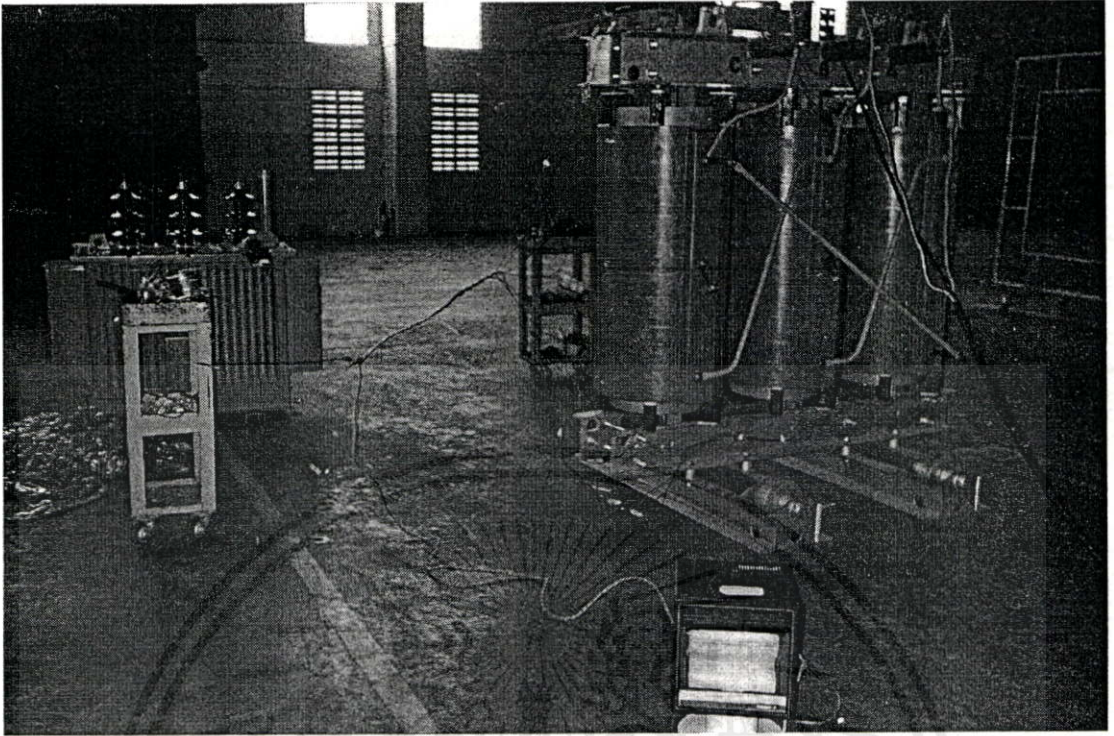
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแป...



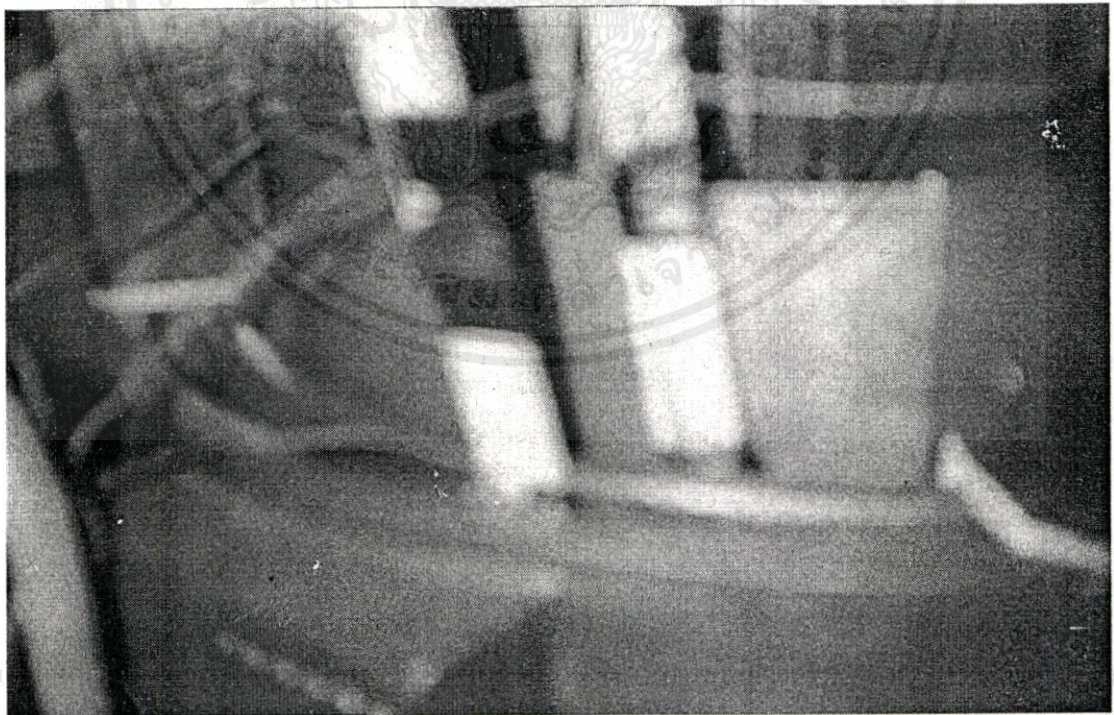
รูปที่ 4.3 แสดงการทดสอบหม้อแปลงขณะตั้งวงจรด้วยแท่งทองแดงเมื่อหม้อแปลงมีการต่อ โหลดลักษณะต่างๆ



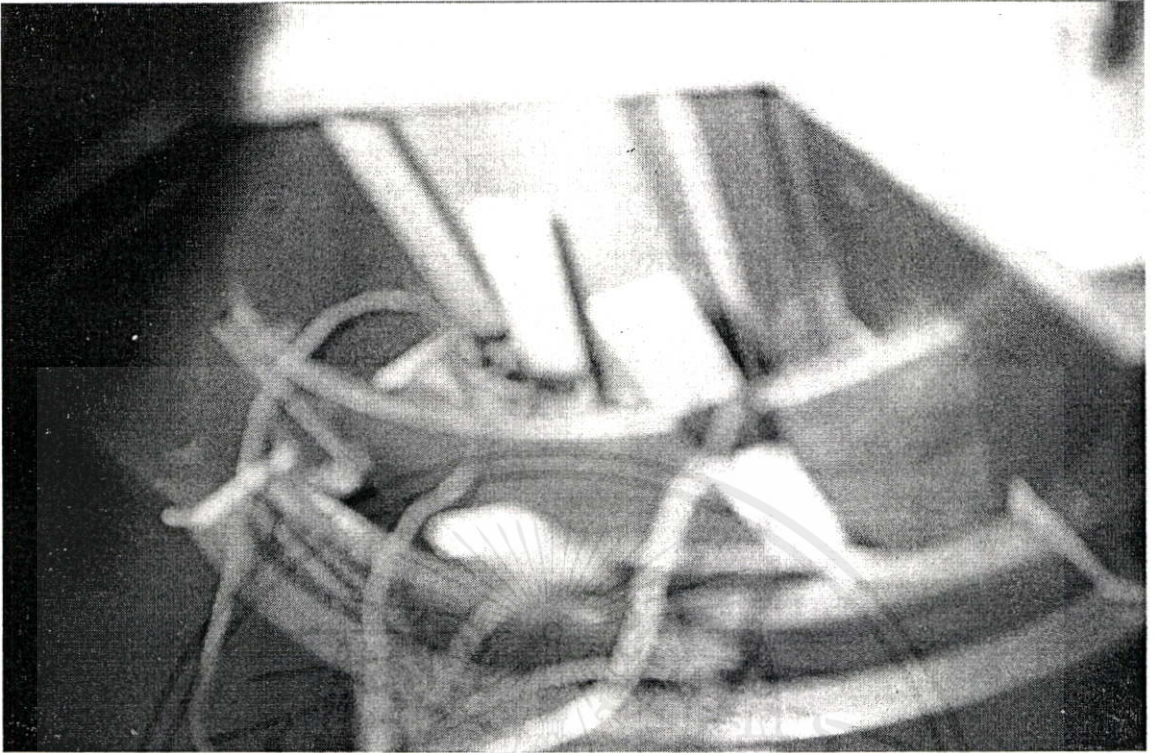
รูปที่ 4.4 แสดงด้านข้างของหม้อแปลงขณะทำการทดสอบอุณหภูมิหรือความร้อน



รูปที่ 4.5 แสดงตำแหน่งของ Ambient และเครื่องมือวัดอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะทำการทดสอบ



รูปที่ 4.6 แสดงตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลบริเวณด้านข้างของหม้อแปลงขณะทำการทดสอบ



รูปที่ 4.7 แสดงการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเปิดตำแหน่งที่ 1,4,7,8 ขณะทำการทดสอบหม้อแปลง



รูปที่ 4.8 แสดงตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลบริเวณด้านล่างของหม้อแปลงขณะทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากอธิการบดีของมหาวิทยาลัย

### 4.3 ผลการทดสอบส่วนที่ 1

ผลจากการทดสอบในส่วนที่ 1 จะเป็นการเปรียบเทียบผลของการทดสอบอุณหภูมิตามตำแหน่งต่างๆ กัน ซึ่งเป็นผลการทดสอบที่ได้จากการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลที่ตำแหน่งต่างๆ ดังนั้น จะมีความสัมพันธ์กันกับรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ดังกราฟที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.9, รูปที่ 4.10, รูปที่ 4.11, รูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13

### 4.4 ผลการทดสอบส่วนที่ 2

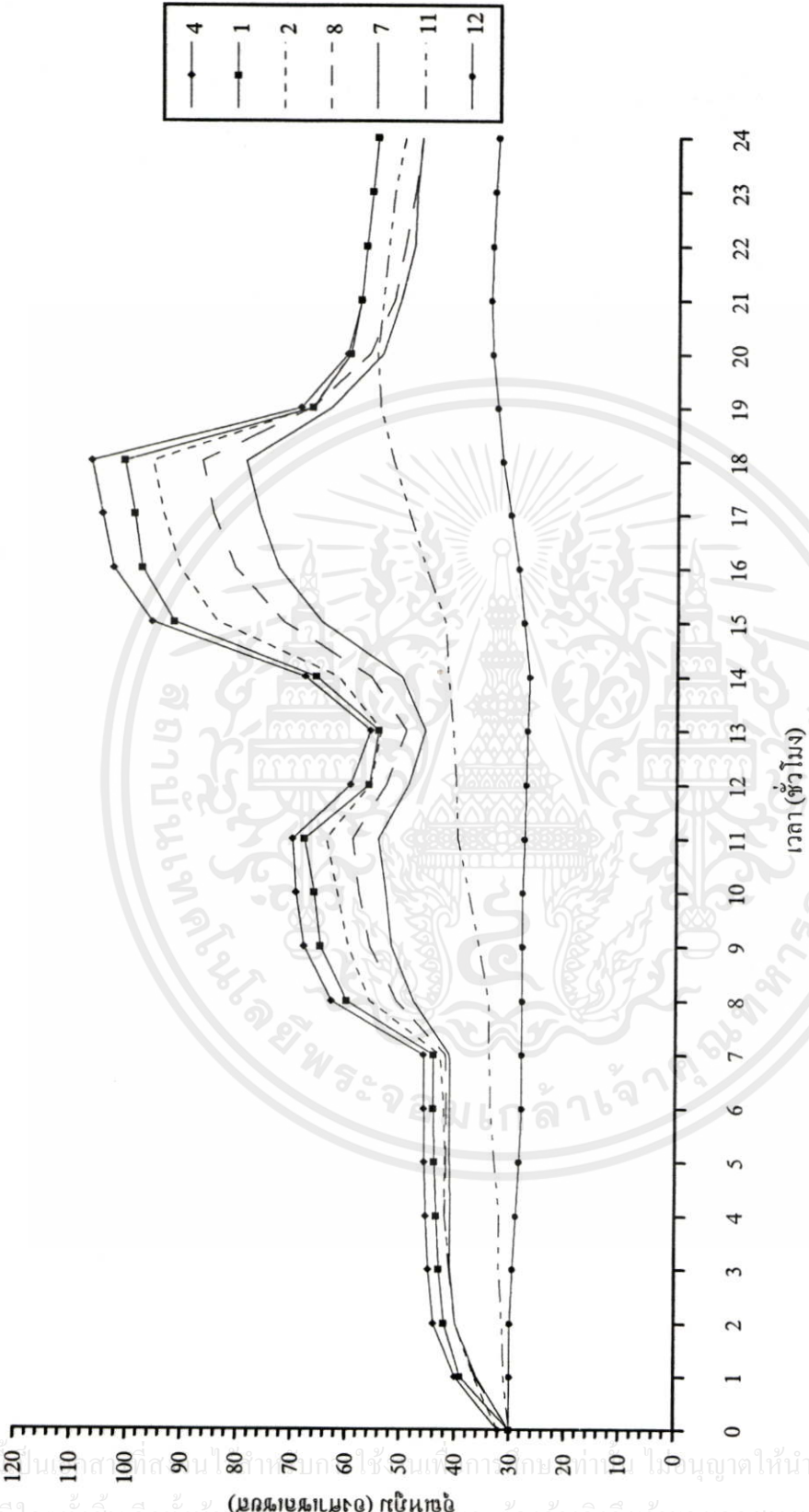
ผลการทดสอบส่วนที่ 2 นี้ได้แสดงไว้ดังในรูปที่ 4.14, รูปที่ 4.15, รูปที่ 4.16 ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กันกับรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.17

โดยที่

รูปที่ 4.14, รูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 เป็นกราฟที่แสดงการเปรียบเทียบผลของการทดสอบที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อหม้อแปลงมีการต่อโหลดลักษณะต่างๆ

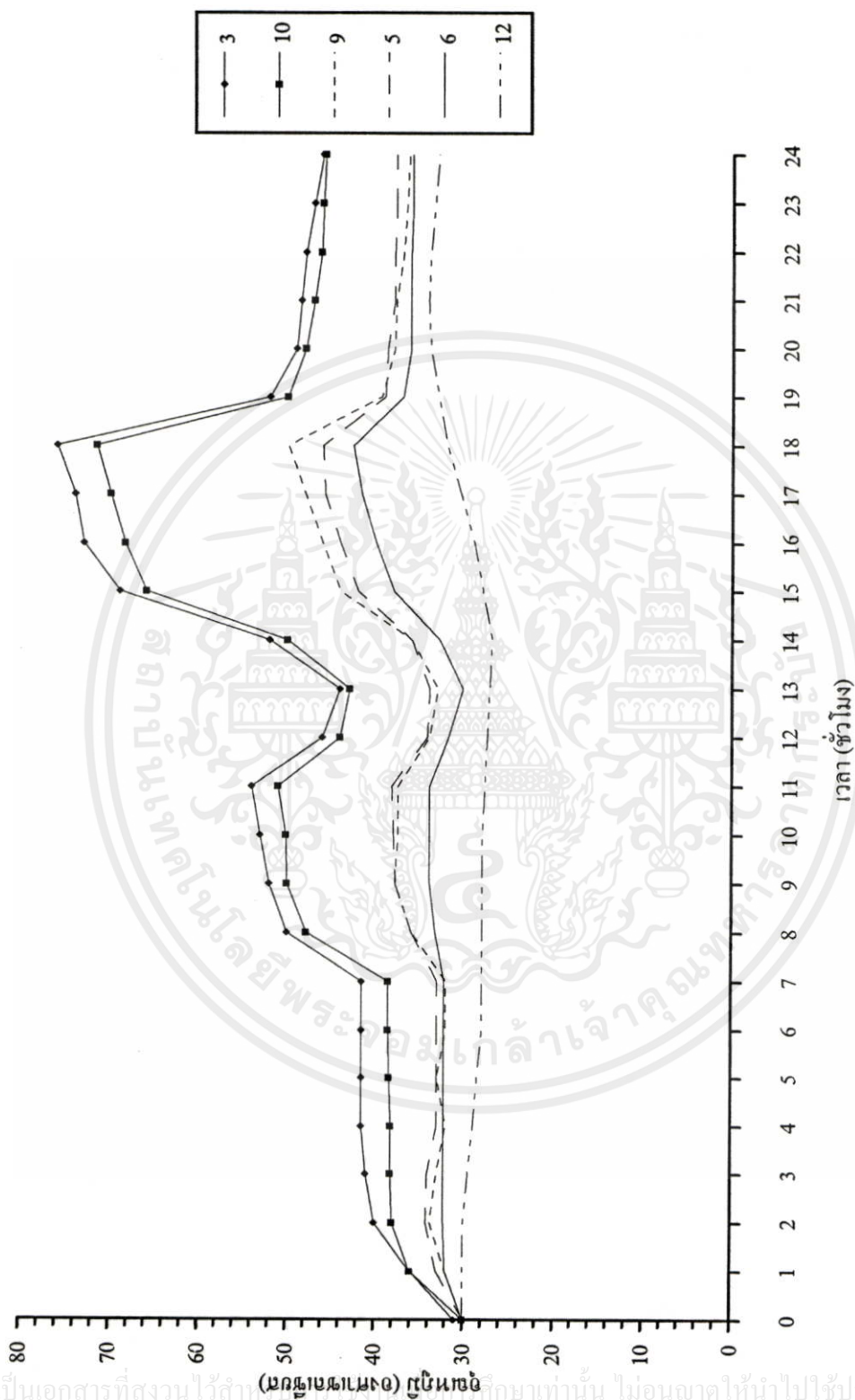
รูปที่ 4.17 แสดงตำแหน่งที่สามารถวัดอุณหภูมิที่ส่วนต่างๆ ของหม้อแปลงที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



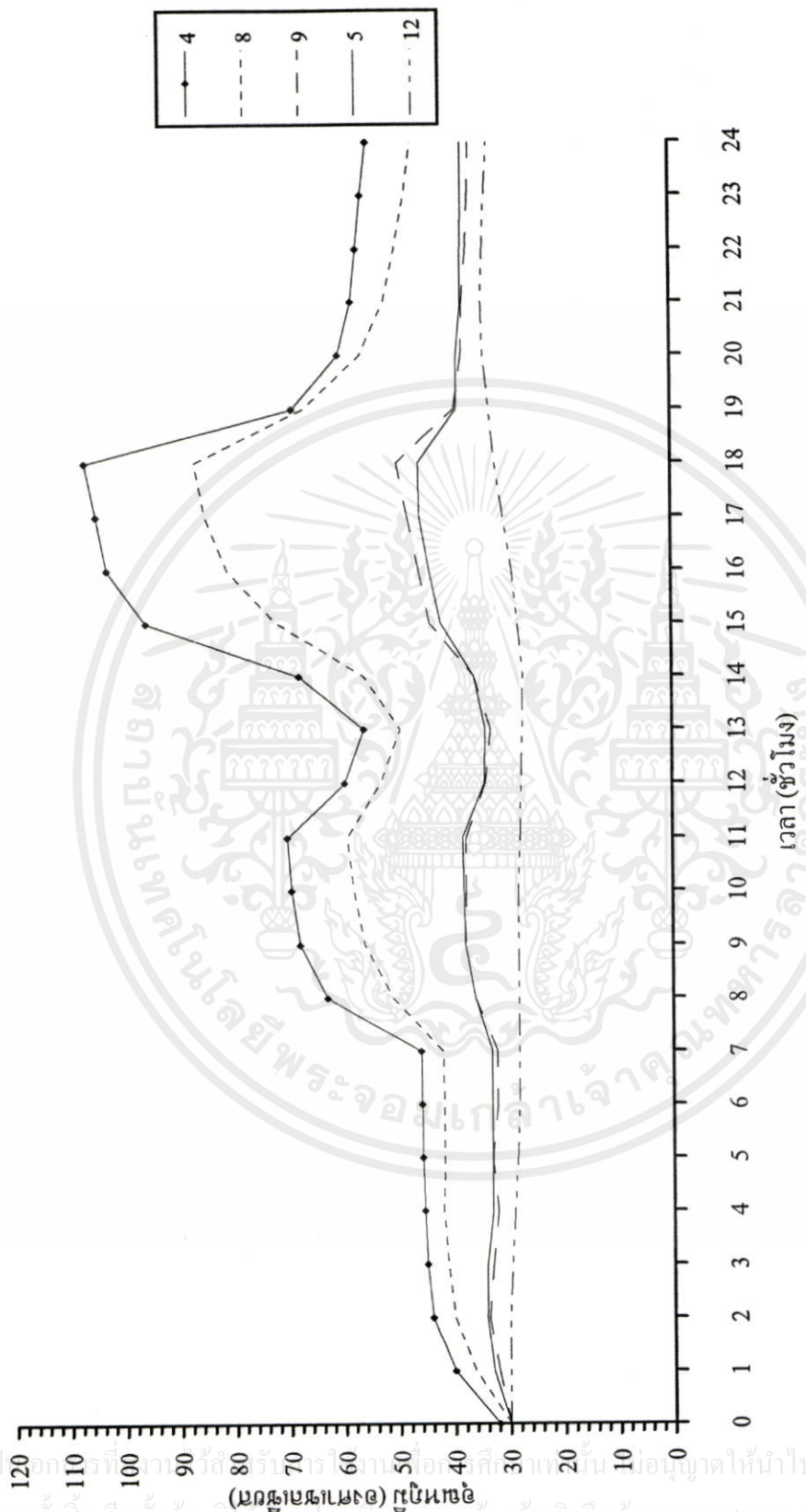
รูปที่ 4.9 แสดงกราฟเปรียบเทียบผลของการทดสอบตำแหน่งที่ 4,1,2,8,7,11 เมื่อหม้อแปลงมีการต่อโหลดลักษณะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือทำซ้ำและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



