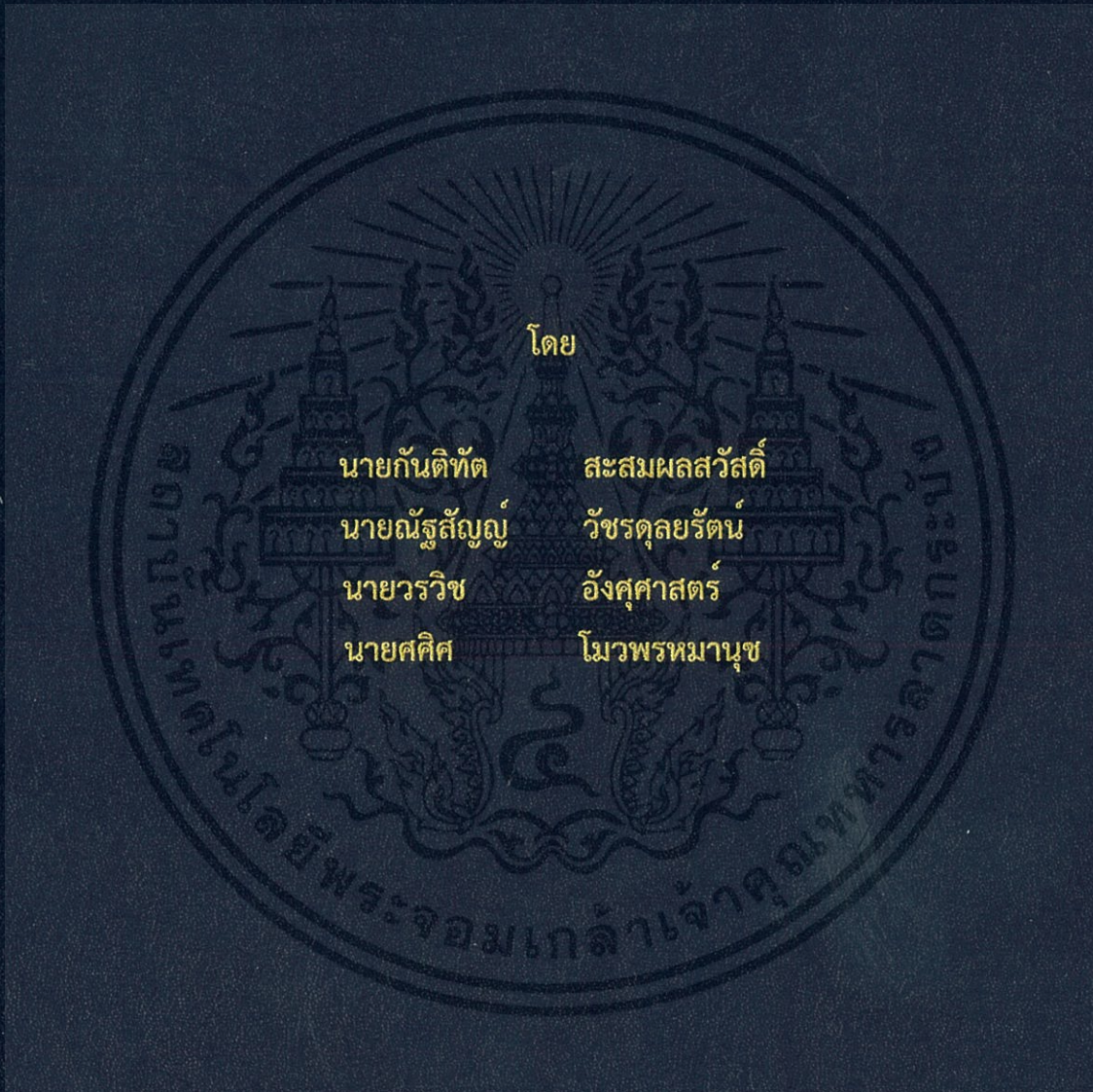


การวินิจฉัยปัญหาหม้อแปลงชนิดฉนวนน้ำมัน
DIAGNOSIS FOR OIL IMMERSED TRANSFORMER PROBLEMS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การวินิจฉัยปัญหาหม้อแปลงชนิดฉนวนน้ำมัน
DIAGNOSIS FOR OIL IMMERSED TRANSFORMER PROBLEMS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DIAGNOSIS FOR OIL IMMERSSED TRANSFORMER PROBLEMS



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2559

การวินิจฉัยปัญหาหม้อแปลงชนิดฉนวนน้ำมัน

DIAGNOSIS FOR OIL IMMERSSED TRANSFORMER PROBLEMS



อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.ธีรพล โปธิพงษ์วิวัฒน์

รศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2559

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การวินิจฉัยปัญหาหม้อแปลงชนิดฉนวนน้ำมัน

ผู้จัดทำ

1. นาย กันติทัต สະสมผลสวัสดิ์
2. นาย ณัฐสัญญา วิชรดุลยรัตน์
3. นาย วรวิษ อังศุศาสตร์
4. นาย ศศิศ โมวพรหมานูช





..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.ธีรพล โปธิพงษ์วิวัฒน์)



..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.นเรศรชู พัฒนเดช)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวินิจฉัยปัญหาหม้อแปลงชนิดฉนวนน้ำมัน

นาย กันติทัต	สะสมผลสวัสดิ์	
นาย ญัฐสัญญา	วัชรดุลย์รัตน์	
นาย วรวิช	อังศุศาสตร์	
นาย ศศิศ	โมฆพรหมานุช	
ดร.ธีรพล	โพธิ์พงษ์วิวัฒน์	อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ดร.นรเศรษฐ	พัฒน์เดช	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2559		

บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาโครงสร้างพื้นฐานของหม้อแปลงและน้ำมันหม้อแปลง และการวินิจฉัยปัญหาที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยการวิเคราะห์ค่าแก๊สที่ละลายในน้ำมันหม้อแปลง (Dissolved Gas Analysis : DGA) โดยการนำค่าแก๊สที่ละลายในน้ำมันของหม้อแปลงจากการไฟฟ้านครหลวง จำนวน 132 ตัว มาทำการประเมินสภาพด้วยวิธีตามมาตรฐาน IEEE C57.104 วิธีการประเมินสภาพด้วยปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 และวิธี Health Index จากนั้นจึงนำค่าแก๊สที่ละลายในน้ำมันของหม้อแปลงที่มีแนวโน้มที่จะมีความผิดปกติเกิดขึ้นมาแปลผลด้วยวิธีการตามมาตรฐาน IEC60599 IEEE C57.104 และวิธี Duval Pentagon พบว่าหม้อแปลงส่วนใหญ่มีปัญหาเรื่องการเสื่อมสภาพของฉนวนจากความร้อนที่อุณหภูมิไม่เกิน 300 °C รวมทั้งทำการจำลองการเกิดความผิดปกติในระบบการฉนวนของหม้อแปลง ได้แก่ การทดลองการเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในน้ำมันหม้อแปลง การทดลองการเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านเพรสบอร์ดที่ผ่านการอิมเพรกเนตด้วยน้ำมันหม้อแปลง การทดลองการเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าในน้ำมันหม้อแปลง และการทดลองการเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าผ่านเพรสบอร์ดที่ผ่านอิมเพรกเนตด้วยน้ำมันหม้อแปลง ปริมาณแก๊สที่ตรวจจับได้จากการทดลองจะถูกนำมาทำการแปลผลด้วยวิธีการต่างๆ พบว่าการแปลผลด้วยวิธีตามมาตรฐาน IEC และ IEEE ให้ผลสอดคล้องกับปัญหาที่จำลองขึ้น

DIAGNOSIS FOR OIL IMMERSED TRANSFORMER PROBLEMS

Kantitat	Sasomponsawat	
Nattasan	Watcharadulyarat	
Worawich	Angsusatra	
Sasis	Mowaprommanuch	
Dr.Teeraphon	Phophongviwat	Advisor
Assoc.Prof.Dr.Techn.Norasage	Pattanadech	Advisor

Abstract

The objectives of the project are to study basic structure of a power transformer and transformer oil including dissolved gas analysis method (DGA) for transformer problem diagnosis. Dissolved gases in transformer oil of the 132 transformers from Metropolitan Electricity Authority of Thailand were evaluated according to IEEE C57.104, gas limitation criteria L1 and Health Index method. Then, the problems which may occur in the transformer having a dissolved gas quantity more than the limitation value were evaluated in accordance with IEC 60599, IEEE C57.104 and Duval Pentagon technique. It was found that the most problem of transformer insulation was thermal fault. Besides, the experiments for faults in the transformer insulation were performed. The dissolved gases in the transformer oil from the AC and lightning impulse breakdowns of the tested transformer oil including the dissolved gases acquired from the breakdown tests of impregnated pressboards immersed in the transformer oil under AC and impulse voltage respectively were interpreted by using the mentioned techniques. It was found that the referred gas interpretation techniques provided the solution met the simulation problems.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอบคุณ ดร.ธีรพล โพธิ์พงศ์วิวัฒน์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา รวมไปถึงคุณปณณวีร์ ฉายศิริ ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไข ปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี ขอขอบคุณ คุณวิลาสินี วัฒนกไพบุลย์ คุณกิตติพิศ จรรย์านูรัตน์ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ที่ได้ให้ความเอาใจใส่ และช่วยเหลือในด้านต่างๆ ด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณ บริษัท เมเดนเซะ จำกัดที่ให้ความอนุเคราะห์เรื่องทุนทรัพย์ การไฟฟ้านครหลวง บริษัท โกลว์ พลังงาน จำกัด (มหาชน) บริษัท โฟกัส แลบบอราทอรีส์ จำกัด และ บริษัท ต้น แอนด์ ชัน จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านความรู้และข้อมูลที่สำคัญในการจัดทำปริญญานิพนธ์จนสำเร็จ

ขอขอบคุณ บริษัท ละมุลวิศวกรรม จำกัด บริษัท อินซูเลชั่น เอนจิเนียริง แอนด์ คอนเซาท์แทนส์ จำกัด และบริษัท ดาต้า เอนทรี กรุป จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เกี่ยวกับเครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบ จนการทดสอบเสร็จสมบูรณ์

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงิน ยานพาหนะ และให้กำลังใจ อีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านให้คำแนะนำ การใช้อุปกรณ์ และการทดสอบ ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	X
สารบัญตาราง	XIV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 แผนการดำเนินงาน	4
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power Transformer)	6
2.2 ส่วนประกอบของหม้อแปลง	7
2.2.1 ตัวถังหม้อแปลง (Main Tank)	7
2.2.2 ถังเก็บน้ำมันสำรอง (Conservator Tank)	7
2.2.3 Dehydrating Breather	8
2.2.4 Buchholz Relay	8
2.2.5 Pressure Relief Device	9
2.2.6 Arcing Horn	10
2.2.7 Tap Changer	10
2.3 ออนโหลดแท็ปเชนเจอร์ (On-load tap changer หรือ OLTC)	11
2.3.1 ลำดับการสวิตช์ซึ่งเพื่อเปลี่ยนแท็ปของ OLTC	11
2.3.2 การติดตั้งขดลวดแท็ปของ OLTC	13
2.3.3 ชนิดของ OLTC	14
2.3.4 การควบคุม OLTC	15
2.4 สนามไฟฟ้า	16
2.5 ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้า (Electric Field Configuration)	17
2.5.1 สนามไฟฟ้าสมำเสมอ (I)	17
2.5.2 สนามไฟฟ้าไม่สมำเสมอ (II,III)	18
2.6 การเกิดเบรกดาวนในฉนวนเหลว	20
2.6.1 กลไกการเกิดเบรกดาวนของฉนวนเหลวบริสุทธิ์	20
2.6.2 กลไกการเกิดเบรกดาวนของฉนวนเหลวเชิงการค้า	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนของแข็ง	22
2.7.1 การเบรกดาวน์แบบแท้จริง (Intrinsic Breakdown)	23
2.7.2 การเบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์ (Streamer Breakdown)	23
2.7.3 การเบรกดาวน์จากแรงทางกลที่เกิดจากไฟฟ้า (Electromechanical Breakdown)	24
2.7.4 การเบรกดาวน์จากรอยที่ผิวและการร้าวในฉนวน (Edge Breakdown or Tracking and Treeing)	24
2.7.5 การเบรกดาวน์จากผลทางความร้อน (Thermal Breakdown)	24
2.7.6 การเบรกดาวน์เนื่องจากการตีสชาร์จภายใน (Cavity Breakdown)	24
2.8 ทฤษฎีการสร้างและการวัดแรงดันอิมพัลส์	25
2.8.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน	25
2.8.2 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	27
2.8.3 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายชั้น	28
2.9 น้ำมันหม้อแปลง (Transformer Oil)	29
2.10 ส่วนประกอบของน้ำมันหม้อแปลง	30
2.10.1 แอลเคน (พาราฟิน)	31
2.10.2 ไฮโคลแอลเคน (แนปทีน แนปทีนิก หรือ ไฮโคลพาราฟิน)	31
2.10.3 อโรมาติก	31
2.11 กลไกการเกิดแก๊ส	32
2.11.1 การสลายตัวของน้ำมัน	32
2.11.2 การสลายตัวของฉนวนเซลลูโลส	33
2.11.3 Stray Gassing	33
2.11.4 แก๊สที่มาจากแหล่งอื่น	34
2.12 ชนิดของความผิดปกติที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง (Fault) ตามมาตรฐาน IEC	34
2.13 การวิเคราะห์แก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมัน (Dissolved Gas Analysis, DGA)	34
2.14 การเก็บตัวอย่างน้ำมันจากอุปกรณ์ไฟฟ้า	35
2.14.1 ตำแหน่งการเก็บตัวอย่าง	35
2.14.2 การทำความสะอาดตำแหน่งที่เก็บตัวอย่าง	35
2.14.3 ภาชนะที่ใช้เก็บตัวอย่าง	35
2.14.4 การเก็บตัวอย่างโดยใช้ไซริง	36
2.15 การแยกแก๊สด้วยวิธี Headspace	38
2.16 แก๊สโครมาโทกราฟี	40
2.16.1 เครื่องโครมาโทกราฟี	40
2.16.2 คอลัมน์ (Column)	40

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.16.3 แก๊สพา (Carrier Gas)	41
2.16.4 ดีเทคเตอร์ (Detector)	41
2.16.5 Cold Trap	43
2.16.6 Integrator และเครื่องบันทึกผล	43
2.17 อัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมัน	43
2.17.1 การคำนวณอัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊ส	43
2.17.2 การตรวจสอบการเสื่อมสภาพของฉนวนโดยใช้ปริมาณแก๊สที่ละลายอยู่	43
2.17.3 การประเมินสภาพของหม้อแปลงโดยใช้ความเข้มข้นของแก๊สแต่ละชนิด และค่า Total Dissolved Combustible Gases (TDCG)	44
2.17.4 การกำหนดข้อปฏิบัติงาน และความถี่ในการเก็บตัวอย่างจากระดับTDCG และอัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊ส	45
2.18 การประเมินสภาพของหม้อแปลงโดยใช้การทำ Health Index	46
2.19 การประเมินสภาพของหม้อแปลงโดยใช้ปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 และค่าอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าแก๊สต่อเดือน	47
2.19 การแปลผลของ DGA	47
2.20.1 การแปลผลด้วยวิธี Key Gas	47
2.20.2 การพิจารณาชนิดของความผิดปกติด้วยวิธี Doernenburg Ratio	49
2.20.3 การพิจารณาชนิดของความผิดปกติด้วยวิธี Rogers Ratio	52
2.20.4 การแปลผลด้วยวิธี IEC Ratio	53
2.20.5 การแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle	55
2.20.6 การแปลผลด้วยวิธี Duval Pentagon	58
2.20.7 การแปลผลโดยใช้อัตราส่วน CO ₂ ต่อ CO	60
2.21 การปรับปรุงคุณภาพน้ำมัน	60
บทที่ 3 การออกแบบการสอบ	61
3.1 การประเมินสภาพหม้อแปลงและแปลผลค่าแก๊สด้วยวิธีการตามมาตรฐาน	61
3.1.1 การประเมินสภาพหม้อแปลง	61
3.1.2 การแปลผลค่าแก๊ส	61
3.1.3 การออกแบบโปรแกรมสำหรับแปลผล	61
3.2 การเตรียมฉนวนสำหรับการทดสอบ	64
3.2.1 การเตรียมน้ำมันหม้อแปลง สำหรับการทดสอบ	64
3.2.2 การเตรียมเพรสบอร์ดสำหรับการทดสอบ	64
3.3 การทดสอบการเกิดโคโรนาดีซชาร์จในน้ำมันหม้อแปลงและตรวจจับแก๊สที่ละลายในน้ำมัน โดยใช้เครื่องวัดแบบออนไลน์ (DGA Online)	65

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.1 วงจรทดสอบ	65
3.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ	66
3.4 การทดสอบการเกิดเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านน้ำมันหม้อแปลง	67
3.4.1 เครื่องที่ใช้ทดสอบ	67
3.4.2 ขั้นตอนการทดสอบ	67
3.5 การทดสอบการเกิดเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านอิมเพรกเนตเพรสเซอร์ที่บรรจุอยู่ในชุดทดสอบที่ใส่น้ำมันหม้อแปลง	68
3.5.1 วงจรทดสอบ	68
3.5.2 ขั้นตอนการทดสอบ	69
3.6 การทดสอบการเกิดเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าผ่านน้ำมันหม้อแปลงที่บรรจุในชุดทดสอบ	69
3.6.1 วงจรทดสอบ	69
3.6.2 ขั้นตอนการทดสอบ	70
3.6.3 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ใช้ในการทดสอบ	71
3.7 การทดสอบการเกิดเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าผ่านอิมเพรกเนตเพรสเซอร์ที่บรรจุอยู่ในชุดทดสอบที่ใส่น้ำมันหม้อแปลง	72
3.7.1 วงจรทดสอบ	72
3.7.2 ขั้นตอนการทดสอบ	73
3.7.3 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ใช้ในการทดสอบ	74
บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดสอบ	75
4.1 ข้อมูลเบื้องต้นและการประเมินสภาพหม้อแปลง	75
4.1.1 ข้อมูลเบื้องต้นของหม้อแปลงไฟฟ้า	75
4.1.2 การประเมินสภาพหม้อแปลง	76
4.2 การแปลผลแก๊สด้วยวิธีการตามมาตรฐานและไม่อยู่ในมาตรฐาน	86
4.2.1 การแปลผลแก๊สด้วยวิธีการ Doernenburg Ratio และ Rogers Ratio	86
4.2.2 การแปลผลแก๊สด้วยวิธีการ Key Gas	92
4.2.3 การแปลผลแก๊สด้วยวิธีการ CO ₂ /CO Ratio	106
4.2.4 การแปลผลแก๊สด้วยวิธีการ IEC Ratio	109
4.2.5 การแปลผลแก๊สด้วยวิธีการ Duval Triangle และ Duval Pentagon	120
4.3 การแปลผลค่าแก๊สจาก OLTC ด้วยวิธี Duval Triangle 2	152
4.3.1 ผลการแปลผลค่าแก๊สจาก OLTC	152
4.3.2 การวิเคราะห์ผลการแปลผลค่าแก๊สจาก OLTC	153

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 การทดสอบการเกิดโคโรนาดีสชาร์จในน้ำมันหม้อแปลงและตรวจจับแก๊สที่ละลายในน้ำมัน โดยใช้เครื่องวัดแบบออนไลน์ (DGA Online)	154
4.4.1 ผลการทดสอบ	154
4.4.2 การวิเคราะห์ผล	155
4.5 การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านน้ำมันหม้อแปลง	157
4.5.1 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์	157
4.6 การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านอิมเพรกเนตเพรสเซอร์ที่บรรจุอยู่ในชุดทดสอบที่ใส่น้ำมันหม้อแปลง	159
4.6.1 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์	159
4.7 การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าผ่านน้ำมันหม้อแปลงที่บรรจุในชุดทดสอบ	161
4.7.1 แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ	161
4.7.2 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์	162
4.8 การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าผ่านอิมเพรกเนตเพรสเซอร์ที่บรรจุอยู่ในชุดทดสอบที่ใส่น้ำมันหม้อแปลง	164
4.8.1 แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ	164
4.8.2 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์	165
4.9 การวิเคราะห์ผลและการแปลผลค่าแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง	168
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	172
5.1 สรุปผลการทดลอง	172
5.1.1 การแปลผลด้วยวิธี Doernenburg Ratio	173
5.1.2 การแปลผลด้วยวิธี Roger Ratio	173
5.1.3 การแปลผลด้วยวิธี Key Gas	173
5.1.4 การแปลผลด้วยวิธี CO ₂ /CO Ratio	173
5.1.5 การแปลผลด้วยวิธี IEC Ratio	174
5.1.6 การแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 1	174
5.1.7 การแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 4 และ Duval Triangle 5	174
5.1.8 การแปลผลด้วยวิธี Duval Pentagon 1 และ Duval Pentagon 2	175
5.1.9 เปรียบเทียบผลการแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 1, Duval Triangle 4, Duval Triangle 5, Duval Pentagon 1 และ Duval Pentagon 2	175
5.1.10 การแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 2 ใน OLTC	176
5.2 ข้อเสนอแนะ	176

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	177
ภาคผนวก	179
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ	180
ภาคผนวก ข ข้อมูลเบื้องต้นของหม้อแปลง ในความดูแลของการไฟฟ้า นครหลวง (MEA)	185
ภาคผนวก ค การตรวจสอบเงื่อนไขของค่าแก๊สที่ละลายในน้ำมัน ก่อนการแปลผลด้วยวิธี Doernenburg Ratio และ Roger Ratio	195
ภาคผนวก ง คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงที่นำมาใช้ทดสอบ	202
ภาคผนวก จ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	204
ภาคผนวก ฉ แก๊สที่ไม่ได้เกิดจากความผิดปกติในหม้อแปลง	210
ประวัติผู้เขียน	213



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างพื้นฐานของหม้อแปลงไฟฟ้า	5
2.2	หม้อแปลงไฟฟ้า	6
2.3	ถังเก็บน้ำมันสำรอง	6
2.4	Dehydrating Breather ที่บรรจุซิลิกาเจล	7
2.5	Buchholz relay	7
2.6	การทำงานของ Buchholz Relay	8
2.7	Pressure Relief Device	8
2.8	Arcing Horn ที่ติดตั้งบริเวณบushing	9
2.9	Tap Changer	9
2.10	การต่อ OLTC เข้ากับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแบบ Y- Δ	10
2.11	หลักการ “Make (2) Before Break (1)” และการต่อทรานซิสชันอิมพีแดนซ์	11
2.12	รูปแบบการติดตั้งของ OLTC	12
2.13	การต่อขดลวดแท๊ปเข้ากับขดลวดของหม้อแปลง	12
2.14	OLTC ชนิดตัวต้านทานในน้ำมันแบบไดโวลเตอร์สวิตช์ แท๊ปซีเลคเตอร์ และลำดับการทำงาน	13
2.15	OLTC ชนิดตัวต้านทานในน้ำมันแบบซีเลคเตอร์สวิตช์ และลำดับการทำงาน	14
2.16	การควบคุม OLTC	15
2.17	อิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างกัน	16
2.18	สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า	17
2.19	สนามไฟฟ้ากระจายเปรียบเทียบของอิเล็กทรอนิกส์ลักษณะต่างๆ	18
2.20	การเรียงตัวของอนุภาคไฟเบอร์ระหว่างช่องว่าง (Gap)	20
2.21	การยืดออกของหยดน้ำที่อยู่ในฉนวนเคลวซิลิโคนภายใต้สนามไฟฟ้า	21
2.22	ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวนเมื่อป้อนแรงดันให้กับฉนวนแข็งที่ระยะเวลาต่างกัน	22
2.23	แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม	24
2.24	แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตัดหางคลื่น	25
2.25	แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตัดหน้าคลื่น	25
2.26	วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ วงจร A	26
2.27	วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ วงจร B	26
2.28	วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบหลายขั้นตามวงจรมาร์กซ์	27
2.29	โครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันหม้อแปลง	30
2.30	การเกิดแก๊สเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ	32
2.31	การเก็บตัวอย่างน้ำมันโดยใช้ไซริง	36
2.32	ตัวอย่างฉลากน้ำมัน	37
2.33	ตัวอย่างในขวดบรรจุสาร	38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.34	เฟลมไอออไนเซชันดีเทคเตอร์	40
2.35	เทอร์มอลคอนดักทีวิตีดีเทคเตอร์	41
2.36	แก๊สที่เกิดในขณะที่เกิดความร้อนในน้ำมัน	47
2.37	แก๊สที่เกิดในขณะที่เกิดความร้อนในเซลลูโลส	47
2.38	แก๊สที่เกิดในขณะที่เกิดการดิสชาร์จบางส่วน	48
2.39	แก๊สที่เกิดในขณะที่เกิดการอาร์ค	48
2.40	โพลชาร์จของวิธีการ Doernenburg Ratio	50
2.41	โพลชาร์จของวิธีการ Roger Ratio	52
2.42	กราฟิก 2 อัตราส่วนแก๊สตามมาตรฐาน IEC	54
2.43	กราฟิก 3 อัตราส่วนแก๊ส Duval Triangle	55
2.44	Duval Triangle 2	56
2.45	Duval Triangle 4	56
2.46	Duval Triangle 5	57
2.47	Duval Pentagon 1 (A) และ Duval Pentagon 2 (B)	58
3.1	Duval Triangle 1 ในโปรแกรม GSP	61
3.2	Duval Triangle 2 ในโปรแกรม GSP	61
3.3	Duval triangle 4 ในโปรแกรม GSP	61
3.4	Duval triangle 5 ในโปรแกรม GSP	62
3.5	Duval Pentagon 1 ในโปรแกรม GSP	62
3.6	Duval Pentagon 2 ในโปรแกรม GSP	62
3.7	ตู้อบสูญญากาศ	63
3.8	เพรสบอร์ด	63
3.9	การเตรียมอิมเพรกเนตเพรสบอร์ด	63
3.10	วงจรถดสอบการเกิดโครนาดีสชาร์จในน้ำมันหม้อแปลงและตรวจจับแก๊สที่ละลายในน้ำมันโดยใช้เครื่องวัดแบบออนไลน์ (DGA Online)	64
3.11	ชุดทดสอบการเกิดโครนาดีสชาร์จ และเครื่องวัด DGA Online (Calisto9)	65
3.12	เครื่องทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนเหลว	66
3.13	วงจรถดสอบการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านอิมเพรกเนตเพรสบอร์ด	67
3.14	ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ด	67
3.15	วงจรถดสอบการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าผ่านน้ำมันหม้อแปลง	68
3.16	ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว	69
3.17	รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วบวก 1.2/50 μ s ที่ใช้ในการทดสอบ	70
3.18	รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบ 1.2/50 μ s ที่ใช้ในการทดสอบ	70