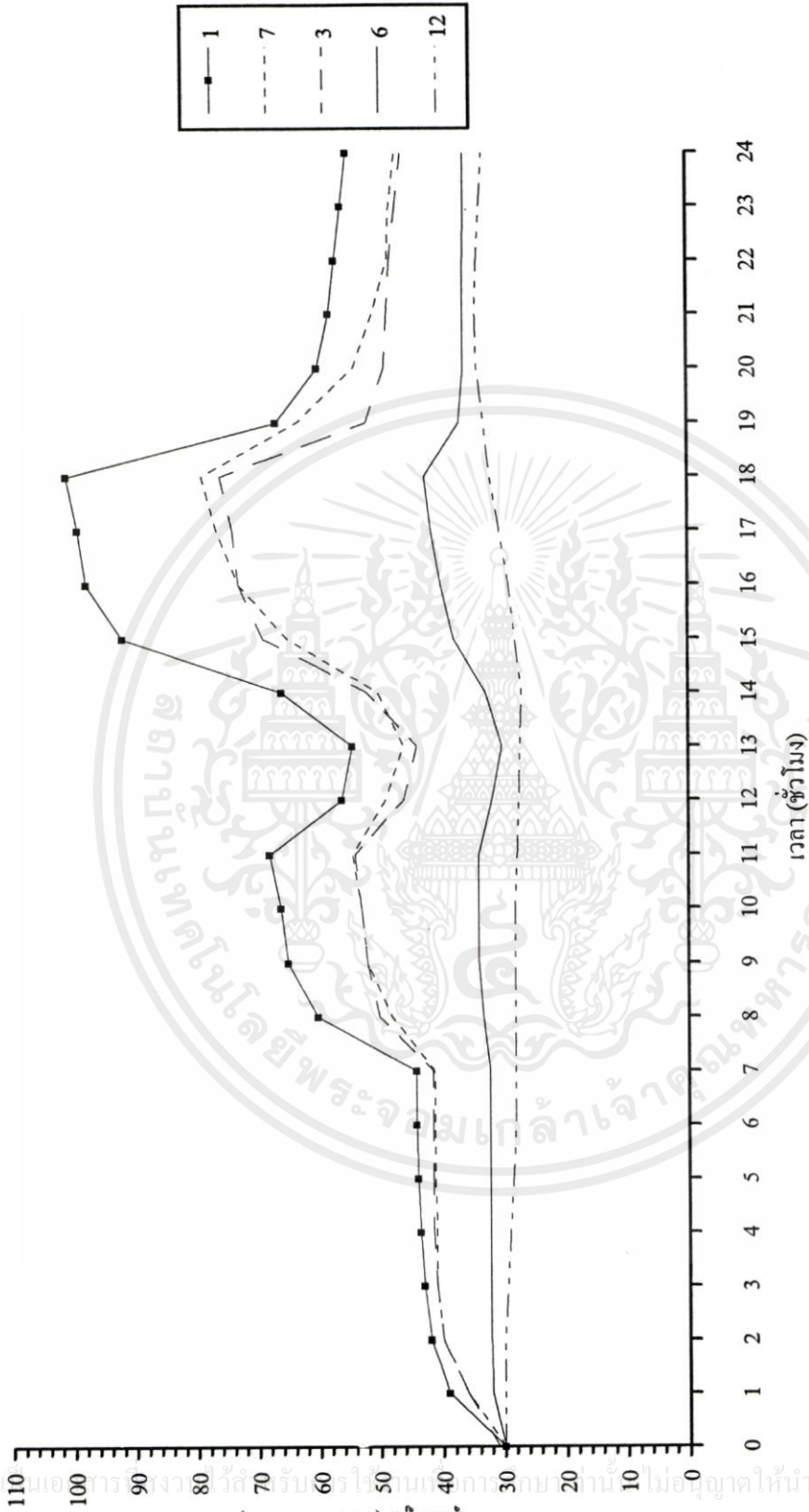
รูปที่ 4.10 แสดงกราฟเปรียบเทียบผลของการทดสอบตำแหน่งที่ 3,10,9,5,6 เมื่อหม้อแปลงมีการต่อโหลดลักษณะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในโรงเรียนการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



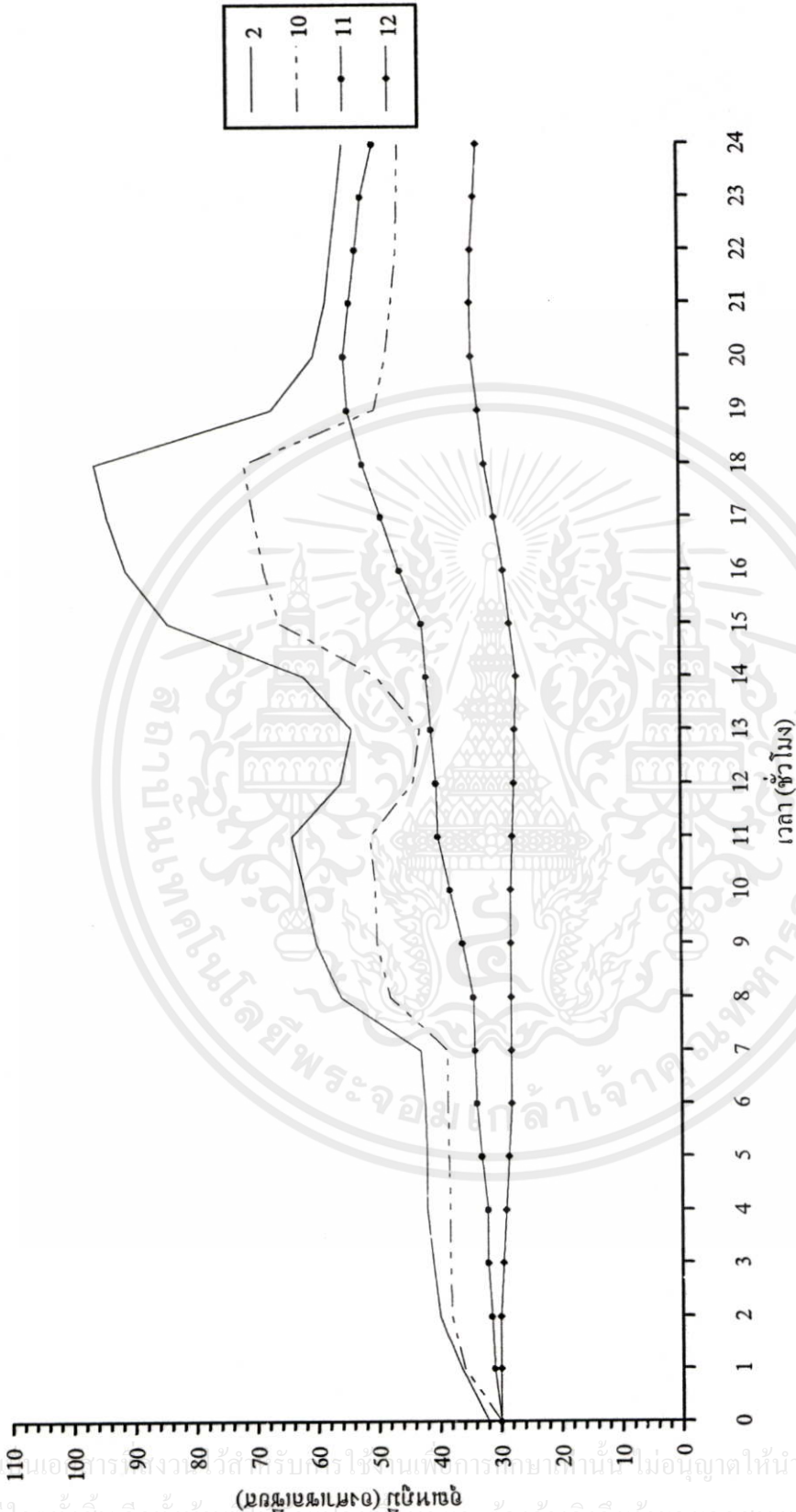
รูปที่ 4.11 แสดงกราฟเปรียบเทียบผลของการทดสอบตำแหน่งที่ 4,8,9,5 เมื่อหม้อแปลงมีการต่อโหลดลักษณะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในวงจำกัดเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



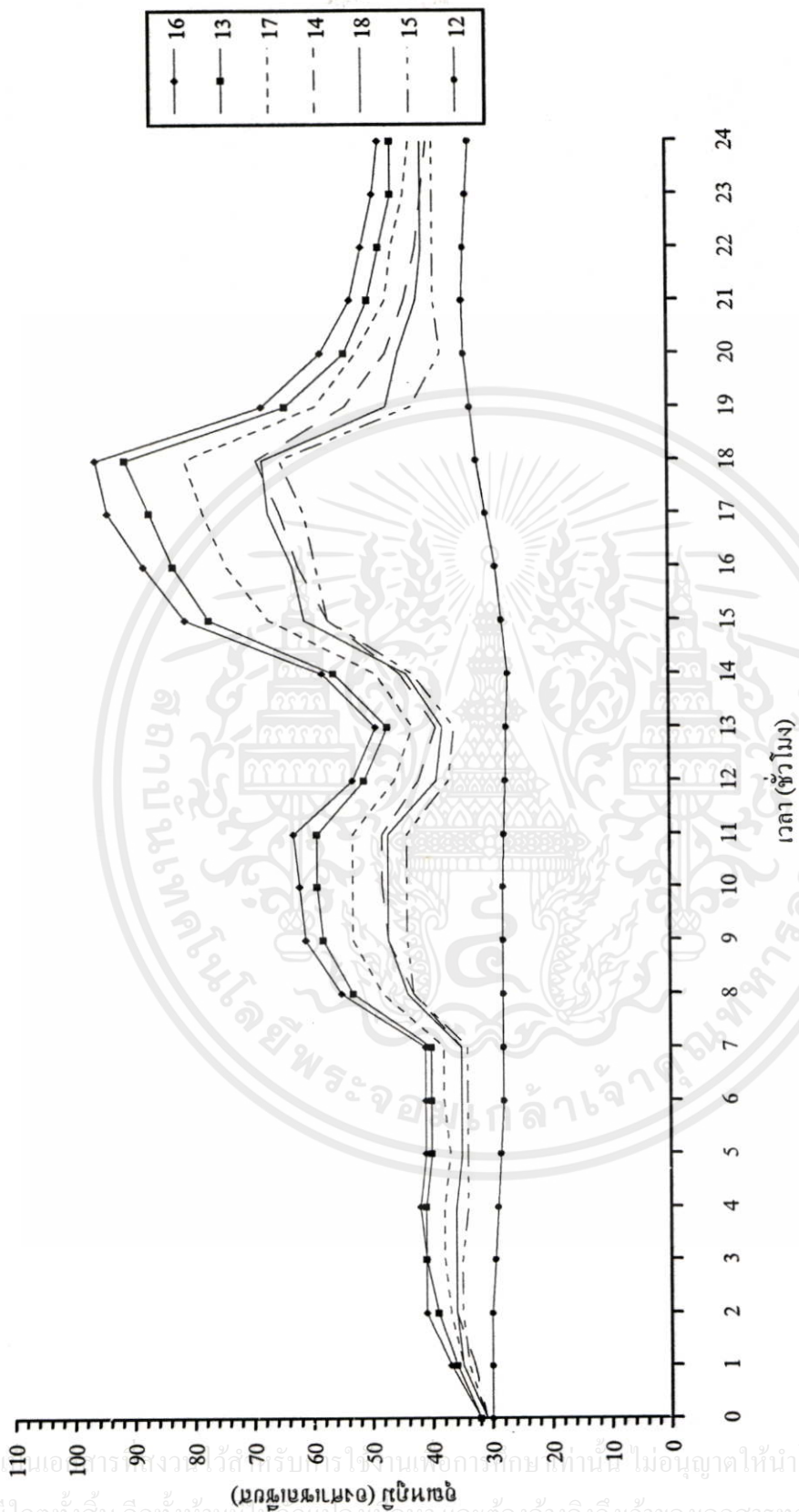
รูปที่ 4.12 แสดงกราฟเปรียบเทียบผลของการทดสอบตำแหน่งที่ 1,7,3,6 เมื่อหัดเปิดมามีการต่อโทดตักขณะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีการเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



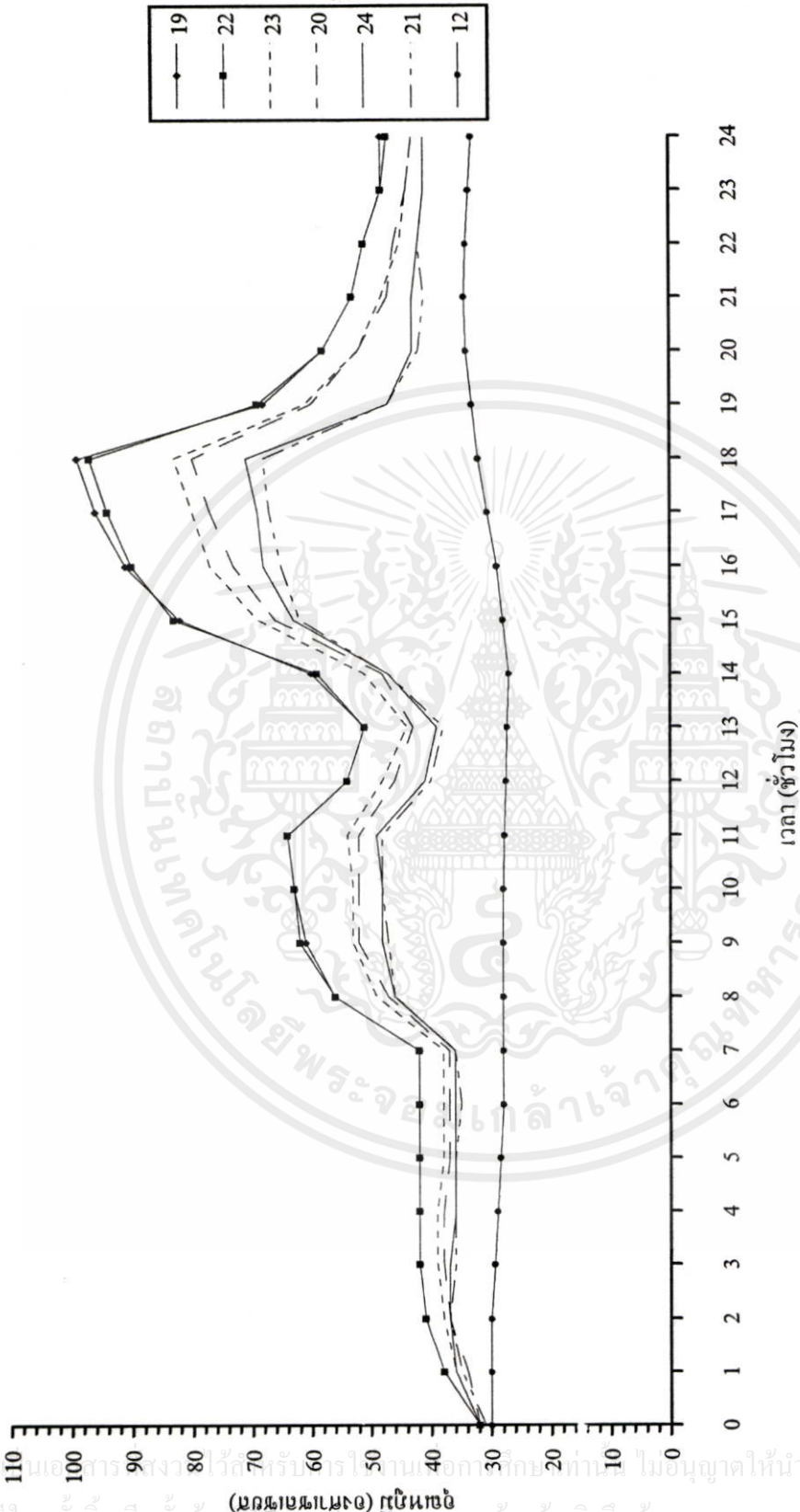
รูปที่ 4.13 แสดงกราฟเปรียบเทียบเกี่ยวกับผลของการทดสอบตำแหน่งที่ 2,10,11,12 เมื่อหม้อแปลงมีการต่อ โหลดลักษณะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



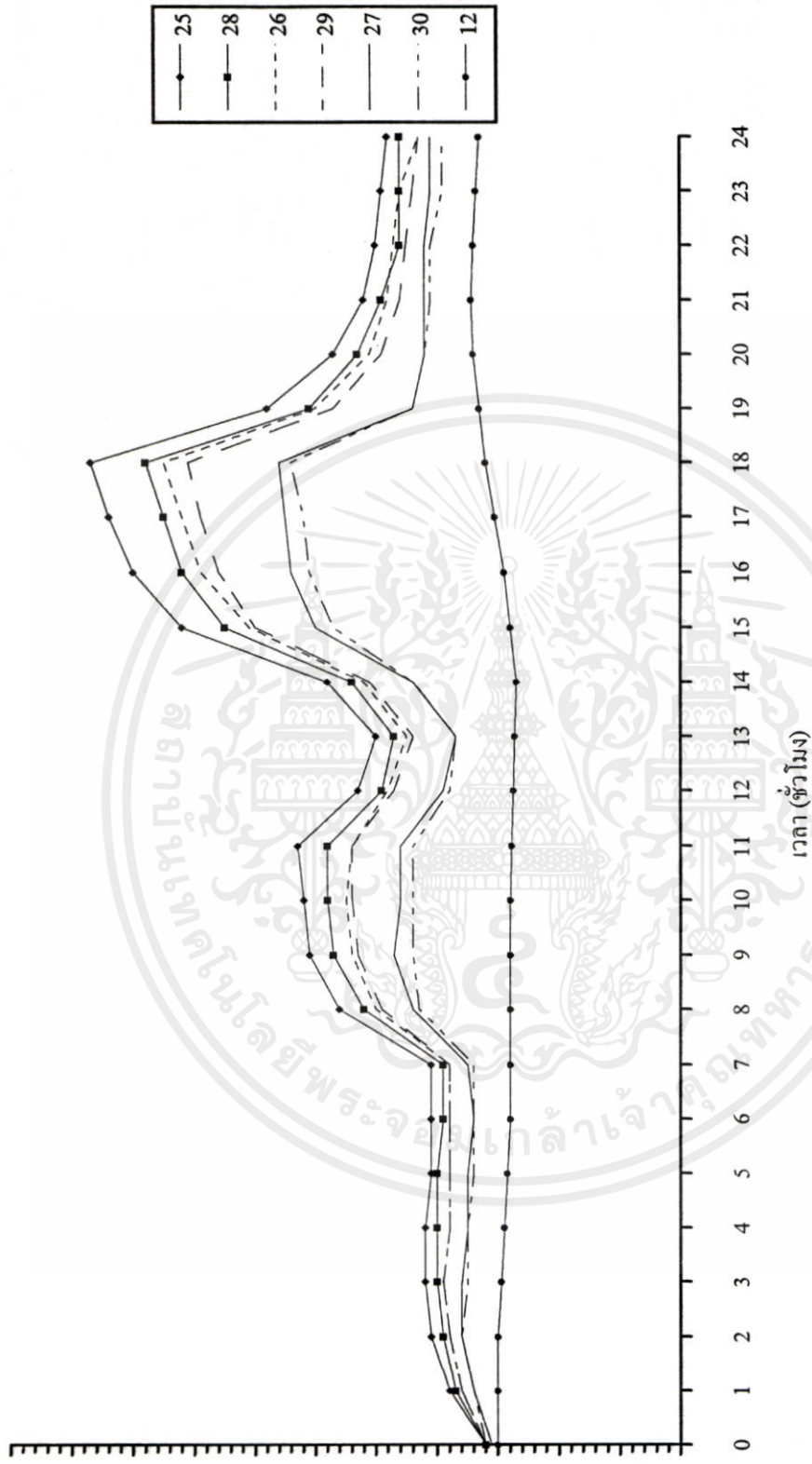
รูปที่ 4.14 แสดงกราฟเปรียบเทียบผลของการทดสอบตำแหน่งที่ 16,13,17,14,18,15 เมื่อหม้อแปลงมีการต่อโหลดลักษณะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไว้สำหรับให้โรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



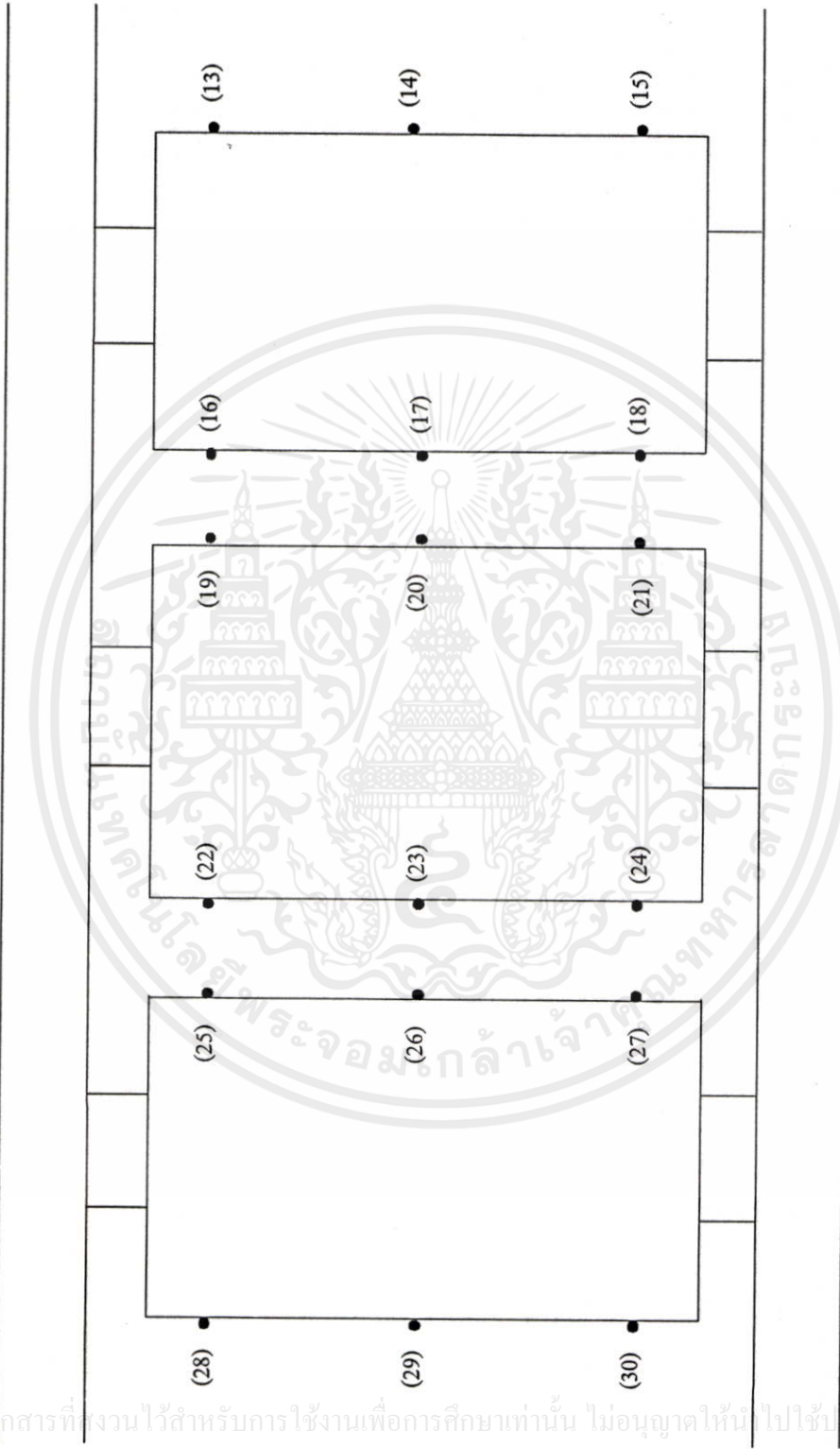
รูปที่ 4.15 แสดงกราฟเปรียบเทียบผลของการทดสอบตำแหน่งที่ 19,22,23,20,24,21 เมื่อหม้อแปลงมีการต่อโหลดลักษณะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับเราในนามของภาควิชาฯ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แสดงกราฟเปรียบเทียบผลของการทดสอบตำแหน่งที่ 25,28,26,29,27,30 เมื่อหม้อแปลงมีการต่อโหลดลักษณะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเปิดเผยแหล่งที่มา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 แสดงตำแหน่งที่สามารถวัดอุณหภูมิที่ส่วนต่างๆ (เฟส A,B,C) ของหม้อแปลงทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.5 ผลการทดสอบส่วนที่ 3

ผลจากการทดสอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.18 และรูปที่ 4.19

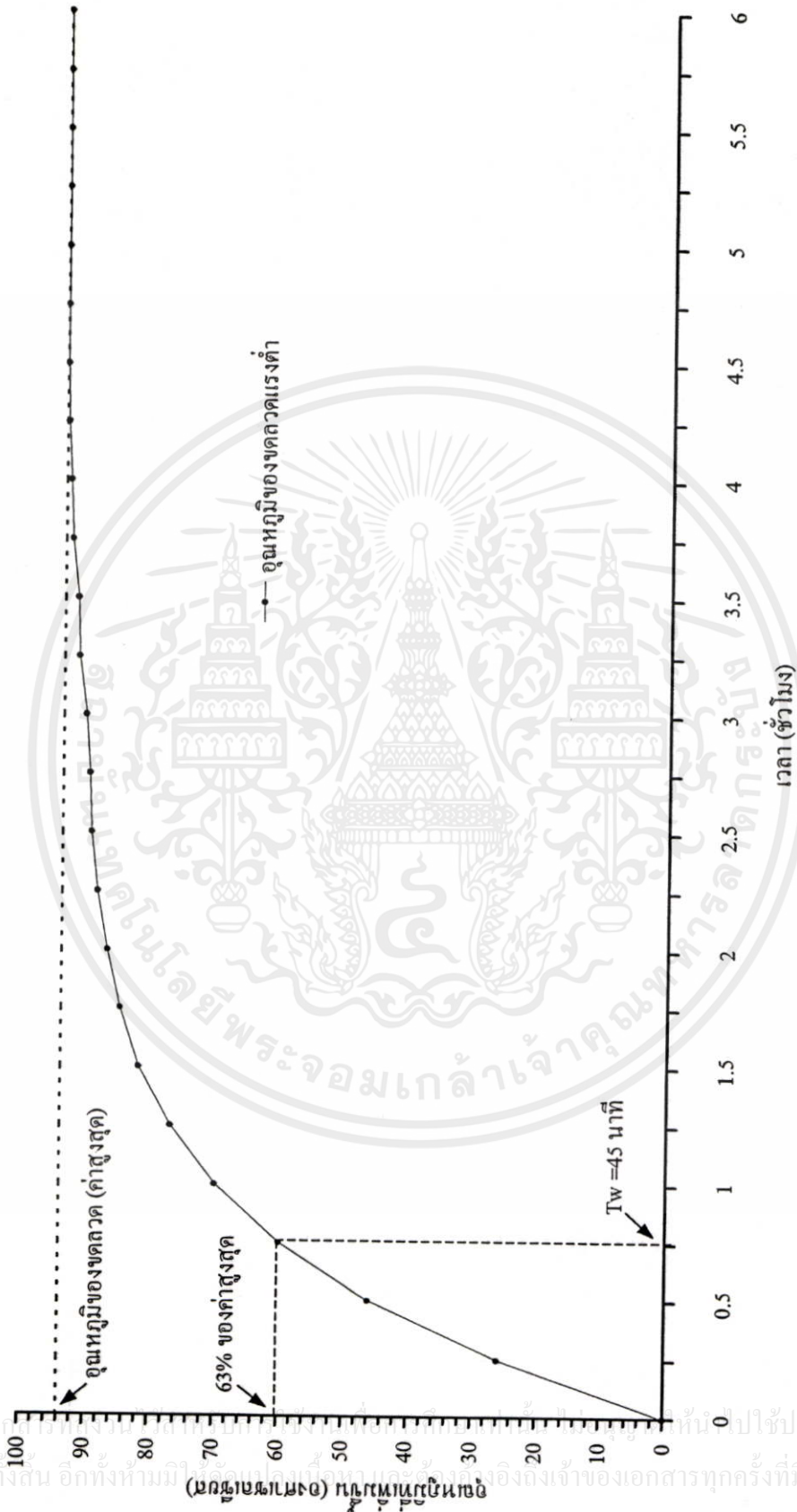
โดยที่

รูปที่ 4.18 เป็นกราฟซึ่งแสดงวิธีการหาไวน์ดิง ไทม์คอนสแตนท์ (Winding Time Constant) และอุณหภูมิเกรเดียนต์ (Temperature gradient)

รูปที่ 4.19 เป็นกราฟที่แสดงการเปรียบเทียบผลของการทดสอบตำแหน่งที่ 4 กับผลทางทฤษฎีจากข้อกำหนดในมาตรฐาน IEEE [3], IEC [4] และทฤษฎีจากบทความ [1], [2] เมื่อหม้อแปลงมีการต่อโหลดลักษณะต่างๆ

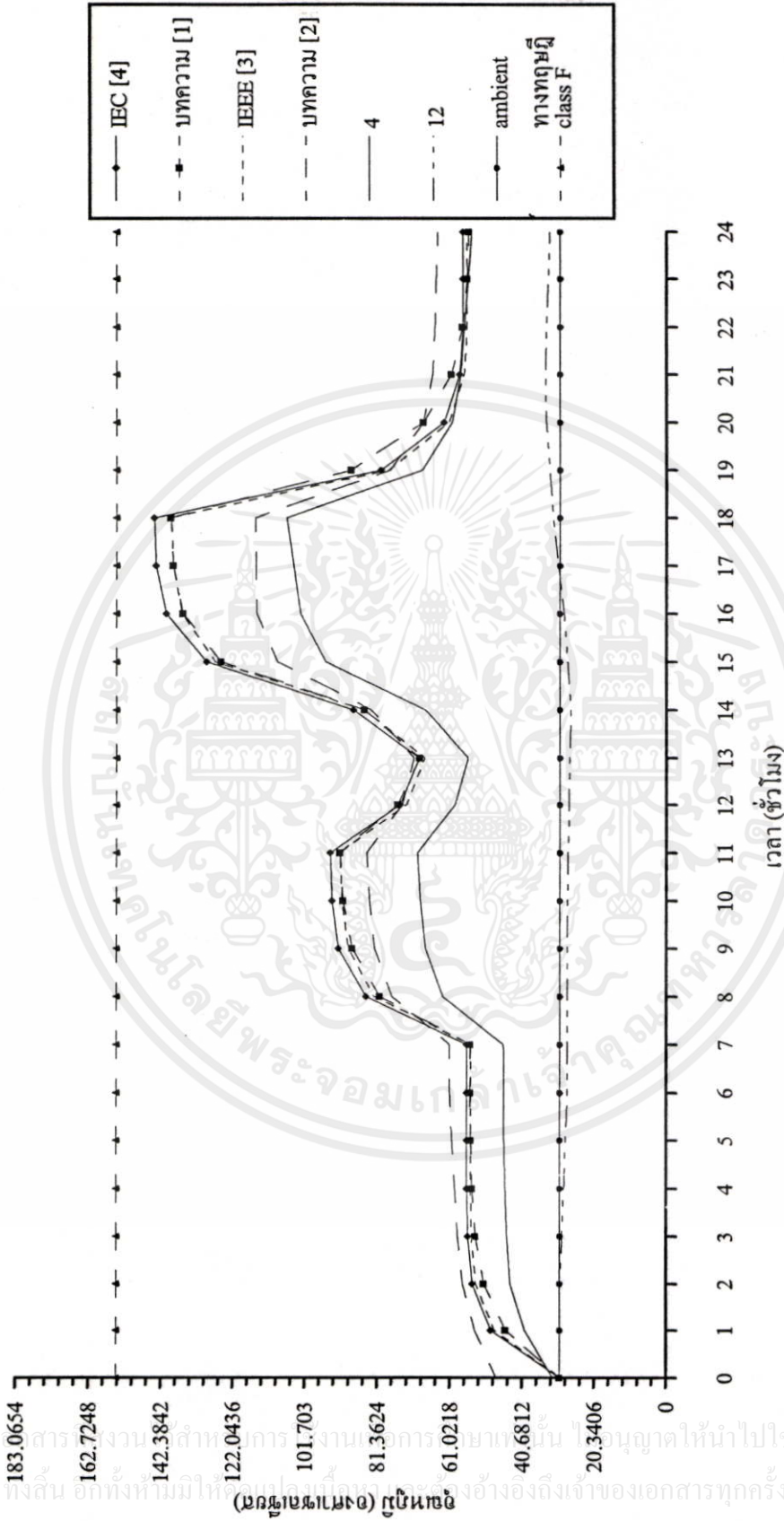


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 แสดงวิธีการหาค่าไว้นิ่งใหม่คอนสแตนต์ (Tw) และจุดของขดลวดแรงต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้เพื่อการค้าหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 แสดงกราฟเปรียบเทียบผลจากการทดสอบตำแหน่งที่ 4 กับผลทางทฤษฎีเมื่อหม้อแปลงมีการต่อโหลดลักษณะต่างๆ

## บทที่ 5

### วิเคราะห์ผลงานวิจัย

#### 5.1 วิเคราะห์ผลของการทำนายอุณหภูมิโดยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์

หลังจากเขียนโปรแกรมเสร็จแล้วได้นำตัวอย่างมาเป็นเครื่องมือในการตรวจสอบความถูกต้องของซอฟต์แวร์ต่างๆ คือ บทความ [1], บทความ [2], IEEE [3], IEC [4] สามารถให้ผลใกล้เคียงกันและนำไปใช้งานได้ โดยที่ตัวอย่างขนาดของหม้อแปลงและ Load duty cycle ที่นำเสนอเท่ากับ 20 ตัวอย่าง สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

##### 5.1.1 หม้อแปลงคาสต์เรซินตัวเดียวกันแล้วทำการเปลี่ยน Load duty cycle

สำหรับการทำนายอุณหภูมิโดยซอฟต์แวร์นั้น สามารถใช้หม้อแปลงตัวเดียวกันหรือพิกัดเดียวกัน แล้วทำการต่อโหลดในลักษณะต่างๆ กัน (Vary load) ซึ่งสามารถกำหนด Load duty cycle เองได้ ในการกำหนดโหลดสภาวะต่างๆ กันนั้น เพื่อจะได้สังเกตเห็นค่า อุณหภูมิฮอตเทสสปีดหลายสภาวะของหม้อแปลงที่มีการต่อโหลดเทียบกับเวลา ถ้ากำหนดให้หม้อแปลงต่อโหลดเป็น 50 เปอร์เซ็นต์ Rated load จะทำให้มีอุณหภูมิฮอตเทสสปีดไม่สูงมากนักแต่ถ้าเปลี่ยนแปลงโหลดเป็น 150 เปอร์เซ็นต์ Rated load แล้วจะทำให้อุณหภูมิฮอตเทสสปีดสูงขึ้นเกินกว่าที่ฉนวน (Class F = 155 °C) จะทนทานได้จึงทำให้ความร้อนบนทองฉนวนคาสต์เรซินเสื่อมสภาพลง เป็นผลให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงสั้นลง อันเนื่องมาจากความร้อนสูงนั่นเอง และอุณหภูมิสูงมากๆ มีผลกระทบต่อหม้อแปลงจึงทำให้หม้อแปลงเกิดความเสียหายได้ ฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่าอายุการใช้งาน ความร้อนเวลาในการต่อโหลดจะมีความสัมพันธ์กัน

##### 5.1.2 วิเคราะห์โปรแกรม

ซอฟต์แวร์ต่างๆ ที่สร้างขึ้นนี้สามารถนำมาเป็นเครื่องมือเพื่อใช้ในการทำนายค่าอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้ง ทำให้สามารถรู้อุณหภูมิและกำหนดโหลดให้ล่วงหน้าได้ กล่าวคือ ค่าอุณหภูมิที่ได้นี้สามารถนำไปพิจารณาในการทำนายความสามารถในการรับโหลดของหม้อแปลงได้ ว่าสามารถเพิ่มภาระให้กับหม้อแปลงได้เต็มที่เท่าไร จึงไม่ทำให้หม้อแปลงแบบแห้งเกิดความเสียหายได้ เนื่องจากอุณหภูมิสูงจากโหลดนั่นเอง ฉะนั้นสามารถที่จะกำหนดโหลดใช้

งานเข้ากับหม้อแปลงให้เกิดประโยชน์สูงสุดได้ การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะวิธีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 วิเคราะห์ Load duty cycle จากการใช้งานจริงของหม้อแปลงขนาด 1000 kVA 1250 kVA

โดยที่ผลของการทำนายค่าอุณหภูมิโดยซอฟต์แวร์ ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้ง ขนาด 1000 kVA 1250 kVA ตามลำดับ ซึ่งมีลักษณะของ Load duty cycle โดยใช้ข้อมูลจากการใช้งานจริงจากอาคารสำนักงาน ตลอดระยะเวลา 24 ชั่วโมง การต่อโหลดเข้ากับหม้อแปลงนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงทุกๆ 15 นาที

จากรูปที่ 3.61, 3.62 และ 3.63 ใช้หม้อแปลงขนาด 1000 kVA จะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบผลอุณหภูมิจากการทำนายแล้วซอฟต์แวร์ IEEE [3] จะมีค่าการขยายตัวและหดตัวของอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงตามลักษณะของการต่อโหลดได้ใกล้เคียงมากที่สุด รองลงมาก็คือ ซอฟต์แวร์ IEC [4], บทความ [1] ตามลำดับ และช่วงระยะเวลาของการต่อโหลดสูงสุดอยู่ชั่วโมงที่ 11 กับอีก 15 นาที เท่ากับ 8.414 เปอร์เซ็นต์ rated load มีอุณหภูมิฮอตเทสสปีกเท่ากับ  $32.093^{\circ}\text{C}$  และมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ  $2.093^{\circ}\text{C}$  จะสังเกตเห็นว่าอุณหภูมิฮอตเทสสปีกนี้ ไม่มีผลกระทบต่อหม้อแปลงเลยและชั่วโมง ที่ 0 ถึง 6, 19 ถึง 24 ไม่มีการต่อโหลด หรือเป็นช่วงเวลาที่ไม่มีการใช้พลังงานไฟฟ้า จึงมีค่าอุณหภูมิฮอตเทสสปีกเท่ากับอุณหภูมิสถานะแวดล้อมเป็น  $30^{\circ}\text{C}$  และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของหม้อแปลงเท่ากับ  $0^{\circ}\text{C}$  ฉะนั้นชั่วโมงที่ 11 กับอีก 15 นาที มีเปอร์เซ็นต์การคลาดเคลื่อนระหว่างบทความ [1] กับ IEEE [3] เท่ากับ 1.832 เปอร์เซ็นต์, IEEE [3] กับ IEC [4] เท่ากับ 0.430 เปอร์เซ็นต์, IEC [4] กับ บทความ [1] เท่ากับ 1.408 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการต่อโหลดตลอดระยะเวลา 24 ชั่วโมง เข้ากับหม้อแปลงซึ่งมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ  $2.093^{\circ}\text{C}$  จึงเปรียบเสมือนว่าหม้อแปลงไม่มีการต่อโหลด เพราะค่าอุณหภูมิฮอตเทสสปีกมีค่าน้อยนั่นเอง จึงไม่มีผลกระทบต่อฉนวนคาสต์เรซิน และถ้าอุณหภูมิเป็นเช่นนี้ตลอดหลายปีจะทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงเพิ่มขึ้นมีอายุยาวนานหลายปีด้วย

จากรูปที่ 3.64 , 3.65 และ 3.66 ใช้หม้อแปลงขนาด 1250 kVA จะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบผลอุณหภูมิจากการทำนายแล้วซอฟต์แวร์ IEEE [3] จะมีค่าการขยายตัวและหดตัวของอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงตามลักษณะของการต่อโหลดได้ใกล้เคียงมากที่สุด รองลงมาก็คือ ซอฟต์แวร์ IEC [4] , บทความ [1] ตามลำดับ และช่วงระยะเวลา ของการต่อโหลดสูงสุดอยู่ชั่วโมงที่ 10 กับอีก 45 นาที เท่ากับ 42.195 เปอร์เซ็นต์ rated load มีอุณหภูมิฮอตเทสสปีก เท่ากับ  $51.896^{\circ}\text{C}$  และมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ  $21.896^{\circ}\text{C}$  จะสังเกตเห็นว่าอุณหภูมิฮอตเทสสปีกสูงสุดอยู่ชั่วโมงที่ 1: เท่ากับ  $56.823^{\circ}\text{C}$  ทั้งนี้เป็นเพราะความร้อนได้สะสมไว้ก่อนหน้านี้ ส่วนชั่วโมงที่ 0 ถึง 5 ไม่มีการต่อโหลดเลยหรือเป็นช่วงเวลาที่ไม่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเลยจึงมีค่าอุณหภูมิฮอตเทสสปีกเท่ากับอุณหภูมิสถานะแวดล้อมเป็น  $30^{\circ}\text{C}$  และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของหม้อแปลงในช่วงนี้เท่ากับ  $0^{\circ}\text{C}$

ฉะนั้นเส้นกราฟของ ซอฟต์แวร์ต่างๆ จะมีลักษณะที่ขนานกัน ซึ่งชั่วโมงที่ 11 มีเปอร์เซ็นต์การคลาดเคลื่อนระหว่าง บทความ [1] กับ IEEE [3] เท่ากับ 22.684 เปอร์เซ็นต์, IEEE [3] กับ IEC [4] เท่ากับ 15.109 เปอร์เซ็นต์, IEC [4] กับ บทความ [1] เท่ากับ 8.923 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นข้อมูลจากการทำนายอุณหภูมิโดยซอฟต์แวร์ครั้งนี้ เป็นข้อมูลจริงจึงสามารถนำมาเป็นต้นแบบในการทำนายอุณหภูมิฮ็อตเทสปีดครั้งต่อไปได้ด้วย

### 5.3 วิเคราะห์การเปรียบเทียบผลการทดสอบทางปฏิบัติ (ทุกตำแหน่งที่ทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล)

การทดสอบหม้อแปลงนั้น ได้ทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลทั้งหมด 12 ตำแหน่งด้วยกันซึ่งจากรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.9 จะสังเกตเห็นว่าตำแหน่งที่ 4 มีอุณหภูมิ  $107^{\circ}\text{C}$  หรือความร้อนสูงสุดกว่าตำแหน่งอื่นๆ สาเหตุเนื่องมาจากว่า ตำแหน่งที่ 4 เป็นบริเวณที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ด้านบนสุดของขดลวดแรงต่ำ ซึ่งขดลวดตัวนำจะมีความร้อนได้ก็เนื่องมาจากการต่อโหลดเข้ากับหม้อแปลงเปลี่ยนแปลงไปเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ rated load เป็นเวลา 4 ชั่วโมงมีอุณหภูมิสูงสุดชั่วโมงที่ 18 ทำให้อุณหภูมิหรือความร้อนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับโหลดที่มาต่อเข้ากับหม้อแปลง และสาเหตุอีกประการหนึ่ง เนื่องมาจากว่าการถ่ายเทความร้อนลอยตัวสูงขึ้นสู่ด้านบนของหม้อแปลงที่บริเวณ Air duct ก็เป็นเพราะว่าโดยธรรมชาติแล้วอุณหภูมิหรือความร้อนสูงจะลอยตัวสูงขึ้นสู่อากาศหรือด้านบนสุดของหม้อแปลงนั่นเอง

ส่วนตำแหน่งที่ 11 เป็นบริเวณด้านบนสุดของ Top Yoke จะสังเกตว่าอุณหภูมิจะใกล้เคียงหรือเกือบเท่ากับอุณหภูมิสภาวะแวดล้อมเลยทีเดียว เป็นเพราะว่าตำแหน่งที่ 11 นั้น เป็นบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนได้ดีโดยอากาศและเป็นบริเวณด้านบนสุดซึ่งอุณหภูมิหรือความร้อนสามารถจะระบายหรือลอยตัวสูงขึ้นได้ดีกว่าตำแหน่งอื่น

สำหรับทุกๆ ตำแหน่งที่มีการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลนั้นจะสังเกตเห็นว่าค่าอุณหภูมิหรือเส้นกราฟทุกรูปที่ได้จากการทดสอบตลอดเวลา 24 ชั่วโมง จะมีลักษณะที่ขนานกันทุกตำแหน่งบนหม้อแปลง และการขยายตัวและหดตัวของอุณหภูมิภายในหม้อแปลงไม่ได้เป็นสมการเส้นตรงแต่เป็นสมการแบบ เอกซ์โปเนนเชียล (Exponential) และอุณหภูมิจะต่ำและสูงตามจุดต่างๆ ของหม้อแปลงและตามสภาวะการต่อโหลดในลักษณะต่างๆ กัน (Vary load) เข้ากับหม้อแปลงนั้นๆ ตามอุณหภูมิสภาวะแวดล้อมแต่ละพื้นที่หรือประเทศนั้นๆ ด้วย ซึ่งขึ้นอยู่กับดวงอาทิตย์

ฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่า อายุการใช้งาน ความร้อน เวลาและการต่อโหลดเข้ากับหม้อแปลงนั้น มีความสัมพันธ์กันถ้าค่าอุณหภูมิฮ็อตเทสปีดหรือความร้อนสูงเกินกว่าที่ฉนวน(Class F= $155^{\circ}\text{C}$ ) ใช้

จะทนทานได้จะทำให้ความร้อนบนทองจนวนคาสต์เรซินเสื่อมสภาพลง เป็นผลให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงสั้นลง ความร้อนสูงจึงมีผลต่อหม้อแปลงเป็นสำคัญ

#### 5.4 วิเคราะห์การเปรียบเทียบผลการทดสอบทางปฏิบัติ (ตำแหน่งที่ 4) กับการทำนายอุณหภูมิโดยซอฟต์แวร์ที่พิกัดและ Load duty cycle เดียวกัน

การทดสอบทางปฏิบัติจะใช้หม้อแปลงขนาด 1000 kVA รวมทั้งพิกัดต่างๆ เหมือนกัน และมี Load duty cycle เดียวกันกับการทดสอบโดยซอฟต์แวร์ ซึ่งพิจารณาได้จากตารางที่ 4.1 และจากรูปที่ 4.1, 4.2 โดยที่การทดสอบจริงที่ตำแหน่งต่างๆ นั้น จะสามารถเฝ้าดูพฤติกรรมความร้อนหรืออุณหภูมิว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร เมื่อเทียบกับเวลาหรือเมื่อเวลาเปลี่ยนไป อุณหภูมิเปลี่ยนอย่างไรซึ่งปกติแล้วอุณหภูมิจะมีลักษณะขึ้นลงตามโหลดที่มาต่อเข้ากับหม้อแปลงและแต่ละตำแหน่งจะสังเกตเห็นว่าอุณหภูมิมียุทธลักษณะขนานกัน ถึงแม้ว่าจะทดสอบเพียง 1 ครั้งก็ตาม แต่ตำแหน่งที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลก็สามารถติดตั้งไว้ได้หลายตำแหน่งเลยทีเดียว จึงทำให้สามารถวิเคราะห์หรือมองเห็นค่าอุณหภูมิสูงสุดและพฤติกรรมของความร้อนของหม้อแปลงได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้ตำแหน่งที่ 4 มีอุณหภูมิสูงสุด พิจารณาและสามารถเปรียบเทียบได้จากรูปที่ 4.19 โดยที่ตำแหน่งที่ 4 เป็นค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งจะต่ำกว่าค่าอุณหภูมิที่ได้จากซอฟต์แวร์ต่างๆ สาเหตุเป็นเพราะว่าติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลที่ผิวเรซินเท่านั้น และหม้อแปลงเป็นหม้อแปลงเชิงการค้าไม่ใช่หม้อแปลงทดสอบ และการทดสอบเป็นวิธีจำลองโหลด Simulate loading test โหลดเทียมนั่นเอง หรือเรียกอีกอย่างว่าทดสอบแบบลัดวงจร และเมื่อพิจารณาตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากการทดสอบและจากซอฟต์แวร์แล้ว จะเห็นว่าลักษณะกราฟทั้งหมดมีลักษณะขนานกัน ซึ่งซอฟต์แวร์ของ IEC [4] มีอุณหภูมิสูงสุด รองลงมาคือ ซอฟต์แวร์ จากบทความ [1], IEEE [3], บทความ [2] ตามลำดับ ฉะนั้นสามารถกล่าวได้ว่าเปอร์เซ็นต์ของการคลาดเคลื่อนระหว่างค่าทดสอบตำแหน่ง 4 กับทฤษฎี IEC [4] มีค่าเท่ากับ 25.91 เปอร์เซ็นต์ ที่ชั่วโมงที่ 18 ซึ่งมีการต่อโหลดเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ rated load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 6.1 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบหม้อแปลงแบบแห้ง เพื่อวิจัยหาความร้อนหรืออุณหภูมิในส่วนต่างๆ ของหม้อแปลงนั้นจะใช้วิธีตัดวงจร ซึ่งจากรูปที่ 3.9 เป็นอุณหภูมิทดสอบที่ตำแหน่งต่างๆ ฉะนั้นเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิแล้วจะเห็นได้ว่าตำแหน่งที่ 4 ซึ่งเป็นบริเวณด้านบนของขดลวดแรงดันนั้นมีอุณหภูมิสูงที่สุดหรือฮอตเทสสป็อดเท่ากับ  $107^{\circ}\text{C}$  ซึ่งมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (Temperature Rise) เท่ากับ  $75^{\circ}\text{C}$  (ชั่วโมงที่ 18) ดังแสดงได้ใน รูปที่ 6.1