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.19	วงจรถดสอบการเกิดเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าผ่านน้ำมันหม้อแปลง	71
3.20	วงจรถดสอบการเกิดเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าผ่านอิมเพรกเนตเพรสเซอร์	71
3.21	ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสเซอร์	72
3.22	รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วบวก 1.2/50 μ s ที่ใช้ในการทดสอบ	73
3.23	รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบ 1.2/50 μ s ที่ใช้ในการทดสอบ	73
4.1	กราฟจำนวนหม้อแปลงที่ประเมินด้วยเงื่อนไข IEEE และผ่านการแปลผลด้วยวิธี Key Gas จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน	105
4.2	กราฟจำนวนหม้อแปลงที่ประเมินด้วยวิธี HI และผ่านการแปลผลด้วยวิธี Key Gas จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน	105
4.3	กราฟจำนวนหม้อแปลงที่ประเมินด้วยปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 และผ่านการแปลผลด้วยวิธี CO ₂ /CO Ratio จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน	109
4.4	กราฟจำนวนหม้อแปลงที่ประเมินด้วยปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 และผ่านการแปลผลด้วยวิธี IEC Ratio จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน	119
4.5	กราฟจำนวนหม้อแปลงที่ประเมินด้วยวิธี HI และผ่านการแปลผลด้วยวิธี IEC Ratio จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน	119
4.6	กราฟจำนวนหม้อแปลงที่ประเมินปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 และผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 1 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน	131
4.7	กราฟจำนวนหม้อแปลงที่ประเมินด้วยเงื่อนไข HI และผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 1 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน	132
4.8	กราฟจำนวนหม้อแปลงที่ประเมินด้วยปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 และผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 4 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน	134
4.9	กราฟจำนวนหม้อแปลงที่ประเมินด้วยปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 และผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 5 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน	135
4.10	กราฟจำนวนหม้อแปลงที่ประเมินด้วยวิธี HI และผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 4 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน	136
4.11	กราฟจำนวนหม้อแปลงที่ประเมินด้วยวิธี HI และผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 5 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน	136
4.12	กราฟจำนวนหม้อแปลงที่ประเมินด้วยปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 และผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Pentagon 1 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน	139
4.13	กราฟจำนวนหม้อแปลงที่ประเมินด้วยปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 และผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Pentagon 2 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน	139
4.14	กราฟจำนวนหม้อแปลงที่ประเมินด้วยวิธี HI และผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Pentagon 1 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน	140

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.15	กราฟจำนวนหม้อแปลงที่ประเมินด้วยวิธี HI และผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Pentagon 2 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน	140
4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (H_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6) ที่เกิดขึ้นกับระยะเวลาในการทดสอบที่ PDIV	155
4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (CO , CO_2) ที่เกิดขึ้นกับระยะเวลาในการทดสอบที่ PDIV	155
4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (H_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6) ที่เกิดขึ้นกับระยะเวลาในการทดสอบที่ 1.5PDIV	156
4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (CO , CO_2) ที่เกิดขึ้นกับระยะเวลาในการทดสอบที่ 1.5PDIV	156
4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (H_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6) ที่เกิดขึ้นกับระยะเวลาในการทดสอบที่ 1.7PDIV	157
4.21	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (CO , CO_2) ที่เกิดขึ้นกับระยะเวลาในการทดสอบที่ 1.7PDIV	157
4.22	ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตัดหลังคลื่นชั่ววอกที่ใช้ในการทดสอบ	161
4.23	ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตัดหลังคลื่นชั่วลบที่ใช้ในการทดสอบ	161
4.24	ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตัดหลังคลื่นชั่ววอกที่ใช้ในการทดสอบ	164
4.25	ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตัดหน้าคลื่นชั่วลบที่ใช้ในการทดสอบ	164

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	วิธีการดำเนินการ	3
2.1	คุณสมบัติทางฟิสิกส์ ทางเคมี และทางไฟฟ้าของฉนวนเหลวที่จำเป็นต้องพิจารณา	29
2.2	ภาชนะบรรจุตัวอย่างสำหรับการทดสอบน้ำมัน	34
2.3	ข้อดี ข้อเสีย ของภาชนะบรรจุตัวอย่าง	35
2.4	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวสำหรับแก๊สที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 70°C	39
2.5	การประเมินสภาพของหม้อแปลงจากความเข้มข้นของแก๊สชนิดต่างๆ	43
2.6	ข้อปฏิบัติงาน และความถี่ในการเก็บตัวอย่างจากระดับค่า TDCG	44
2.7	ค่าคะแนนและค่าน้ำหนักของแก๊ส	45
2.8	สภาพหม้อแปลงตามค่า DGAF	45
2.9	ปริมาณแก๊สอ้างอิง (L1) และค่าอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าแก๊สต่อเดือน	46
2.10	ปริมาณแก๊สอ้างอิง (L1)	49
2.11	การแปลผลจากวิธี Doernenburg Ratio	50
2.12	การแปลผลจากวิธี Rogers Ratio	41
2.13	การแปลผล DGA วิธี IEC Ratio	53
2.14	การตีความอย่างง่ายด้วยวิธี IEC Ratio	53
4.1	การประเมินสภาพหม้อแปลง	77
4.2	การคำนวณอัตราส่วนและการแปลผลด้วยวิธีการ Doernenburg Ratio	86
4.3	การคำนวณอัตราส่วนและการแปลผลด้วยวิธีการ Roger Ratio	86
4.4	การแปลผลด้วยวิธี Doernenburg Ratio และ Roger Ratio เมื่อพิจารณาเพียงเงื่อนไขค่าแก๊ส	88
4.5	ผลการแปลผลด้วยวิธีการ Key Gas (IEEE)	93
4.6	ผลการแปลผลด้วยวิธีการ Key Gas (HI)	100
4.7	จำนวนหม้อแปลงที่ผ่านการแปลผลด้วยวิธี Key Gas จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน	104
4.8	จำนวนหม้อแปลงที่ผ่านการแปลผลด้วยวิธี Key Gas จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์)	104
4.9	ผลการแปลผลด้วยวิธีการ CO ₂ /CO Ratio	107
4.10	จำนวนหม้อแปลงที่ผ่านการแปลผลด้วยวิธี CO ₂ /CO Ratio จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน	108
4.11	จำนวนหม้อแปลงที่ผ่านการแปลผลด้วยวิธี CO ₂ /CO Ratio จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์)	108
4.12	ผลการแปลผลด้วยวิธีการ IEC Ratio (ปริมาณแก๊สอ้างอิง L1)	110
4.13	ผลการแปลผลด้วยวิธีการ IEC Ratio (HI)	115

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
4.14	จำนวนหม้อแปลงที่ผ่านการแปลผลด้วยวิธี IEC Ratio จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน	118
4.15	จำนวนหม้อแปลงที่ผ่านการแปลผลด้วยวิธี IEC Ratio จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์)	118
4.16	ผลการแปลผลด้วยวิธีการ Duval Triangle และ Duval Pentagon (ปริมาณแก๊สอ้างอิง L1)	121
4.17	ผลการแปลผลด้วยวิธีการ Duval Triangle และ Duval Pentagon (HI)	126
4.18	จำนวนหม้อแปลงที่ผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 1 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน	130
4.19	จำนวนหม้อแปลงที่ผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 1 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์)	130
4.20	จำนวนหม้อแปลงที่ผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 4 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน	132
4.21	จำนวนหม้อแปลงที่ผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 5 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน	133
4.22	จำนวนหม้อแปลงที่ผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 4 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์)	133
4.23	จำนวนหม้อแปลงที่ผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 5 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์)	134
4.24	จำนวนหม้อแปลงที่ผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Pentagon 1 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน	137
4.25	จำนวนหม้อแปลงที่ผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Pentagon 2 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน	137
4.26	จำนวนหม้อแปลงที่ผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Pentagon 1 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์)	138
4.27	จำนวนหม้อแปลงที่ผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Pentagon 2 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์)	138
4.28	หม้อแปลงที่เกิดความผิดปกติขึ้นเพียงชนิดเดียว (ปริมาณแก๊สอ้างอิง L1)	142
4.29	หม้อแปลงที่เกิดความผิดปกติขึ้นหลายชนิดผสมกัน (ปริมาณแก๊สอ้างอิง L1)	144
4.30	จำนวนหม้อแปลงที่มีความผิดปกติเกิดขึ้นเพียงชนิดเดียว (เปอร์เซ็นต์คิดเทียบกับจำนวนหม้อแปลงที่พิกัดกำลังและพิกัดแรงดันเดียวกัน)	146
4.31	จำนวนหม้อแปลงที่มีความผิดปกติเกิดขึ้นหลายชนิดผสมกัน (เปอร์เซ็นต์คิดเทียบกับจำนวนหม้อแปลงที่พิกัดกำลังและพิกัดแรงดันเดียวกัน)	146
4.32	หม้อแปลงที่เกิดความผิดปกติขึ้นเพียงชนิดเดียว (ประเมินสภาพด้วยวิธี HI)	148
4.33	หม้อแปลงที่เกิดความผิดปกติขึ้นหลายชนิดผสมกัน (ประเมินสภาพด้วยวิธี HI)	149

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
4.34	จำนวนหม้อแปลงที่มีความผิดปกติเกิดขึ้นเพียงชนิดเดียว (เปอร์เซ็นต์คิดเทียบกับจำนวนหม้อแปลงที่พิกัดกำลังและพิกัดแรงดันเดียวกัน)	150
4.35	จำนวนหม้อแปลงที่มีความผิดปกติเกิดขึ้นหลายชนิดผสมกัน (เปอร์เซ็นต์คิดเทียบกับจำนวนหม้อแปลงที่พิกัดกำลังและพิกัดแรงดันเดียวกัน)	150
4.36	ผลการแปลผลค่าแก๊สจาก OLTC ด้วยวิธี Duval Triangle 2	152
4.37	ผลการทดสอบ DGA ของการเกิดโครนาดีสชาร์จในน้ำมันหม้อแปลง	154
4.38	ผลการทดสอบ DGA และการแปลผลการเกิดเบรกตาวานด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านน้ำมันหม้อแปลง	158
4.39	ผลการทดสอบ DGA และการแปลผลการเกิดเบรกตาวานด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านอิมเพรกเนตเพรสเซอร์	160
4.40	ผลการทดสอบ DGA และการแปลผลการเกิดเบรกตาวานด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าผ่านน้ำมันหม้อแปลง	163
4.41	ผลการทดสอบ DGA และการแปลผลการเกิดเบรกตาวานด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าผ่านอิมเพรกเนตเพรสเซอร์หนา 1.6 mm	166
4.42	ผลการทดสอบ DGA และการแปลผลการเกิดเบรกตาวานด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าผ่านอิมเพรกเนตเพรสเซอร์หนา 3.2 mm	167
4.43	เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีที่ต่างกัน	168
4.44	เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวิธีการแปลผล	169

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าจากแรงดันระดับหนึ่งไปยังแรงดันอีกระดับหนึ่ง โดยอาจสูงขึ้นหรือต่ำลงหรือแรงดันอาจเท่าเดิมขึ้นอยู่กับลักษณะของการส่งจ่ายกำลังและการใช้ไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้าจึงนับเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในบรรดาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เมื่อหม้อแปลงมีการใช้งาน ฉนวนไฟฟ้าจะเกิดการเสื่อมสภาพขึ้นจากสาเหตุต่างๆ เช่น เสื่อมสภาพไปตามอายุการใช้งาน หรือเสื่อมสภาพจากสภาพแวดล้อมภายในและภายนอก ซึ่งโดยส่วนใหญ่หม้อแปลงใช้น้ำมันแร่ (Mineral Oil) เป็นฉนวนเหลวในหม้อแปลง ดังนั้นการตรวจสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมันแร่จะช่วยทำให้ สามารถวินิจฉัยปัญหาที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อป้องกันความเสียหาย เพิ่มประสิทธิภาพ และยืดอายุการใช้งานของหม้อแปลง โดยการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าให้เหมาะสม ซึ่งการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน (Dissolved Gas Analysis หรือ DGA) เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เพราะสามารถนำตัวอย่างของน้ำมันจากหม้อแปลงไฟฟ้ามาทำการวิเคราะห์ข้อมูล การวิเคราะห์จะได้แก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในการตรวจสอบย้อนกลับได้ว่า ปัญหาใดบ้างที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลง และวางแผนการบำรุงรักษาหม้อแปลงให้มีอายุการใช้งานเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังทราบว่าหม้อแปลงมีการใช้งานที่เหมาะสมหรือไม่

อุปกรณ์ OLTC (On-load Tap-Changer) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าในขณะที่มีโหลด OLTC มีบทบาทอย่างยิ่งทั้งในภาคอุตสาหกรรมและระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เนื่องจาก OLTC จะทำหน้าที่ปรับแรงดันไฟฟ้าให้ระบบสามารถทำงานได้ แต่อย่างไรก็ตามหน้าที่สัมผัสของ OLTC เป็นอุปกรณ์ที่มีการเคลื่อนที่และเกิดอาร์คอยู่ตลอดเวลาจึงส่งผลให้ปัญหาที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงส่วนใหญ่จึงมาจาก OLTC ดังนั้นการวิเคราะห์ถึงโครงสร้างและการทำงานของ OLTC จึงมีความสำคัญ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาโครงสร้างพื้นฐานของหม้อแปลง OLTC และน้ำมันหม้อแปลง
2. เพื่อศึกษากลไกการเกิดแก๊สที่เกิดขึ้นในน้ำมันหม้อแปลง
3. เพื่อศึกษาความผิดปกติที่ระบุได้จากการแปลผลค่าแก๊สที่ละลายในน้ำมันหม้อแปลง
4. เพื่อศึกษาวิธีการประเมินสภาพของหม้อแปลง
5. เพื่อศึกษาวิธีการแปลผลค่าแก๊สที่ละลายในน้ำมันของหม้อแปลงและ OLTC
6. เพื่อศึกษาข้อดีและข้อเสียของวิธีการแปลผลค่าแก๊สที่ละลายในน้ำมันหม้อแปลงแต่ละวิธี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของโครงการงาน

1. ศึกษาโครงสร้างพื้นฐานของหม้อแปลง OLTC และน้ำมันหม้อแปลง
2. ศึกษากลไกการเกิดแก๊สที่เกิดขึ้นในน้ำมันหม้อแปลง
3. ศึกษาความผิดปกติที่ระบุได้จากการแปลผลค่าแก๊สที่ละลายในน้ำมันหม้อแปลง
4. ศึกษาวิธีการประเมินสภาพของหม้อแปลงตามมาตรฐาน IEEE C57.104 ค่าลิมิต L1 และ อัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊สในน้ำมันต่อเดือนจากเอกสาร FIST3-31 และการทำ HI (Health Index) เฉพาะการทำ DGA
5. ศึกษาวิธีการแปลผลแก๊สที่ละลายในน้ำมันหม้อแปลงด้วยวิธี Doernenburg Ratio, Roger Ratio, Key Gas, CO₂/CO Ratio, IEC Ratio, Duval Triangle 1, Duval Triangle 2, Duval Triangle 4, Duval Triangle 5, Duval Pentagon 1 และ Duval Pentagon 2
6. ศึกษาการเขียนคำสั่งใน Microsoft Excel และ การใช้โปรแกรม GSP (The Geometer's Sketchpad)
7. ศึกษาข้อดีและข้อเสียของวิธีการแปลผลค่าแก๊สที่ละลายในน้ำมันหม้อแปลงแต่ละวิธี จากการแปลผลค่าแก๊สที่ละลายในน้ำมันด้วยข้อมูลจากการไฟฟ้านครหลวง (MEA)

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาโครงสร้างพื้นฐานและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่ออุณหภูมิภายในหม้อแปลงไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE C57.106, IEC 60422
2. ศึกษาหลักการทำงานเบื้องต้นของแก๊สที่เกิดขึ้นในน้ำมันหม้อแปลงโดยเครื่อง Gas Chromatography จากมาตรฐาน IEC 60567, ASTM D3612
3. ศึกษาการแปลผลค่าแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงตามมาตรฐาน IEC 60599-2015, IEEE C57.104
4. ศึกษาหลักการทำงานเบื้องต้นของ OLTC
5. นำข้อมูลค่าแก๊สที่ละลายในน้ำมันหม้อแปลงจาก MEA มาแปลผลด้วยวิธี Doernenburg Ratio, Roger Ratio, Key Gas, CO₂/CO Ratio, IEC Ratio, Duval Triangle 1, Duval Triangle 2, Duval Triangle 4, Duval Triangle 5, Duval Pentagon 1 และ Duval Pentagon 2
6. ออกแบบการทดลองเพื่อเก็บตัวอย่างไปทดสอบแก๊สที่ละลายในน้ำมัน โดยการทดลองแบ่งออกเป็น
 - การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิดขึ้นของแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงเนื่องจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลงโดยใช้เครื่อง DGA ออนไลน์
 - การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิดของแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงเนื่องจากการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านน้ำมันหม้อแปลงที่บรรจุในชุดทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิดของแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงเนื่องจากการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านอิมเพรกเนตเพรสเซอร์ที่บรรจุอยู่ในชุดทดสอบที่ใส่น้ำมันหม้อแปลง

-การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิดของแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงเนื่องจากการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าผ่านน้ำมันหม้อแปลงที่บรรจุในชุดทดสอบ

-การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิดของแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงเนื่องจากการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าผ่านอิมเพรกเนตเพรสเซอร์หนา 1.6 mm และ 3.2 mm ที่บรรจุอยู่ในชุดทดสอบที่ใส่น้ำมันหม้อแปลง

7. จัดเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลอง
8. ทำการทดลองและบันทึกผลการทดลอง
9. วิเคราะห์ผลการทดลองและทำการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้
10. จัดทำปริญญานิพนธ์



1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 วิธีการดำเนินการ

วิธีการดำเนินการ	ปีการศึกษา 2559									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาโครงสร้างพื้นฐานของฉนวนเหลวในหม้อแปลงไฟฟ้า	←-----→									
2. ศึกษาหลักการทำงานเบื้องต้นของแก๊สที่เกิดขึ้นในน้ำมันโดยเครื่อง Gas Chromatography		←-----→								
3. ศึกษาการแปลผลค่าแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมัน		←-----→	←-----→							
4. ศึกษาหลักการทำงานเบื้องต้นของ OLTC		←-----→	←-----→							
5. ออกแบบการทดลองเพื่อจำลองความผิดปกติในหม้อแปลง และเตรียมอุปกรณ์			←-----→	←-----→						
6. แปลผลค่าแก๊สด้วยวิธีต่างๆ จากข้อมูลของ MEA					←-----→	←-----→				
7. ทำการทดลองเบรกดาวน้ำมัน และเบรกดาวกระดาษ						←-----→	←-----→			
8. ทำการทดลองอิมพัลส์น้ำมัน และอิมพัลส์กระดาษ						←-----→	←-----→			
9. วิเคราะห์ผลการทดสอบและทำการเปรียบเทียบ							←-----→	←-----→		
10. สรุปผลการทดลอง							←-----→	←-----→		
11. จัดทำปริญญานิพนธ์							←-----→	←-----→		

←-----→ วางแผน

←-----→ ปฏิบัติจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

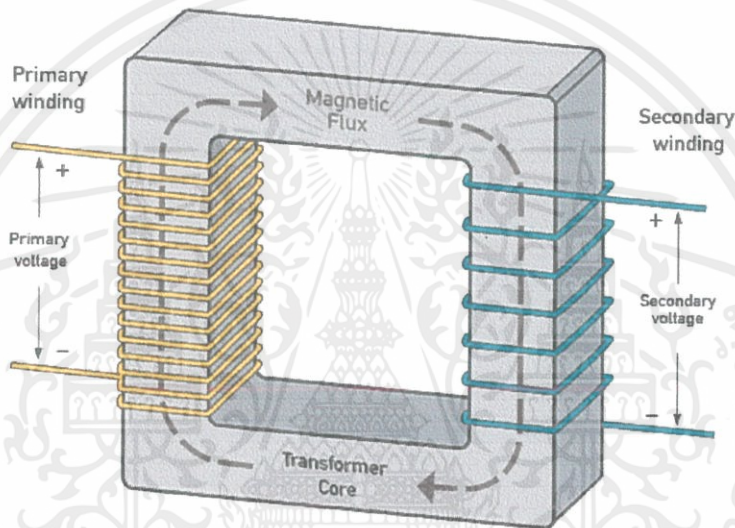
1. เข้าใจโครงสร้างพื้นฐานของหม้อแปลง OLTC และน้ำมันหม้อแปลง
2. เข้าใจวิธีการประเมินสภาพของหม้อแปลงตามมาตรฐาน IEEE C57.104 ค่าลิมิต L1 และ อัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊สในน้ำมันต่อเดือนจากเอกสาร Fict3-31 และการทำ HI (Health Index) เฉพาะการทำ DGA
3. เข้าใจวิธีใช้งานการแปลผลแก๊สค่าแก๊สในน้ำมันในหม้อแปลง และ OLTC
4. เข้าใจกลไกการเกิดแก๊สที่เกิดขึ้นในน้ำมันหม้อแปลง
5. เข้าใจความผิดปกติที่ระบุได้จากการแปลผลค่าแก๊สในน้ำมันหม้อแปลง
6. ได้รู้ข้อดีและข้อเสียของวิธีการแปลผลค่าแก๊สในน้ำมันหม้อแปลงแต่ละวิธี



บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power Transformer) [1]

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างระบบไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้าต่างกัน โดยหม้อแปลงนั้นมีหน้าที่เพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะกับการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าตามการใช้พลังงานไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้าจึงนับเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในบรรดาอุปกรณ์ไฟฟ้า การขัดข้องหรือการชำรุดเสียหายของหม้อแปลงไฟฟ้ามักมีผลกระทบต่อการใช้ไฟฟ้า หรือกระบวนการผลิตอย่างมาก ดังนั้นหม้อแปลงนอกจากจะต้องถูกออกแบบผลิต ติดตั้งอย่างถูกต้องและมีคุณภาพแล้ว การใช้งานและการดูแลรักษาก็เป็นปัจจัยสำคัญที่จะหลีกเลี่ยงการขัดข้องหรือการชำรุดเสียหายดังกล่าวได้



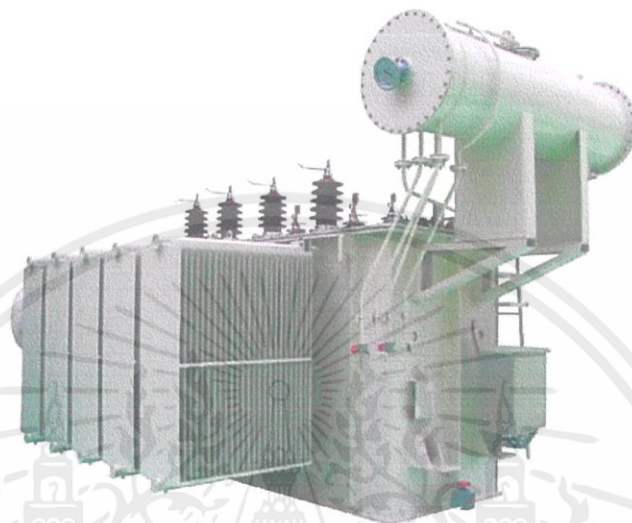
รูปที่ 2.1 โครงสร้างพื้นฐานของหม้อแปลงไฟฟ้า

โครงสร้างพื้นฐานของหม้อแปลงไฟฟ้าจะประกอบด้วย ขดลวด 2 ขด ได้แก่ ขดลวดปฐมภูมิ (Primary Winding) และขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Winding) พันรอบแกนที่เป็นสื่อกลางของเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งอาจเป็นแกนเหล็ก แกนเฟอร์ไรต์ หรือแกนอากาศ เมื่อขดลวดปฐมภูมิได้รับแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ จะทำให้มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นที่ขดลวดทุติยภูมิตามกฎของฟาราเดย์ โดยที่ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวด พื้นที่ของแกนเหล็ก และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับ

2.2 ส่วนประกอบของหม้อแปลง [1]

2.2.1 ตัวถังหม้อแปลง (Main Tank)

ตัวถังหม้อแปลงเป็นส่วนประกอบที่ใช้ห่อหุ้มชิ้นส่วนที่สำคัญภายในของหม้อแปลง เช่น แกนเหล็ก ขดลวด และระบบฉนวน ได้แก่ ฉนวนน้ำมันและฉนวนกระดาษ บุชชิ่ง นอกจากนี้แล้วยังมีเรติเอดเตอร์ที่ทำหน้าที่ช่วยการระบายความร้อนของฉนวนเหลว



รูปที่ 2.2 หม้อแปลงไฟฟ้า

2.2.2 ถังเก็บน้ำมันสำรอง (Conservator Tank)

ถังเก็บน้ำมันสำรองมีหน้าที่เก็บน้ำมันเพื่อรองรับการหดตัวและขยายตัวของน้ำมันภายในตัวถังหม้อแปลงขณะจ่ายกระแสไฟฟ้าและจ่ายน้ำมันชดเชยเมื่อหม้อแปลงเกิดรั่วซึม เพื่อให้น้ำมันอยู่เต็มภายในหม้อแปลงตลอดเวลา ลักษณะถังเก็บน้ำมันสำรองจะเป็นถังติดตั้งอยู่สูงกว่าตัวถังหลักมีฉนวนทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อากาศภายนอกสัมผัสกับน้ำมันหม้อแปลงภายในโดยตรง โดยมีที่วัดระดับน้ำมันติดอยู่ข้างถัง



รูปที่ 2.3 ถังเก็บน้ำมันสำรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 Dehydrating Breather

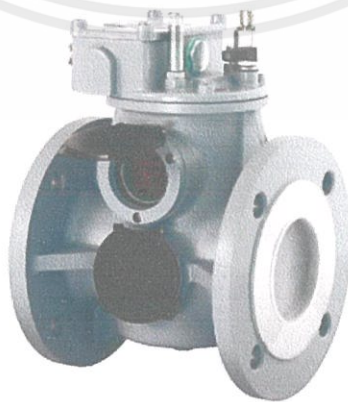
ทำหน้าที่ป้องกันความชื้นที่อยู่ในอากาศก่อนเข้าสู่ภายในถังเก็บน้ำมันสำรองเนื่องจากในขณะที่มีความต้องการไหลตสูงน้ำมันในหม้อแปลงจะขยายตัวเนื่องจากความร้อน ส่งผลให้อากาศถูกถ่ายเทออกสู่ภายนอก แต่ในขณะที่มีความต้องการไหลต่ำน้ำมันจะหดตัวเนื่องจากอุณหภูมิที่ลดลง อากาศภายนอกจึงไหลกลับเข้าไปในหม้อแปลง ความชื้นที่อยู่ในอากาศจะไหลผ่านสารดูดความชื้นซิลิกาเจล เพื่อดูดความชื้นก่อนที่จะเข้าสู่หม้อแปลง ซิลิกาเจลมีลักษณะเป็นเม็ดสีน้ำเงินและจะเปลี่ยนเป็นสีชมพูเมื่อดูดซับความชื้นเข้าไป ส่วนล่างจะเป็นถ้วยสำหรับใส่น้ำมันหม้อแปลงซึ่งมีน้ำมันบรรจุอยู่เล็กน้อย มีหน้าที่ป้องกันไม่ให้ซิลิกาเจลสัมผัสกับอากาศภายนอกตลอดเวลา และป้องกันฝุ่นเข้าไปในหม้อแปลง



รูปที่ 2.4 Dehydrating Breather ที่บรรจุซิลิกาเจล

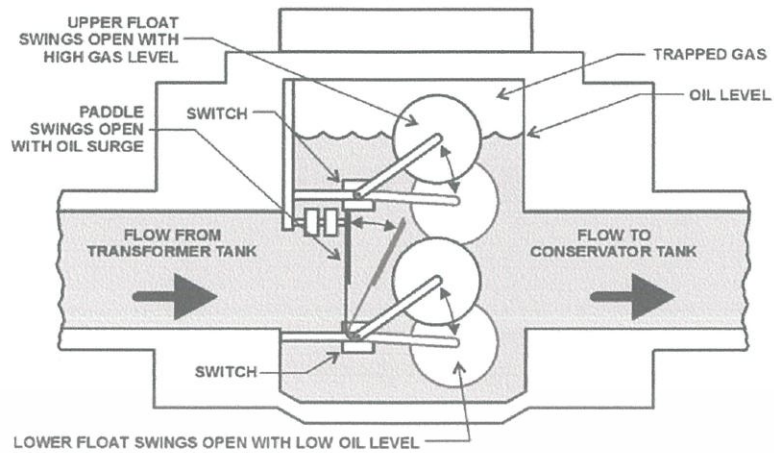
2.2.4 Buchholz Relay

Buchholz Relay เป็นอุปกรณ์ที่เชื่อมต่ออยู่ระหว่างหม้อแปลงกับถังเก็บน้ำมันสำรองมีหน้าที่ตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลง เมื่อมีความผิดปกติเนื่องจากความร้อนจะทำให้เกิดแก๊สขึ้น กรณีที่ความผิดปกติไม่รุนแรงแก๊สจะเกิดขึ้นช้าๆ และแก๊สที่เกิดขึ้นจะมาแทนที่น้ำมันที่ส่วนบนของ Buchholz Relay ทำให้ลูกกลอยลูกบนลดระดับลงจนถึงระดับหนึ่งสัญญาณเตือนก็จะทำงาน ถ้าเกิดความผิดปกติรุนแรง แก๊สที่เกิดขึ้นจะมีจำนวนมากและเกิดขึ้นทันทีทันใดทำให้เกิดแรงดันน้ำมันไหลย้อนกลับเข้าไปในถังน้ำมันสำรองผ่าน Buchholz Relay เมื่อความเร็วน้ำมันที่ไหลผ่านเกินกว่าที่กำหนดจะทำให้ส่งสัญญาณไปสั่งปลดหม้อแปลงออกจากระบบ



รูปที่ 2.5 Buchholz relay

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 การทำงานของ Buchholz Relay

2.2.5 Pressure Relief Device

Pressure Relief Device เป็นเครื่องมือสำหรับระบายความดันภายในหม้อแปลง ใช้ติดตั้งบริเวณด้านบนหม้อแปลง ภายในมีแผ่น Diaphragm ปิดอยู่ซึ่งถูกกดด้วยแรงสปริง การทำงานของ Pressure Relief คือเมื่อมีความดันภายในหม้อแปลงเกินกำหนด ซึ่งอาจเกิดเนื่องจากการเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลง ความดันที่เกิดขึ้นจะดันแผ่น Diaphragm ให้ชนะแรงสปริงทำให้น้ำมันไหลออกสู่ภายนอก ช่วยลดความดันที่เกิดขึ้นจากความผิดปกติภายในหม้อแปลง



รูปที่ 2.7 Pressure Relief Device

2.2.6 Arcing Horn

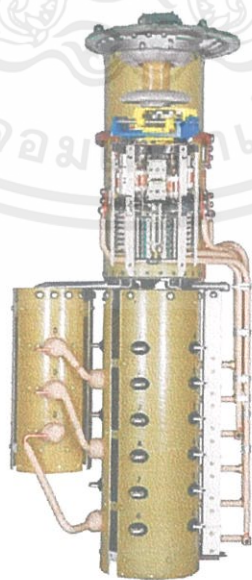
Arcing Horn ทำหน้าที่ในการป้องกันหม้อแปลงเสียหายเนื่องจากสภาวะแรงดันเกิน (Surge) โดยเฉพาะความเสียหายที่เกิดจากฟ้าผ่า เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งที่บushing ของหม้อแปลงช่วยให้เกิดอาร์กที่ Arcing Horn แทนที่จะเกิดที่บushing ส่งผลให้ความเสียหายของบushing เนื่องจากฟ้าผ่าลดลงและช่วยยืดอายุการใช้งานได้อีกด้วย



รูปที่ 2.8 Arcing Horn ที่ติดตั้งบริเวณบushing

2.2.7 Tap Changer

Tap Changer เป็นส่วนหนึ่งของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่คอยปรับระดับแรงดัน ซึ่งทำการปรับเปลี่ยนแรงดันโดยการปรับเปลี่ยนจำนวนรอบของขดลวดหม้อแปลงเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าทางด้านโหลดตามต้องการ ส่วนใหญ่ในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจะใช้ On-Load Tap Changer ที่สามารถเปลี่ยนแรงดันและมุมเฟสชฟได้ในขณะที่โหลดต่ออยู่ได้โดยไม่ต้องดับไฟ



รูปที่ 2.9 Tap Changer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

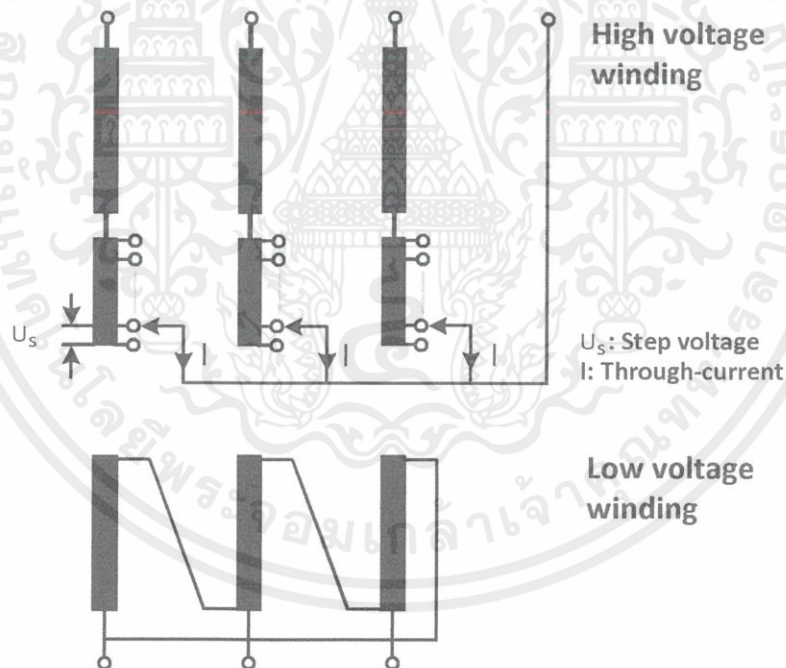
2.3 ออนโหลดแท็ปเชนเจอร์ (On-Load Tap Changer หรือ OLTC) [2]

การใช้งาน OLTC ร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังนั้นมีความยาวนาน การติดตั้ง OLTC ทำให้เราสามารถเปลี่ยนแปลงแรงดันขาออกและมุมเฟสขีฟได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของขดลวด (Turn Ratio) ของหม้อแปลงในขณะที่มีโหลดต่ออยู่โดยไม่ทำให้เกิดการอินเทอร์รัพชัน (Interruption)

โดยเริ่มแรก OLTC ได้มีการพัฒนาให้มีการเปลี่ยนแท็ป 2 วิธี คือ OLTC ไสสปัดชนิดตัวต้านทาน (High-Speed Resistor Type OLTCs) และ OLTC ไสสปัดชนิด รีแอกเตอร์ (Reactor Type OLTCs) ทั้งสองวิธีนี้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ทำให้ทั้งสองวิธีมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวาง โดยหลักๆ แล้วในปัจจุบัน OLTC ชนิดตัวต้านทาน (Resistor Type OLTCs) จะถูกติดตั้งในแท้งค์เดียวกับขดลวดของ หม้อแปลง (In-Tank OLTCs) และ OLTC ชนิดรีแอกเตอร์ (Reactor Type OLTCs) จะถูกติดตั้งแยกกับแท้งค์ของหม้อแปลง (Compartment Type)

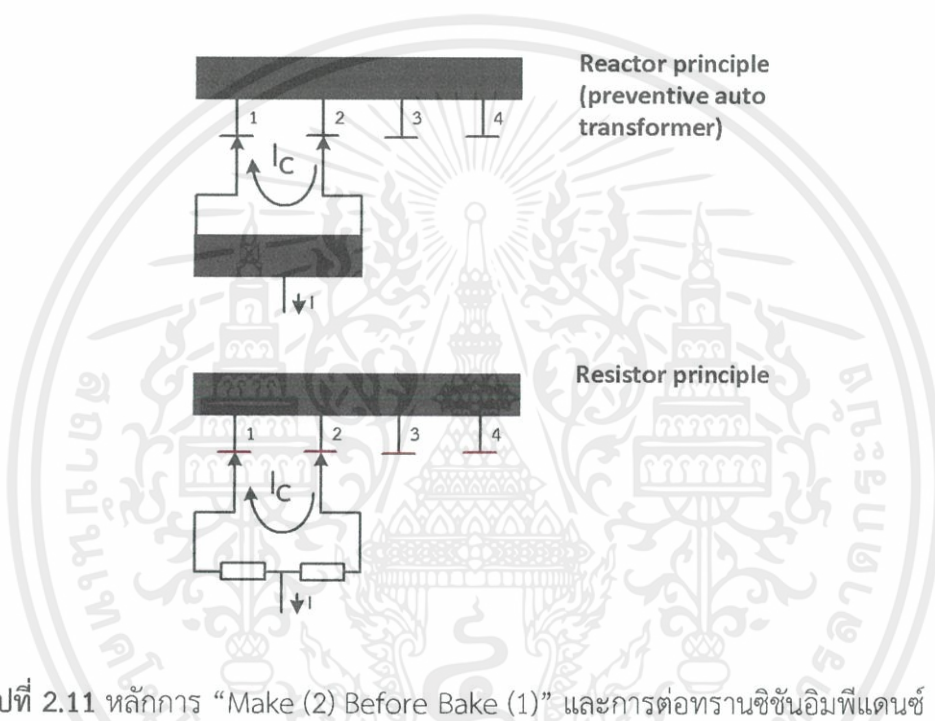
2.3.1 ลำดับการสวิตซ์ซึ่งเพื่อเปลี่ยนแท็ปของ OLTC

OLTC สามารถเปลี่ยนอัตราส่วนของขดลวดของหม้อแปลงได้ทั้งบวกและลบ และสามารถติดตั้งได้ทั้งด้านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิ



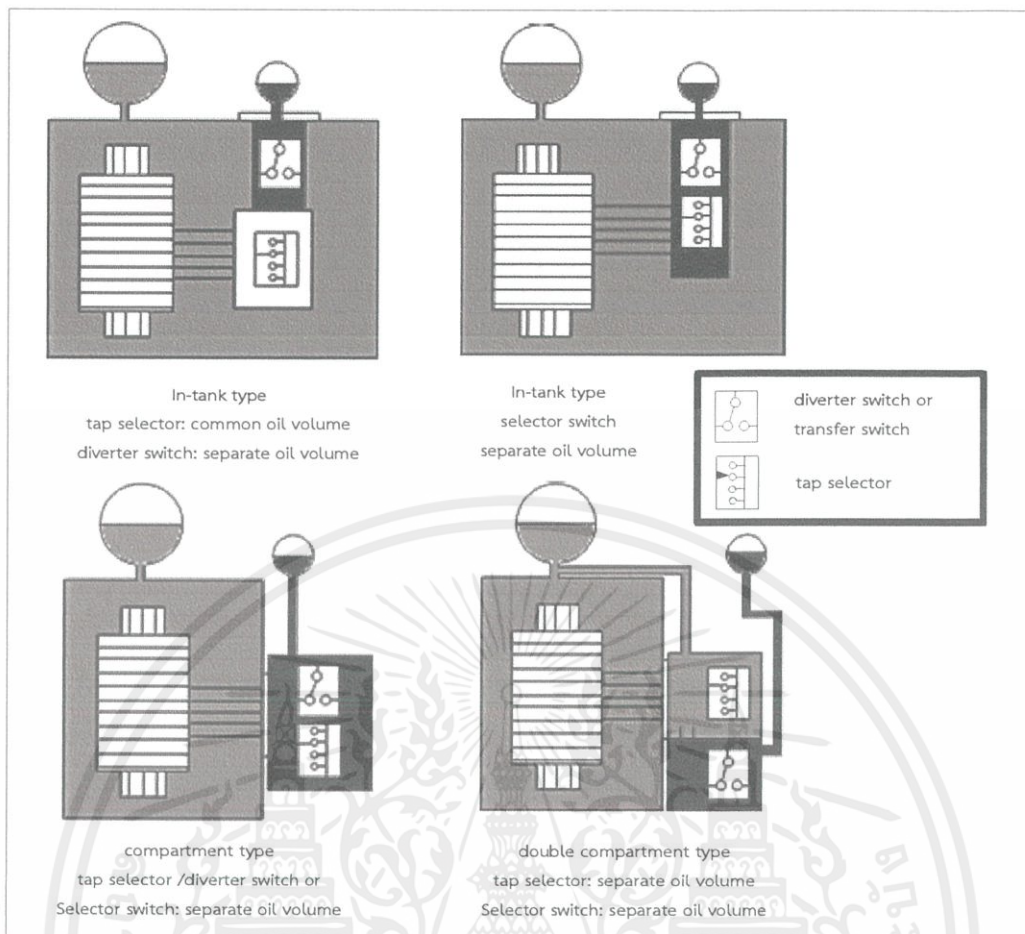
รูปที่ 2.10 การต่อ OLTC เข้ากับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแบบ Y- Δ [2]

ในการเปลี่ยนแท็บในขณะที่มีโหลดถ้าหากตัวแท็บเซนเจอร์มีการเปิดวงจรในขณะที่ทำการเปลี่ยนแท็บ (Loss of System) จะทำให้เกิดการอาร์คขึ้น ดังนั้นจึงต้องใช้หลักการ “Make (2) Before Brake (1)” ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งหลักการนี้เป็นหลักการพื้นฐานของ OLTC ทุกๆ ตัว และจากรูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าการต่ออิมพีแดนซ์ เรียกว่า ทรานซิชันอิมพีแดนซ์ (Transition Impedance) ซึ่งอาจจะเป็นตัวต้านทานหรือตัวเหนี่ยวนำเพื่อไม่ให้เกิดการอินเตอร์รัพชัน ขณะทำการเปลี่ยนแท็บ และยังทำหน้าที่กำจัดกระแสไหลวน (Circulating Current) ที่เกิดขึ้นในช่วงที่แท็บทั้งสองแท็บ ใช้งานพร้อมกัน แรงดันไฟฟ้าระหว่างแท็บแต่ละแท็บเรียกว่า สเตปโวลต์เทจ (Step Voltage) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.8% ถึง 2.5% ของแรงดันพิกัดของหม้อแปลง



รูปที่ 2.11 หลักการ “Make (2) Before Brake (1)” และการต่อทรานซิชันอิมพีแดนซ์ [2]

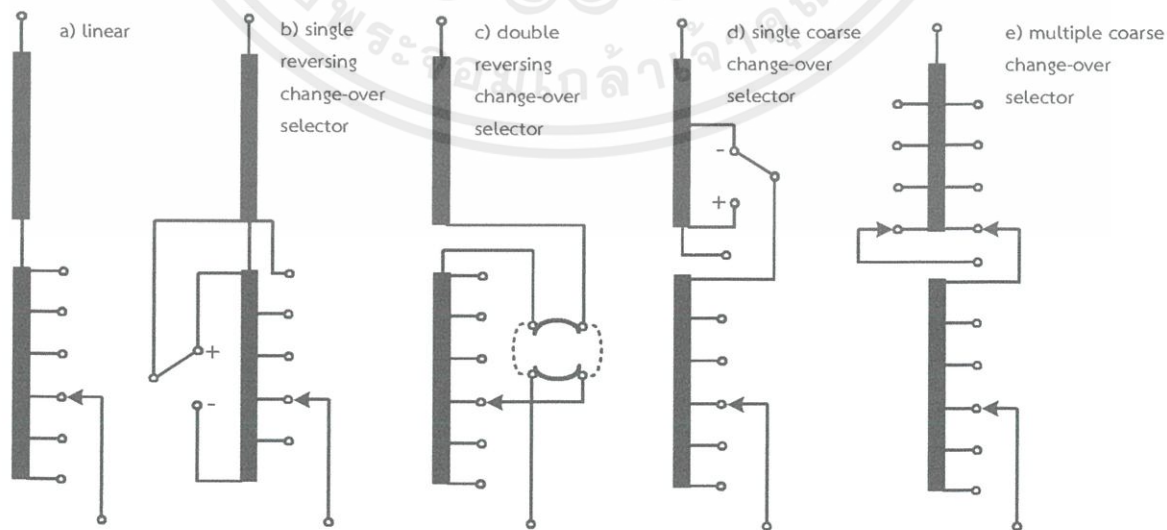
การติดตั้ง OLTC ซึ่งประกอบด้วยไดเวอเตอร์หรือทรานส์เฟอร์สวิตช์ (Diverter or Transfer Switch) และแท็บซีเล็คเตอร์ (Tap Selector) มีทั้งชนิดที่ออกแบบมาเพื่อติดตั้งในแท่งของหม้อแปลงหรือที่เรียกว่าแบบอินแท่ง และแบบที่ติดตั้งแยกกับแท่งของหม้อแปลงหรือที่เรียกว่าแบบคอมพาร์ทเมนต์ ในกรณี OLTC ไฮสปีด ชนิดตัวต้านทานแบบอินแท่ง ส่วนของไดเวอเตอร์สวิตช์ (Diverter Switch) จะจุ่มอยู่ในน้ำมันแยกคนละส่วนกับแท็บซีเล็คเตอร์ โดยแท็บซีเล็คเตอร์จะจุ่มอยู่ในน้ำมันเดียวกันกับน้ำมันของหม้อแปลง แต่แบบซีเล็คเตอร์สวิตช์ (Selector Switch) น้ำมันของ OLTC ทุกส่วนจะแยกส่วนกับน้ำมันของหม้อแปลงทั้งหมด ในกรณีแบบคอมพาร์ทเมนต์ตัวแท็บซีเล็คเตอร์และไดเวอเตอร์สวิตช์ จะมีอยู่ทั้งแบบที่อุปกรณ์ทั้งสองชนิดติดตั้งอยู่ในแท่งเดียวกันในน้ำมันเดียวกัน และแบบที่อุปกรณ์ทั้งสองชนิดอยู่แยกออกจากกัน โดยรูปแบบการติดตั้งของอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 รูปแบบการติดตั้งของ OLTC [2]

2.3.2 การติดตั้งขดลวดแท๊ปของ OLTC

การต่อขดลวดแท๊ป (Tap Winding) เข้ากับหม้อแปลงแสดงดังรูปที่ 2.13 ซึ่งสามารถออกแบบได้หลากหลายขึ้นกับผู้ผลิตหม้อแปลง โดยส่วนใหญ่ 70-80% จะเป็นรีเวอร์สซิงสวิทช์ (Reversing Switch) ถึงแม้ว่าคอร์ส/ไฟน์แท๊ป (Coarse/Fine tap) จะมีข้อดีมากกว่าก็ตาม