ส่วนในรูปที่ 3.14, 3.15, 3.16 จะมีความสัมพันธ์กันกับรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.17 และเมื่อทำการเปรียบเทียบกราฟอุณหภูมิทั้ง 3 เฟสแล้วจะเห็นได้ว่ามีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ  $99^{\circ}\text{C}$ ,  $97^{\circ}\text{C}$ ,  $96^{\circ}\text{C}$  ที่ตำแหน่ง 19, 25, 16 ตามลำดับ (ชั่วโมงที่ 18) ซึ่งมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ  $67^{\circ}\text{C}$ ,  $65^{\circ}\text{C}$ ,  $64^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับดังแสดงได้ใน รูปที่ 6.2

สำหรับรูปที่ 3.19 เมื่อเปรียบเทียบเส้นกราฟอุณหภูมิแล้ว จะเห็นว่าเส้นกราฟอุณหภูมิที่ได้ทางทฤษฎีต่างๆ นั้นมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิทางปฏิบัติ (ตำแหน่งที่ 4) ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิจะไม่สูงมากจนเกินอุณหภูมิของฉนวน (Class F =  $155^{\circ}\text{C}$ ) เนื่องจากการทดสอบที่โหลดสูงสุดเป็น 100 % ของ Rated Load เท่านั้นและอุณหภูมิสูงสุด (ชั่วโมงที่ 18) ที่ได้ตามผลทางทฤษฎีต่างๆ เป็นดังนี้

ผลทางทฤษฎีจากข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC [4] มีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ  $144.43^{\circ}\text{C}$  และมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ  $114.43^{\circ}\text{C}$

ผลทางทฤษฎีจากบทความ [1] มีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ  $139.73^{\circ}\text{C}$  และมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ  $109.73^{\circ}\text{C}$

ผลทางทฤษฎีจากข้อกำหนดในมาตรฐาน IEEE [3] มีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ  $139.51^{\circ}\text{C}$  และมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ  $109.51^{\circ}\text{C}$

ผลทางทฤษฎีจากบทความ [2] มีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ  $115.73^{\circ}\text{C}$  และมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ  $85.73^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครู ใช้งานเพื่อการศึกษานั่น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สำหรับผลอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในทางทฤษฎีต่างๆ นั้นสามารถแสดงได้ใน รูปที่ 6.3 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อุตสาหกรรม หลอดไฟ โคมไฟ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารที่กรงทุนการนำไปใช้

จากรูปที่ 6.3 นี้จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟอุณหภูมิทางทฤษฎีต่างๆ จะมีรูปแบบหรือลักษณะเส้นกราฟที่ขนานกันกับเส้นกราฟทางปฏิบัติ (ตำแหน่งที่ 4) ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าทฤษฎีต่างๆ ที่ใช้

ในการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงชนิดแห้งนั้น สามารถนำไปใช้งานได้จริง และทฤษฎีต่างๆ ดังกล่าวน่าที่จะเชื่อถือยอมรับได้โดยเฉพาะทฤษฎีจากข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC [4] สมควรที่จะยอมรับและเชื่อถือได้มากที่สุด เพราะว่าเมื่อเปรียบเทียบกับทฤษฎีต่างๆ แล้ว มาตรฐาน IEC [4] มีค่าอุณหภูมิสูงสุด (ดังแสดงไว้ในตารางที่ 6.1) ซึ่งโดยธรรมชาติทางแนวความคิดนั้น จะต้องออกแบบให้หม้อแปลงมีความปลอดภัยมากที่สุด ดังนั้นอุณหภูมิที่ได้จากการทำนายต้องคำนึงถึงอุณหภูมิสูงสุดซึ่งเป็นหลักการที่ดีในการทำนายอุณหภูมิหม้อแปลง

ดังนั้นทฤษฎีต่างๆ และหลักการที่น่าเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ จึงสามารถนำไปวิเคราะห์ใช้ร่วมกับหม้อแปลงชนิดแห้งทุกตัวหรือตัวอื่นๆ ได้และสามารถนำไปใช้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีการทำงานและระบบของฉนวนที่เหมือนกันกับหม้อแปลงชนิดแห้ง ซึ่งได้แก่มอเตอร์เหนี่ยวนำนั่นเอง

นอกจากนี้ในหลักการการทำงานของหม้อแปลงซึ่งมีการทำงานเหมือนกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ ดังนั้นหลักการต่างๆ ที่ใช้พิจารณาถึงผลของอายุการใช้งานในหม้อแปลง [1] จึงสามารถนำมาใช้ในมอเตอร์ได้ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการทำงานโหลดเกินของหม้อแปลงหรือมอเตอร์จะมีผลต่ออายุการใช้งานและสามารถคำนวณหาได้โดยใช้หลักการในเนื้อหาของบทที่ 2

ผลจากการทดสอบจะเห็นได้ชัดเจนว่าอุณหภูมิฮ็อตสปอตหรือความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับโหลดที่นำมาต่อเข้ากับหม้อแปลงแบบแห้ง ตามเงื่อนไขที่กำหนดจริง เนื่องจากการต่อโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงย่อมทำให้ความร้อนเปลี่ยนแปลงจึงทำให้การคาดการณ์ถึงอายุการใช้งานเปลี่ยนแปลงตามการต่อโหลดด้วย จึงสรุปได้ว่า การต่อโหลด ความร้อน และอายุการใช้งานมีความสัมพันธ์กันและความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับหม้อแปลงนั้น จะเกิดเนื่องจากฉนวนเสื่อมสภาพลงหรือเสียหายโดยที่ฉนวนจะเสียหายได้ก็เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้น และได้สะสมไว้ในขณะที่หม้อแปลงทำงานนั่นเอง [7,8]

## 6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

สำหรับการทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นั้น ผลของอุณหภูมิที่ทดสอบได้นั้น มีข้อเสียในเรื่องการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล กล่าวคือ ตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิลไม่สามารถติดตั้งที่ขดลวดทองแดงได้แต่จะติดตั้งที่ผิวของเรซินเท่านั้น ทั้งนี้เป็นเพราะหม้อแปลงที่ใช้ในการทดสอบนี้ เป็นหม้อแปลงทางการค้าที่ทางบริษัทเป็นผู้ผลิตเพื่อจำหน่ายเท่านั้น ไม่ใช่หม้อแปลงทดสอบสำหรับงานวิจัยและวิธีการทดสอบใช้วิธีจำลองโหลด ดังนั้นจึงไม่ใช่โหลดจริง และข้อเสียในเรื่องของการทดสอบนั้นสามารถทดสอบได้เพียง 1 ครั้งเท่านั้น ทั้งนี้เป็นเพราะหม้อแปลงที่ใช้ในการทดสอบเสี่ยงต่อการใช้ค่าใช้จ่ายสูง รวมถึงค่าอุณหภูมิสถานะแวดล้อมที่ใช้ทำนายเป็นเพียงค่าเฉลี่ยเท่านั้น แต่ในความเป็นจริงต้องใช้ค่าอุณหภูมิสถานะแวดล้อมของแต่ละท้องถิ่นที่ได้ทำการสำรวจในปีต่างๆ ที่ผ่านมายังทำให้ค่าอุณหภูมิฮ็อตสปอต (Hottest Spot

Temperature) ของขดลวดทองแดงที่วัดได้ที่ตำแหน่งต่างๆ มีค่าอุณหภูมิใกล้เคียงเท่ากันซึ่งค่านี้ต่ำกว่าความเป็นจริง

ดังนั้นข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อจากงานวิจัยนี้ สามารถแนะแนวทางวิจัยได้ดังนี้

6.2.1 ต้องคำนึงถึงเรื่องการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล เป็นสิ่งสำคัญซึ่งตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิลต้องติดตั้งให้สัมผัสกับขดลวดทองแดงโดยตรงเพื่อให้ได้ค่าอุณหภูมิฮอตสปอตที่ขดลวดถูกต้องจริงๆ

6.2.2 ต้องปรับปรุงเรื่องวิธีการทดสอบและหาวิธีการที่เหมาะสม เช่น การทดสอบแบบ Loading back หรือ Bucking test หรือ Back to Back, Actual loading test และ Simulate loading test เพื่อให้ได้ค่าอุณหภูมิฮอตสปอตที่ถูกต้อง

6.2.3 หม้อแปลงที่ใช้ในการทดสอบควรเป็นหม้อแปลงสำหรับงานวิจัยเท่านั้น

6.2.4 การทดสอบโหลดใช้งานควรทดสอบที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดลักษณะต่างๆ กัน (Vary Load) และให้มีโหลดเกินเพื่อให้รู้ถึงอุณหภูมิในช่วงที่บั้นทอนอายุการใช้งานของหม้อแปลง ดังนั้นผลจากการทดสอบหาอุณหภูมิหรือความร้อนที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงคาสเตอร์ซินนั้น สามารถรู้ได้ว่าอุณหภูมิของหม้อแปลงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับโหลดที่มาต่อเข้ากับหม้อแปลง ซึ่งความร้อนดังกล่าวนี้เกิดขึ้นมาจากการสูญเสียกำลังงานไฟฟ้าบางส่วน ซึ่งแบ่งการสูญเสียนี้เป็น 2 รูปแบบ ได้แก่การสูญเสียเนื่องมาจากความต้านทานของขดลวดตัวนำ (Winding loss) ซึ่งอาจเป็นทองแดงหรืออะลูมิเนียมและการสูญเสียเนื่องมาจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแกนเหล็ก (Core loss) มีทั้งการสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์ซิสและการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก ซึ่งการสูญเสียทั้ง 2 รูปแบบนี้ จะมีค่าการแปรผันตามปริมาณกระแสไฟฟ้า ซึ่งทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น ความร้อนหรืออุณหภูมิที่เกิดขึ้นจะเป็นไปอย่างต่อเนื่อง และขณะเดียวกันก็จะถูกถ่ายเทออกสู่ภายนอกในลักษณะของการระบายความร้อนนั่นเอง

### 6.3 วิชยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ชี้แนะประโยชน์ดังต่อไปนี้

6.3.1 วิชยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กล่าวถึงการสร้างและพัฒนาโปรแกรมสำเร็จรูปซึ่งเป็นซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ซึ่งสามารถนำมาเป็นเครื่องมือ เพื่อใช้ในการทำนายค่าอุณหภูมิฮอตสปอตของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้ง ซึ่งค่าอุณหภูมิที่ได้นี้สามารถนำไปพิจารณาในการทำนายความสามารถในการรับโหลดการใช้งานของหม้อแปลงได้ว่า สามารถเพิ่มภาระให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าได้เต็มที่เท่าไร จึงไม่ทำให้หม้อแปลงเกิดความเสียหาย จากผลของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิฮอตสปอตอันเนื่องมาจากโหลดนั่นเอง ดังนั้นสามารถที่จะกำหนดโหลดของหม้อแปลงให้เกิดประโยชน์สูงสุดได้

6.3.2 วิทยานิพนธ์นี้ได้กล่าวถึงการทดสอบหม้อแปลงขนาด 1000 kVA เพื่อหาอุณหภูมิ ส่วนต่างๆ ของหม้อแปลง จากค่าอุณหภูมิจึงสามารถรู้ได้ว่าความร้อนที่เกิดขึ้นนี้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับโหลดที่นำมาต่อเข้ากับหม้อแปลงจริงและขณะทดสอบผู้เขียนสามารถมองเห็นพฤติกรรมของความร้อนได้จริงในสภาวะโหลดของหม้อแปลงต่างๆ กัน และ ณ เวลาเดียวกัน อุณหภูมิแต่ละจุดที่ส่วนต่างๆ ของหม้อแปลงจะแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโหลดและทิศทางการถ่ายเทความร้อนด้วย

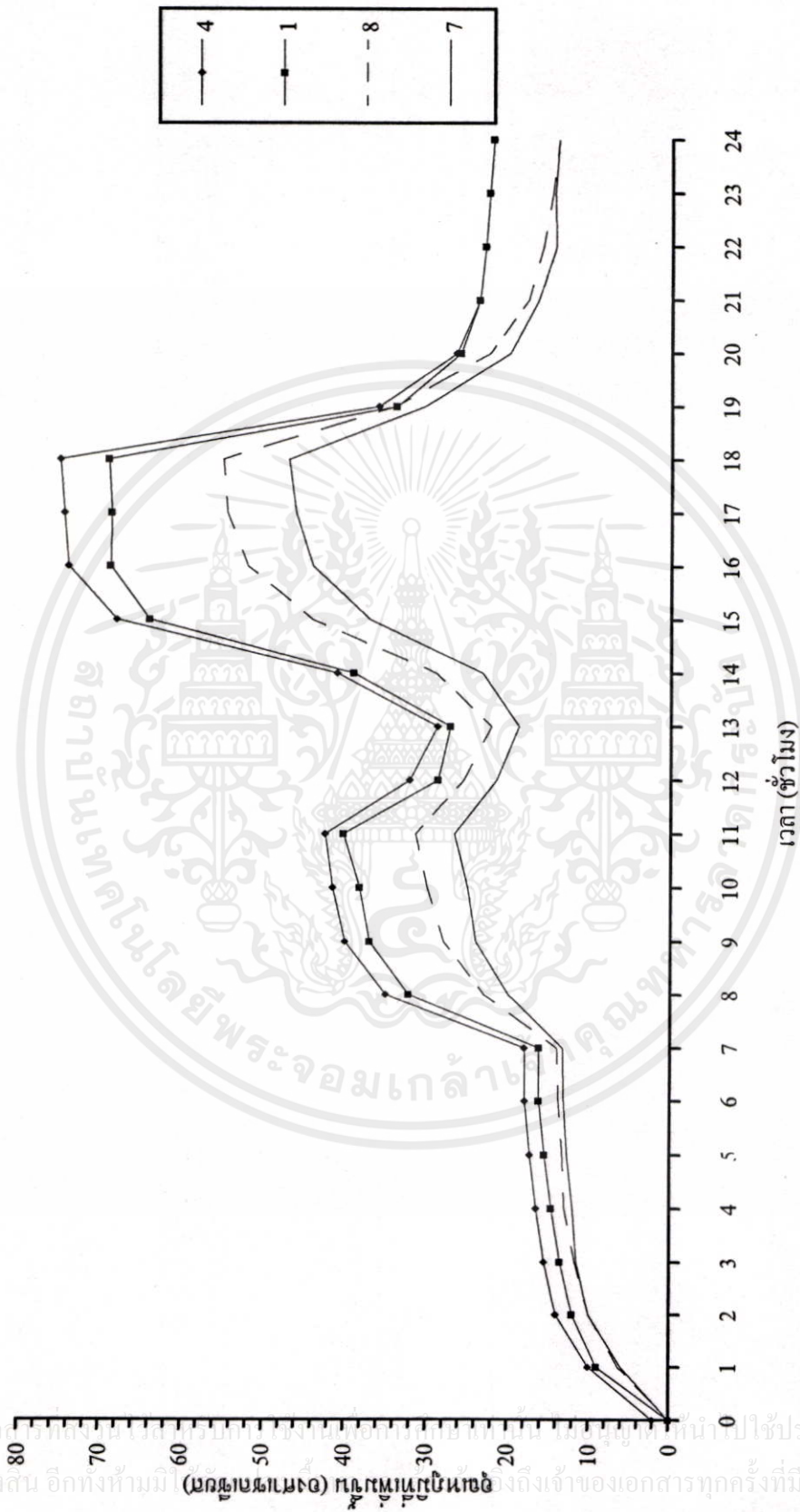
6.3.3 เมื่อรู้ค่าอุณหภูมิฮ็อตสปอตของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้งในอนาคตได้ก็สามารถลดและป้องกันอันตรายที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงได้ ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและประหยัดเวลาในการทดสอบหาค่าอุณหภูมิของหม้อแปลงและไม่ต้องทดสอบ

6.3.4 ประโยชน์อีกอย่างที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปนี้คือ จะช่วยในการตัดสินใจของผู้ผลิตในการพิจารณาการออกแบบหม้อแปลงเพื่อให้ได้ต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุด เนื่องจากการที่ได้ทราบสภาวะของหม้อแปลงภายใต้สภาวะโหลดต่างๆ กัน

6.3.5 หลักการของทฤษฎีและซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ที่สร้างขึ้นนี้ สามารถนำมาใช้เป็นต้นแบบ (Prototype) ในการคำนวณอุณหภูมิฮ็อตสปอตของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้งทุกชนิดได้ เช่น หม้อแปลงคาสต์เรซินมีระบบฉนวน Epoxy resin เป็น class F = 155°C, หม้อแปลงแบบ Open-type มีระบบฉนวน Enamel เป็น class B = 130°C และหม้อแปลงแบบแห้งแก๊ส SF<sub>6</sub> ที่มีระบบฉนวนเป็น class ต่างๆ นอกจากนี้แล้วหลักการในบทที่ 2 และซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายรูปแบบเช่น ใช้วิเคราะห์ได้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้าทุกชนิดที่มีการทำงานและระบบฉนวน (ตารางที่ 2.1) ที่เหมือนกันกับหม้อแปลงชนิดแห้งซึ่งได้แก่ มอเตอร์เหนี่ยวนำมีระบบฉนวน Enamel เป็น class E = 120 °C ได้อีกด้วย

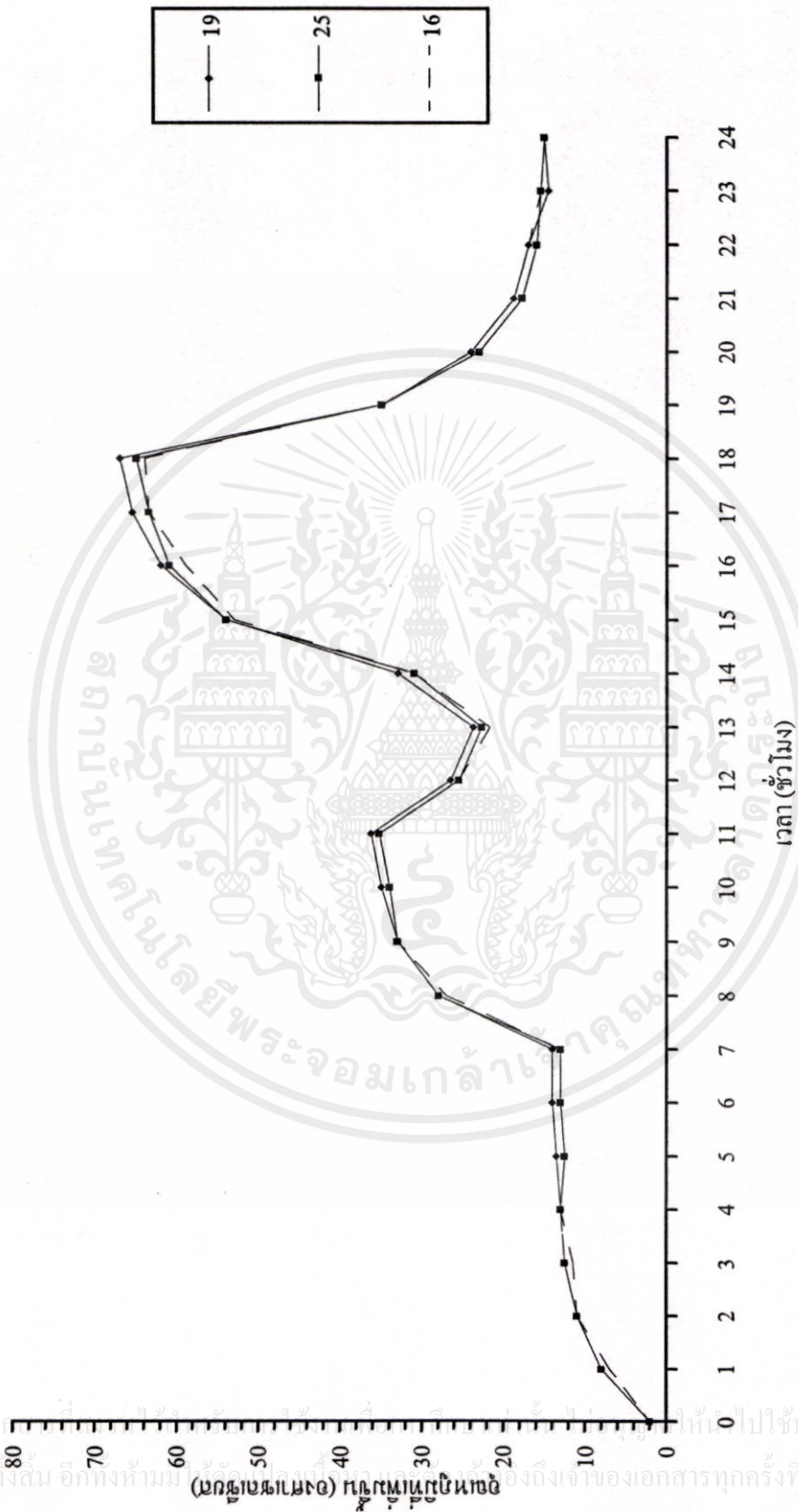
โดยปกติแล้วโหลดการใช้งานจริงของหม้อแปลงจะมีการเปลี่ยนแปลงทุกวินาที หรือ โหลดมีการเปลี่ยนแปลงตามความต้องการของผู้ใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งลักษณะโหลดของหม้อแปลงอาจเป็นดังนี้คือ 1, Linear load ซึ่งเป็นโหลดเชิงเส้นได้แก่ โหลดการใช้งานทั่วไป 2, Non-Linear load ซึ่งเป็นโหลดไม่เป็นเชิงเส้นได้แก่ โหลดที่เป็น Solid-state load หรือ Nonsinusoidal load จำพวก เครื่องหลอมโลหะ เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ เครื่องสำรองไฟฟ้า (UPS) อินเวอร์เตอร์ ฯลฯ หรือโหลดที่มีสารกึ่งตัวนำทุกประเภท ซึ่งโหลดพวกนี้ทำให้เกิดความร้อนสูงเนื่องจากจะทำให้เกิดกระแสโหลดไม่เป็นคลื่นรูปไซน์ (Nonsinusoidal load current)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