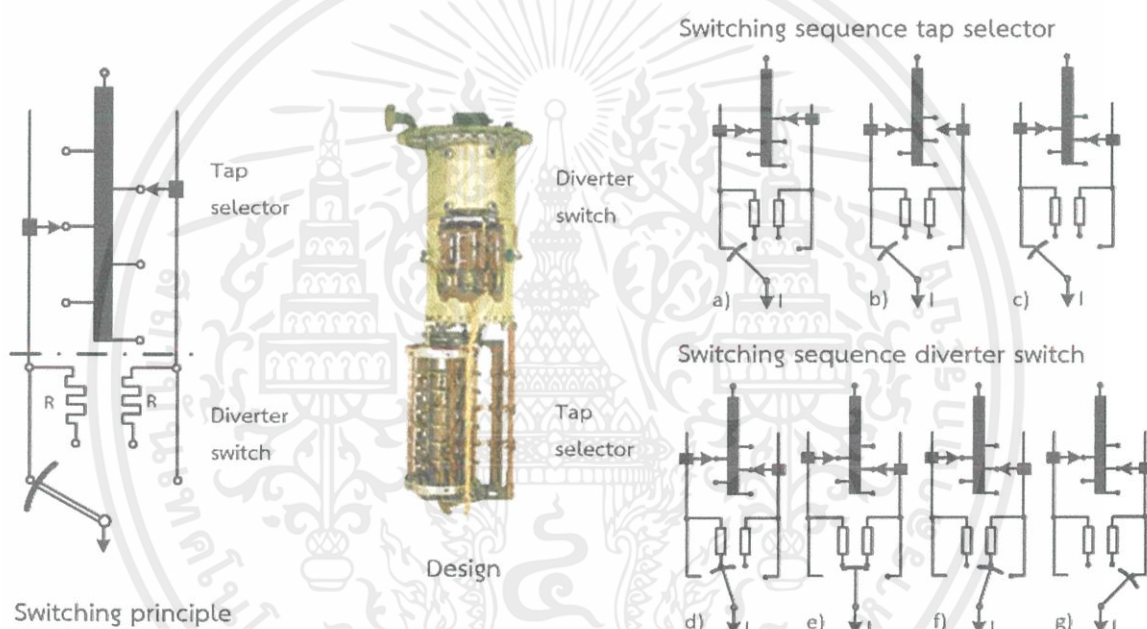
รูปที่ 2.13 การต่อขดลวดแท๊ปเข้ากับขดลวดของหม้อแปลง [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 ชนิดของ OLTC

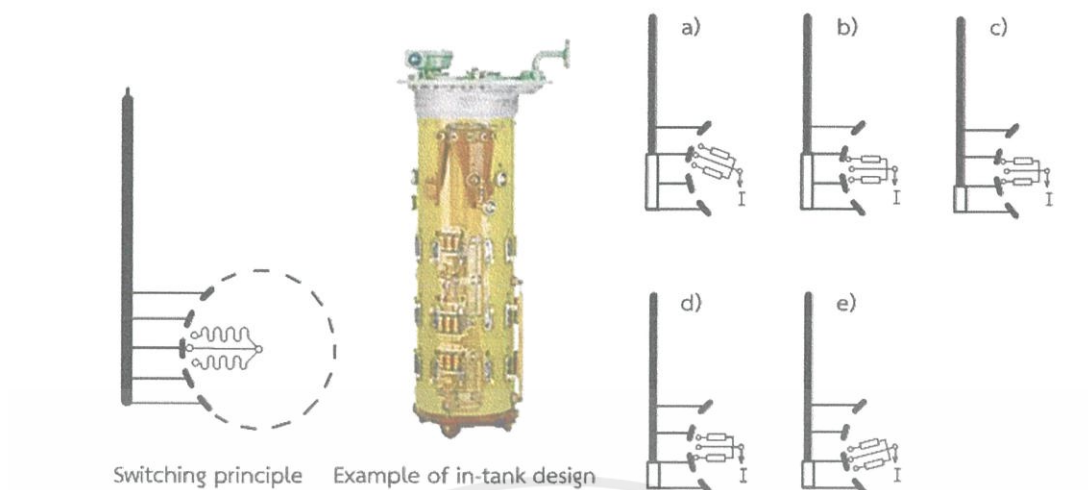
1) OLTC ชนิดตัวต้านทานในน้ำมัน

โดยทั่วไปแล้ว OLTC ที่ใช้ในปัจจุบันถ้าหากใช้ที่พิกัดแรงดันสูงจะใช้ไดโวลเตอร์สวิตช์ และแท็ปซีลคเตอร์ ถ้าหากใช้งานที่พิกัดแรงดันต่ำจะใช้ซีลคเตอร์สวิตช์ การทำงานของไดโวลเตอร์สวิตช์และแท็ปซีลคเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.14 โดยเริ่มต้นแท็ปซีลคเตอร์จะทำงานโดยจะเคลื่อนตัวไปยังแท็ปถัดจากแท็ปที่ใช้งานอยู่ (Preselected Tap) ในขณะที่ไม่มีโหลด (รูป 2.14a-c) จากนั้นไดโวลเตอร์สวิตช์จะทำงานเพื่อถ่ายเทกระแสไหลต่อไปยังแท็ปที่ได้ทำการเลือกไว้ โดยอาศัยระบบมอเตอร์และสปริง (รูป 2.14c-g) เวลาการทำงานของไดโวลเตอร์สวิตช์อยู่ที่ 40-60 มิลลิวินาที และจากรูปจะมีการใส่ตัวต้านทาน เรียกว่า ทรานซิชันริซิสเตอร์ (Transition Resistor) ซึ่งมีค่าประมาณ 0.8-20 โอห์ม ซึ่งจะทำงานประมาณ 20-30 มิลลิวินาที ช่วงที่ทำการเปลี่ยนแท็ป (รูป 2.14d-f) เพื่อจำกัดกระแส และลดการเกิดอาร์ค ทำให้ช่วงเวลาการทำงานโดยรวมของ OLTC จะอยู่ที่ 3-10 วินาที



รูปที่ 2.14 OLTC ชนิดตัวต้านทานในน้ำมันแบบไดโวลเตอร์สวิตช์ แท็ปซีลคเตอร์ และลำดับการทำงาน [2]

ซีลคเตอร์สวิตช์เป็น OLTC ชนิดตัวต้านทานในน้ำมันอีกประเภทหนึ่งซึ่งเหมือนกับการนำ ไดโวลเตอร์สวิตช์ และแท็ปซีลคเตอร์มารวมเข้าด้วยกัน ลักษณะของซีลคเตอร์สวิตช์แสดงดังรูปที่ 2.15 การทำงานอุปกรณ์ชนิดนี้จะเหมือนกับการเลือกแท็ปและสับสวิตช์ไปพร้อมๆ กัน ดังนั้นแต่ละ ขั้นตอนในการทำงานจะเกิดการอาร์คตลอดเวลา ความรุนแรงของอาร์คจะมากหรือน้อยขึ้นกับการ เปลี่ยนแท็ปว่าเป็นการเปลี่ยนแท็ปเพื่อเพิ่มแรงดันหรือเป็นการเปลี่ยนแท็ปเพื่อลดแรงดัน



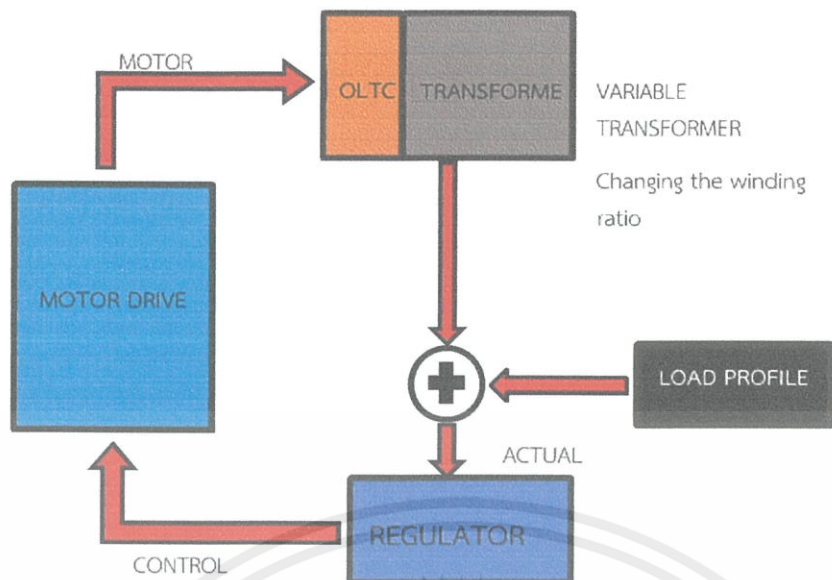
รูปที่ 2.15 OLTC ชนิดตัวต้านทานในน้ำมันแบบซีเลคเตอร์สวิตช์ และลำดับการทำงาน [2]

2) OLTC ชนิดรีแอกเตอร์ในน้ำมัน

OLTC รีแอกเตอร์ในน้ำมันนั้นจะเป็นแบบคอมพาร์ทเมนต์ โดยจะติดตั้งแยกส่วนกับแหล่งกักของหม้อแปลง มีทั้งแบบซีเลคเตอร์สวิตช์และแบบไดโวลเตอร์สวิตช์และแท็ปซีเลคเตอร์ OLTC ชนิดนี้จะใช้ในแถบอเมริกาเหนือและไม่มีใช้ในประเทศไทย การทำงานของ OLTC ชนิดรีแอกเตอร์ในน้ำมันจะเหมือนกับการทำงานของ OLTC ชนิดตัวต้านทานในน้ำมัน

2.3.4 การควบคุม OLTC

OLTC ใช้เพื่อการควบคุมแรงดันทางด้านขาออกของหม้อแปลง ดังนั้นจึงต้องทำการมอนิเตอร์แรงดันขาออกของหม้อแปลง แล้วกำหนดลิมิตที่ตัว Regulator ว่าต้องการให้แรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ระดับใด กำหนดว่าแรงดันสามารถคลาดเคลื่อนได้กี่เปอร์เซ็นต์ และกำหนดว่าให้หน่วงเวลาไว้กี่วินาทีก่อนจะให้ OLTC ทำงาน (สามารถกำหนดได้ในช่วง 1-180 วินาที) โดยการกำหนดค่าต่างๆ นั้นขึ้นกับว่าต้องการให้ระบบมีความไวต่อการตรวจจับและเสถียรภาพขนาดไหน เช่น ถ้าหากต้องการให้มีความไวเสถียรภาพมากก็อาจจะกำหนดให้เปอร์เซ็นต์แรงดันคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยและหน่วงเวลาน้อยๆ เมื่อแรงดันตกถึงระดับและเวลาหน่วงที่กำหนด Regulator ก็จะทำให้การสั่งให้ส่วนของ Motor-Drive ทำงานเพื่อทำการเปลี่ยนแท็ป



รูปที่ 2.16 การควบคุม OLTC [2]

2.4 สนามไฟฟ้า [3]

สนามไฟฟ้า หมายถึง “บริเวณโดยรอบประจุไฟฟ้า ซึ่งประจุไฟฟ้าสามารถส่งอำนาจไปถึง” หรือ “บริเวณที่เมื่อนำประจุไฟฟ้าทดสอบเข้าไปวางแล้วจะเกิดแรงกระทำบนประจุไฟฟ้าทดสอบนั้น” สนามไฟฟ้าจะมีค่ามากหรือน้อยอาจแสดงหรือวัดในรูปของแรงที่เกิดขึ้นตามกฎของคูลอมบ์ (Coulomb’s Law) หากมีประจุ Q_1 และ Q' ขนาดเล็กเป็นจุดวางห่างกันระยะ r จะเกิดแรงกระทำต่อกันในแนวทิศต่อเชื่อมโยงระหว่างสองประจุนั้น แรงที่เกิดขึ้นคำนวณได้จาก

$$F_{Q_1 \rightarrow Q'} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{Q_1 Q' \vec{r}}{r^3} = \frac{Q_1 Q' \hat{r}}{4\pi\epsilon r^2} \tag{2.1}$$

เมื่อ \vec{r} คือ เวกเตอร์ตำแหน่งสัมพันธ์ของประจุ Q' เทียบกับ Q_1 ซึ่งมีเวกเตอร์หน่วย $\hat{r} = \vec{r} / r$

ϵ คือ เปรอิมิตติวิตีของตัวกลาง = $\epsilon_r \epsilon_0$

ϵ_0 คือ เปรอิมิตติวิตีของสุญญากาศ หรือที่ว่าง = 8.854×10^{-12}

ϵ_r คือ เปรอิมิตติวิตีของตัวกลาง (ไม่มีหน่วย)

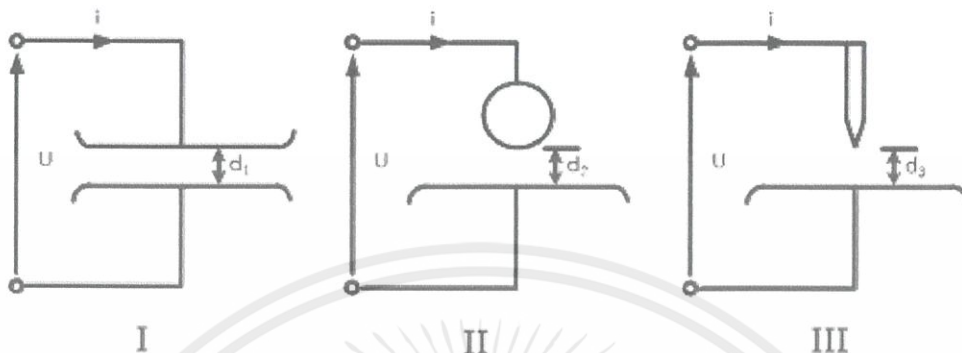
แรงที่ประจุต่างๆกระทำต่อประจุ Q' ถ้าคิดเป็นแรงต่อหนึ่งหน่วยประจุ Q' คำนั้นเรียกว่า ความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric Field Intensity) หรือความเครียดสนามไฟฟ้า E

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q'} = \frac{\vec{F}}{e} = \sum_{i=1}^N \frac{Q_i \hat{r}_i}{4\pi\epsilon r_i^2} \tag{2.2}$$

เมื่อ e คือประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอนเท่ากับ 1.602×10^{-19} คูลอมบ์ ความเครียดสนามไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับเปอร์มิตติวิตี หรือค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ϵ และหน่วยของสนามไฟฟ้าคือนิวตันต่อคูลอมบ์ หรือโวลต์ต่อเมตร

2.5 ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้า (Electric Field Configuration) [3]

ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้าแบ่งได้ทั่วไปเป็น 2 ชนิดคือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ และ สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง โดยจะขึ้นอยู่กับรูปลักษณะของอิเล็กโทรด ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 อิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างกัน [3]

- I : สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform Field)
- II : สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly Nonuniform Field)
- III : สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly Nonuniform Field)

2.5.1 สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (I)

สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หมายถึง สนามไฟฟ้าที่เท่ากันทุกจุด ดังเช่นในช่องระหว่างอิเล็กโทรดระนาบ-ระนาบ ซึ่งคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_{\max} = E = \frac{U}{d} \quad 2.3$$

- เมื่อ
- U คือ แรงดันที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโทรด
 - d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด
 - E คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า ณ จุดใดๆ ระหว่างอิเล็กโทรด
 - E_{\max} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

เมื่อป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ จะเกิดเบรกดาวน์ที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด (เท่ากันทุกจุด) ถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณ และกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมากในทันทีทันใด ค่ากระแสเบรกดาวน์นี้จะถูกจำกัดด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของตัวจ่าย และวงจรภายนอกเท่านั้น ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันขณะจะเกิดเบรกดาวน์นี้คือ ค่าความคงทนทางไฟฟ้า (Dielectric Strength) หรือความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของการฉนวน ซึ่งคำนวณได้จาก

$$E_b = \frac{U_b}{d} \quad 2.4$$

เมื่อ U_b คือ แรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ด้วยสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ
 E_b คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ ซึ่งเรียกว่าความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวน

อย่างไรก็ตามค่า E_b ของไดอิเล็กทริกชนิดหนึ่งก็ไม่มีค่าคงตัวเสมอไป เพราะขึ้นอยู่กับแพกเตอร์ต่างๆ แม้แต่ความหนาหรือระยะห่าง d ที่ไม่เท่ากัน ค่า E_b ก็ไม่เท่ากัน ฉะนั้นในมาตรฐานที่กำหนดค่าความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวน มักจะกำหนดความหนาของไดอิเล็กทริกไว้ด้วยเสมอ

2.5.2 สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (II,III)

สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ คือความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้น ความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆ จะมากขึ้นหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโตรด ที่มีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากหรือน้อย ดังเช่น อิเล็กโตรดในรูป 2.18 ถ้าเส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าๆ จะได้ดังในรูป



จะเห็นว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_{\max} จะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโตรดทรงกลม ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$E_{\max} = \frac{U}{d\eta^*} \quad 2.5$$

เมื่อ η^* คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (Field Utilization Factor) มีนิยามว่า

$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}} \quad 0 < \eta^* \leq 1 \quad 2.6$$

โดยที่ E_{av} คือ ค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ U/d

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงอาจกล่าวได้ว่า η^* คือ ดรรชนีแสดงให้ทราบว่าอิลีกโตรดนั้น มีลักษณะสนามไฟฟ้า สม่ำเสมอมากน้อยเพียงใด และโดยอาศัยแพคเกจอิลีกโตรดสนามไฟฟ้านี้เอง จึงคำนวณหาความเครียด สนามไฟฟ้าเบรกดาว์นของฉนวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยได้คือ

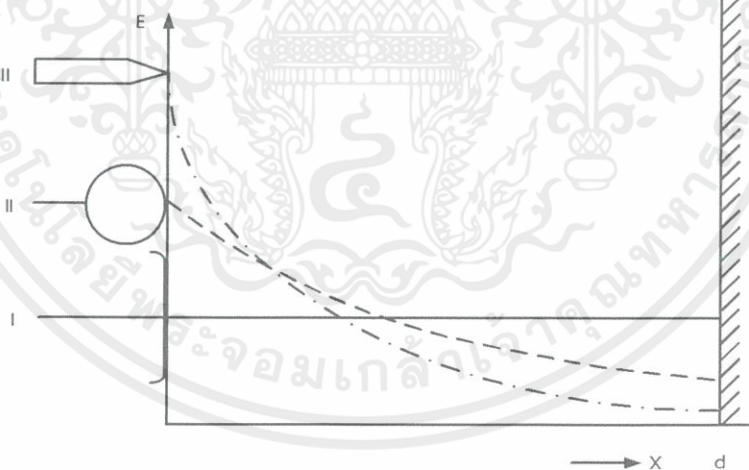
$$E_b = \frac{U_b}{d\eta^*} \quad 2.7$$

และค่าแรงดันเบรกดาว์น

$$U_b = E_b \cdot d \cdot \eta^* \quad 2.8$$

แสดงว่า อิลีกโตรดที่มีค่าแพคเกจอิลีกโตรดสนามไฟฟ้าลดลง ค่าแรงดันเบรกดาว์นก็จะลดลง สมการ นี้ใช้ได้เฉพาะกรณีที่มีอิลีกโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย หรือใช้ได้กับกรณีที่ไม่มีโคโรนา ก่อน เกิดเบรกดาว์น

ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly Nonuniform Field) ความเครียดสนามไฟฟ้าสูง จะอยู่บริเวณใกล้กับผิวอิลีกโตรดที่มีพื้นที่ผิวน้อยที่สุด เช่น ปลายแหลมดังรูปที่ 2.19 III เมื่อระยะห่าง ออกไปจากผิวอิลีกโตรด ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังเส้นกราฟ ความเครียด สนามไฟฟ้ากระจายเปรียบเทียบในรูป 2.19 อิลีกโตรดแบบ III นี้ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้า สูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤตแล้วก็ตาม เบรกดาว์นจะยังไม่เกิด แต่จะเกิดโคโรนา



รูปที่ 2.19 สนามไฟฟ้ากระจายเปรียบเทียบของอิลีกโตรดลักษณะต่างๆ [3]

บริเวณที่ผิวอิลีกโตรดเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ส่วนบริเวณอื่นๆ ที่ห่าง ออกไปจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าลดลงและโคโรนาไม่เกิด ฉะนั้นในแกประหว่างอิลีกโตรดจะเกิด ดิสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ เรียกว่าดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) ปรากฏการณ์อาจเกิดขึ้นอย่าง ต่อเนื่องหรือเป็นช่วงๆ จึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้กับอิลีกโตรด กระแสนี้จะเกิดขึ้น และวัดได้ก่อนเกิดเบรกดาว์น เรียกว่ากระแสโคโรนา หรือกระแสพรีดิสชาร์จ

2.6 การเกิดเบรกดาวนในฉนวนเหลว [4]

ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ หลายประการ เช่น ลักษณะโครงสร้างทางเคมีและฟิสิกส์ของฉนวนเหลว ชนิดและรูปร่างอิเล็กโทรด ระยะแคป อัตราการไหลของฉนวนเหลว ความดัน อุณหภูมิ อีกทั้งสิ่งเจือปนที่ปะปนอยู่ในฉนวนเหลว สิ่งเจือปนที่อยู่ในฉนวนเหลวจะทำให้ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวลดลง ในกรณีของสิ่งเจือปนที่เป็นความชื้นหรือหยดน้ำ ความชื้นที่เจือปนอยู่ในฉนวนเหลวจะทำให้ฉนวนเหลวมีอุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากการสูญเสียไดอิเล็กตริกที่เพิ่มขึ้นทำให้ฉนวนเหลวเกิดการเสื่อมสภาพ ถ้าเป็นหยดน้ำที่อยู่ในน้ำมันหม้อแปลงหยดน้ำจะยึดติดตามแนวสนามไฟฟ้าทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น เมื่อถึงค่าวิกฤติจะเกิดเบรกดาวน โดยแนวการเบรกดาวนจะเริ่มที่ปลายของหยดน้ำไปสู่อิเล็กโทรด นอกจากนี้ยังมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าแยกน้ำออกเป็นแก๊สไฮโดรเจนกับแก๊สออกซิเจนที่อยู่ในรูปของฟองแก๊สทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนและอาจทำให้เกิดเบรกดาวนตามมา

พิจารณาจากโครงสร้างและองค์ประกอบของฉนวนเหลว อาจแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ฉนวนเหลวบริสุทธิ์ และฉนวนเหลวเชิงการค้า โดยทั่วไปฉนวนเหลวที่ใช้กันในทางปฏิบัติ ส่วนใหญ่จะเป็นฉนวนเหลวเชิงการค้า ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีไม่บริสุทธิ์ มีโครงสร้างหรือส่วนผสมของโมเลกุลซับซ้อน อาจมีแก๊สและอนุภาคของแข็งผสมอยู่

2.6.1 กลไกการเกิดเบรกดาวนของฉนวนเหลวบริสุทธิ์

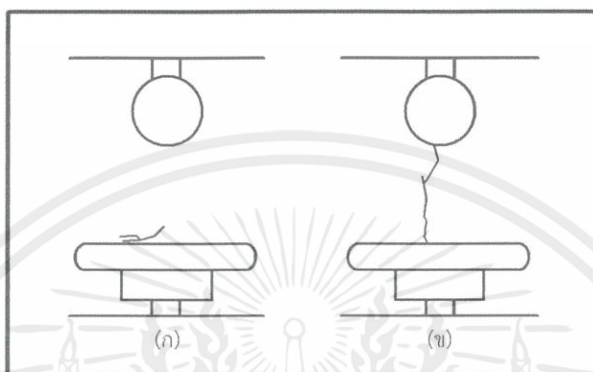
กลไกการเกิดเบรกดาวนของฉนวนเหลวบริสุทธิ์มีหลักการแบบเดียวกับกรณีของฉนวนแก๊สที่เกิดจากอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ โดยเกิดจากการชนกันของอิเล็กตรอนกับอนุภาคในสนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนเริ่มต้นที่ออกจากแคโทดเนื่องจากผลของสนามไฟฟ้า (Field Emission) หรือเป็นผลมาจากความร้อน (Thermionic Emission) มีรายงานผลการศึกษาการนำไฟฟ้าในฉนวนเหลว ระบุว่าเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าสูง พบว่าการไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดเกิดจากการปล่อยอิเล็กตรอนจากแคโทดโดยสนามไฟฟ้ามากกว่าที่จะเป็นการปล่อยอิเล็กตรอนจากแคโทดด้วยความร้อน การเบรกดาวนน่าจะเกิดจากการที่ไอออนบวกของอนุภาคเจือปนเคลื่อนที่มาสู่แคโทด ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณใกล้ผิวแคโทดสูงขึ้นเพียงพอที่อิเล็กตรอนสามารถหลุดออกจากผิวแคโทดได้อิเล็กตรอนอิสระที่หลุดออกมาเหล่านี้ จะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรด ทำให้เกิดการเคลื่อนที่โดยมีทิศทางไปสู่ขั้วแอโนด ระหว่างทางจะชนกับโมเลกุลของฉนวนเหลวทำให้พลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้าสูญเสียไปกับการชน ในกระบวนการนี้จะมีอิเล็กตรอนบางตัวที่สูญเสียพลังงานไปกับการชนต่ำกว่าพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้า ถ้าอิเล็กตรอนเหล่านี้ถูกเร่งจนมีพลังงานสูงพอที่จะชนกับโมเลกุลแล้ว ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนและก่ออะวาลานซ์ จนเกิดเป็นการเบรกดาวนของฉนวนเหลว

2.6.2 กลไกการเกิดเบรกดาวนของฉนวนเหลวเชิงการค้า

การเกิดเบรกดาวนของฉนวนเหลวเชิงการค้าอาจเกิดได้จากสาเหตุต่อไปนี้

1) การเกิดเบรกดาวนเนื่องจากอนุภาคเจือปนของแข็ง

สิ่งเจือปนของแข็งที่อยู่ในฉนวนเหลวอาจเป็นอนุภาคตัวนำ ไฟเบอร์หรือฝุ่นละออง เมื่อมีสนามไฟฟ้าอนุภาคเจือปนเหล่านี้จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วภายใต้สนามไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงกระทำต่ออนุภาคฉนวนโดยผลของแรงที่เกิดขึ้นจะทำให้อนุภาคเจือปนของแข็งเรียงตัวกันเป็นสะพานเชื่อมต่อระหว่างอิเล็กโทรดทำให้เกิดเบรกดาวนขึ้นในที่สุดดังแสดงในรูปที่ 2.20



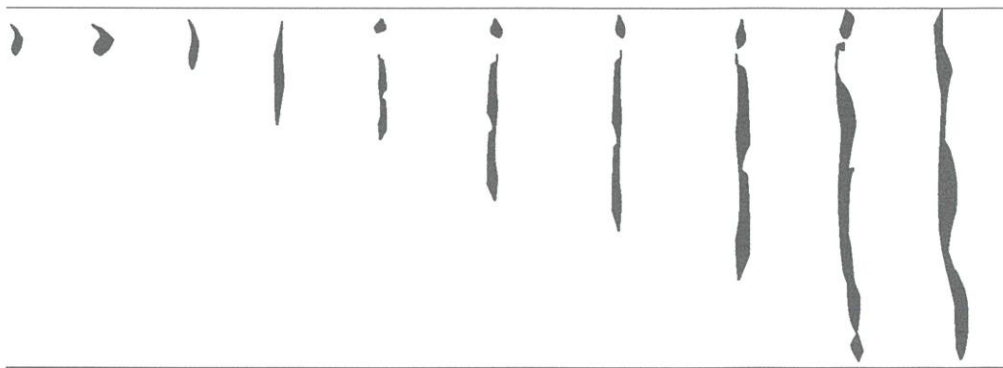
รูปที่ 2.20 การเรียงตัวของอนุภาคไฟเบอร์ระหว่างช่องว่าง(Gap) (ก) อนุภาคไฟเบอร์ก่อนป้อนแรงดัน (ข) การจัดเรียงตัวเชื่อมต่อระหว่างอิเล็กโทรดของอนุภาคไฟเบอร์หลังป้อนแรงดัน [4]

2) การเกิดเบรกดาวนเนื่องจากฟองแก๊ส

แก๊สสามารถละลายในฉนวนเหลวได้ในปริมาณมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับสถานะความดันและอุณหภูมิของฟองแก๊สในฉนวนเหลว ฟองแก๊สอาจเกิดจากฉนวนที่มีคุณภาพต่ำหรือเสื่อมคุณภาพ หรือในขณะที่เติมฉนวนเหลวในภาชนะบรรจุ แก๊สอาจจะจับอยู่ที่ผิวอิเล็กโทรดที่ขรุขระหรือร่องผิวอิเล็กโทรด หรืออาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีภายในฉนวนเหลว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความดัน การชนของไอออน และอิเล็กตรอน ทำให้ฉนวนเหลวสลายตัวเป็นแก๊สออกมา หรืออาจเกิดจากผลของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนบริเวณผิวอิเล็กโทรดที่มีความเครียดสูง ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นเมื่อได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าก็จะขยายตัวยึดตามแนวสนามไฟฟ้าเพื่อลดพลังงานศักย์ในสนามไฟฟ้า เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าของฟองแก๊สมีค่าเท่ากับความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของแก๊สก็จะเกิดดิสชาร์จผ่านฟองแก๊ส เป็นผลให้เกิดการแยกตัวของโมเลกุลฉนวนเหลวนำไปสู่การเบรกดาวนได้

3) การเกิดเบรกดาวนจากหยดของเหลวเจือปน

ฉนวนเหลวที่มีหยดของเหลวต่างชนิดเจือปนอยู่สามารถทำให้เกิดเบรกดาวนได้ เนื่องจากการเปลี่ยนรูปร่างของหยดของเหลวเจือปน โดยมีการยืดออกตามแนวของสนามไฟฟ้า เมื่อของเหลวเกิดการยืดตัว ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนเหลวที่ปลายทั้งสองของหยดของเหลวมีค่าสูงขึ้น ถ้ามีค่าสูงเกินค่าวิกฤตจะทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วน เกิดโพรงแก๊สและนำมาสู่การเบรกดาวน



รูปที่ 2.21 การยืดออกของหยดน้ำที่อยู่ในฉนวนเคลือบซิลิโคนภายใต้สนามไฟฟ้า [4]

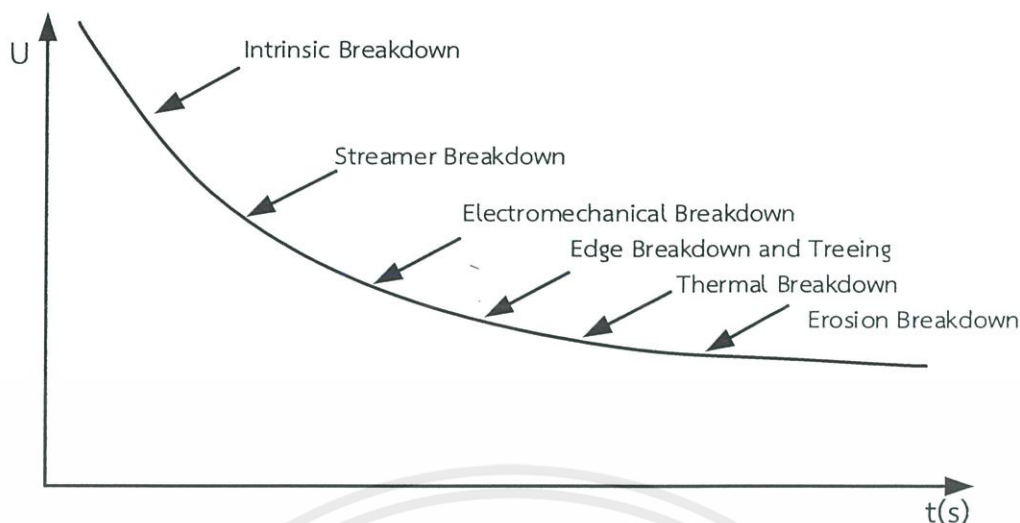
4) การเกิดเบรกดาวนจากความร้อน

การเกิดเบรกดาวนเนื่องจากความร้อน เกิดขึ้นในกรณีที่มีการป้อนแรงดันชนิดพัลส์ จากการทดลองวัดพัลส์กระแสในฉนวนเหลวพบว่ากระแสมีค่าสูงก่อนเกิดเบรกดาวน โดยมีค่าความหนาแน่นกระแสประมาณ 1 A/cm^3 ซึ่งเชื่อว่ามีแหล่งกำเนิดจากปลายของผิวอิเล็กโตรดขั้วลบ ทำให้ฉนวนเหลวบริเวณนั้นมีอุณหภูมิสูงและกลายเป็นไอหรือฟองแก๊ส เมื่อฟองแก๊สมีการยืดจับตัวจนกระทั่งมีความยาวเกินความยาววิกฤติหรือโพรงตลอดแนวระยะแก๊ปของอิเล็กโตรดจะเกิดเบรกดาวนตามมา

2.7 การเกิดเบรกดาวนในฉนวนของแข็ง [4]

ฉนวนแข็งที่มีการใช้งานอยู่นั้นเมื่อเบรกดาวนแล้วจะเสียสภาพฉนวนอย่างถาวร ใช้งานอีกไม่ได้ การเกิดเบรกดาวนในฉนวนแข็งจะต่างไปจากการเกิดเบรกดาวนในฉนวนแก๊ส และฉนวนเหลว ซึ่งสามารถกลับคืนสู่สภาพฉนวนได้อีก คุณสมบัติของฉนวนแข็งขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอกหลายอย่าง เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ระยะเวลาในการทดสอบ ชนิดของแรงดันที่ป้อนเข้า การถ่ายประจุภายใน ช่องว่างเล็กๆ ที่เกิดขึ้นภายในฉนวนแข็ง และปัจจัยอื่นๆ อีกหลายประการ กลไกการเกิดเบรกดาวนของฉนวนแข็งค่อนข้างซับซ้อนขึ้นอยู่กับเงื่อนไข และกระบวนการป้อนแรงดัน ที่สำคัญคือขึ้นอยู่กับช่วงเวลาคงอยู่ของแรงดันหรือสนามไฟฟ้าที่ป้อน การเกิดเบรกดาวนในฉนวนแข็งอาจแบ่งออกตามช่วงเวลาของแรงดันที่ป้อนและปรากฏการณ์การเกิดเบรกดาวนได้ คือ

- การเบรกดาวนแบบแท้จริง
- การเบรกดาวนแบบสตริมเมอร์
- การเบรกดาวนจากแรงทางกลที่เกิดจากไฟฟ้า
- การเบรกดาวนจากรอยที่ผิวและการรั่วในฉนวน
- การเบรกดาวนจากผลทางความร้อน
- การเบรกดาวนเนื่องจากการดีสชาร์จภายใน



รูปที่ 2.22 ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์เมื่อป้อนแรงดันให้กับฉนวนแข็งที่ระยะเวลาต่างกัน [4]

2.7.1 การเบรกดาวน์แบบแท้จริง (Intrinsic Breakdown)

ในกรณีของฉนวนแข็งที่มีคุณสมบัติบริสุทธิ์และเป็นเนื้อเดียวกัน อุณหภูมิ และสภาวะแวดล้อมภายนอกถูกควบคุม เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าให้กับวัตถุทดสอบนี้จะไม่เกิดการดิสชาร์จภายนอก ดังนั้นเมื่อป้อนสนามไฟฟ้าภายใต้ระยะเวลาสั้นๆ ความเครียดจากสนามไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจนถึงขอบเขตบนสุด ซึ่งเรียกว่า Intrinsic Breakdown ซึ่งจะการเกิดจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและอุณหภูมิเท่านั้น ทฤษฎีที่ใช้ในการเกิดเบรกดาวน์บริสุทธิ์ นั้นยังไม่มีคำอธิบายที่สมบูรณ์ แต่ได้มีการทดลองมากมาย เพื่อบันทึกค่าเอาไว้สำหรับวัสดุหลายชนิด

การเกิด Intrinsic Breakdown จะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ภายใน 10^{-8} วินาที ส่วนความเครียดสนามไฟฟ้าที่สามารถทำให้ Intrinsic Breakdown ได้ดีนั้นควรมีมากกว่า 10^6 MV/cm ได้มีข้อสันนิษฐานว่าการเกิดเบรกดาวน์บริสุทธิ์จะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนภายในฉนวนได้รับพลังงานเพียงพอที่จะข้ามช่องแกปจากแถบวาเลนซ์ (Valence Band) สู่แถบความนำ (Conduction Band) ได้

2.7.2 การเบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์ (Streamer Breakdown)

การเกิดเบรกดาวน์แบบนี้จะเหมือนกับการเกิดเบรกดาวน์ในแก๊ส ซึ่งอธิบายได้จากการเกิดไอออนในเซชัน การเบรกดาวน์จะเกิดขึ้นเมื่อมีอิเล็กตรอนจำนวนมากพอเรียงตัวต่อเชื่อมระหว่างแคโทดกับแอโนด

อิเล็กตรอนที่อยู่ในฉนวนของแข็งจะเคลื่อนที่โดยเริ่มจากขั้วอิเล็กโตรดที่เป็นแคโทดไปยังแอโนด และในระหว่างที่เคลื่อนที่ไปนั้น อิเล็กตรอนจะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า ในขณะที่เคลื่อนที่ไป เมื่ออิเล็กตรอนตัวนี้ได้ชนอะตอมอาจทำให้อิเล็กตรอนตัวใหม่หลุดจากวงโคจรของอะตอมตัวที่โดนชนได้ ถ้าพลังงานจากการชนมากกว่าค่าศักย์ไอออไนซ์ภายในผลึกของแข็งของอะตอมที่ถูกชน กระบวนการนี้จะเกิดซ้ำๆ เป็นทวีคูณ (การเกิดอะวาลานซ์) ในระหว่างที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้น จนเกิดเบรกดาวน์ขึ้นเมื่อปริมาณอิเล็กตรอนในอะวาลานซ์มีจำนวนถึงค่าวิกฤต

2.7.3 การเบรกดาวนจากแรงทางกลที่เกิดจากไฟฟ้า (Electromechanical Breakdown)

เมื่อจ่ายสนามไฟฟ้าในระดับสูงให้แก่ฉนวนของแข็ง จะทำให้เกิดแรงกดกระทำต่อฉนวนนั้น แรงกดที่เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างผิวประจุ (Surface Charge) ซึ่งเมื่อแรงนี้มีค่ามากจนเกินค่าความคงทนทางกลของฉนวนจะทำให้เกิดการแตกกร้าวได้

2.7.4 การเบรกดาวนจากรอยที่ผิวและการร้าวในฉนวน (Edge Breakdown or Tracking and Treeing)

การเกิด Tracking จะเป็นการฟอรัมตัวทางเดินตัวนำถาวรบนผิวฉนวน โดยมักเกิดจากความชื้นหรือน้ำค้างรวมตัวกับสิ่งเปรอะเปื้อน เช่นโอเกลือ ผุ่นละออง สารเคมี กลายเป็นฟิล์มตัวนำบนผิวฉนวนทำให้กระแสสามารถไหลผ่านได้ จะเรียกระแสดังกล่าวว่า กระแสรั่วไหล กระแสรั่วไหลทำให้เกิดความร้อนขึ้น ฉนวนจะแห้งลง ความร้อนที่เกิดขึ้นแต่ละจุดบนผิวฉนวนมีค่าไม่เท่ากัน เกิดการแห้งเฉพาะบางส่วน และจะมีแรงดันตกคร่อมบริเวณดังกล่าว ซึ่งอาจก่อให้เกิดการสปาร์คได้ การเกิด Tracking จะหมายถึงการเกิดเป็นทางของคาร์บอนบริเวณผิวฉนวนซึ่งเกิดได้เฉพาะฉนวนแบบอินทรีย์เท่านั้น

ส่วนการเกิด Treeing นั้นมักจะเกิดขึ้นในสายเคเบิล ที่ใช้ฉนวนแข็งเป็นหลัก เช่น PE, XLPE หรือ EPR ลักษณะการเกิดจะเป็นรอยแตกแขนงคล้ายกิ่งไม้แตกกิ่งก้านสาขาออกไป มีผลทำให้เกิดการเบรกดาวนของฉนวนต่อมา Treeing อาจแบ่งเป็น 2 แบบ คือ Electrical Treeing และ Water Treeing การเกิด Electrical Treeing นั้นจะเกิดในบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าค่อนข้างสูง ซึ่งสามารถวัดหาค่าดิสชาร์จบางส่วนได้ ในกรณีของ Water Treeing จะเกิดขึ้นเมื่อเนื้อฉนวนแข็งมีน้ำผสมอยู่ด้วย ซึ่งอาจมาจากกระบวนการผลิต เมื่อจุดดังกล่าวได้รับความเครียดสนามไฟฟ้า Water Treeing ก็จะถูกตัวขึ้นมาโดยเริ่มจากบริเวณที่มีความบกพร่องของเนื้อฉนวนก่อน แนวของ Treeing จะอยู่ในแนวเดียวกับสนามไฟฟ้า

2.7.5 การเบรกดาวนจากผลทางความร้อน (Thermal Breakdown)

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับฉนวนของแข็งทำให้เกิดการนำกระแส (Conduction Current) ขึ้น ค่าของกระแสจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ กระแสจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความร้อนที่เกิดเนื่องจากกระแสการนำบางส่วนจะถ่ายเทออกสู่บรรยากาศ ส่วนที่เหลือก็จะทำให้อุณหภูมิของฉนวนแข็งเพิ่มขึ้นอีก ถ้าอัตราความร้อนที่เกิดขึ้นมากกว่าความร้อนที่ถูกถ่ายเทออกไปทำให้ฉนวนแข็งมีอุณหภูมิสะสมเพิ่มขึ้นจนเกิดเบรกดาวนได้

2.7.6 การเบรกดาวนเนื่องจากการดิสชาร์จภายใน (Cavity Breakdown)

วัสดุฉนวนที่ใช้งานอยู่โดยทั่วไปจะมีโพรงหรือช่องว่างอยู่ในเนื้อฉนวนหรือตรงบริเวณรอยต่อระหว่างฉนวนกับขั้วเล็กโตรด โดยส่วนมากโพรงนี้จะมีแก๊สหรือช่องเหลือบรรจุอยู่ซึ่งมีความคงทนต่อค่าแรงดันเบรกดาวนได้น้อยกว่าของแข็ง นอกจากนี้ค่าความจุไฟฟ้าของสิ่งแปลกปลอมที่อยู่ในฉนวนแข็งส่วนมากแล้วจะมีค่าน้อยกว่าฉนวนแข็ง จึงเป็นผลให้ความเครียดสนามไฟฟ้าภายในโพรงมีค่าสูงกว่าเนื้อฉนวน ดังนั้นภายใต้การใช้งานที่ความเครียดสนามไฟฟ้าปกติของฉนวนแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโพรงนี้จะมีค่ามากกว่าแรงดันเบรกดาวนของโพรง ทำให้เกิดการเบรกดาวนภายในโพรงก่อนที่จะนำมาสู่การเบรกดาวนของเนื้อฉนวนต่อไป

2.8 ทฤษฎีการสร้างและการวัดแรงดันอิมพัลส์ [3]

แรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันที่มีรูปคลื่นเลียนแบบมาจากแรงดันเกินเส้นจทรานเซียนต์ที่เกิดจากเหตุภายนอก ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ฟ้าผ่า เรียกว่า แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า และที่เกิดขึ้นจากสาเหตุภายในระบบส่งจ่ายเอง คือเกิดจากการทำงานของสวิตช์ หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์เมื่อมีความผิดพลาดเกิดขึ้นในระบบเรียกว่าแรงดันอิมพัลส์สวิตช์

2.8.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน

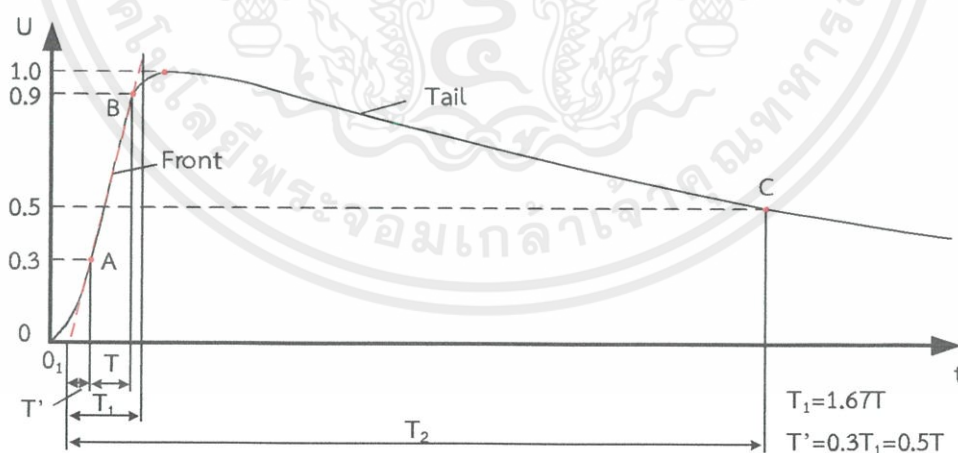
แรงดันอิมพัลส์มาตรฐานอาจกำหนดด้วยข้อกำหนดต่อไปนี้

- ขนาดของแรงดัน โดยปกติจะหมายถึงค่ายอดของรูปคลื่นแรงดัน ในกรณีที่มีระลอกซ้อนกันที่เกิดจากออสซิลเลชันใกล้ๆ ยอดรูปคลื่น ให้ถือเอาค่าเฉลี่ยจากค่ายอดรูปคลื่นระลอก
- ขั้วของแรงดันอาจเป็นขั้วบวกหรือลบ เมื่อเทียบกับดิน
- เวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 หมายถึงช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากค่าศูนย์จนถึงค่ายอด
- เวลาช่วงหางคลื่น T_2 หมายถึงช่วงเวลาตั้งแต่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านค่ายอดจนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด

รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์อาจแบ่งได้เป็น

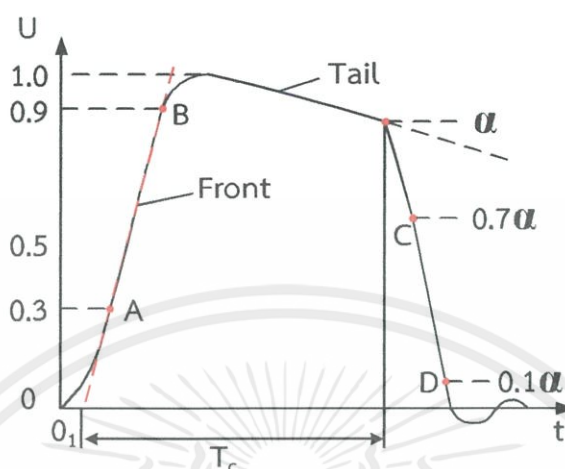
1) รูปคลื่นเต็ม (Full Wave) ซึ่งหมายถึงรูปคลื่นที่มีขนาดเพิ่มขึ้นถึงค่ายอด แล้วค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเป็นศูนย์

2) รูปคลื่นตัด (Chopped Wave) ซึ่งเกิดจากการป้อนแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มเข้าไปที่วัสดุทดสอบ และการฉนวนของวัสดุทดสอบนั้นทนต่อแรงดันที่ป้อนเข้าไปไม่ได้ จึงเกิดการสปาร์กผ่านเกิดวาบไฟตามผิว หรือเกิดเบรกดาวน์เฉาะทะเล ทำให้เกิดการลัดวงจร ณ จุดนั้น การเกิดคลื่นตัดนี้อาจจะเกิดขึ้นที่ส่วนหางคลื่น หรือส่วนหน้าคลื่นก็ได้

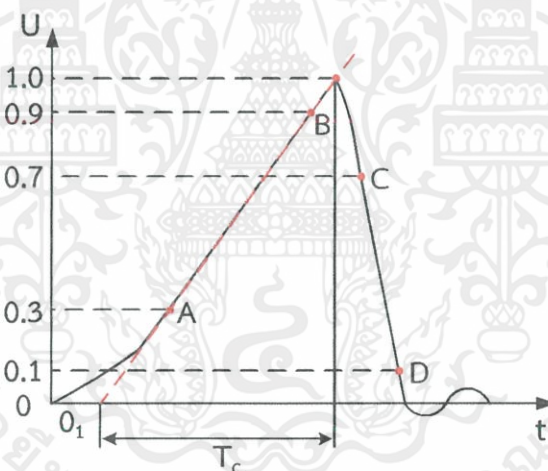


รูปที่ 2.23 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม [3]

รูปคลื่นตัดมีส่วนกำหนดที่สำคัญ คือ เวลาช่วงคลื่นตัด (Chopped Time, T_c) ถ้าเกิดตัดที่หางคลื่น ขนาดของแรงดัน คือ ค่ายอด (Peak) ถ้าเกิดตัดที่หน้าคลื่นขนาดของแรงดันก็คือ ค่าที่ได้ ณ จุดตัด ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของรูปคลื่นที่เหลือ



รูปที่ 2.24 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตัดหางคลื่น [3]



รูปที่ 2.25 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตัดหน้าคลื่น [3]