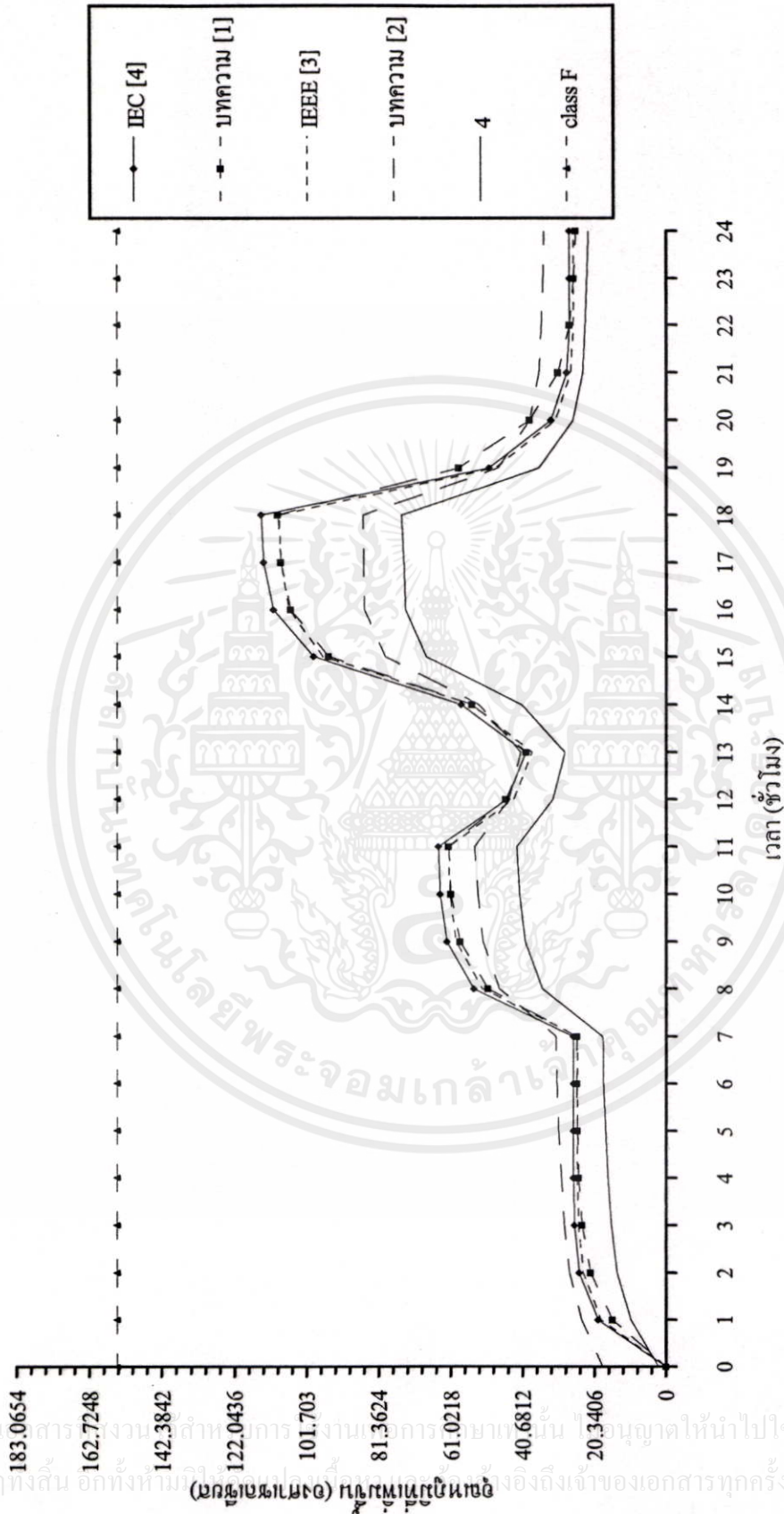
รูปที่ 6.1 แสดงกราฟเปรียบเทียบขุมหินที่เพิ่มขึ้นจากผลการทดสอบตำแหน่งที่ 4,1,8,7 เมื่อหม้อแปลงมีการต่อโหลดลักษณะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่สู่สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาต  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.2 แสดงกราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากผลการทดสอบตำแหน่งที่ 19, 25, 16 เมื่อหม้อแปลงมีการต่อโหลดลักษณะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 แสดงกราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากผลการทดสอบตำแหน่งที่ 4 กับผลทางทฤษฎีเมื่อมีการต่อโหลดลักษณะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารงานตำหนัการงานการกษาณนั้น อนุญาตให้นำไปใช้ปรนด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำไปเผยแพร่หรืออ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1 ตารางสรุปเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิฮอตสปอตและเปอร์เซ็นต์การคลาดเคลื่อน

เวลา (ชม.)	% Rated Load	กระแส (A)	แรงดัน (V)	Power (kW)	ทดสอบ ตำแหน่ง 4 (°C)	อุณหภูมิ บทความ [1](°C)	อุณหภูมิ บทความ [2](°C)	อุณหภูมิ IEEE [3](°C)	อุณหภูมิ IEC [4](°C)	% การคลาดเคลื่อน ค่าทดสอบตำแหน่ง 4 กับอุณหภูมิ IEC[4]
0		9.64	537.80	1.507	32	30	47.98	30	30	6.25
1		9.60	539.00	1.500	40	45.31	54.03	48.52	49.37	18.97
2		9.50	525.00	1.480	44	51.39	57.47	53.59	54.68	19.53
3	40	9.37	524.50	1.460	45	53.80	58.82	54.9	56.00	19.64
4		9.48	529.70	1.490	45.5	54.76	59.74	55.12	56.27	19.13
5		9.58	538.00	1.529	45.77	55.14	60.46	55.12	56.27	18.66
6		9.62	540.00	1.531	45.9	55.29	61.06	55.12	56.27	18.42
7		9.63	540.00	1.530	46	55.35	61.15	55.12	56.27	18.25
8		16.74	938.70	4.880	63	80.57	77.19	82.22	84.53	25.47
9	70	16.61	927.60	4.840	68	88.51	82.04	89.57	92.27	26.30
10		16.75	939.30	4.960	69.5	91.01	83.50	91.41	94.21	26.22
11		16.10	935.00	4.80	70.2	91.79	84.45	91.78	94.60	25.79
12	50	11.89	665.90	2.42	59.6	75.56	74.45	73.26	75.13	20.67
13		12.00	672.60	2.44	56	69.65	71.26	68.08	69.79	19.75
14	70	17.00	958.00	5.15	68	85.07	83.13	85.16	88.18	22.88
15		23.70	1334.00	10.7	96	125.52	109.61	127.07	129.65	25.95
16	100	23.20	1311.00	10.4	103	136.18	115.37	136.64	141.02	26.96
17		23.10	1305.00	10.4	105	138.99	115.55	139.03	143.86	27.01
18		23.10	1301.00	10.4	107	139.73	115.73	139.51	144.43	25.91
19		9.50	537.00	1.64	69	88.85	77.65	78.22	80.27	14.04
20		9.90	557.00	1.69	60.5	68.67	68.62	61.29	62.69	3.49
21	40	9.58	533.00	1.54	58	60.66	66.06	57.07	58.29	0.49
22		9.70	544.00	1.61	57	57.48	65.39	56.22	57.41	0.71
23		9.70	537.00	1.51	56	56.22	64.96	56.22	57.41	2.45
24		9.65	539.00	1.56	55	55.71	64.53	56.22	57.41	4.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] William E. Featheringill. "Power Transformer Loading." IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA – 19, No.1, January/February 1983. pp. 21-27.
- [2] Linden W. Pierce. "Thermal Considerations in Specifying Dry – Type Transformers." IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 30, no. 4, July/August 1994. pp. 1090-1098.
- [3] IEEE Guide for Loading Dry –Type Distribution and Power Transformers. ANSI / IEEE Standard C57.96 –1989.
- [4] Loading Guid for Dry –Type Power Transformers. IEC standard 905. 1<sup>st</sup> ed.. 1987.
- [5] Dry Type Power Transformer, IEC Standard Publication 726, 1<sup>st</sup> ed., 1982, Table IV, pp. 19, and Amendment 1, Feb.1986.
- [6] A.A.Halacsy and G.H. Von Fuchs. "Transformer invented 75 years ago." AIEE Trans. Power Appar. Syst.. vol. 80, no. 54 , June 1961. pp. 121–125; disc. pp. 125 – 128.
- [7] L.W. Pierce. "Hottest spot temperatures in ventilated dry type Transformers." Presented at IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Columbus, OH, Jan. 31 - Feb. 5, 1993, IEEE paper 93 WM 052 - 1 PWRD.
- [8] H.C. Stewart and L.C. Whitman. "Hot spot temperatures in dry-type transformer windings." AIEE Trans. vol. 63, Oct. 1944. pp. 763 –768, 1445-1448.
- [9] L. C. Whitman. "Loading of ventilated dry type transformers." AIEE Trans. vol. 76, part III, Dec. 1997. pp. 1077 –1084.
- [10] M. L. Manning. " The application of class H insulation to transformers." AIEE Trans. vol. 70, pt. II, 1951. pp. 1427 –1434; disc. pp. 1434 – 1435.
- [11] L. W. Pierce. "Predicting in hottest spot temperatures ventilated dry type transformers." presented at the IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vancouver, July 18-23, 1993, IEEE paper 93 SM 392-1 PWRD.
- [12] A.A.Halacsy. "Temperature rise of dry type transformers." AIEE Trans.. vol. 77, part III, Aug. 1958. pp. 456–462.
- [13] M.V. Deshpande. **Elements of Electrical Power Station Design.** 2 nd ed. India : Wheeler, 1981.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
program Theorem1;
```

```
function ZtoPower(Z:real;Power:integer):real;
var Index:integer; {This function use for find Z power by n}
    Result:real;
begin
    Result:=1.0;
    for Index := 1 to Power do
        Result := Z*Result;
    ZtoPower := Result;
end;
```

```
function SquareRootA(Number:real;n:integer):real;
(*This function used for find Number Root of n *)
var Temp,SqRoot,Ans:real;
const a = 10;(* a is root of 10 *)
begin
    SqRoot := Number;
    repeat
        Temp:= SqRoot;
        SqRoot:= Temp-(ZtoPower(Temp,a)-Number)*Temp/(a*ZtoPower(Temp,a));
    until abs(SqRoot-Temp)<1e-10;
    Ans:=ZtoPower(SqRoot,n);
    SquareRootA:=Ans;
end;
```

```
procedure Input(var Theta_co,Theta_ho,Theta_s,Theta_a,L1,Lo,t1,Tw:real);
begin
    writeln('Input Theta_co in celcius');
    readln(Theta_co);
    writeln('Input Theta_ho in celcius');
    readln(Theta_ho);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

writeln('Input Theta_s in celcius');
readln(Theta_s);
writeln('Input Theta_a in celcius');
readln(Theta_a);
writeln('Input L1 in KVA');
readln(L1);
writeln('Input Lo in KVA');
readln(Lo);
writeln('Input t1 in minute');
readln(t1);
writeln('Input Tw in minute');
readln(Tw);
end;

procedure Calculate(var Theta_H,Theta_co,Theta_ho,Theta_s,Theta_a,
  L1,Lo,t1,Tw:real);
var a,b,c,d:real;
begin
  a:=SquareRootA(L1,16)/SquareRootA(Lo,16);
  d:=SquareRootA(L1,4)/SquareRootA(Lo,4);
  b:=exp(t1/(Tw*(1/d)));
  c:=((Theta_co+Theta_ho)*a*(b-1))+Theta_s;
  Theta_H:=(c/b)+Theta_a;
  writeln('Theta_H is ',Theta_H,' celcius');
end;

var The_H,The_co,The_ho,The_s,The_a,LL1,LLo,tt1,TTw:real;
begin
  Input(The_co,The_ho,The_s,The_a,LL1,LLo,tt1,TTw);
  Calculate(The_H,The_co,The_ho,The_s,The_a,LL1,LLo,tt1,TTw);
  readln;
end.

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้คิดเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

program Theorem2;

```
function ZtoPower(Z:real;Power:integer):real;
```

```
var Index:integer;
```

```
    Result:real;
```

```
begin
```

```
    Result:=1.0;
```

```
    for Index := 1 to Power do
```

```
        Result := Z*Result;
```

```
    ZtoPower := Result;
```

```
end;
```

```
function SquareRootA(Number:real;n:integer):real;
```

```
(*This function used to find Root of n which n= 0.1 to 0.9*)
```

```
var Temp,SqRoot,Ans:real;
```

```
const a = 10;(* a is root of 10 *)
```

```
begin
```

```
    SqRoot := Number;
```

```
    repeat
```

```
        Temp:= SqRoot;
```

```
        SqRoot:= Temp-(ZtoPower(Temp,a)-Number)*Temp/(a*ZtoPower(Temp,a));
```

```
    until abs(SqRoot-Temp)<1e-10;
```

```
        Ans:=ZtoPower(SqRoot,n);
```

```
        SquareRootA:=Ans;
```

```
end;
```

```
function SquareRootB(Number:real;n:integer):real;
```

```
(*This function used to find Root of 1/n which n= 0.1 to 0.9*)
```

```
var Temp,SqRoot,Ans:real;
```

```
const a = 10;(* a is root of 10 *)
```

```
begin
```

```
    SqRoot := Number;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกสิ่งนี้ออก และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

repeat
    Temp:= SqRoot;
    SqRoot:=(Temp-(ZtoPower(Temp,n)-Number)*Temp/(a*ZtoPower(Temp,n)));
until abs(SqRoot-Temp)<1e-10;
    Ans:=ZtoPower(SqRoot,10);
    SquareRootB:=Ans;
end;

```

```

procedure Input (var Theta_c,Theta_E,TA,TAT,Tk:real;

```

```

    var n:integer);

```

```

var a:real;

```

```

begin

```

```

    writeln('Input n');

```

```

    readln(a);

```

```

    n:=Trunc(a*10);

```

```

    writeln('Input Theta_c in celcius');

```

```

    readln(Theta_c);

```

```

    writeln('Input Theta_E in celcius');

```

```

    readln(Theta_E);

```

```

    writeln('Input TA in celcius');

```

```

    readln(TA);

```

```

    writeln('Input TAT in celcius');

```

```

    readln(TAT);

```

```

    writeln('Input Tk in celcius');

```

```

    readln(Tk);

```

```

end;

```

```

Procedure Calculate (var Theta_c,Theta_HS,Theta_HSdat,Theta_cDat,

```

```

    Theta_E,TA,TAT,Tk:real;var n:integer);

```

```

var x,y,z,Temp:real;

```

```

    i:integer;

```

```

begin

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ หากมีใครนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ขออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ผู้อื่นห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Temp:= 20;
repeat
y:= Temp+TA+Tk;
z:= Theta_c+TAT+Tk;
Theta_cDat:= Theta_c*(SquareRootA(y,n)/SquareRootA(z,n));
x:= 1+(SquareRootB(Theta_E,n)/SquareRootB(Theta_cDat,n));
Theta_HS:= Theta_cDat*SquareRootA(x,n);
Temp:=(Theta_HS+Temp)/2;
until abs(Theta_HS-Temp)<1e-10;
Theta_HSdat:=Theta_HS+TA;
writeln('The Theta_cDat is ',Theta_cDat:5:3,' celcius');
writeln('The Theta_HS is ',Theta_HS:5:3,' celcius');
writeln('The Theta_HSdat is ',Theta_HSdat:5:3,' celcius');
end;
var
The_c,The_HS,The_HSdat,The_cDat,The_E,TemA,TemAT,TemK:real;
Num:integer;
begin {main}
Input(The_c,The_E,TemA,TemAT,TemK,Num);
Calculate(The_c,The_HS,The_HSdat,The_cDat,The_E,TemA,TemAT,TemK,Num);
readln;
end.

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

program Theorem3;

```
function ZtoPower(Z:real;Power:integer):real;
var Index:integer; {This function use for find Z power by n}
    Result:real;
begin
    Result:=1.0;
    for Index := 1 to Power do
        Result := Z*Result;
    ZtoPower := Result;
end;
```

```
function SquareRootA(Number:real;n:integer):real;
(*This function used for find Number Root of n *)
var Temp,SqRoot,Ans:real;
const a = 10;(* a is root of 10 *)
begin
    SqRoot := Number;
    repeat
        Temp:= SqRoot;
        SqRoot:= Temp-(ZtoPower(Temp,a)-Number)*Temp/(a*ZtoPower(Temp,a));
    until abs(SqRoot-Temp)<1e-10;
    Ans:=ZtoPower(SqRoot,n);
    SquareRootA:=Ans;
end;
```

```
procedure Input(var Theta_gr,Theta_wr,Theta_a,L1,L2,Lr,t1,Tua_w:real;
    var m:integer);
    var a:real;
begin
    writeln('Input Theta_gr in celcius');
    readln(Theta_gr);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

writeln('Input Theta_wr in celcius');
readln(Theta_wr);
writeln('Input Theta_a in celcius');
readln(Theta_a);
writeln('Input L1 in KVA');
readln(L1);
writeln('Input L2 in KVA');
readln(L2);
writeln('Input Lr in KVA');
readln(Lr);
writeln('Input m');
readln(a);
    m:=Trunc(a*10);
writeln('Input t1 in minute');
readln(t1);
writeln('Input Tua_w in minute');
readln(Tua_w);
end;

procedure calculate(var Theta_gi,Theta_gu,Theta_gr,Theta_g,Theta_wi,
                    Theta_wu,Theta_wr,Theta_w,Theta_h,Theta_a,L1,
                    L2,Lr,t1,Tua_w:real; var m:integer);
var a:integer;
begin
    a:=2*m;
    Theta_gi:= Theta_gr*(SquareRootA(L1,a)/SquareRootA(Lr,a));
    Theta_gu:= Theta_gr*(SquareRootA(L2,a)/SquareRootA(Lr,a));
    Theta_g := (Theta_gu-Theta_gi)*(1-exp(-t1/Tua_w))+Theta_gi;
    Theta_wi:= Theta_wr*(SquareRootA(L1,a)/SquareRootA(Lr,a));
    Theta_wu:= Theta_wr*(SquareRootA(L2,a)/SquareRootA(Lr,a));
    Theta_w := (Theta_wu-Theta_wi)*(1-exp(-t1/Tua_w))+Theta_wi;
    Theta_h := Theta_g+Theta_w+Theta_a;

```

```

writeln('Theta_h is ',Theta_h:5:3,' celcius');
end;

var The_gi,The_gu,The_gr,The_g,The_wi,The_wu,The_wr,
    The_w,The_h,The_a,LL1,LL2,LLr,tt1,TTua_w:real;
    mm:integer;
begin
    Input(The_gr,The_wr,The_a,LL1,LL2,LLr,tt1,TTua_w,mm);
    calculate(The_gi,The_gu,The_gr,The_g,The_wi,The_wu,The_wr,The_w,
        The_h,The_a,LL1,LL2,LLr,tt1,TTua_w,mm);
    readln;
end.

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น" อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

program Theorem4;

```
function ZtoPower(Z:real;Power:integer):real;
```

```
var Index:integer;
```

```
    Result:real;
```

```
begin
```

```
    Result:=1.0;
```

```
    for Index := 1 to Power do
```

```
        Result := Z*Result;
```

```
    ZtoPower := Result;
```

```
end;
```

```
function SquareRootA(Number:real;n:integer):real;
```

```
(*This function used to find Root of n which n= 0.1 to 0.9*)
```

```
var Temp,SqRoot,Ans:real;
```

```
const a = 10;(* a is root of 10 *)
```

```
begin
```

```
    SqRoot := Number;
```

```
    repeat
```

```
        Temp:= SqRoot;
```

```
        SqRoot:= Temp-(ZtoPower(Temp,a)-Number)*Temp/(a*ZtoPower(Temp,a));
```

```
    until abs(SqRoot-Temp)<1e-10;
```

```
        Ans:=ZtoPower(SqRoot,n);
```

```
        SquareRootA:=Ans;
```

```
end;
```

```
procedure Input(var Theta_whi,t1,Tau,Theta_ad,Z,Theta_wr,L1,Lr:real;
```

```
    var q:integer);
```

```
var a:real;
```

```
begin
```

```
    writeln('Input Theta_whi in celcius');
```

```
    readln(Theta_whi);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

writeln('Input Theta_ad in celcius');
readln(Theta_ad);
writeln('Input t1 in minute');
readln(t1);
writeln('Input Tau in minnute');
readln(Tau);
writeln('Input Z ');
readln(Z);
writeln('Input Theta_wr in celcius');
readln(Theta_wr);
writeln('Input L1 in KVA');
readln(L1);
writeln('Input Lr in KVA');
readln(Lr);
writeln('Input q');
readln(a);
q:=Trunc(a*10);
end;

procedure calculate(var Theta_wh,Theta_whu,Theta_who,t1,Tau,Theta_ad,
Z,Theta_wr,L1,Lr:real;var q:integer);

begin
Theta_who := Z*Theta_wr*(SquareRootA(L1,q)/SquareRootA(Lr,q));
Theta_wh := (Theta_who-Theta_who)*exp(-t1/Tau)+Theta_who+Theta_ad;
writeln('Theta_wh is ',Theta_wh:5:3,' celcius');
end;

var The_wh,The_who,The_who,t1,TTau,The_ad,ZZ,The_wr,LL1,LLr:real;
qq:integer;
begin
Input(The_who,t1,TTau,The_ad,ZZ,The_wr,LL1,LLr,qq);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

calculate(The_wh,The_whu,The_whi,tt1,TTau,The_ad,ZZ,The_wr,LL1,LLr,qq);
readln;
end.