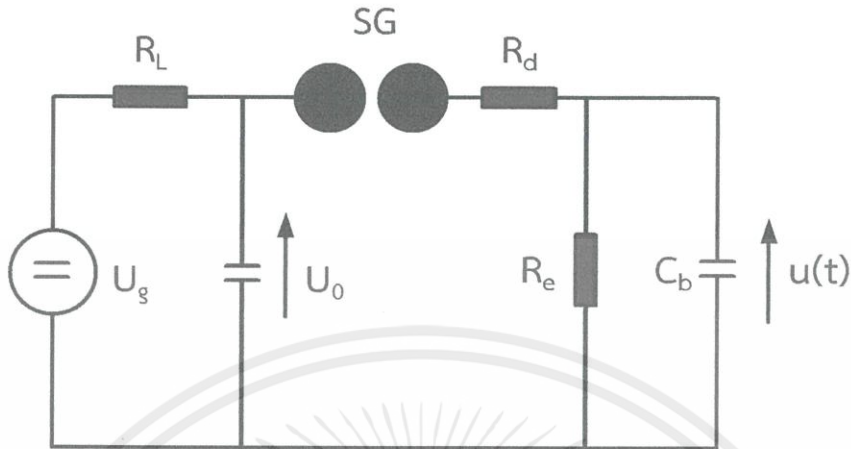
แรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐาน สามารถสร้างได้โดยหาค่า T_1 , T_2 หรือ T_c โดยวิธีที่แสดงในรูป 2.23 - 2.25 ให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดต่อไปนี้

เวลาช่วงหน้าคลื่น $T_1 = 1.2 \mu\text{s} \pm 30\%$ คือ จะต้องอยู่ในช่วง $0.84\text{-}1.56 \mu\text{s}$

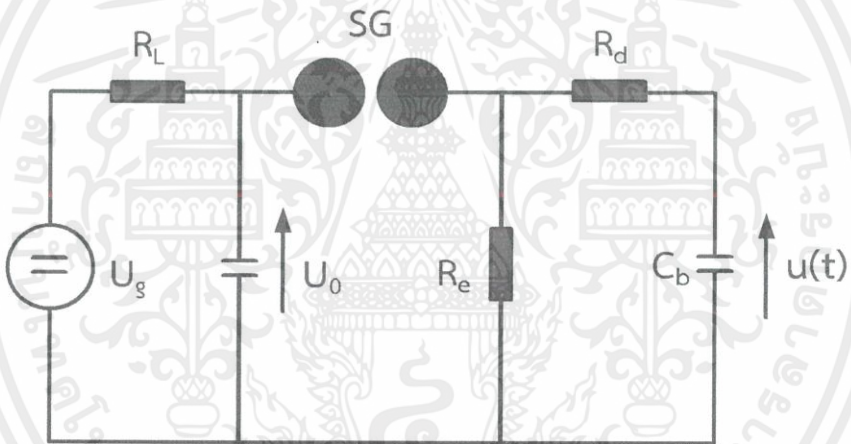
เวลาช่วงหลังคลื่น $T_2 = 50 \mu\text{s} \pm 20\%$ คือ จะต้องอยู่ในช่วง $40\text{-}60 \mu\text{s}$

ค่ายอดแรงดัน U_m ยอมให้ผิดพลาดได้ $\pm 3\%$ ของค่าที่ระบุรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

2.8.2 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
 วงจรพื้นฐานที่ใช้สร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ามี 2 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.26 และรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.26 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ วงจร A [3]



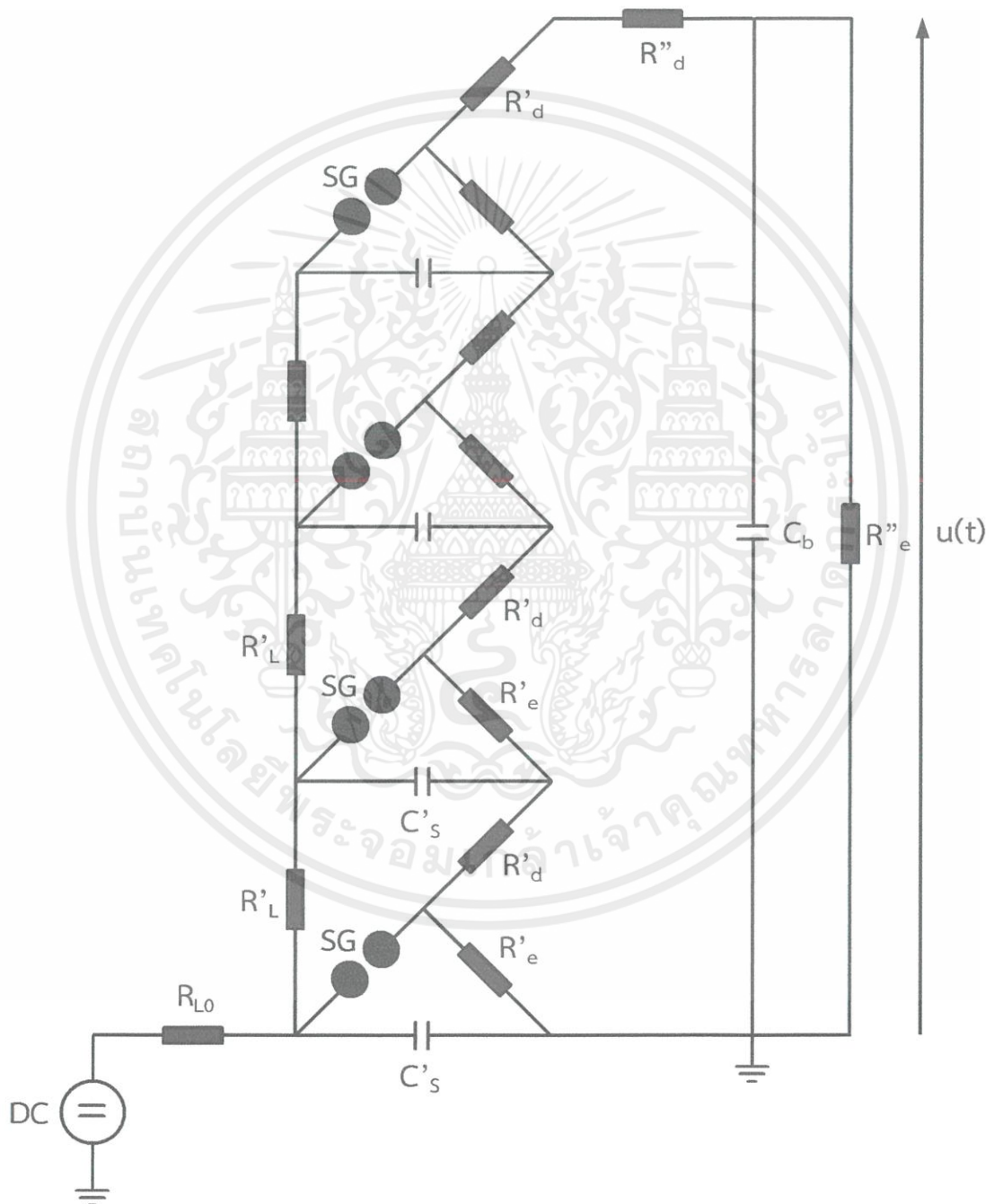
รูปที่ 2.27 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ วงจร B [3]

โดย	U_s	คือ แรงดันกระแสตรงของตัวจ่าย
	U_0	คือ แรงดันอัดประจุกระแสตรง
	C_s	คือ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นตัวเก็บพลังงาน
	C_B	คือ ตัวเก็บประจุโหลด (รวมทั้งความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์เครื่องวัดและอื่นๆ)
	R_L	คือ ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ
	R_d	คือ ความต้านทานหน่วง
	R_e	คือ ความต้านทานปล่อยประจุ
	$U(t)$	คือ แรงดันอิมพัลส์ที่ได้แปรไปตามเวลา
	SG	คือ สปาร์กแกป

2.8.3 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายชั้น

จากวงจรพื้นฐานของการสร้างแรงดันอิมพัลส์ ปกติจะออกแบบให้สร้างแรงดันได้ถึง 200 kV ซึ่งไม่เพียงพอสำหรับการทดสอบ BIL ของอุปกรณ์ที่ใช้กับแรงดันระบบ 52 kV หรือสูงกว่าค่าแรงดันอิมพัลส์สูงๆ อาจสร้างได้ด้วยเครื่องกำเนิดอิมพัลส์แบบหลายชั้น โดยใช้วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ตามหลักการของมาร์กซ์ (Marx's Circuit) ดังรูปที่ 2.28

ความหมายของสัญลักษณ์ในวงจร จะเหมือนกับวงจรขั้นพื้นฐาน (เครื่องหมาย ' แสดงถึงเป็นค่าต่อชั้น และเครื่องหมาย " แสดงถึงองค์ประกอบภายนอกที่เพิ่มขึ้นเพื่อปรับรูปคลื่น)



รูปที่ 2.28 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบหลายชั้นตามวงจรมาร์กซ์ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าองค์ประกอบในวงจร

C'_s : ค่าเก็บประจุอิมพัลส์ต่อชั้น

C_B : ค่าเก็บประจุไหลด

R'_d : ความต้านทานปรับหน้าคลื่นต่อชั้น

R''_d : ความต้านทานปรับหน้าคลื่นภายนอก

R'_e : ความต้านทานปรับหางคลื่นต่อชั้น

R''_e : ความต้านทานปรับหางคลื่นภายนอก

เมื่อเกิดสปาร์กวงจรถัดกันแบบอนุกรมจะได้ค่ารวมเป็น

$$U_0 = nU'_0$$

$$C_s = C'_s/n$$

$$R_d = nR'_d$$

$$R_e = nR'_e$$

2.9 น้ำมันหม้อแปลง (Transformer Oil) [4,5]

หม้อแปลงไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังจำเป็นต้องใส่ฉนวนเหลว ซึ่งนอกจากจะทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าแล้วยังทำหน้าที่เป็นสารระบายความร้อนด้วยน้ำมันแร่เป็นฉนวนเหลวและเป็นสารอินทรีย์จากธรรมชาติซึ่งได้จากกระบวนการกลั่นปิโตรเลียม และเนื่องจากน้ำมันแร่นิยมใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจึงทำให้น้ำมันหม้อแปลงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า น้ำมันหม้อแปลง จากมาตรฐาน IEC 60422 น้ำมันหม้อแปลงซึ่งทำหน้าที่เป็นทั้งฉนวน ตัวระบายความร้อน และตัวดับอาร์ค จะต้องมียุทธสมบัติหลักๆ ดังนี้

- มีค่าความคงทนของฉนวนทางไฟฟ้าสูง เพื่อให้ทนความเครียดทางไฟฟ้าในระหว่างที่ใช้งานได้
- มีค่าความหนืดต่ำ เพื่อให้น้ำมันสามารถหมุนเวียนภายในหม้อแปลงได้อย่างอิสระ ทำให้สามารถระบายความร้อนได้ดี
- มีคุณสมบัติที่อุณหภูมิต่ำที่เหมาะสม เพื่อให้หม้อแปลงสามารถเริ่มทำงานในที่ที่มีอุณหภูมิต่ำ
- มีความคงทนต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Stability) สูง เพื่อให้มีอายุการใช้งานยาวนาน

นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาคุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์ ทางเคมี และทางไฟฟ้า ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ ทางเคมี และทางไฟฟ้าของฉนวนเหลวที่จำเป็นต้องพิจารณา [4]

คุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์	คุณสมบัติทางด้านเคมี	คุณสมบัติทางด้านไฟฟ้า
-อุณหภูมิติดไฟทันที (Auto-Ignition Temperature)	-แรงตึงผิว (Interfacial Tension)	-ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (Breakdown Strength)
-สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion)	-การปนเปื้อนของสาร (Contaminants)	-ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric Dissipation Factor)
-ความหนาแน่น (Density)	-โครงสร้างโมเลกุล (Molecular Structure)	-ค่าเปอร์มิตติวิตี (Permittivity)
-จุดติดไฟ (Fire Point)	-ค่าความเป็นกลาง (Neutrality)	-ค่าความต้านทานไฟฟ้า (Electric Resistance)
-จุดวาบไฟ (Flash Point)	-ปริมาณไนโตรเจน (Nitrogen Content)	-ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ (Impulse Voltage Withstand)
-จุดไหลเท (Pour Point)	-ความคงทนต่อการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation Stability)	-ดิสชาร์จบางส่วนและแรงดันเริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge Inception Voltage)
-ดัชนีการหักเหของแสง (Refractive Index)	-ค่าสaponification Value)	
-ความร้อนจำเพาะ (Specific Heat)	-ความเสถียรต่ออุณหภูมิ (Thermal Stability)	
-สภาพนำความร้อน (Thermal Conductivity)	-ความชื้น (Water Content)	
-ความดันไอ (Vapor Pressure)	-อัตราส่วนปริมาณของพาราฟินิก แนนทีนิก และอโรมาติก (Ratio of Paraffinic Naphtenic and Aromatics)	
-ความหนืด (Viscosity)		

2.10 ส่วนประกอบของน้ำมันหม้อแปลง [4,5]

น้ำมันหม้อแปลงเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งได้จากการกลั่นปิโตรเลียมและเนื่องจากการกลั่นปิโตรเลียมเพื่อผลิตน้ำมันหม้อแปลงในหลายพื้นที่ ซึ่งแต่ละที่นั้นก็มือน้ำมันดิบที่มีลักษณะเฉพาะและมีวิธีการกลั่นที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละพื้นที่จึงทำให้ได้น้ำมันหม้อแปลงที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันด้วย ดังนั้นเพื่อให้แน่ใจว่าน้ำมันหม้อแปลงที่ได้นั้นมีคุณสมบัติที่จะนำไปใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ จึงต้องมีการเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ของน้ำมันที่ได้กับคุณสมบัติมาตรฐานของน้ำมันจากมาตรฐาน เช่น มาตรฐาน ASTM D3487 Standard Specification for Mineral Insulating Oil Used in Electrical Apparatus

ปิโตรเลียมหรือน้ำมันดิบที่มาจากแหล่งที่มาแตกต่างกันจะมีองค์ประกอบแตกต่างกันหลายอย่างซึ่งรวมถึงปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนแต่ละชนิดด้วย ซึ่งสิ่งที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงซึ่งได้จากการกลั่นน้ำมันดิบนั้นมีหลายอย่าง เช่น กระบวนการกลั่น โมเลกุลของสารในน้ำมัน สารประกอบซัลเฟอร์ เป็นต้น

โดยสามารถจำแนกน้ำมันหม้อแปลงได้เป็น 3 ชนิด ตามองค์ประกอบพื้นฐานหลักๆ ที่มีอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง ได้แก่

2.10.1 แอลเคน (พาราฟิน)

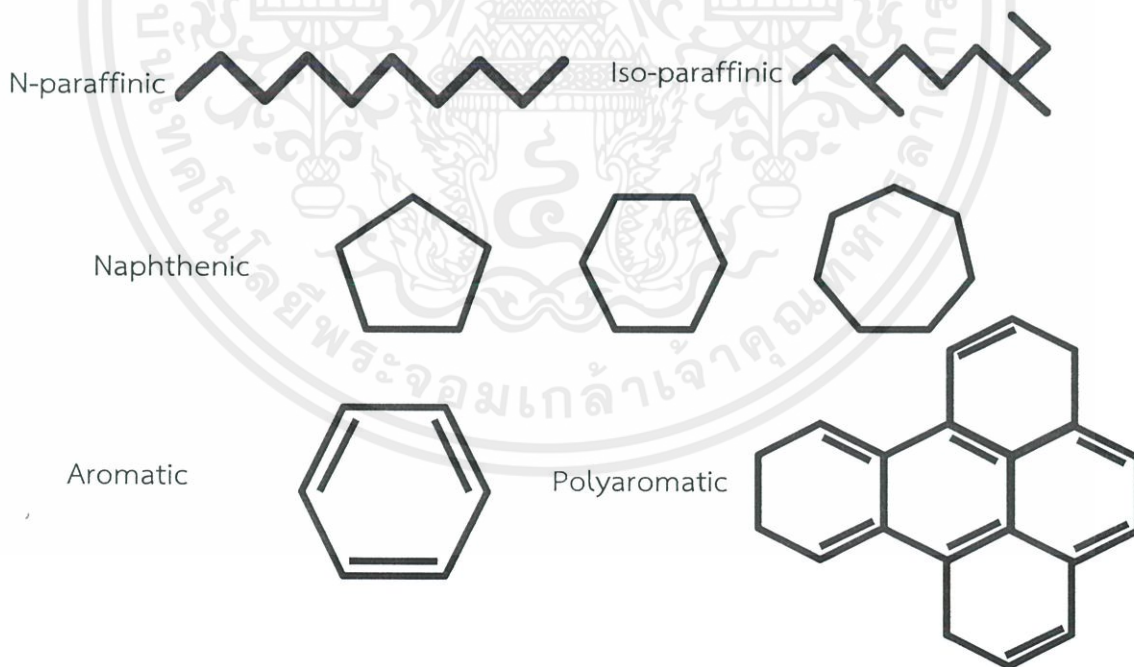
น้ำมันพาราฟินิก (Paraffinic Oils) ประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนแบบโซ่ตรงเป็นหลัก มีค่าความหนืดและจุดไหลเทสูง ดังนั้นน้ำมันที่มีปริมาณพาราฟินิกสูงจะทำได้มีความสามารถในการไหลเวียนไม่ดีนักที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้เกิดปัญหาเมื่อหม้อแปลงเริ่มทำงานที่อุณหภูมิต่ำ

2.10.2 ไฮโคลแอลเคน (แนปทีน แนปทีนิก หรือ ไฮโคลพาราฟิน)

น้ำมันแนปทีนิก (Naphthenic Oils) ประกอบด้วยไอโซพาราฟิน (Iso Paraffins) ซึ่งเป็นพาราฟินที่มีพันธะแบบกิ่งและไฮโคลพาราฟิน (Cycloparaffines) หรือไฮโคลแอลเคน (cycloalkanes) เป็นจำนวนมาก น้ำมันแนปทีนิกมีความหนืดต่ำทำให้มีความสามารถในการระบายความร้อนที่ดี นอกจากนั้นแล้วน้ำมันแนปทีนิกยังมีจุดไหลเทต่ำด้วย

2.10.3 อโรมาติก

น้ำมันอโรมาติก (Aromatics) ประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างแบบวงแหวน 1 วงหรือมากกว่าแบบไม่อิ่มตัว (Unsaturated) ที่คาร์บอนอะตอมมีการทำพันธะคู่กับอะตอมอื่น น้ำมันอโรมาติกมีความสามารถป้องกันการเกิดกรดคาร์บอกซิลิกและป้องกันการสลายตัวของน้ำมัน แต่เนื่องจากเป็นพันธะแบบไม่อิ่มตัว ทำให้สารประกอบอโรมาติกถูกกำจัดออกได้ง่ายขณะทำการกลั่น



รูปที่ 2.29 โครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันหม้อแปลง [5]

2.11 กลไกการเกิดแก๊ส [6]

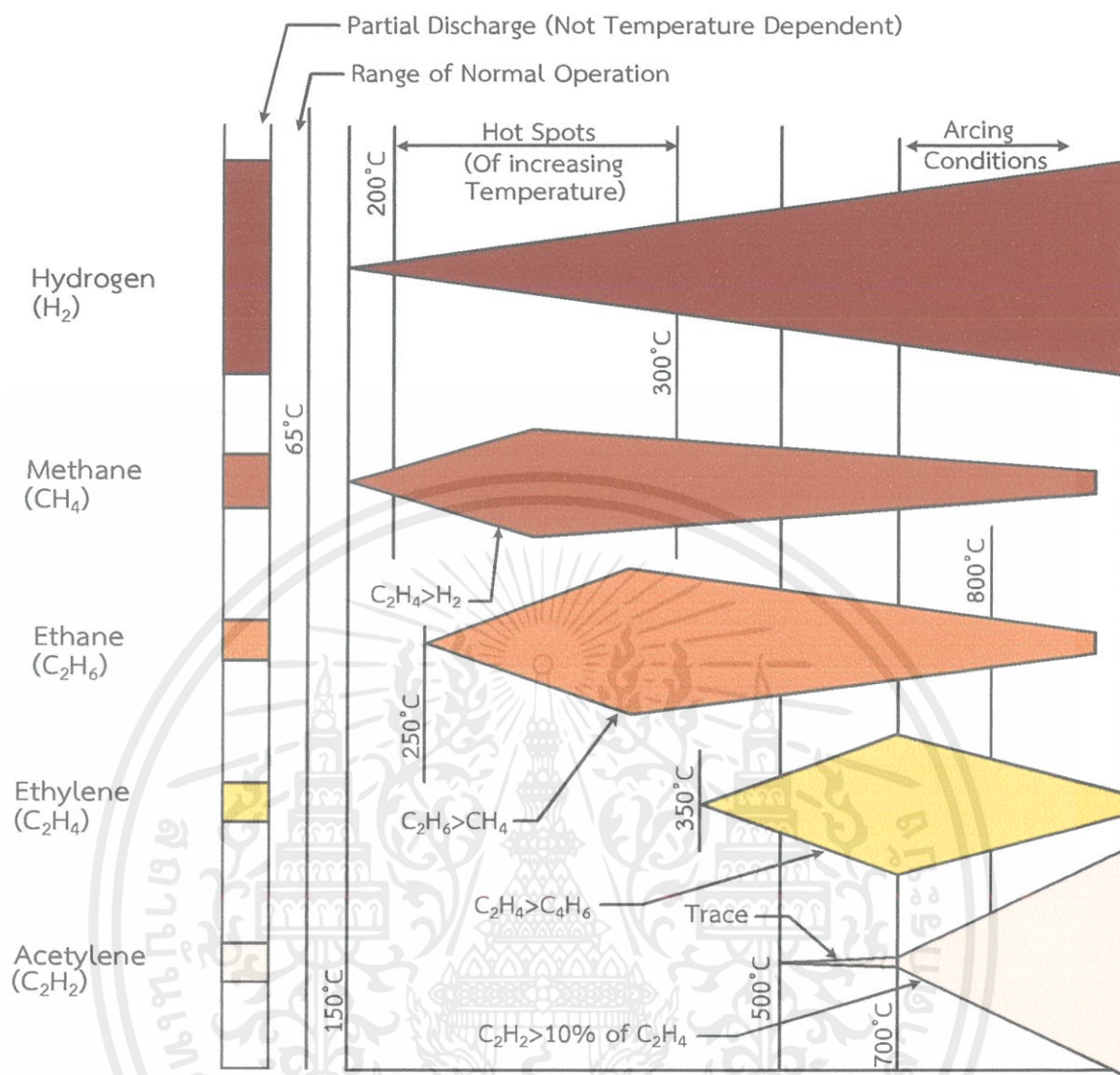
2.11.1 การสลายตัวของน้ำมัน

น้ำมันหม้อแปลงเป็นสารผสมระหว่างไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลต่างกัน ได้แก่ CH_3 , CH_2 และ CH เชื่อมต่อกันโดยพันธะเคมี การสลายพันธะระหว่าง C-H และ C-C อาจเกิดจากความผิดปกติทางไฟฟ้าหรือทางความร้อนทำให้เกิดไอออนิกที่ไม่สมบูรณ์ เช่น H^\cdot , CH_3^\cdot , CH_2^\cdot , CH^\cdot หรือ C^\cdot ในหลายรูปแบบที่ซับซ้อน ซึ่งจะรวมตัวกันใหม่อย่างรวดเร็วผ่านปฏิกิริยาที่ซับซ้อนกลายเป็นโมเลกุลแก๊ส เช่น ไฮโดรเจน (H-H), มีเทน (CH_3-H), อีเทน (CH_3-CH_3), เอทิลีน ($\text{CH}_2=\text{CH}_2$) หรือ อะเซทิลีน ($\text{CH}\equiv\text{CH}$) รวมถึงอนุภาคคาร์บอนแข็งและโพลิเมอร์ไฮโดรคาร์บอน (X-Wax)

การเกิดดิสซาร์จพลังงานต่ำ เช่น การเกิดโคโรนา สามารถทำให้พันธะ C-H (338 kJ/mole) สลายตัวผ่านปฏิกิริยาไอออไนซ์และสะสมเป็นแก๊สไฮโดรเจน เมื่อมีพลังงานมากขึ้นหรืออุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้เกิดการสลายของพันธะ C-C (607 kJ/mole) และรวมตัวกันเป็นแก๊สด้วยพันธะเดี่ยวพันธะคู่ C=C (720 kJ/mole) หรือพันธะสาม $\text{C}\equiv\text{C}$ (960 kJ/mole)

แก๊สเอทิลีนมีความสำคัญมากกว่าแก๊สอีเทนและมีเทน เนื่องจากเป็นแก๊สที่เกิดที่อุณหภูมิสูงประมาณ 500°C ส่วนการเกิดของแก๊สอะเซทิลีนเกิดที่อุณหภูมิสูง 800°C ถึง 1200°C ถ้ามีแก๊สอะเซทิลีนนั้นหมายถึงมีการเกิดอาร์กขึ้นที่ตัวนำมีอุณหภูมิหลายพันองศาเซลเซียส

ในบางครั้งอาจเกิดการออกซิไดซ์ในน้ำมันทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เล็กน้อยแต่สามารถเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำมันมีการใช้งานเป็นระยะเวลาานาน แก๊สที่เกิดขึ้นในน้ำมันเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ แสดงในรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 การเกิดแก๊สเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ [7]

2.11.2 การสลายตัวของฉนวนเซลลูโลส

ฉนวนประเภทเซลลูโลส อันได้แก่ กระดาษ เพอร์สบอร์ด และแท่งไม้ จะประกอบไปด้วยวงแหวนแอนไฮโดรคาร์บอนจำนวนมาก พันธะ C—O และ พันธะโคโคซิติก โดยฉนวนเซลลูโลสนั้นจะมีความเสถียรน้อยกว่าพันธะไฮโดรคาร์บอนในน้ำมัน เมื่อมีอุณหภูมิสูงกว่า 105°C โพลีเมอร์จะถูกตัดออกและกลายเป็นคาร์บอน และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 300 °C จะเกิดการสลายตัวเป็น CO และ CO₂

2.11.3 Stray Gassing

Stray Gassing คือแก๊สที่สามารถเกิดขึ้นได้จากการที่น้ำมันได้รับความร้อนที่อุณหภูมิไม่เกิน 200°C เช่น H₂ CH₄ และ C₂H₆ อาจเกิดขึ้นได้ในอุปกรณ์ หรือ เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของน้ำมัน Stray Gassing ถือว่าเป็นปัญหาที่ไม่เป็นอันตราย (Non-Damage Fault)

2.11.4 แก๊สที่มาจากแหล่งอื่น

แก๊สในบางกรณีอาจจะไม่ได้มาจากความผิดปกติในอุปกรณ์แต่อาจเกิดจากปัจจัยอื่นๆ ตัวอย่างเช่น

- การเกิดสนิม การเกิดปฏิกิริยาเคมีที่โลหะ หรือสีของอุปกรณ์
- แก๊สไฮโดรเจนอาจจะเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างเหล็กกับน้ำมัน ในบางครั้งไฮโดรเจนถูกพบในหม้อแปลงที่ยังไม่ได้ให้พลังงาน เนื่องจากน้ำที่อยู่ในวัสดุที่ใช้เคลือบโลหะถูกเร่งปฏิกิริยาโดยออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำมัน
- แก๊สอาจเกิดจากน้ำมันสัมผัสแสงอาทิตย์ระหว่างทำการซ่อมบำรุงอุปกรณ์
- เกิดจากสีภายในหม้อแปลง เช่น เรซินอัลคิตและโพลียูรีเทนมีกรดไขมันเป็นโครงสร้างอาจจะทำให้เกิดแก๊ส

2.12 ชนิดของความผิดปกติที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง (Fault) ตามมาตรฐาน IEC [6]

- ดิสชาร์จบางส่วน ชนิดโคโรนาอาจจะเป็นผลมาจาก X-Wax มาเกาะบนฉนวนกระดาด เกิดประกายไฟ การเจาะทะลุในกระดาด (Punctures)
- ดิสชาร์จพลังงานต่ำ ในน้ำมันและกระดาด เกิดจากรอยคาร์บอนเจาะทะลุขนาดใหญ่ในกระดาด มีรอยไหม้บนฉนวนกระดาด (Tracking) หรือมีอนุภาคคาร์บอนในน้ำมัน
- ดิสชาร์จพลังงานสูง เกิดจากกระแสสูงสามารถไหลผ่านน้ำมันและกระดาดได้เนื่องจากฉนวนกระดาดถูกทำลายทำให้เกิดคาร์บอน และมีปริมาณคาร์บอนที่อยู่ในน้ำมันสูง
- ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิน้อยกว่า 300°C กระดาดจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล
- ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 300°C ถึง 700°C คาร์บอนจะเกิดขึ้น
- ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 700°C เกิดการหลอมละลายของโลหะ ($>1000^{\circ}\text{C}$)

2.13 การวิเคราะห์แก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมัน (Dissolved Gas Analysis, DGA)

การวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมันก็เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเพราะสามารถนำตัวอย่างของน้ำมันจากหม้อแปลงไฟฟ้ามาทำการวิเคราะห์ ข้อมูลจากการวิเคราะห์จะได้แก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงมีประโยชน์อย่างมากในการตรวจสอบย้อนกลับว่ามีพฤติกรรมแบบใดบ้างที่เกิดขึ้นกับ หม้อแปลงและทำการบำรุงรักษา ทำให้สามารถวางแผนการใช้งานและการซ่อมบำรุงหม้อแปลงได้อย่างเหมาะสม ส่งผลให้หม้อแปลงมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน อีกทั้งยังทำให้รู้ว่าหม้อแปลงมีการใช้งานที่เหมาะสมหรือไม่อย่างไร โดยขั้นตอนของการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลักด้วยกัน คือ การเก็บตัวอย่างน้ำมันจากหม้อแปลงไฟฟ้า การแยกแก๊สออกจากตัวอย่างน้ำมัน และการแปลผลจากค่าแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมัน

2.14 การเก็บตัวอย่างน้ำมันจากอุปกรณ์ไฟฟ้า [8]

2.14.1 ตำแหน่งในการเก็บตัวอย่าง

การเลือกตำแหน่งในการเก็บตัวอย่างควรวางแผนอย่างระมัดระวัง โดยปกติน้ำมันควรถูกนำออกมาจากบริเวณที่เป็นตัวแทนของปริมาณน้ำมันทั้งหมดในอุปกรณ์ เช่น วาล์วทิ้งหรือวาล์วเก็บตัวอย่างสำหรับอุปกรณ์ที่มีถังเก็บน้ำมันขนาดใหญ่ ส่วนใหญ่หม้อแปลงที่มีวาล์ว 2 ชั้นให้เปิดวาล์วด้านนอกเป็นลำดับแรก ตามด้วยวาล์วด้านในหลีกเลี่ยงอากาศเข้าสู่หม้อแปลง

2.14.2 การทำความสะอาดตำแหน่งที่เก็บตัวอย่าง

ทำความสะอาดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างและล้างตำแหน่งที่เก็บตัวอย่างเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของน้ำมันตัวอย่าง ในส่วนของวาล์วทิ้งต้องระบายน้ำมันอย่างเพียงพอ (โดยทั่วไป 2 - 5 ลิตร) เพื่อกำจัดสารปนเปื้อน นอกจากนั้นแล้วจะต้องมีการสวมใส่ถุงมือป้องกัน และตำแหน่งที่มีการเก็บตัวอย่างจะต้องทำความสะอาดทุกครั้งที่มีการเก็บตัวอย่างน้ำมันใหม่

สำหรับการวัดปริมาณน้ำในน้ำมัน การเก็บตัวอย่างจะต้องทำในช่วงที่ความชื้นของอากาศต่ำสุดเท่าที่ทำได้ เพื่อป้องกันไม่ให้ความชื้นปนเปื้อนกับตัวอย่างน้ำมัน อุณหภูมิในการเก็บตัวอย่างน้ำมันจะใช้เครื่องวัดอุณหภูมิภายในที่มีการไหลของน้ำมันเพื่อให้มั่นใจว่าความชื้นสัมพัทธ์ของน้ำมันถูกต้อง นอกจากนี้ยังมีการบันทึกว่าพัดลมทำงานหรือไม่ ป้อนกำลังทำงานหรือไม่ เพื่อใช้ประกอบอุณหภูมิที่แสดง

2.14.3 ภาชนะที่ใช้เก็บตัวอย่าง

ตัวอย่างภาชนะบรรจุที่ใช้สำหรับการเก็บตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงแสดงในตารางที่ 2.2 และข้อดี ข้อเสีย ของภาชนะบรรจุตัวอย่างแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 ภาชนะบรรจุตัวอย่างสำหรับการทดสอบน้ำมัน [9]

ภาชนะบรรจุ	ไซริง		ขวด		ปริมาตรน้ำมัน มิลลิลิตร
	แก้ว	แก้ว	พลาสติก		
ชนิดที่ทดสอบ					
DGA	/	/			25-100
น้ำ	/	/			20
ความแข็งแรงของฉนวน	/	/	/		200
อนุภาค	/	/	/		100
เบรกดาว์น			/		500-1000
อื่นๆ			/	/	250
ความจุ (มิลลิลิตร)	25 - 250		125 - 2500		

ตารางที่ 2.3 ข้อดี ข้อเสีย ของภาชนะบรรจุตัวอย่าง [8]

ประเภทภาชนะ	ข้อดี	ข้อเสีย
ไซริงแก้ว	<ul style="list-style-type: none"> - เป็นภาชนะที่ดีที่สุดในการวิเคราะห์ DGA และวัดปริมาณน้ำ - สามารถสังเกตตัวอย่างได้ด้วยสายตา - เก็บได้อย่างมีประสิทธิภาพไม่กระทบกับสิ่งแวดล้อม 	<ul style="list-style-type: none"> - มีปริมาณจำกัด - แหกหักง่าย - ตัวอย่างสามารถย่อยสลายโดยแสง หากไม่ได้ป้องกันจากแสง
ขวด HDPE มีด	<ul style="list-style-type: none"> - ทนทานมากและน้ำหนักเบา - ป้องกันตัวอย่างจากการย่อยสลายด้วยแสง - เป็นภาชนะที่ดีสำหรับการตรวจสอบคุณภาพน้ำมันและ Furanic 	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่สามารถมองเห็นภายในได้ - ไม่เหมาะสำหรับการวัดค่าน้ำในน้ำมัน เนื่องจากการดูดซึมของผนังพลาสติก ถ้าน้ำเข้าอาจจะมีผลกระทบต่อผลการทดลองและค่าความแข็งแรงของฉนวน
ขวด HDPE ทึบ	<ul style="list-style-type: none"> - ทนทานมากและน้ำหนักเบา - เป็นภาชนะที่ดีสำหรับการตรวจสอบคุณภาพน้ำมันและ Furanic 	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถมองเห็นตัวอย่างได้บางส่วน - ไม่เหมาะสำหรับการวัดค่าน้ำในน้ำมัน เนื่องจากการดูดซึมของผนังพลาสติก - ตัวอย่างสามารถย่อยสลายด้วยแสง หากไม่ได้ป้องกันจากแสง ถ้าน้ำเข้าอาจจะมีผลกระทบต่อผลการทดลองและค่าความแข็งแรงของฉนวน
ขวดแก้วสีชา	<ul style="list-style-type: none"> - เป็นขวดที่ดีในการตรวจสอบคุณภาพน้ำมัน - ป้องกันตัวอย่างจากการย่อยสลายด้วยแสง - ไม่มีผลกับการวัดค่าน้ำในน้ำมัน 	<ul style="list-style-type: none"> - แหกหักง่าย - มีข้อจำกัดทางการมองเห็น
ขวดแก้วใส	<ul style="list-style-type: none"> - เป็นขวดที่ดีในการตรวจสอบคุณภาพน้ำมัน - ไม่มีผลกับการวัดค่าน้ำในน้ำมัน 	<ul style="list-style-type: none"> - แหกหักง่าย - ตัวอย่างสามารถย่อยสลายด้วยแสง หากไม่ได้ป้องกันจากแสง

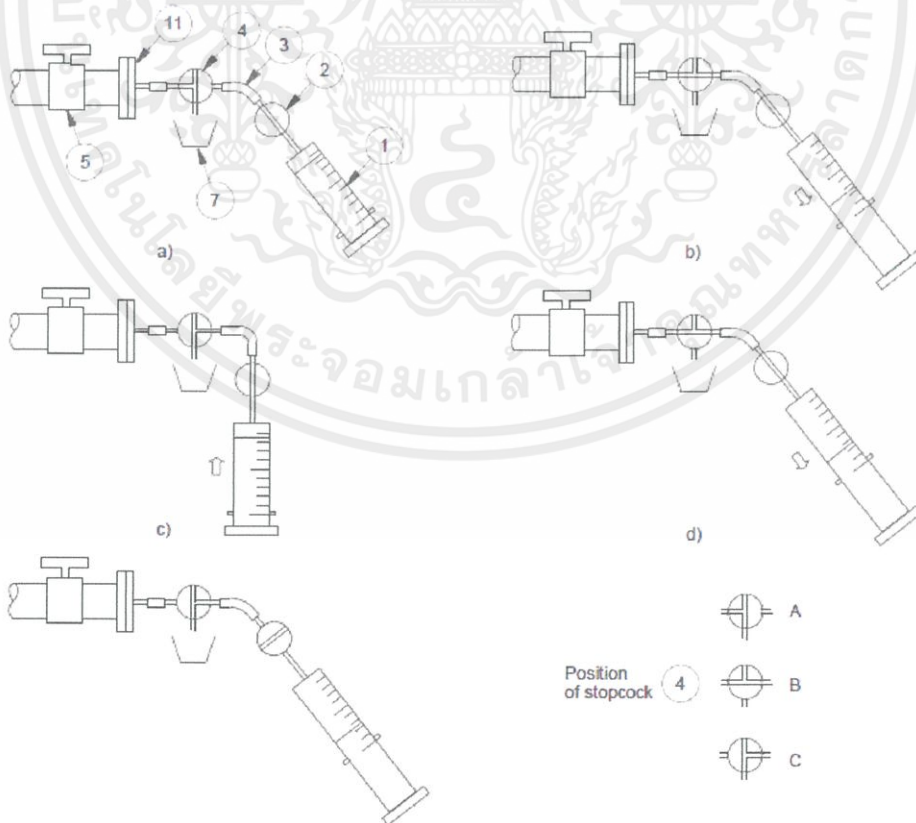
2.14.4 การเก็บตัวอย่างโดยใช้ไซริง

ขนาดของไซริงสำหรับบรรจุตัวอย่างน้ำมันต้องมีความจุ 20 มิลลิลิตร ถึง 250 มิลลิลิตร และต้องมีวาล์วพลาสติก 3 ทางทำมาจากไนลอนและโพรพิลีน หรือวาล์วพลาสติก 3 ทางที่ทำมาจากสแตนเลส สำหรับวาล์วพลาสติก วาล์วใหม่ควรใช้ในการเก็บน้ำมันและไม่นำกลับมาใช้ใหม่ เพราะจะมีการปนเปื้อนน้ำมันก่อนหน้าและหลวมเมื่อใช้หลายครั้ง สำหรับการป้องกันระหว่างการขนส่ง จะสวมจุกสแตนเลสปิดไว้เหนือวาล์ว 3 ทาง จุกนี้สามารถนำมาใช้ใหม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างน้ำมัน ในส่วนของขั้นตอนการเก็บตัวอย่างน้ำมันแสดงดังรูปที่ 2.31 และมีรายละเอียดดังนี้

- 1) อุปกรณ์ไฟฟ้าถูกเชื่อมต่อตามภาพที่ 2.31a และ วาล์วเก็บตัวอย่างถูกเปิดออก
- 2) วาล์ว 3 ทาง (2.31-4) ปรับให้อยู่ที่ตำแหน่ง A ปลอ่ยให้น้ำมันไหล 1 ถึง 2 ลิตรลงสู่ถังทิ้ง(2.31-7)
- 3) วาล์ว 3 ทาง ปรับให้อยู่ที่ตำแหน่ง B ปลอ่ยให้น้ำมันไหลเข้าไซริงอย่างช้าๆ (รูปที่ 2.31b) ไม่ควรดึงก้านสูบแต่จะให้ถูกผลักออกมาด้วยความดันของน้ำมัน
- 4) วาล์ว 3 ทาง ปรับให้อยู่ที่ตำแหน่ง C ปลอ่ยให้น้ำมันไหลออกจากไซริงลงสู่ถังทิ้ง (2.31-7) โดยการกดก้านสูบเข้าไซริง ต้องแน่ใจว่าไม่มีอากาศหลงเหลืออยู่ในไซริงและไซริงถูกแทนที่ด้วยน้ำมันจนเต็ม โดยจะจับไซริงให้อยู่ในแนวตั้ง หัวไซริงอยู่ด้านบน (รูปที่ 2.31c)
- 5) ขั้นตอน 4 และ 5 ให้ทำซ้ำจนกว่าจะไม่มีฟองแก๊สเกิดขึ้น จึงจะหมุนวาล์ว 3 ทางไปที่ตำแหน่ง B ภายในไซริงเต็มไปด้วยน้ำมัน (รูปที่ 2.31d)
- 6) ทำการปิดวาล์ว (2.31-2) และวาล์วเก็บตัวอย่าง (2.31-5)
- 7) ปรับวาล์ว 3 ทางให้อยู่ที่ตำแหน่ง C และปลดไซริงออก
- 8) เมื่อทำการเก็บตัวอย่างสำหรับ DGA ถ้าน้ำมันที่เก็บมามีความร้อนให้วางไซริงลงในกล่องในแนวตั้งให้หัวไซริงอยู่ด้านบนจนกระทั่งน้ำมันเย็นตัวลงอย่างช้าๆ จึงค่อยนำไซริงใส่กล่องเพื่อทำการขนส่งซึ่งจะช่วยป้องกันการก่อตัวของฟองอากาศ
- 9) ตีฉลากลงบนภาชนะ



รูปที่ 2.31 การเก็บตัวอย่างน้ำมันโดยใช้ไซริง [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การเก็บและการขนส่งตัวอย่าง

ออกซิเจนที่ละลายในตัวอย่างน้ำมันบางส่วนจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮโดรคาร์บอนและ CO₂ โดยปฏิกิริยานี้มีแสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นภาชนะที่มีความโปร่งใส ควรจะมีการป้องกัน เช่น ห่อด้วยวัสดุทึบแสงหรือใส่กล่องสำหรับการขนส่ง

ไซริงหรืออุปกรณ์ชนิดอื่นอาจจะถูกเก็บในกล่องที่ปิดสนิทเพื่อลดความเสี่ยงที่จะเกิดฟองอากาศระหว่างการขนส่งโดยเครื่องบิน อีกทั้งยังช่วยลดความดันและการอิมตัวของแก๊สในน้ำมัน ก้านสูบของไซริงควรป้องกันอากาศที่เข้ามาตกค้างภายใน

3. ฉลากของตัวอย่างน้ำมัน

ตัวอย่างน้ำมันที่เก็บมานั้นต้องมีฉลากติดไว้เพื่อบอกข้อมูลของน้ำมัน เช่น ข้อมูลของอุปกรณ์ ไฟฟ้า วันและเวลาที่ทำการเก็บตัวอย่าง ลักษณะของโรงงานที่ทำการทดสอบ จุดที่ทำการเก็บตัวอย่าง อุณหภูมิของน้ำมันด้านบน เป็นต้น

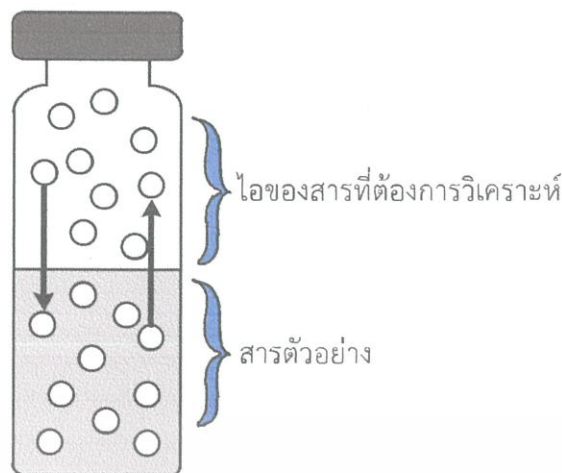
SIGNUM OIL ANALYSIS	
Account: 170898 ABC SINGAPORE	Total Equip. Hrs: 20000
Vessel Number: 3255541 CLEAN ANNA	Hrs Since Last Overhaul: 10000
Equipment Number: 002 PWA ENGINE #1	Oil Service Hrs: 10000
Lubricant: MOBILACO M440	Oil Volume: 2000 Litres/USG
	Oil Used / 24 Hrs: 150 Litres/USG
	Date Sampled: 07/20/2011
	Date Landed: 07/22/2011
	Port Landed: SINGAPORE
	Compatibility Test: <input type="checkbox"/> Please check if applicable
	Special Data Test Info
	Fd Rate l/engine/day: _____ Amb. Temp(C): _____
	KW at Sampling: _____ Rel Humid(%): _____
	Fuel Sulphur, Wt%: _____

รูปที่ 2.32 ตัวอย่างฉลากน้ำมัน [10]

2.15 การแยกแก๊สด้วยวิธี Headspace [11]

หลักการแยกแก๊สด้วยวิธี Headspace

วิธีการนี้น้ำมันในขวดบรรจุสารจะเข้าไปสัมผัสกับแก๊สเฟส ส่วนหนึ่งของแก๊สที่ละลายในน้ำมัน (H₂, O₂, N₂, CH₄, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆, CO และ CO₂) จะถ่ายเทไปยังช่องว่าง Headspace ภายใต้เงื่อนไขที่สมดุลของอุณหภูมิ และความดัน ความเข้มข้นของแก๊สในน้ำมันจะถูกคำนวณโดยใช้กฎของเฮนรีและค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของน้ำมัน



รูปที่ 2.33 ตัวอย่างในขวดบรรจุสาร [11]

โดยทั่วไปการวิเคราะห์จะต้องบรรจุตัวอย่างในขวดบรรจุสาร (Vial) ที่มีฝาติดด้วยแผ่นยางปิดผนึก (Septum) ส่วนที่เป็นไอจากการระเหยของสารตัวอย่างจะสะสมอยู่ในช่องว่าง Headspace ด้านบน จากนั้นจะสามารถนำไปวิเคราะห์หองค์ประกอบต่าง ๆ โดยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี

ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของน้ำมัน คือค่าที่แสดงความสามารถในการระเหยกลายเป็นไอของน้ำมันตัวอย่างที่วิเคราะห์ สัมประสิทธิ์นี้อาจใช้ในการวัดอายุน้ำมันตลอดจนความแตกต่างของส่วนประกอบน้ำมัน อย่างไรก็ตามส่วนประกอบที่ต่างกันอาจจะมีผลเล็กน้อยกับค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์แก๊สที่ละลายมีความแม่นยำน้อยลง กำหนดให้ K เป็นค่าที่ใช้ในการพิจารณาน้ำมัน และใช้ในการคำนวณความเข้มข้นจะทำให้แม่นยำที่สุด โดยจะแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารที่สภาวะสมดุลได้ดังนี้

$$C_L = KC_G$$

2.9

เมื่อ K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว
 C_L คือ ความเข้มข้นของสารตัวอย่าง
 C_G คือ ความเข้มข้นของสารในสถานะแก๊ส

หากค่า K มากแสดงว่าสารตัวอย่างสามารถระเหยเป็นไอได้น้อยและหากค่า K ต่ำ แสดงว่าสารตัวอย่างสามารถระเหยกลายเป็นไอได้ดี

ตารางที่ 2.4 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวสำหรับแก๊สที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 70°C [11]

แก๊ส	K
H ₂	0.074
O ₂	0.17
N ₂	0.11
CH ₄	0.44
CO	0.12
CO ₂	1.02
C ₂ H ₂	0.93
C ₂ H ₄	1.47
C ₂ H ₆	2.09
C ₃ H ₆	5.04
C ₃ H ₈	5.37
C ₄ H ₆	10.10

2.16 แก๊สโครมาโทกราฟี [11]

2.16.1 เครื่องโครมาโทกราฟี

จะต้องมีการรองรับที่เหมาะสมกับตัวอย่างแก๊สที่มาจากเครื่องแยกแก๊สด้วยวิธีที่แตกต่างกัน เช่น อุปกรณ์การแยกด้วยวิธีสุญญากาศ จะโดยทำการถ่ายแก๊สผ่านทางวาล์ว หรืออาจใช้ไซริงค์เป็นฉีดยตัวอย่างแก๊สเข้าเครื่องโครมาโทกราฟี ส่วนในกรณีที่ทำการแยกด้วยวิธี Stripping จะใช้วาล์วเก็บตัวอย่างกับ Stripper ต่อเข้ากับเครื่องโครมาโทกราฟีและผ่านเข้า Cold Trap และในกรณี Head Space จะใช้วาล์วแยกและ Zero-dead Volume Adapter เพื่อต่อเข้ากับ Column เพื่อพ่นแก๊ส

2.16.2 คอลัมน์ (Column) [12]

คอลัมน์เป็นหนึ่งในส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องโครมาโทกราฟี คอลัมน์มีลักษณะเป็นท่อที่มีจะทำด้วยสแตนเลสสตีล (Stainless Steel) เพราะมีความแข็งแรง ในบางครั้งคอลัมน์ที่ทำจากแก้วอาจจะถูกนำมาใช้ในกรณีที่สารเป็นสารประเภทชีวเคมี ภายในอัดแน่นด้วยสเตชันนารีเฟส (Stationary Phase) ซึ่งเป็นของแข็งที่ทำหน้าที่ซัพพอร์ตสารเคลือบ (Inert Solid Support) ทำจากดินเบา(Diatomite) ซึ่งเป็นสารที่เอื้อต่อการทำปฏิกิริยาเคลือบด้วยฟิล์มบางของของเหลว(Thin Film of Liquid) โดยของเหลว หรือ Liquid Phase นี้จะมีขนาดประมาณ 3, 5 หรือ 10% โดยน้ำหนัก โดยคิดจากน้ำหนักรวมของ Stationary Phase ทั้งหมด