```

## โครงสร้างและส่วนประกอบของหม้อแปลงแบบแห้ง

หม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้งแบ่งตามลักษณะโครงสร้างภายนอกได้เป็น 3 แบบด้วยกันคือ

1. Conventional or Open-type
2. Impregnated type
3. Resin encapsulated or Cast resin

โดยแบบที่ 1 เป็นแบบเปิดคือ เปลือยให้เห็นขดลวดโดยตรงแบบนี้มีการระบายความร้อนดีเนื่องจากขดลวดสามารถระบายความร้อนให้กับอากาศบริเวณรอบๆ ได้โดยตรง ยิ่งถ้ามีการติดตั้งพัดลมเพื่อช่วยเป่าระบายความร้อนออกด้วยแล้วก็ยิ่งดี จะทำให้หม้อแปลงสามารถจ่ายโหลดได้เพิ่มขึ้นอีกประมาณ 30-40 % แต่แบบนี้ไม่เหมาะสมที่จะใช้กับสภาพภูมิอากาศที่ร้อนชื้นและมีฝุ่นละอองมากเช่นบ้านเรา ข้อดีอีกประการหนึ่งของหม้อแปลงแบบนี้ก็คือ ขณะทำงานจะมีเสียงดังรบกวน (Noise)

ส่วนแบบที่ 2 จะมีการเทฉนวนจำพวก Epoxy resin หล่อหุ้มเข้ากับขดลวดตัวนำ กรรมวิธีในการหล่อต้องใช้ความชำนาญเป็นพิเศษ หากเกิดโพรงอากาศและการควบคุมคุณภาพไม่ดีพอจะเป็นผลเสียอย่างมาก เมื่อหม้อแปลงเกิดความร้อนก็จะเกิดการขยายตัวของขดลวดอาจทำให้เกิดการแตกร้าวของ resin และการออกแบบการระบายความร้อนก็ต้องใช้เทคนิคสูงเพราะการระบายความร้อนของขดลวดจะต้องผ่านชั้นของ resin ก่อน ดังนั้นหากจะเลือกใช้หม้อแปลงแบบนี้ควรจะต้องเลือกซื้อจากผู้ผลิตที่มีประสบการณ์ยาวนานเท่านั้น หม้อแปลงแบบนี้จะมีฉนวนที่เรียบร้อยและเป็นมันวาวสวยงาม

ส่วนแบบที่ 3 เป็นแบบที่นิยมใช้กันแพร่หลายมากที่สุดมีการเสริม glassfiber เข้าไปกับ epoxy resin ด้วยซึ่งจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับขดลวด เพิ่มประสิทธิภาพการนำความร้อนและทำให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวของขดลวดกับ epoxy resin ใกล้เคียงกันจึงตัดปัญหาเรื่องการแตกร้าวหรือเกิดการ cracks ของ resin ไปได้เลย การทำฉนวนให้กับขดลวดไม่ได้ใช้วิธีการหล่อด้วย resin เหมือนแบบที่ 2 แต่จะใช้แผ่น glassfiber รองแผ่นตัวนำที่ใช้ทำขดลวด ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอก (แผ่นตัวนำที่ใช้อาจเป็นแผ่นทองแดงหรือแผ่นอลูมิเนียมก็ได้) แล้วพันทับอีกครั้งด้วยเชือกซึ่งทำด้วย glassfiber อีกเช่นกัน โดยให้เชือกนี้วิ่งผ่านน้ำยา resin เสียก่อนแล้วพันไขว้กันไปมา เทคนิคนี้เรียกว่า “Roving winding technique” แล้วนำไปเข้าตู้อบให้ความร้อน ขดลวดที่ได้จะมีผิวเรียบเป็นมันวาวสวยงามเช่นเดียวกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คุณสมบัติของหม้อแปลง Dynacast

### 1) ทนต่อความชื้น (Moisture Resistance)

ทั้ง Coils แรงสูงและแรงต่ำ ผ่านการหล่อภายใต้สภาวะสูญญากาศ และอบที่อุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสม ทำให้ Resin และใยแก้วสังเคราะห์ (Synthetic Glass Fiber) รวมตัวจับเป็นเนื้อเดียวกันทุกอนุ ความชื้นจึงไม่สามารถซึมแทรกเข้าไปได้ และไม่จำเป็นต้องอุ่นหม้อแปลงก่อนใช้งาน

### 2) ทนต่อกระแสลัดวงจร (Short Circuit Proof)

คุณสมบัติในการยึดเหนี่ยวระหว่างทองแดงและ Resin นั้นสูง จึงยากที่จะทำให้ขดลวดทองแดง เคลื่อนตัว ในขณะที่เกิดการลัดวงจร และจากแรงยึดเหนี่ยวกันสูงนี้เอง ทำให้ไม่มีการแตกร้าวของ Coils เกิดขึ้น

### 3) ทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิโดยฉับพลัน (Thermal Shock Resistance)

ถึงแม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างฉับพลัน ก็ไม่เกิดการแตกร้าวของ Coils เนื่องจาก คุณสมบัติของ Resin และ Glass Fiber ดังที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งมีทั้งความแข็งแรง และมีความยืดหยุ่นในตัว ของ Coils เอง

### 4) ทนต่อเปลวไฟ (Flame Resistance)

วัสดุที่ใช้ทำฉนวนของหม้อแปลง Dynacast ไม่ติดไฟและดับเองได้ และไม่ก่อให้เกิดก๊าซอันตราย

### 5) มีความปลอดภัยต่อสภาพแวดล้อม ไม่เกิดมลภาวะ (Safe For The Environment)

หม้อแปลง Dynacast ไม่มีส่วนประกอบของ ของเหลวหรือสารพิษเจือปนอยู่ Resin และ Glass Fiber ที่ใช้นั้น หลังจากผ่านขั้นตอนการผลิตในโรงงานผลิตหม้อแปลงแล้ว ได้ผ่านการวิเคราะห์จาก สถาบันนานาชาติในต่างประเทศ แล้วว่าปราศจากสารพิษ จึงสามารถใช้ได้ในตัวอาคาร ใกล้กับศูนย์ควบคุมการจ่ายไฟฟ้า ซึ่งเป็นเหตุผลหนึ่งทำให้ประหยัดต้นทุนในการติดตั้งระบบสายไฟฟ้าแรงดันต่ำ และไม่จำเป็นต้องสิ้นเปลืองเนื้อที่นอกอาคาร

### 6) ปราศจากการซ่อมบำรุง (Maintenance Free)

ไม่จำเป็นต้องดูแลรักษาหรือซ่อมบำรุง ไม่มีการขีดหกดของฉนวนไม่มีของเหลว, ไม่มีการคลายตัวของชิ้นส่วนทางกล และไม่จำเป็นต้องดูแลรักษาส่วนประกอบอื่นๆ ซึ่งประหยัดค่าใช้จ่ายด้านการซ่อมบำรุง

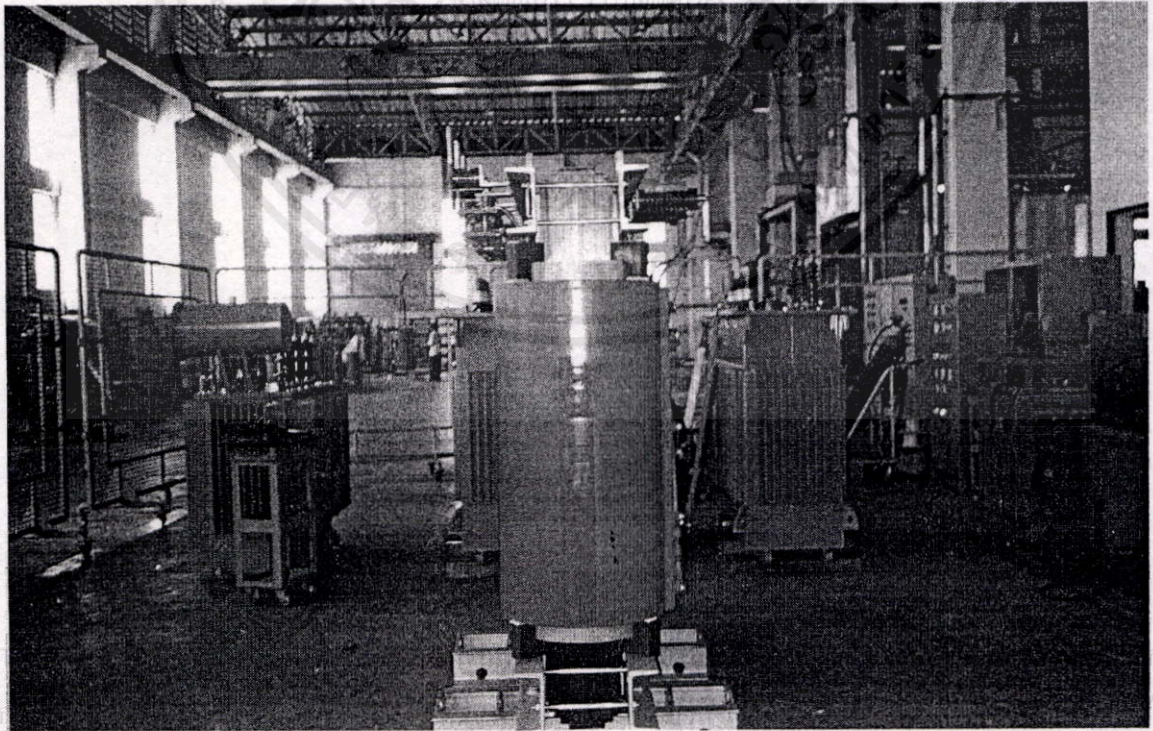
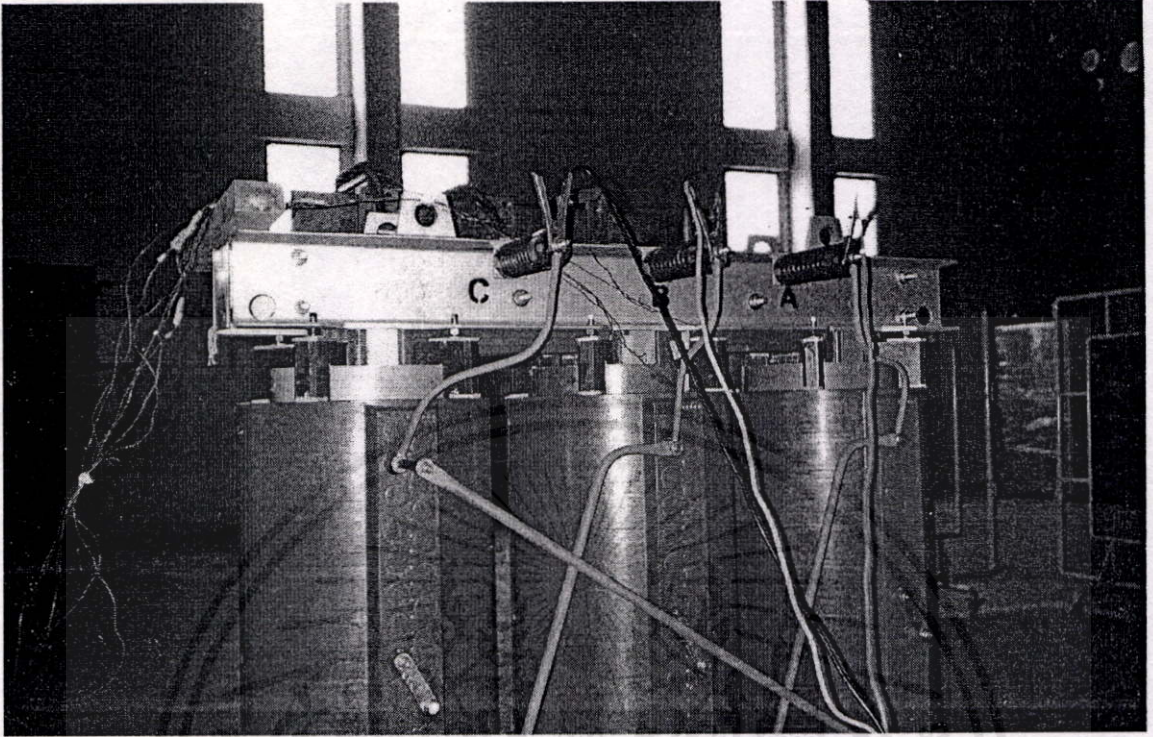
### 7) ปราศจาก Partial Discharge

จากการทดสอบ Partial Discharge พบว่าไม่เกิด Partial Discharge ขึ้นตามข้อกำหนดการทดสอบมาตรฐานของ IEC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

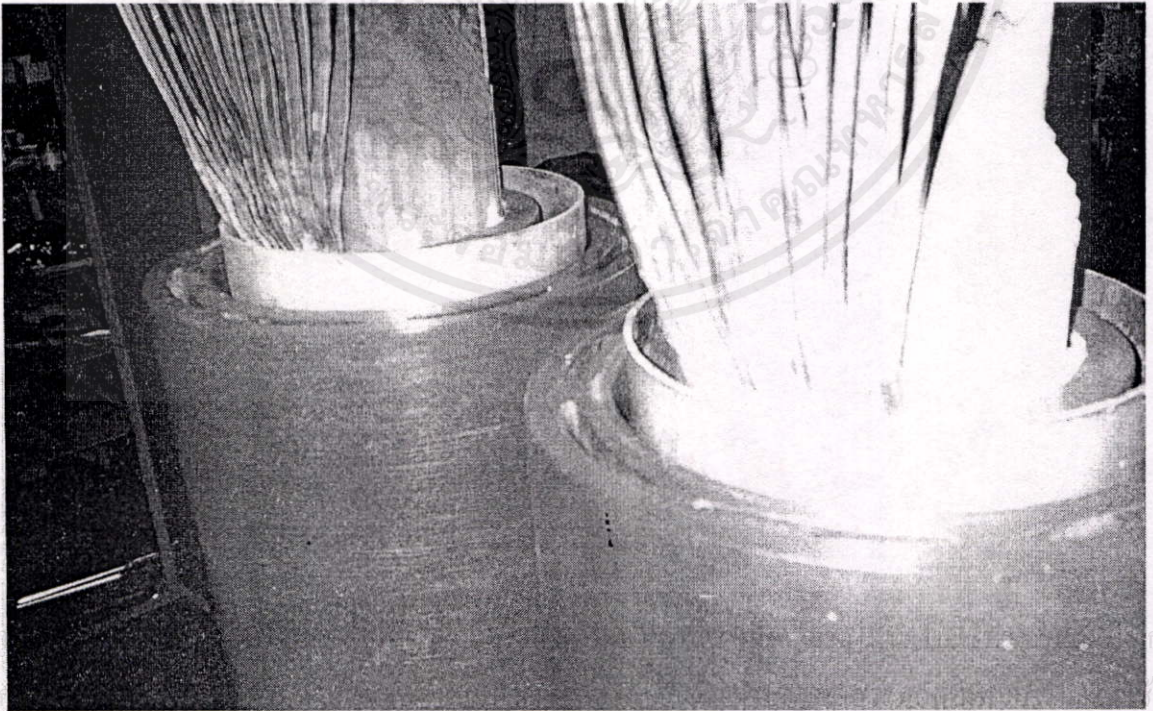
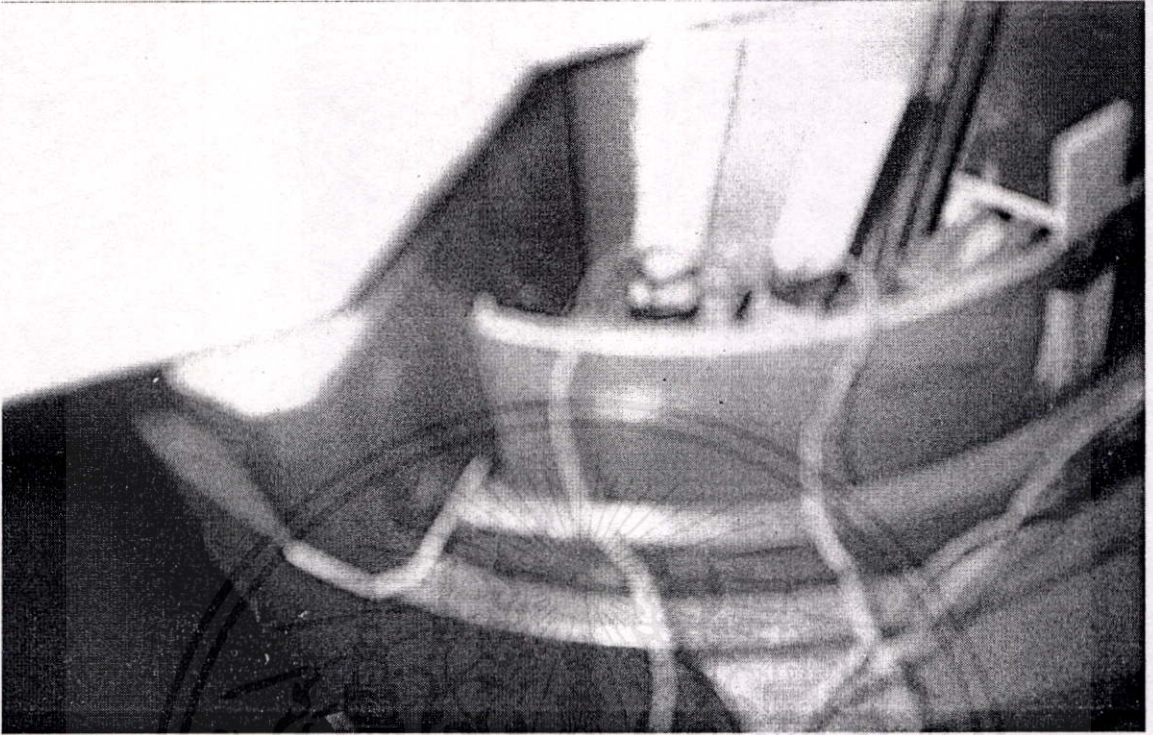


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



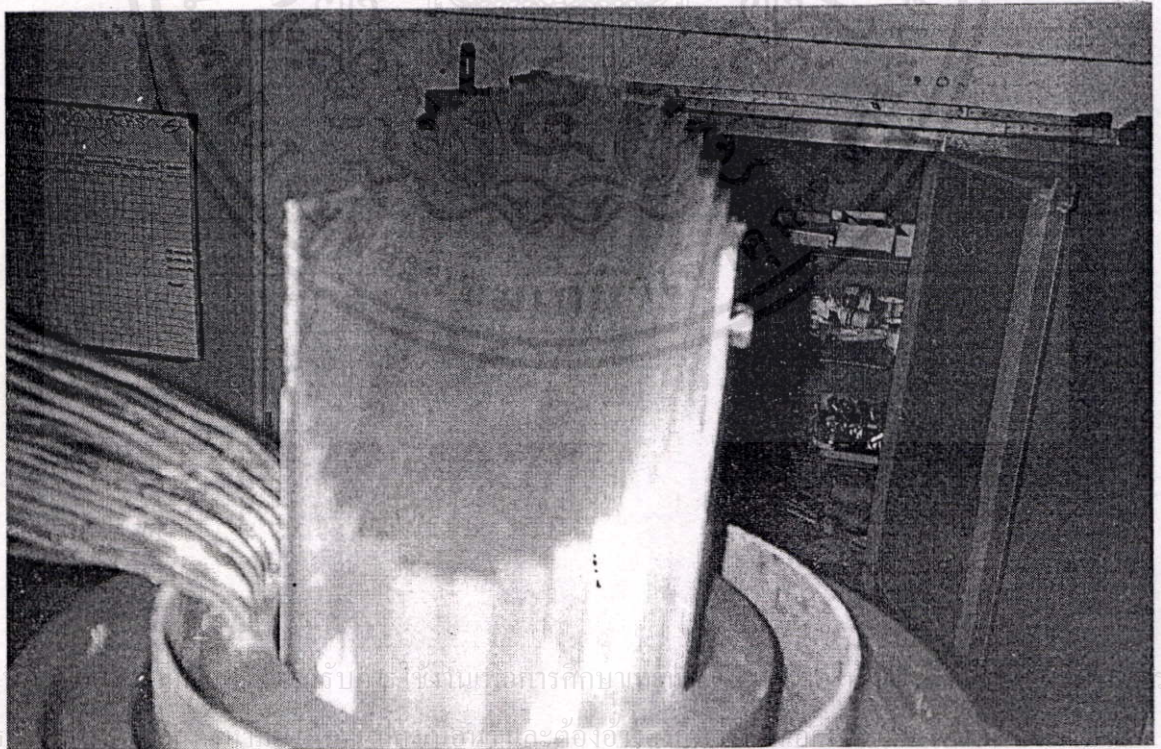
เอกสาร  
ไฟฟ้า

การคำนวณ



เอกศ  
ไม่ว่า


การคำ



เอกสาร  
ไม่จำกัด

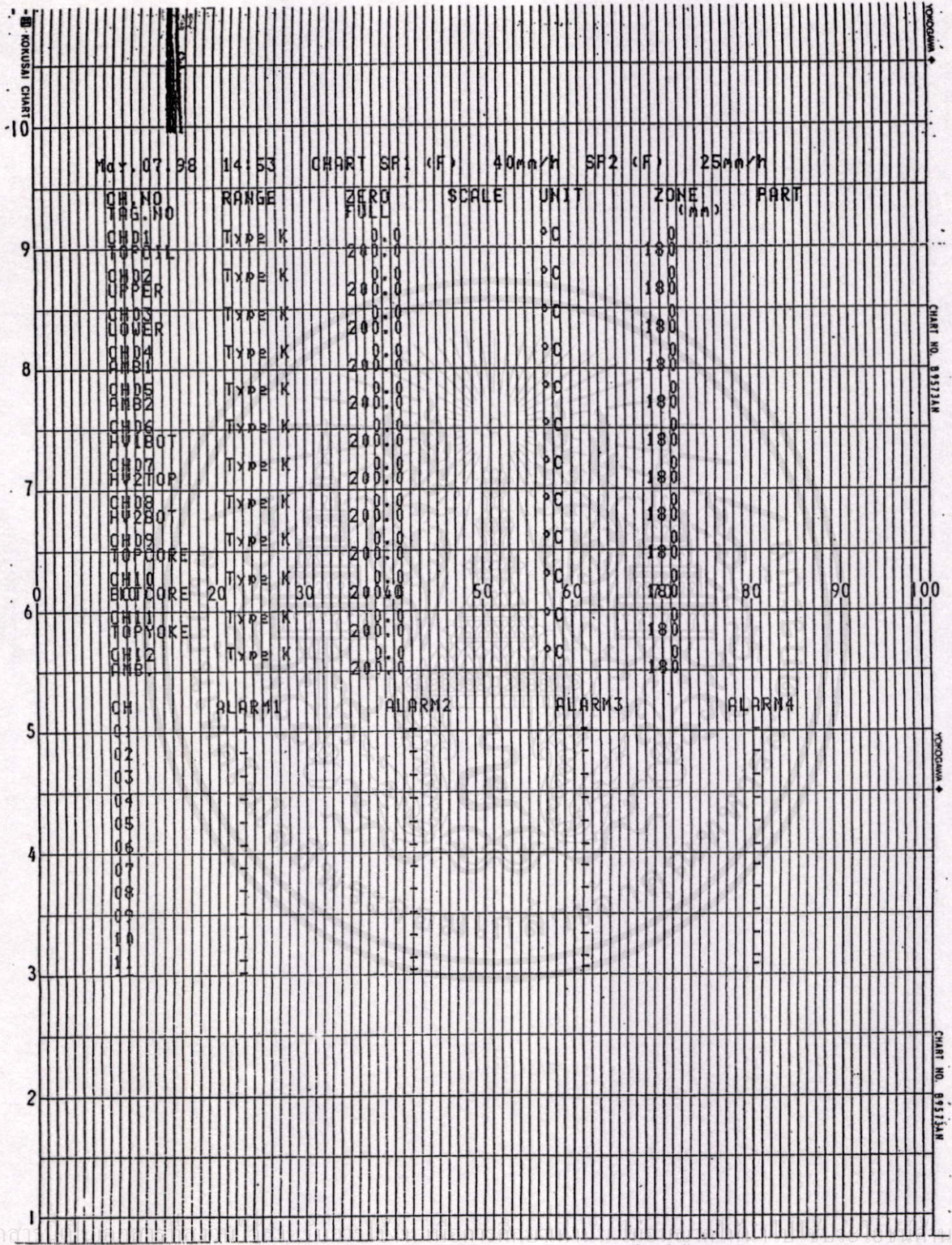
รับใช้เพื่อการศึกษา  
สงวนลิขสิทธิ์

ร.ด.



ภาคผนวก ง.  
ตัวอย่างกราฟที่ได้จากผลของการทดสอบ 24 ชั่วโมงเมื่อหม้อแปลงมีการต่อโหลดลักษณะต่างๆ  
และวงจรทดสอบ (Short circuit test)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

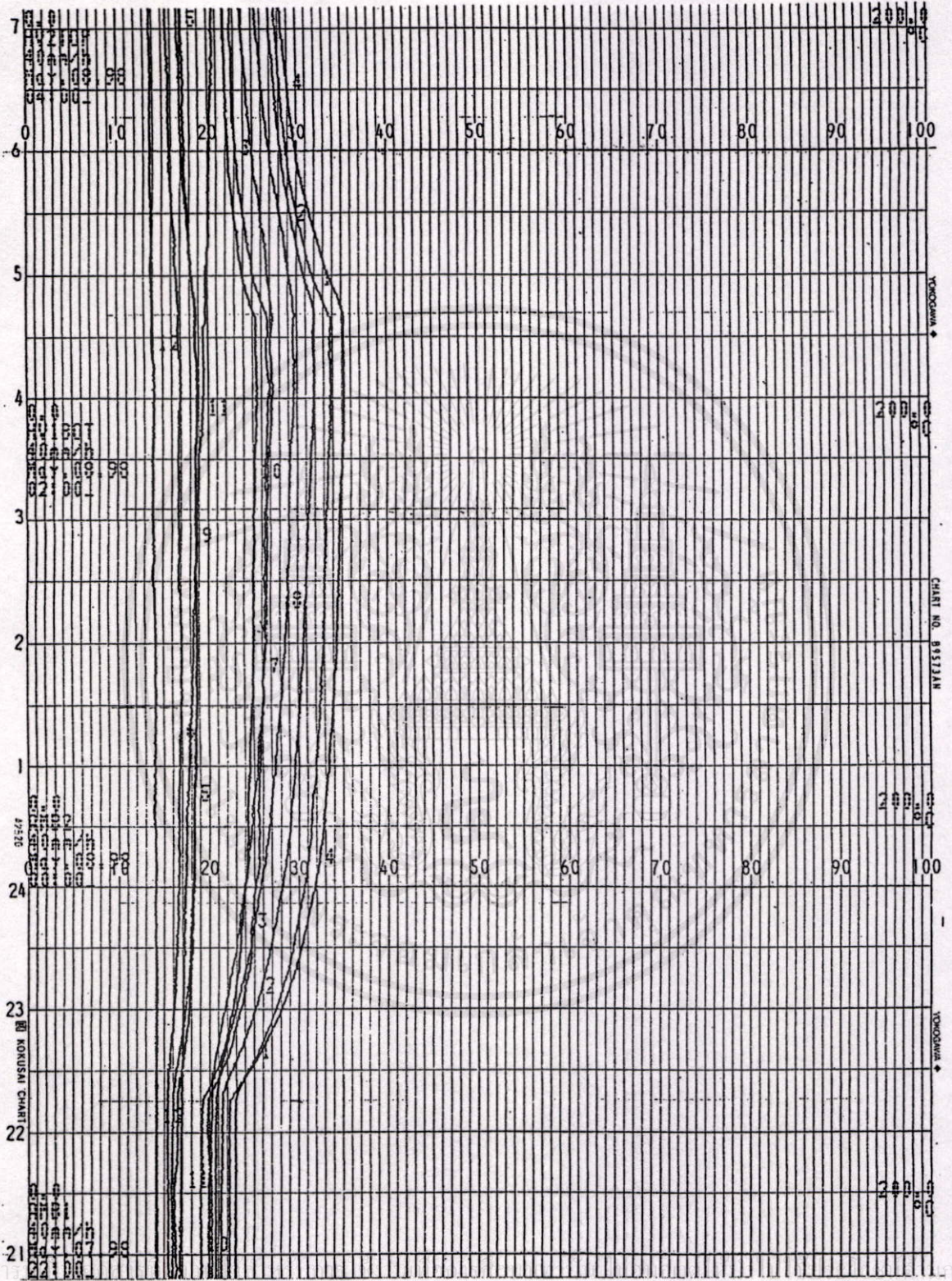


เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ การคัดลอกโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

การคัดลอกโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

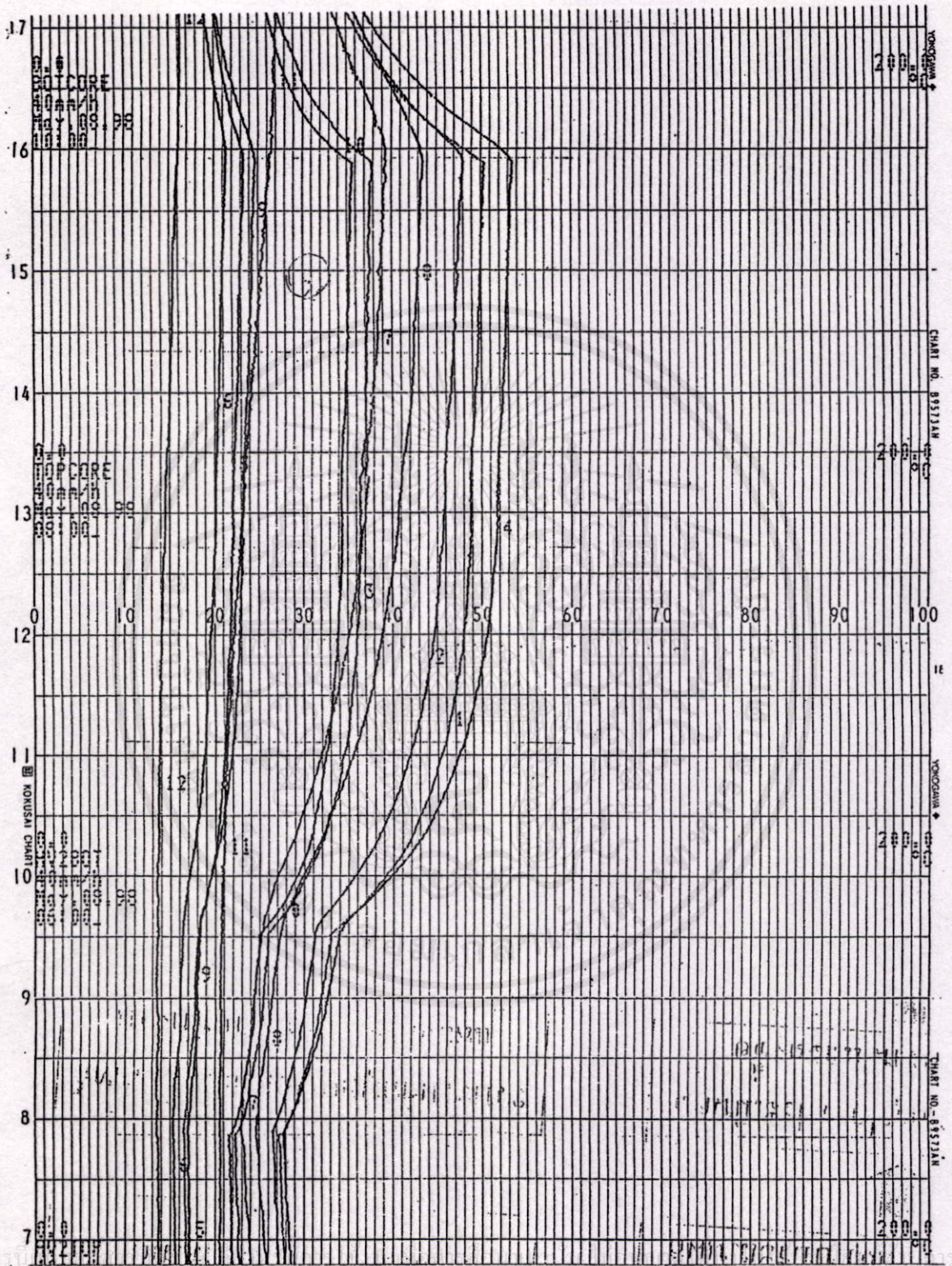
การคัดลอกโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย





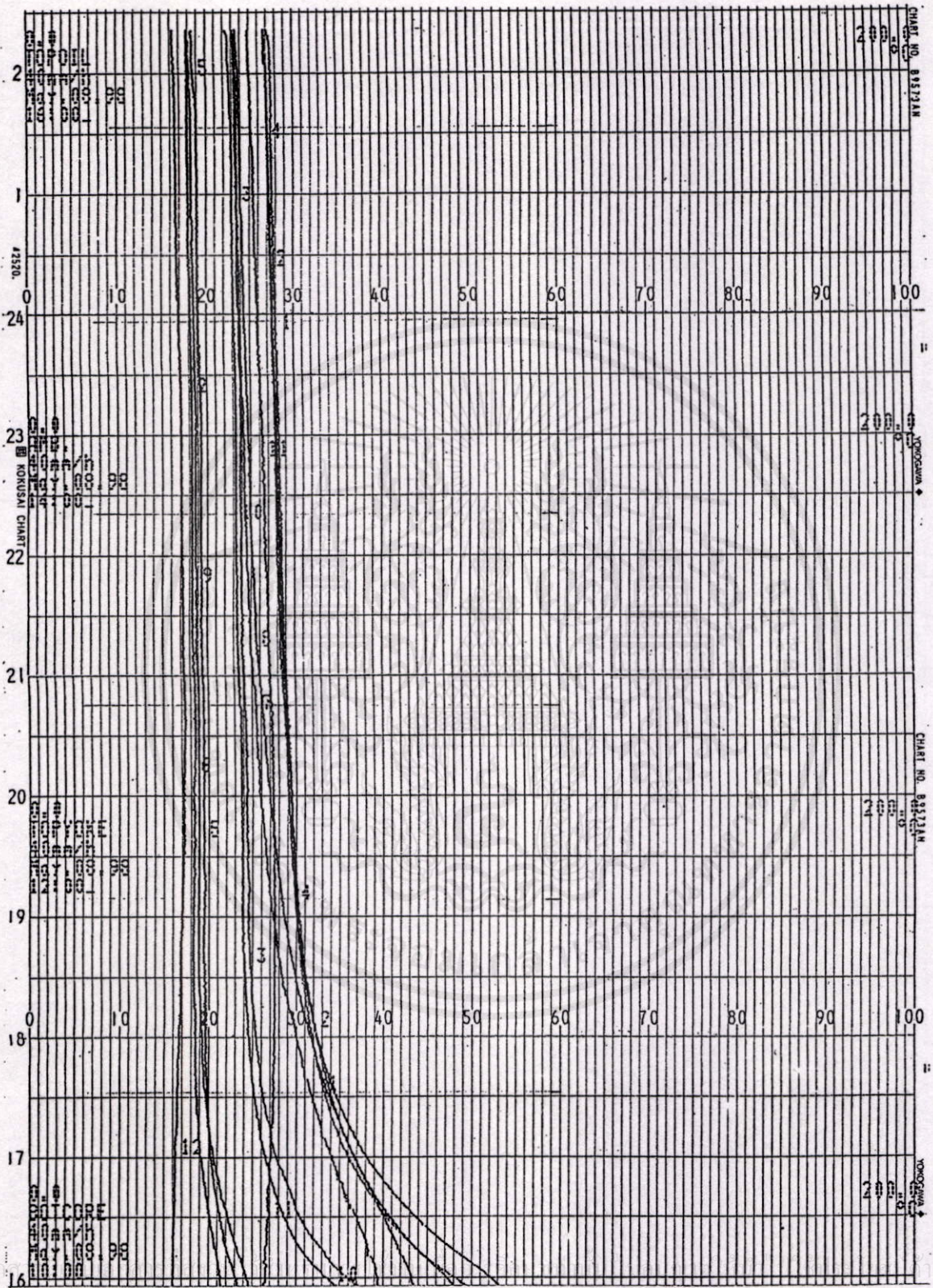
เอกสารนี้... การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



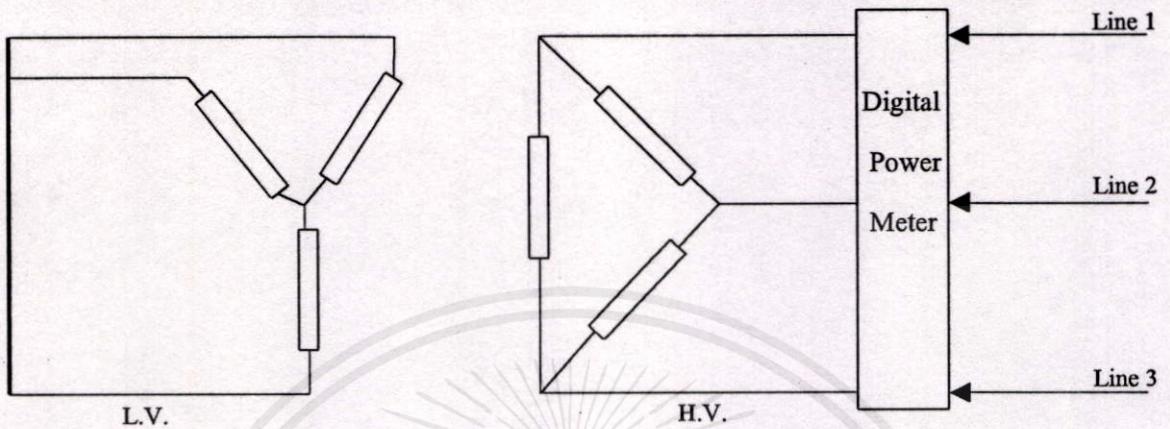
เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของทางราชการ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การคำนวณค่า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



วงจรทดสอบ (Short circuit test)

ดังนั้นในกรณีที่โหลดเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ค่าการวัดถึงอายุการใช้งานจะมีค่าดังสมการ

$$P_r = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_N}{\frac{t_1}{P_1} + \frac{t_2}{P_2} + \frac{t_3}{P_3} + \dots + \frac{t_N}{P_N}}$$

โดยที่

- $P_r$  = ผลของการวัดการวัดถึงอายุการใช้งาน (%)
- $t_N$  = ช่วงเวลาที่ใช้ในการต่อโหลดขนาด  $L_N$  เข้ากับหม้อแปลง (ชั่วโมง)
- $P_N$  = ค่าอายุการใช้งานของหม้อแปลง เมื่อต่อโหลด  $L_N$  เข้ากับหม้อแปลง (%) หรือค่าการวัดการวัดอายุการใช้งานสำหรับ  $\theta_{HN}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประชุมวิชาการ

ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21

21<sup>st</sup> Electrical Engineering Conference  
(EECON-21)

วันที่ 12-13 พฤศจิกายน 2541

ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
ถ.สุขสวัสดิ์ 48 เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร

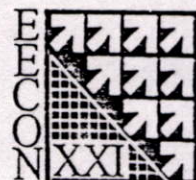
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
KING MONGKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THONBURI

ไม่เว้นการตีพิมพ์ทั้งฉบับ อีกทั้งยังมีให้ดำเนินการจัดการประชุมโดย การทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี



การประชุมวิชาการ  
ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21



# 21<sup>st</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-21)

วันที่ 12-13 พฤศจิกายน 2541  
ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
ถ.สุขสวัสดิ์ 48 เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร

\*\*\*\*\*

ดำเนินการจัดการประชุมโดย

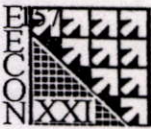
ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21  
ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
91 หมู่ 1 ถนนประชาอุทิศ บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ  
Phone. (66-2) 470-9083,9085 Fax 872-5050

Secretariat of EECON-21  
Department of Computer Engineering  
Faculty of Engineering  
King Mongkul's University of Technology Thonburi  
91 Moo 1 Bangmod, Tung-kru, Bangkok 10140  
E-mail:surapont@cpe.eng.kmitl.ac.th



ที่ ทม. 5302.13/1082

26 ตุลาคม 2541

เรื่อง ขอแจ้งกำหนดการการบรรยายบทความในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21

เรียน คุณไพโรจน์ ตี๋ชื่น

สิ่งที่ส่งมาด้วย กำหนดการการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21

ตามที่ท่านได้ส่งบทความเข้าร่วมการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 21 เรื่อง การทดสอบและ  
การทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้ง รหัส PW022 ทางคณะผู้จัดการประชุมฯ ได้จัดพิมพ์บทความ  
ของท่านลงในหนังสือการประชุมฯ แล้ว และขอให้ท่านปฏิบัติตามระเบียบการบรรยายบทความ ดังนี้

- ผู้บรรยายบทความทุกท่านต้องลงทะเบียนและรายงานตัวในวันพฤหัสบดีที่ 12 พฤศจิกายน 2541  
และรายงานตัวกับประธานการประชุมกลุ่มย่อย ในวันและห้องตามกำหนดการที่ส่งมาด้วย ก่อนช่วง  
เวลาของการบรรยาย 20 นาที
- ผู้บรรยายบทความที่ไม่มารายงานตัวก่อนขึ้นบรรยาย จะถูกตัดสิทธิ์ ในการบรรยาย
- บทความที่ผู้บรรยายบทความไม่มาบรรยาย หรือบทความที่ถูกตัดสิทธิ์จากข้อ 2 ทางคณะกรรมการ  
จัดการประชุมฯ จะนำรายชื่อผู้นำเสนอบทความทั้งหมดไปพิจารณาให้สิทธิ์การลงบทความสำหรับ  
การประชุมฯ ครั้งต่อไป และจะแจ้งให้คั่นสังกัดทราบ
- ผู้บรรยายบทความต้องคิดป้ายชื่อที่ได้รับในวันลงทะเบียนก่อนบรรยายบทความ จึงจะได้รับสิทธิ์ใน  
การบรรยาย

หากท่านมีข้อสงสัยประการใด กรุณาติดต่อสอบถามได้ที่หมายเลขโทรศัพท์ (02) 470-9083,470-9085

ขอแสดงความนับถือ

(รศ.ดร.นุชญ์เจริญ สิริเนากุล)

ประธานจัดการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21

คณะกรรมการจัดการประชุมฯ จะจัดเตรียม “เครื่องฉายแผ่นใส Overhead Projector”

สำหรับการบรรยายบทความเท่านั้น

# การทดสอบและทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้ง

## Testing and Prediction of Temperature of Dry Type Transformer

ไพโรจน์ คีรีน สิริวิช ทัดสวน ศุภี บรรจงจิตร

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ถนนฉลองกรุง แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ โทร (02) 3269902

### บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอผลงานวิจัยจากการทดสอบและทำนายค่าอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้ง จุดประสงค์เพื่อสามารถที่จะกำหนดโหลดการใช้งานของหม้อแปลงให้เกิดประโยชน์สูงสุด และการป้องกันอันตรายอันเนื่องมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นบนหม้อแปลงเกินที่กักขังต่อโหลดได้ ซึ่งถ้ามีค่ามากก็จะทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงสั้นลง และยังสามารถทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ การทดสอบนี้เป็นการทดสอบโดยใช้วิธีการการลัดวงจรตลอดช่วงระยะเวลา 24 ชั่วโมง ตามวัฏจักรโหลดที่จำลองขึ้น ซึ่งจะให้เห็นพฤติกรรมของความร้อนได้จริง และค่าผลลัพธ์ที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับผลจากการทำนาย

### Abstract

This paper presents the results of testing and prediction of temperature of dry type transformer in order to define load transformer for using in the most efficiency and protect faults occur from heat by using over load. Moreover, this paper also presents the prediction of life time of transformer, which make its life time shorter. The test used on short circuit test during 24 hours and varies with the values from simulated load cycle. The characteristic of heat from the test will be compared with the results from the prediction.

### 1. คำนำ

เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลดที่ต่ออยู่กับระบบไฟฟ้าหรือไม่ต่ออยู่กับคาน เป็นเรื่องปกติที่หม้อแปลงจะก่อให้เกิดความร้อนขึ้น อันเนื่องมาจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแกนเหล็ก(core loss) และค่าสูญเสียที่ลวดทองแดง(copper loss) หม้อแปลงจะยิ่งร้อนขึ้นตามปริมาณโหลดและระยะเวลาที่จ่ายกระแสไฟฟ้า ปริมาณความร้อนนี้จะสะสมขึ้นเรื่อยๆ ผลเสียก็คืออุณหภูมิที่อุณหภูมิที่พันขดลวดที่พันอยู่บนจะชำรุดเสียหายได้ ซึ่งจะทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงสั้นลง ดังนั้น การศึกษาพฤติกรรมของความร้อนที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลง จะเป็นการพัฒนาการ ออกแบบและการป้องกันอุณหภูมิที่เกิดกับหม้อแปลงขณะต่อโหลดได้เป็นอย่างดี

### 2. ทฤษฎี

การศึกษานี้จะเป็นการศึกษาเรื่องอายุของฉนวนและเรื่องวัฏจักรโหลดดังต่อไปนี้

#### 2.1 อายุฉนวน

อายุของฉนวนหรือค่าความเสื่อมสภาพของฉนวน จะเป็นฟังก์ชันของเวลาและอุณหภูมิ ซึ่งอุณหภูมิจะไม่คงที่ เมื่ออุณหภูมิสูงๆ จะทำให้เกิดค่าความเสื่อมสภาพมาก ดังนั้นการศึกษามุ่งประเด็นไปที่ความเสื่อมสภาพของฉนวนอันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนหม้อแปลงมีค่าต่างๆ จาก(1) สามารถหาค่าเปอร์เซ็นต์อายุการใช้งานรวม

$$P_r = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_N}{\frac{t_1}{P_1} + \frac{t_2}{P_2} + \frac{t_3}{P_3} + \dots + \frac{t_N}{P_N}} \quad \dots(1)$$

$P_r$  = เปอร์เซนต์การใช้งานรวม

$P_{1,2,-,N}$  = ค่าเปอร์เซ็นต์อายุการใช้งานย่อย ตั้งแต่ 1,2, -,N

$t_{1,2,-,N}$  = ค่าเวลาย่อยตั้งแต่ 1,2, -,N

#### 2.2 วัฏจักรโหลด

ในสถานะที่หม้อแปลงจ่ายโหลด ลักษณะแคว่งขึ้นๆลงๆนั้น ซึ่งจะทำให้เกิดการสะสมความร้อนของวัสดุในหม้อแปลง ซึ่งเป็นค่าสูญเสียที่มีลักษณะขึ้นๆลงๆคล้ายกันด้วย ในการพิจารณาลักษณะของโหลดจะแบ่งดังต่อไปนี้

##### 2.2.1 โหลดต่อเนื่องสภาวะคงตัว

ค่าอุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุด ในสถานะที่เป็นโหลดต่อเนื่องที่สภาวะคงตัว อาจจะคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$T_{HS} = T_A + \theta_{HS} \quad \dots(2)$$

ถ้าเป็นการระบายความร้อนด้วยตัวเอง

$$\theta_{HS} = \theta_{HS,r} [L]^{2N} \quad \dots(3)$$

ในการศึกษาเรื่องนี้ ไม่อนุญาตให้มีการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้มีการใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา  
ในการศึกษาเรื่องนี้ ไม่อนุญาตให้มีการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้มีการใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา

ถ้าเป็นการระบายความร้อนด้วยพัดลม

$$\theta_{HS} = \theta_{HS,r} [L^2 K_T]^X \quad \dots(4)$$

เมื่อ

$$K_T = \frac{T_K + T_{HS}}{T_K + T_{HS,r}} \quad \dots(5)$$

โดยที่

$\theta_{HS}$  = ค่าอุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุดที่มากกว่าอุณหภูมิแวดล้อม ค่อหน่วย L, °C

$\theta_{HS,r}$  = ค่าอุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุดที่มากกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่พิกัดหรือที่ได้จากการทดสอบ ที่ 1.0 ค่อหน่วยโหนด, °C

L = โหนดค่อหน่วย

$K_T$  = ค่าอุณหภูมิที่ถูกค่อสำหรับค่าความต้านทาน-อุณหภูมิ

N = 0.8 สำหรับการระบายความร้อนด้วยตัวเอง (AN)

$T_{HS}$  = ค่าอุณหภูมิจุดร้อนสุด ค่อหน่วย L, °C

$T_{HS,r}$  = ค่าอุณหภูมิจุดร้อนสุดที่พิกัด หรือจากการทดสอบ ค่อหน่วยโหนด 1, °C

$T_A$  = อุณหภูมิแวดล้อม, °C

$T_K$  = 234.5°C สำหรับทองแดง, 225°C สำหรับอลูมิเนียม

X = 1 สำหรับการระบายความร้อนด้วยอากาศแบบบังคับ (AF)

2.2.2 โหนดในช่วงเวลาสั้นๆ

ค่าอุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุดในสภาวะที่เป็นโหนดในช่วงเวลาสั้นๆ อาจจะคำนวณได้ดังค่อไปนี้

$$\theta_i = (\theta_u - \theta_l) [1 - \exp^{-t/\tau}] + \theta_l \quad \dots(6)$$

$$T_{HS} = \theta_i + T_A \quad \dots(7)$$

$\theta_i$  = ค่าอุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุด ที่ช่วงเวลาเริ่มต้น ที่โหนด  $L_i$ , °C

$\theta_l$  = ค่าอุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุด ที่ช่วงเวลา  $t$ , °C

$\theta_u$  = ค่าอุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุด ที่ช่วงเวลาท้าย  $t$  ที่โหนด  $L_u$ , °C

$t$  = เวลา, นาที

$\tau$  = ค่าคงที่ของเวลาของขดลวด, นาที (เมื่อเป็นหม้อแปลงแบบแห้ง ชนิด คลาส -เรจิน ประมาณ 45 นาที)

2.2.3 การจำลองวัฏจักรโหนดโดยวิธีการลัดวงจรหม้อแปลง

ในสภาพการะไฟฟ้าที่หม้อแปลงได้รับจริงในงานสนามนั้นจะเป็นลักษณะโหนดจริง (...แรงดันไฟฟ้าที่พิกัด) แต่ในการทดสอบในห้องทดสอบนั้นเป็นการยากที่จะสร้างโหนดที่มีขนาดใหญได้ เพราะกระแสไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้าที่พิกัดของหม้อแปลงขนาดใหญมีค่าสูงมาก แต่ก็พอที่

จะมีแนวทางในการสร้างโหนดที่พิกัดแรงดันไฟฟ้าได้ด้วยวิธีการทดสอบแบบ back to back แต่วิธีการนี้มีข้อจำกัดตรงที่ว่า จะต้องใช้หม้อแปลงที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน แต่ในทางปฏิบัติจริงแล้วเป็นการยากที่จะกระทำ เพราะจะต้องสร้างหม้อแปลงเพิ่มขึ้นอีก 1 ตัว ทำให้ค่าใช้จ่ายสูงขึ้นอีกเท่าตัว

จาก [3] ได้มีการทดสอบหาค่าอุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุดหม้อแปลงโดยวิธีการ back to back เทียบกับวิธีการทดสอบโดยการลัดวงจร (Short circuit test) ร่วมกับเปิดวงจร (Open circuit test) ซึ่งค่าอุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุดที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกัน เพราะฉะนั้นก็จะเป็นประโยชน์สำหรับการทดสอบ ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายและลดอันตรายที่จะเกิดขึ้นได้เป็นอย่างมาก จาก [2,3] สามารถคำนวณหาค่าต่างๆ ดังค่อไปนี้

$$\theta'_C = \theta_C \left[ \frac{\theta_{HS} + T_A + T_K}{\theta_C + T_{AT} + T_K} \right]^N \quad \dots(8)$$

$$\theta_{HS} = \theta'_C \left[ 1 + \left( \frac{\theta'_C}{\theta_C} \right)^{\frac{1}{N}} \right]^N \quad \dots(9)$$

โดยที่

$\theta_C$  = ค่าอุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุดที่มากกว่าอุณหภูมิแวดล้อม ขณะทดสอบ โดยการลัดวงจร °C

$\theta'_C$  = ค่าอุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุด ที่มากกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่ถูกค่อเนื่องด้วยพิจารณากระแสไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว, °C

$\theta_e$  = ค่าอุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุดที่มากกว่าอุณหภูมิแวดล้อม ขณะทดสอบโดยการเปิดวงจร, °C

$\theta_{HS}$  = ค่าอุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุดที่มากกว่าอุณหภูมิแวดล้อม สำหรับเงื่อนไขที่พิกัด, °C

$T_A$  = อุณหภูมิแวดล้อมที่พิกัด, °C

$T_{AT}$  = อุณหภูมิแวดล้อมช่วงระหว่างการทดสอบโดยการลัดวงจร, °C

$T_K$  = 234.5°C สำหรับทองแดง, 225°C สำหรับอลูมิเนียม

N = 0.8 สำหรับการระบายความร้อนด้วยตัวเอง (AN); 0.9 สำหรับการระบายความร้อนด้วยอากาศแบบบังคับ (AF)

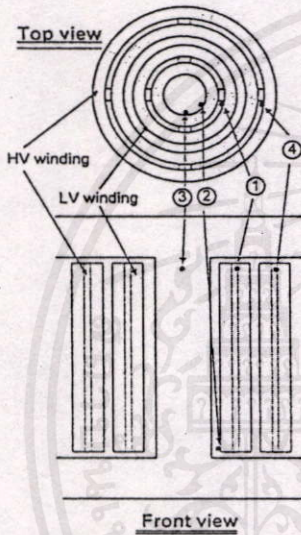
3. การทดลองและผลการทดลอง

การทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงที่มีคุณสมบัติตามตารางที่ 1 โดยจะคิดตั้งเทอร์โมคัปเปิลตามตำแหน่งต่างๆ ที่ขดลวดชุดกลางของหม้อแปลงดังรูปที่ 1 และจะทำกรทดสอบแบบลัดวงจรหม้อแปลงทางด้านแรงดันไฟฟ้าค่าโดยปรับกระแสไฟฟ้าตามช่วงวัฏจักรโหนดที่กำหนดขึ้น ดังรูปที่ 2 โดยให้หม้อแปลงมีการระบายความร้อนด้วยตัวเอง [AN]

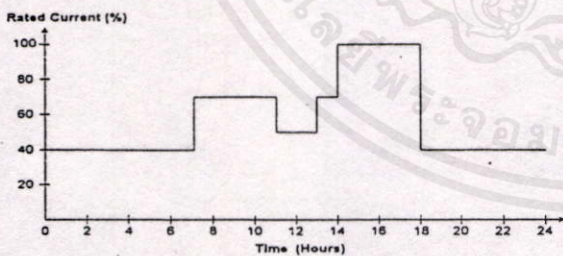
ตารางที่ 1 ค่าคุณสมบัติหม้อแปลงแบบแห้งที่ทำการทดสอบ

Rated 1,000 kVA	Frequency = 50 Hz
Rated High volt = 12,000V/24,000V	Rated Low volt = 416V/240V
No load Loss = 2,091 W	Load Loss = 9,220 W
Total Loss = 12,722 W	Vector group Dyn1
imp.volt 5.63%	temp. class F (155°C)

จากผลการทดสอบดังรูปที่ 3 จะเห็นว่าค่าอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลหมายเลขที่ 1 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ขดลวดชุดในด้านล่างภายในช่องค้ำคระบายความร้อน มีอุณหภูมิสูงมากที่สุด จากนั้นก็เป็นเทอร์โมคัปเปิลหมายเลข 3, 4, 2 เรียงตามลำดับ



รูปที่ 1 ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล



รูปที่ 2 กราฟช่วงวัฏจักร โหลดที่กำหนด 24 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4 ที่เส้นหมายเลข 1 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดจากการทดสอบด้วยวงจรของหม้อแปลง ที่เส้นหมายเลข 2 เป็นการอ่านค่าอุณหภูมิจากเส้นหมายเลข 1 ให้เป็นค่าอุณหภูมิเทียบเท่ากับอุณหภูมิแท้จริงขณะรับภาระจริง(แรงดันไฟฟ้าที่พิกัด)โดยใช้สม

การที่ 8.9 เมื่อกำหนดให้ค่าอุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุดที่มากกว่าอุณหภูมิแวดล้อมขณะทดสอบโดยการเปิดวงจร ( $\theta_c$ ) = 17 °C ,  $T_A$  = 34.25 °C ที่เส้นหมายเลข 3 เป็นการอ่านค่าโดยใช้สมการที่ 2,3,6,7 เมื่อกำหนดให้ค่าอุณหภูมิจุดร้อนสุดที่พิกัด ( $\theta_{HS,r}$ ) จากสมการที่ 3 = 104.3 °C (IEC กำหนดไม่เกิน 115 °C) และสมมติค่าอุณหภูมิแวดล้อม ( $T_A$ ) = 30 °C

4.สรุปผลการทดลอง

จากรูปที่ 3 จะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่า 1.อุณหภูมิด้านบนของหม้อแปลงจะมีค่าสูงกว่าด้านล่างหม้อแปลง 2.อุณหภูมิที่ขดลวดด้านใน (ขดแรงดันไฟฟ้าค่า)จะมีค่าสูงกว่าที่ขดลวดด้านนอก(ขดแรงดันไฟฟ้าสูง)

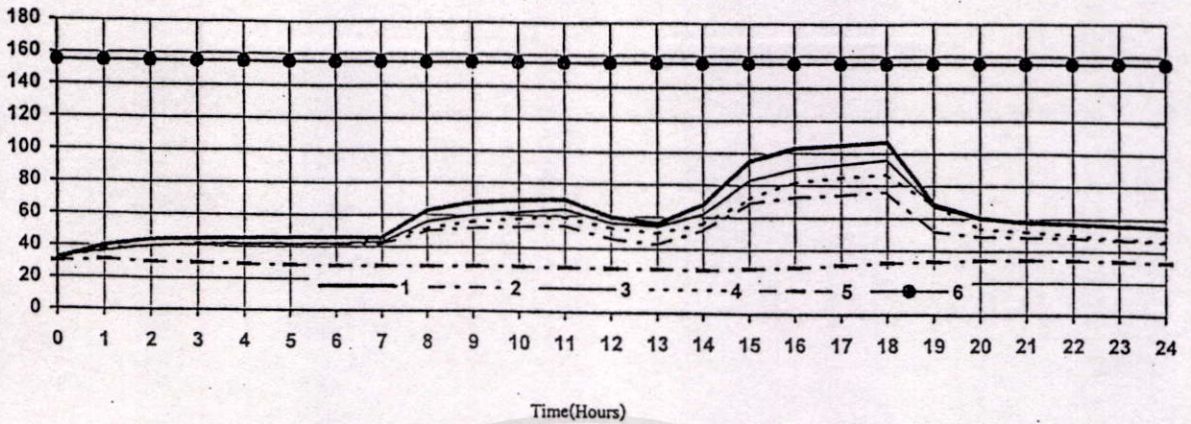
จากรูปที่ 4 เนื่องจากการทดสอบเป็นในลักษณะโหลดสูงสุดไม่เกิน 100% ของพิกัด ดังนั้นอุณหภูมิจริงและอุณหภูมิจากผลของซอฟต์แวร์ จะไม่สูงมากจนเกินอุณหภูมิทนได้สูงสุดของฉนวน(class F อุณหภูมิทนได้ 155 °C ) ค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิจุดร้อนสุด ที่เวลา 18 ชั่วโมง จากการทดสอบโดยด้วยวงจร(เส้นที่ 1) เทียบกับซอฟต์แวร์(เส้นที่ 3) มีความแตกต่าง = 20.2 % และซอฟต์แวร์(เส้นที่ 3) เทียบกับอุณหภูมิจุดร้อนสุดที่มีการแก้ไข (เส้นที่ 2) มีความแตกต่าง = 11.6 %

ในการอ่านค่าอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าตัวนี้ เมื่อพิจารณาที่โหลดหม้อแปลงที่ไม่เกินพิกัด จะทำให้อายุการใช้งานที่ 100% หรือ 20 ปี แต่ถ้าสมมติให้หม้อแปลงตัวที่ทำการทดสอบนี้จ่ายโหลดที่ 100 % เป็นเวลา 20 ชั่วโมง และจ่ายโหลดที่ 150% เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยสมมุติอุณหภูมิแวดล้อมมีค่า 30 °C จะสามารถคำนวณหาอายุการใช้งานจุดร้อนสุดเฉลี่ยได้ 2 ช่วง  $T_{HS}$  เฉลี่ย(1) = 134.3 °C และ  $T_{HS}$  เฉลี่ย(2) = 181.2 °C จากนั้นก็สามารถหาค่าเปอร์เซ็นต์อายุการใช้งานจากตารางที่ 1 ของ [1] จะได้  $P_1$  = 1200 ,  $P_2$  = 5.21 และเปอร์เซ็นต์อายุการใช้งานรวม (P<sub>1</sub>) จากสมการที่ 1 = 30.6% หมายความว่าหม้อแปลงตัวนี้มีอายุการใช้งานประมาณ 6 ปี

ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้น เกิดจากตำแหน่งที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลมิได้ติดตั้งที่ลวดตัวนำโดยตรง เป็นเพียงแต่ติดตั้งที่ผิวของฉนวนเรซิน อันเนื่องมาจากหม้อแปลงที่ทำการทดสอบนี้เป็นหม้อแปลงเชิงการค้า มิได้เป็นหม้อแปลงสำหรับงานวิจัย จึงทำให้ค่าอุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง และการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลอยู่ในตำแหน่งที่แคบมาก จึงอาจจะทำให้ตัวเทอร์โมคัปเปิลไม่สัมผัสกับผิวฉนวนเรซินอย่างสนิท รวมถึงค่าอุณหภูมิแวดล้อมที่ใช้ทำนายเป็นเพียงค่าที่เฉลี่ยเท่านั้น แท้ที่จริงต้องใช้ค่าอุณหภูมิแวดล้อมของแต่ละท้องถิ่น ที่ได้ทำการสำรวจในปีต่างๆที่ผ่านมา ดังนั้นค่าของซอฟต์แวร์จึงน่าที่จะยอมรับในการใช้งานจริงได้ และได้รับการวิจัย,พัฒนาต่อไป เพื่อประโยชน์ต่างๆที่กล่าวมาข้างต้น

เอกสารนี้มีเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก,เผยแพร่ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

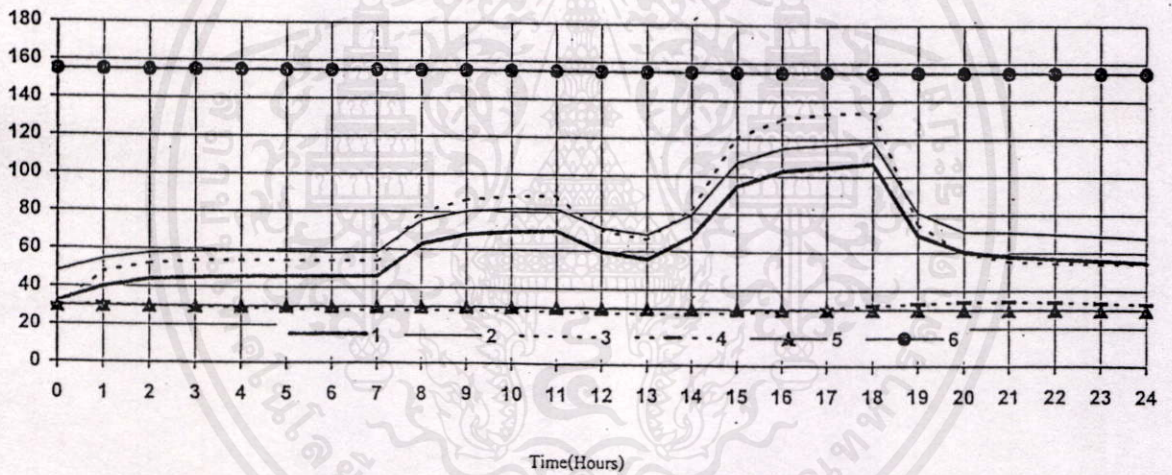
Temp. (°C)



รูปที่3 กราฟค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆที่ทำการทดสอบ

หมายเหตุ เส้นหมายเลขที่ 1,2,3,4 คือ ค่าอุณหภูมิที่เทอร์โมคัปเปิล ที่ตำแหน่ง 1,2,3,4 เรียงตามลำดับ ,°C  
 เส้นหมายเลขที่ 5 คืออุณหภูมิแวดล้อม ,°C เส้นหมายเลขที่ 6 คืออุณหภูมิของฉนวน class (F)

Temp. (°C)



รูปที่4 กราฟค่าอุณหภูมิจุดร้อนสุด(Hottest spot) ที่ได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบกับการทำงาน

หมายเหตุ เส้นหมายเลขที่1 คือค่าอุณหภูมิจุดร้อนสุดที่เทอร์โมคัปเปิล ที่ตำแหน่ง ที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีการคำนวณ ,°C  
 เส้นหมายเลขที่2 คือค่าอุณหภูมิจุดร้อนสุด ที่ได้นำค่าอุณหภูมิจากหมายเลขมาแก้ไขให้เป็นค่าอุณหภูมิจริง ที่ภาระจริง โดยใช้สมการที่ 8-9 °C  
 เส้นหมายเลขที่3 คือค่าอุณหภูมิจุดร้อนสุด ที่ได้จากการทำนายโดยใช้สมการที่ 2,3,6,7 ,°C  
 เส้นหมายเลขที่4 คือค่าอุณหภูมิแวดล้อมที่ทำการทดสอบ ขณะลัดวงจรหม้อแปลง ,°C  
 เส้นหมายเลขที่5 คือค่าอุณหภูมิแวดล้อมที่สมมุติขึ้น เพื่อใช้ในการทำนายค่าอุณหภูมิจุดร้อนสุดที่ช่วงเวลาต่างๆ ,°C  
 เส้นหมายเลขที่6 คืออุณหภูมิของฉนวน class (F) มีค่าไม่เกิน 155 °C

Pierce.,IEEE Transaction's on Industry Application ,Vol.29, NO. 3  
 May/June1993.

[3.] "Predicting Hottest spot Temperatures in Ventilated Dry Type Transformer Windings. Linden W.Pierce.,IEEE Transaction's on Industry Application, Vol. 2 , NO. 2 , April 1994.

5. เอกสารอ้างอิง

- [1.] " Power Transformer Loding " William E.Featheringill IEEE Trans action's on Industry Application,Vol. IA-19, No. January/February 1983.
- [2.] " Specifying and Loading Cast-Resin Transformers" Linden W.

เอกสารอ้างอิงเหล่านี้เป็นเอกสารที่นำมาใช้เพื่อประกอบการศึกษาและจัดทำรายงานฉบับนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง  
กรุงเทพฯ 10520  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

๒๒

กันยายน 2540

เรื่อง การขออนุญาตเข้ารับการฝึกงานเพื่อทำวิทยานิพนธ์

เรียน คุณประเชษฐ์ จิรธรรมกุล

ตำแหน่ง ผู้จัดการฝ่ายบุคคล

บริษัท ไทยทราฟ จำกัด

เนื่องด้วยกระผม นายไพโรจน์ ตี๋ชื่น นักศึกษาหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า โดยมี รศ. ศุภี บรรจงจิตร เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา

ซึ่งกระผมทราบว่าบริษัทไทยทราฟ ผลิตหม้อแปลงชนิดแห้ง ดังนั้นกระผมจึงขออนุญาต  
เข้ารับการฝึกงานที่บริษัทไทยทราฟ จำกัด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำวิทยานิพนธ์ เกี่ยวกับหม้อแปลงชนิด  
แห้งเป็น ระยะเวลา 1 เดือน ( 1 ตุลาคม - 31 ตุลาคม 2540 ) โดยกระผมได้แนบรายละเอียดเกี่ยวกับผัง  
แสดงขั้นตอนต่าง ๆ และทฤษฎีของ IEEE, IEC มาด้วย เพื่อที่จะใช้ในการวิจัยที่บริษัท ไทยทราฟ จำกัด  
จึงเรียนมาเพื่อให้ท่านทราบ พร้อมทั้งอนุญาตให้กระผมเข้ารับการฝึกงานครั้งนี้ด้วย

ขอแสดงความขอบพระคุณอย่างสูง



( รศ. ศุภี บรรจงจิตร )

อาจารย์ที่ปรึกษา



( นายไพโรจน์ ตี๋ชื่น )

นักศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4 9 9 27 5 9 :  
163

พิมพ์ คุณไพโรจน์

บริษัท ไทยทราฟ แมนูแฟคเจอร์ริง จำกัด  
THAI TRAFD MANUFACTURING CO., LTD.

Mailing Address, Head Office : 115 Pcedaview Building, Soi Chokechai Chongjumroen, Rachadapisek Rd., (Rama 3)  
Yannava, Bangkok 10120 Thailand. Tel. (662) 295-2121-30 Fax : (662) 295-2132 Tlx : S4190 IEEC TH.  
Manufacturing Plant : 177 Moo 3 Banbung-Klang Rd., Tambon Krasaebon  
Klang, Rayong 21110 Thailand. Tel. (66) 38-886331 Fax : (66) 38-671799

วันที่ 27 ตุลาคม 2540

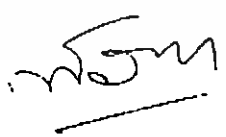
เรื่อง การรับนักศึกษาเข้าฝึกงาน

เรียน อาจารย์ที่ปรึกษา

ทางบริษัท ไทยทราฟแมนูแฟคเจอร์ริง จำกัด ได้รับหนังสือขออนุญาตเข้ารับการฝึกงาน เพื่อ  
ทำวิทยานิพนธ์ของ นายไพโรจน์ ตีชื่น ลงวันที่ 22 กันยายน 2540 นั้น ทางบริษัทฯ ได้ร่วมกัน  
พิจารณาเห็นสมควรอนุมัติให้ นายไพโรจน์ ตีชื่น นักศึกษาจากสถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้า  
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง เข้ามาฝึกงานเพื่อทำวิทยานิพนธ์เกี่ยวกับหม้อแปลงชนิดแห้งที่บริษัทฯ ได้  
เป็นระยะเวลา 1 เดือน

จึงเรียนมาเพื่อทราบ

ขอแสดงความนับถือ



(นายพัลลภ พูลวิทยกิจ)

รักษาการผู้จัดการโรงงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นายไพโรจน์ ดีชื่น เกิดเมื่อวันที่ 26 ธันวาคม พ.ศ. 2507 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม ปีการศึกษา 2528 เข้าศึกษาต่อหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2536 มีผลงานทางวิชาการเรื่อง “การทดสอบและทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแบบแห้ง” ลงตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 (EBCON-21)

ประสบการณ์ในการทำงาน เลขทำงานตำแหน่งวิศวกรไฟฟ้า บริษัทเอกชนหลายแห่ง ตำแหน่งอาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเซนต์จอห์น (มาตรฐาน ISO 9002) หน้าที่การงานปัจจุบัน ประกอบอาชีพอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้