2.16.3 แก๊สพา (Carrier Gas)

ทำหน้าที่เป็นตัวพาสารตัวอย่างที่ถูกทำให้เป็นแก๊สบริเวณหัวฉีดสารเข้าสู่คอลัมน์ แก๊สพาที่ใช้ในการทำแก๊สโครมาโทกราฟีได้แก่ แก๊สฮีเลียม แก๊สไนโตรเจน แก๊สอาร์กอน และแก๊สไฮโดรเจน โดยแก๊สพาที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้

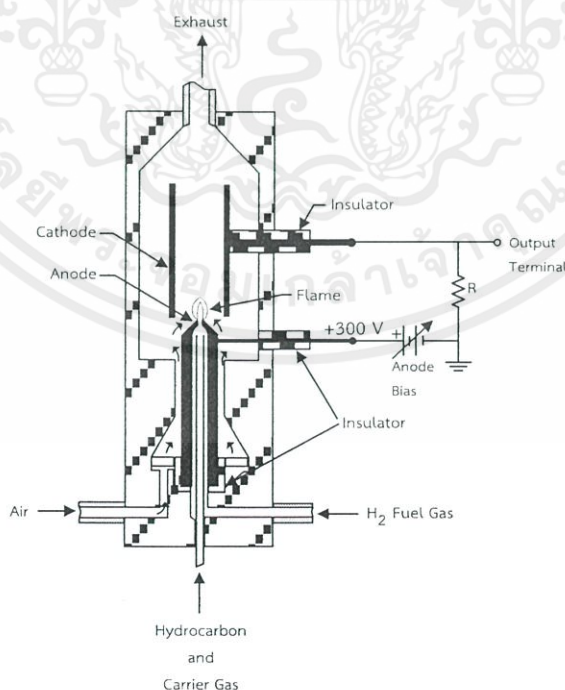
- เป็นแก๊สเฉื่อย เพราะในการทำแก๊สโครมาโทกราฟีไม่ต้องการให้ แก๊สพาไปทำปฏิกิริยาเคมีกับสารตัวอย่าง
- มีความบริสุทธิ์สูง
- มีความเหมาะสมกับบิตเทคนิคเตอร์ที่เลือกใช้หรือมีสภาพการนำความร้อนที่เหมาะสม
- มีความหนาแน่นต่ำ อัตราการไหลที่ดี และมีอัตราการแพร่ที่ต่ำหรือน้อยที่สุด ดังนั้นแก๊สที่มีมวลโมเลกุลต่ำๆ จะมีอัตราการไหลที่ดีกว่าแก๊สที่มีมวลโมเลกุลสูงๆ

2.16.4 ดีเทคเตอร์ (Detector) [13,14]

1) เฟลมไอออนเซชันดีเทคเตอร์ (Flame Ionization Detector (FID))

FID เป็นดีเทคเตอร์ที่ใช้สำหรับแก๊สโครมาโทกราฟีโดยเฉพาะและเป็นชนิดที่มีการใช้อย่างกว้างขวางมากที่สุด โดยสารตัวอย่างถูกเผาด้วยไฟในขณะที่มีออกซิเจนและไฮโดรเจนต่ำกระบวนการนี้จะให้อิออนออกมา อิออนนี้จะถูกเก็บเพื่อนำมาสร้างเป็นกระแสไฟฟ้าและกลายมาเป็นสัญญาณที่ตรวจจับ ในกรณีที่ไม่มีสารตัวอย่างผ่านเข้ามาให้ตรวจจับ ภายใน FID จะมีไอออนของไฮโดรเจนและอากาศจำนวนหนึ่งซึ่งจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าประมาณ 10^{-4} แอมป์

FID ตอบสนองต่อสารอินทรีย์ทุกประเภท สัญญาณที่ตรวจจับได้แปรผันกับปริมาณของคาร์บอน และเพื่อให้ประสิทธิภาพออกมาดีที่สุด อากาศและไฮโดรเจนต้องมีความบริสุทธิ์และปราศจากสารอินทรีย์ สารที่ไม่มีคาร์บอนอินทรีย์เป็นองค์ประกอบจะไม่สามารถเผาและจะไม่ถูกตรวจจับโดย FID รวมถึงน้ำด้วย



รูปที่ 2.34 เฟลมไอออนเซชันดีเทคเตอร์ [13]

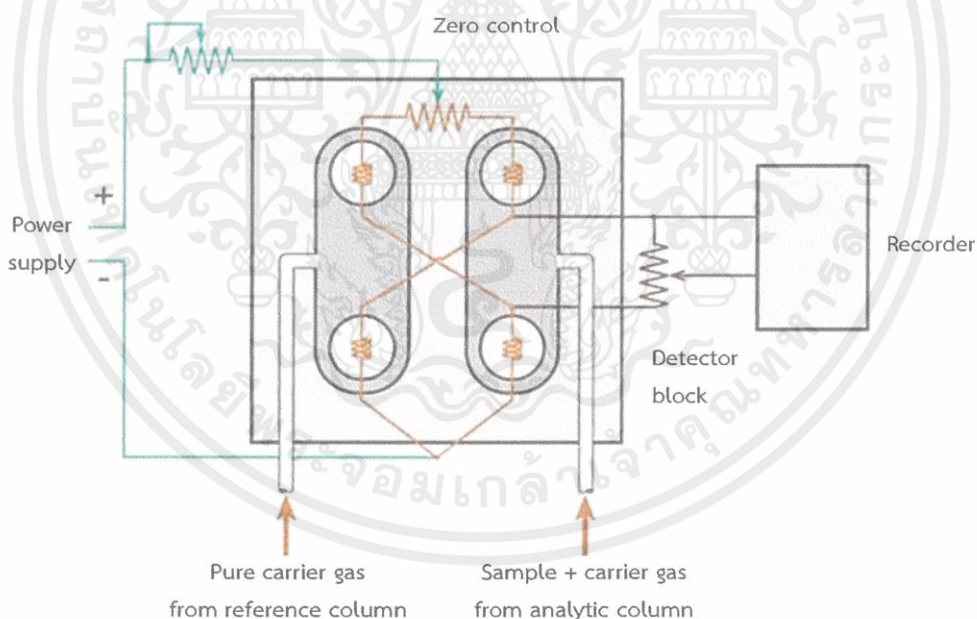
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) เทอร์มอลคอนดักทิวิตีดีเทคเตอร์ (Thermal Conductivity Detector (TCD))

ปัจจุบันการทำแก๊สโครมาโทกราฟีมีการติดตั้ง TCD โดยเฉพาะในกรณีที่เป็นแก๊สคอลัมน์เพื่อวิเคราะห์สารอนินทรีย์ (Inorganic) เช่น H_2O , CO , CO_2 , และ H_2

TCD เป็นดีเทคเตอร์ที่ตรวจจับความแตกต่าง (Differential Detector) ซึ่งวัดการนำความร้อนของสารที่วิเคราะห์ในแก๊สพาเปรียบเทียบกับแก๊สพาบริสุทธิ์ที่ไม่มีสารตัวอย่างเจือปน โดยปกติแล้วใน TCD จะมีช่องเซลล์อยู่ 2 เซลล์ หรืออาจจะมี 4 เซลล์ก็ได้ โดยช่องเซลล์จะอยู่ในกล่องโลหะซึ่งปกติทำจากสแตนเลสสตีล ภายในช่องเซลล์จะบรรจุด้วยขดลวดความต้านทานไฟฟ้าสูง (เรียกว่า Hot-wire) โดยขดลวดจากทั้ง 4 เซลล์จะต่อเป็นวงจรวีทสโตนบริดจ์ (Wheatstone Bridge) โดยตอนแรกในช่องเซลล์จะผ่านแก๊สพาบริสุทธิ์เข้าไปและเซตให้บริดจ์สมดุล จากนั้นผ่านแก๊สพาที่ปนกับสารตัวอย่างเข้าไปในเซลล์ 2 เซลล์ แก๊สผสมนี้จะมีการนำความร้อนน้อยลง อุณหภูมิของขดลวดจะสูงขึ้น ทำให้ความต้านทานของขดลวดสูงขึ้น ทำให้บริดจ์ไม่สมดุล จากนั้นนำแรงดันตกคร่อมวงจรบริดจ์ทั้งสองฝั่ง (ฝั่งที่เป็นแก๊สพาบริสุทธิ์และฝั่งแก๊สผสม) ไปวิเคราะห์เป็นข้อมูล หลังจากแก๊สผสมถูกวิเคราะห์จนหมดแล้ว ก็จะทำให้การเซตวงจรบริดจ์ให้สมดุลดั้งเดิม ยิ่งปริมาณกระแสที่ทำให้เกิดความร้อนในขดลวดมีมาก ก็จะทำให้เกิดความต่างของอุณหภูมิมากทำให้ TCD มีความไวสูง แต่ก็ส่งผลให้ขดลวดมีอายุการใช้งานต่ำลง

แก๊สพาที่ใช้งานใน TCD ต้องเป็นแก๊สที่นำความร้อน (Thermal Conductivity: TC) และแตกต่างจากแก๊สสารตัวอย่าง โดยแก๊สที่มักใช้ คือ ฮีเลียม และ ไฮโดรเจน ซึ่งเป็นแก๊สที่มีค่า TC สูง



รูปที่ 2.35 เทอร์มอลคอนดักทิวิตีดีเทคเตอร์ [14]

2.16.5 Cold Trap

Cold Trap จะใช้ในกรณีที่ใช้วิธีการแยกแก๊สแบบ Stripping เนื่องจากวิธีดังกล่าวนี้ไม่สามารถทำให้ความไวและความถูกต้องเพียงพอต่อการตรวจจับสารประเภทไฮโดรคาร์บอน ในการทดสอบของห้องทดลองที่ปริมาณน้ำมันตัวอย่างต่ำกว่า 5 มิลลิลิตร แต่ถ้าหากเพิ่มปริมาณของน้ำมันให้มากขึ้น ก็จะใช้เวลาในการแยกแก๊สนานขึ้นและทำให้เกิดแก๊สที่ไม่ต้องการขึ้นมา โดย Cold Trap จะติดตั้งไว้ที่ Stripper เพื่อปรับปรุงความไวต่อการตรวจจับสารประเภทไฮโดรคาร์บอน

2.16.6 Integrator และเครื่องบันทึกผล

ค่าผลลัพธ์จากอุปกรณ์ตรวจจับจะถูกส่งไปยัง Integrator หรืออาจใช้งานเครื่องบันทึกผลด้วย

2.17 อัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมัน [15]

2.17.1 การคำนวณอัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊ส

เนื่องจากการวัดค่าปริมาณแก๊สเพียงอย่างเดียวนั้น ไม่สามารถนำไปวิเคราะห์ความผิดปกติ และวางแผนการดูแลหม้อแปลงได้ จึงต้องมีการคำนวณอัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊สจากผลรวมความเข้มข้นของแก๊สทั้งหมด (ยกเว้นแก๊ส CO₂, O₂ และ N₂) ในตัวอย่างน้ำมันที่ 1 และ 2 ที่เก็บคนละวันกัน และแทนในสมการที่ 2.10

$$R = \frac{(S_T - S_0) \times V \times 10^{-6}}{T} \quad 2.10$$

เมื่อ	R	คือ อัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊ส (ลิตรต่อวัน)
	S ₀	คือ ตัวอย่างน้ำมันตัวที่ 1 (ppm)
	S _T	คือ ตัวอย่างน้ำมันตัวที่ 2 (ppm)
	V	คือ ปริมาณน้ำมันทั้งหมดในหม้อแปลง (ลิตร)
	T	คือ เวลา (วัน)

2.17.2 การตรวจสอบการเสื่อมสภาพของฉนวนโดยใช้ปริมาณแก๊สที่ละลายอยู่

เป็นวิธีการหนึ่งที่ได้รับการยอมรับสำหรับการตรวจสอบความเสื่อมสภาพของฉนวนในหม้อแปลงจะเกี่ยวข้องกับปริมาณรวมของแก๊สที่ค่อยๆ ปรากฏออกมา โดยปริมาณทั้งหมดของแก๊สที่พบจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความผิดปกติที่เริ่มเกิดขึ้นกับฉนวนว่ามากน้อยขนาดไหน

ตัวอย่างของฉนวนที่ดีนั้น จะสามารถบ่งชี้ถึงความผิดปกติที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาได้ เรา จะเห็นแนวโน้มได้ง่ายขึ้นเมื่อทำการวาดกราฟระหว่างปริมาณแก๊สกับเวลา สมการที่ 2.11 แสดงถึงการหาปริมาณของแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมัน 1 ลิตร

$$TDCG_V = \frac{FG(V)}{1000000} \quad 2.11$$

เมื่อ FG คือ ผลรวมของ H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₂H₂, and CO (ppm)
 V คือ ปริมาตรของน้ำมันในหม้อแปลง (ลิตร)
 TDCG_V คือ ปริมาตรของแก๊สที่ติดไฟได้ที่ละลายอยู่ในน้ำมัน (ลิตร)

2.17.3 การประเมินสภาพของหม้อแปลงโดยใช้ความเข้มข้นของแก๊สแต่ละชนิด และค่า Total Dissolved Combustible Gases (TDCG)

เป็นเรื่องยากในการประเมินสภาพของหม้อแปลงหากไม่มีประวัติปริมาณของแก๊ส แต่จะมีการกำหนดค่าที่ยอมรับได้ที่ทำให้ประเมินได้ว่าหม้อแปลงนั้นอยู่ในสภาพที่ปกติอยู่ โดยจะแบ่งสภาพของหม้อแปลงเป็น 4 ระดับ โดยมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 2.5 การประเมินสภาพของหม้อแปลงจากความเข้มข้นของแก๊สชนิดต่างๆ [15]

สถานะ	ปริมาณความเข้มข้นของแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมัน (ppm)							TDCG*
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	
ระดับ 1	100	120	1	50	65	350	2500	720
ระดับ 2	101-700	121-400	2-9	51-100	66-100	351-570	2500-4000	721-1920
ระดับ 3	701-1800	401-1000	10-35	101-200	101-150	571-1400	4001-10000	1921-4630
ระดับ 4	>1800	>1000	>35	>200	>150	>1400	>10000	>4630

* ค่า TDCG ในตารางจะไม่รวมปริมาณของ CO₂ ซึ่งเป็นแก๊สไม่ติดไฟ

- สภาพหม้อแปลงในระดับที่ 1 หมายถึง หม้อแปลงที่มีค่า TDCG น้อยกว่าค่าที่ระบุ หมายความว่าหม้อแปลงทำงานได้อย่างปกติ แต่หากพิจารณาค่าของแก๊สแต่ละตัวแล้วเกินค่าที่กำหนด ควรมีการตรวจสอบหม้อแปลงเพิ่มเติม
- สภาพหม้อแปลงในระดับที่ 2 หมายถึง หม้อแปลงที่ค่า TDCG อยู่ในช่วงที่สูงกว่าปกติ หากพิจารณาค่าของแก๊สแต่ละตัวแล้วเกินค่าที่กำหนด ควรมีการตรวจสอบหม้อแปลงเพิ่มเติม และควรมีการเก็บตัวอย่างน้ำมันเพื่อดูแนวโน้มหรืออัตราการเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีความเป็นไปได้ที่จะพบปัญหาในหม้อแปลง โดยให้ดำเนินการตามคำแนะนำในตารางที่ 2.5
- สภาพหม้อแปลงในระดับที่ 3 หมายถึง หม้อแปลงที่มีค่า TDCG อยู่ในช่วงนี้ ระบุถึงการสลายตัวสูง หากพิจารณาค่าของแก๊สแต่ละตัวแล้วเกินค่าที่กำหนด ควรมีการตรวจสอบหม้อแปลงเพิ่มเติมและควรมีการเก็บตัวอย่างน้ำมันเพื่อดูหรืออัตราการเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีความเป็นไปได้ที่จะพบปัญหาในหม้อแปลง โดยให้ดำเนินการตามคำแนะนำในตารางที่ 2.5
- สภาพหม้อแปลงในระดับที่ 4 หมายถึง หม้อที่มีค่า TDCG สูงกว่าที่ระบุ ระบุถึงการสลายตัวมีค่าสูงมากเกินไป การใช้งานหม้อแปลงต่อมมีโอกาสทำให้หม้อแปลงเสียหายได้ ให้คำนวณอัตราการเพิ่มขึ้น จากนั้นให้ดำเนินการตามคำแนะนำในตารางที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.17.4 การกำหนดข้อปฏิบัติงาน และความถี่ในการเก็บตัวอย่างจากระดับ TDCG และอัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊ส

ข้อมูลที่ระบุไว้ในตารางที่ 2.6 เป็นข้อแนะนำข้อปฏิบัติเบื้องต้น และความถี่ในการเก็บตัวอย่างน้ำมันมาตรวจสอบ โดยพิจารณาจากค่า TDCG (ppm) และอัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊ส

ตารางที่ 2.6 ข้อปฏิบัติงาน และความถี่ในการเก็บตัวอย่างจากระดับค่า TDCG [15]

สถานะ	TDCG (ppm)	อัตราการเพิ่มขึ้น (ppm/วัน)	ข้อปฏิบัติงาน และความถี่ในการเก็บตัวอย่าง		
			ความถี่ในการเก็บตัวอย่าง	ข้อปฏิบัติ	
ระดับที่ 4	> 4630	> 30	ทุกวัน	-พิจารณาการหยุดใช้งาน	
		10 – 30	ทุกวัน	-ปฏิบัติตามคำแนะนำของผู้ผลิต	
		< 10	ทุกสัปดาห์	-ควรใช้งานอย่างระมัดระวังมากกว่าปกติ -พิจารณาค่าของแก๊สแต่ละชนิด -วางแผนหยุดการใช้งาน -ปฏิบัติตามคำแนะนำของผู้ผลิต	
ระดับที่ 3	1921 - 4630	> 30	ทุกสัปดาห์	-ควรใช้งานอย่างระมัดระวังมากกว่าปกติ -พิจารณาค่าของแก๊สแต่ละชนิด -วางแผนหยุดการใช้งาน -ปฏิบัติตามคำแนะนำของผู้ผลิต	
		10 – 30	ทุกสัปดาห์		
		< 10	ทุกเดือน		
ระดับที่ 2	721 - 1920	> 30	ทุกเดือน	-ควรใช้งานอย่างระมัดระวัง -พิจารณาค่าของแก๊สแต่ละชนิด -ตรวจสอบโดยพิจารณาจากโพลด	
		10 – 30	ทุกเดือน		
		< 10	ทุก 4 เดือน		
ระดับที่ 1	≤ 720	> 30	ทุกเดือน	-ควรใช้งานอย่างระมัดระวัง -พิจารณาค่าของแก๊สแต่ละชนิด -ตรวจสอบโดยพิจารณาจากโพลด	
		10 – 30	ทุก 4 เดือน		-ใช้งานตามปกติ
		< 10	ทุกปี		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.18 การประเมินสภาพของหม้อแปลงโดยใช้การทำ Health Index [16]

การทำ Health Index เป็นอีกหนึ่งวิธีการสำหรับการประเมินสภาพหม้อแปลง สำหรับในปฏิญญาฉบับนี้ จะพิจารณาการประเมินสภาพหม้อแปลงจากค่า DGA เท่านั้น โดยพิจารณาจากค่า DGAF ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2.12

$$DGAF = \frac{\sum_{i=1}^7 S_i \times W_i}{\sum_{i=1}^7 W_i} \quad 2.12$$

เมื่อ S_i คือ คะแนนตั้งแต่ 1-6 คะแนน ให้ตามค่าแก๊สในตารางที่ 2.6
 W_i คือ ค่าน้ำหนักของแก๊ส มีค่าตามระดับความอันตรายของแก๊สนั้นๆ

ตารางที่ 2.7 ค่าคะแนนและค่าน้ำหนักของแก๊ส [16]

แก๊ส	Score (S_i)						W_i
	1	2	3	4	5	6	
H ₂	≤100	100-200	200-300	300-500	500-700	>700	2
CH ₄	≤75	75-125	125-200	200-400	400-600	>600	3
C ₂ H ₆	≤65	65-80	80-100	100-120	120-150	>150	3
C ₂ H ₄	≤50	50-80	80-100	100-150	150-200	>200	3
C ₂ H ₂	≤3	3-7	7-35	35-50	50-80	>80	5
CO	≤350	350-700	700-900	900-1100	1100-1400	>1400	1
CO ₂	≤2500	≤3000	≤4000	≤5000	≤7000	>7000	1

เมื่อได้ค่า DGAF มาแล้วก็จะสามารถประเมินสภาพของหม้อแปลงได้เป็น 5 ระดับ ตั้งแต่ระดับ A ถึงระดับ E ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 สภาพหม้อแปลงตามค่า DGAF [16]

Rating Code	สภาพหม้อแปลง	DGAF
A	ดีเยี่ยม	DGAF < 1.2
B	ยอมรับได้	1.2 ≤ DGAF < 1.5
C	เริ่มเฝ้าระวัง	1.5 ≤ DGAF < 2
D	แย่	2 ≤ DGAF < 3
E	แย่มาก	DGAF ≥ 3

2.19 การประเมินสภาพของหม้อแปลงโดยใช้ปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 และค่าอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าแก๊สต่อเดือน [17]

ก่อนทำการแปลผลค่าแก๊สด้วยวิธีการแปลผลที่มาจากมาตรฐาน IEC และวิธีของ Duval จะต้องทำประเมินสภาพของหม้อแปลงโดยใช้ปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 และค่าอัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊สต่อเดือน ดังตารางที่ 2.9 ในกรณีที่มีค่าแก๊สเพียงอย่างเดียวและไม่สามารถหาอัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊สได้ ให้ประเมินสภาพหม้อแปลงโดยใช้ค่า L1 เท่านั้น ถ้าหากแก๊สชนิดใดชนิดหนึ่งของหม้อแปลงมีค่าสูงกว่า L1 แสดงว่าหม้อแปลงตัวนั้นมีแนวโน้มที่จะมีความผิดปกติเกิดขึ้น และต้องนำไปแปลผลด้วยวิธีตามมาตรฐาน IEC ต่อไป

ตารางที่ 2.9 ปริมาณแก๊สอ้างอิง (L1) และค่าอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าแก๊สต่อเดือน [17]

Gas	L1 Limits	G1 Limits (ppm per month)	G2 Limits (ppm per month)
Hydrogen (H ₂)	100	10	50
Methane (CH ₄)	75	8	38
Acetylene (C ₂ H ₂)	3	3	3
Ethylene (C ₂ H ₄)	75	8	38
Ethane (C ₂ H ₆)	75	8	38
Carbon Monoxide (CO)	700	70	350
Carbon Dioxide (CO ₂)	7000	700	3500

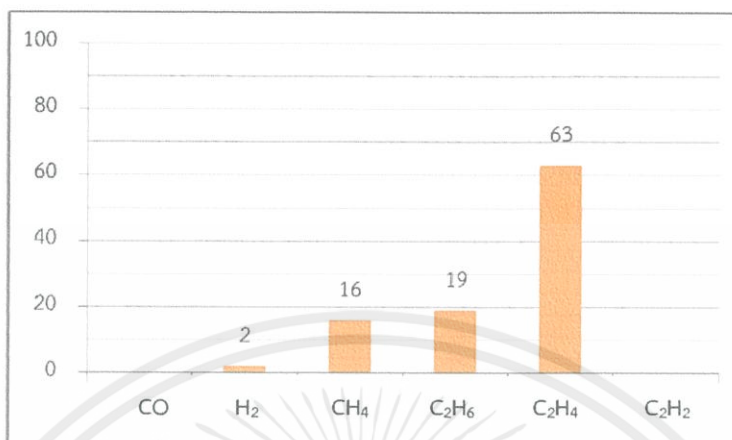
2.20 การแปลผลของ DGA

ขั้นตอนการแปลผล DGA เป็นอีกขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญอย่างมากในการวิเคราะห์ เนื่องจากขั้นตอนการแปลผลนั้นเป็นขั้นตอนที่ให้คำตอบของปัญหาว่าหม้อแปลงนั้นมีความผิดปกติหรือมีสถานะอย่างไร โดยขั้นตอนการแปลผลนั้นมีหลายวิธีด้วยกัน วิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายนั้นอ้างอิงจากมาตรฐาน IEEE C57.104 และ IEC 60599 ทั้งนี้คำตอบของการแปลผลของแต่ละวิธีอาจให้คำตอบไม่เหมือนกันในบางครั้ง ดังนั้นการให้คำตอบของปัญหานั้นจะต้องใช้ประสบการณ์ และความชำนาญของผู้วิเคราะห์ในการตัดสินใจร่วมด้วย

2.20.1 การแปลผลด้วยวิธี Key Gas [15]

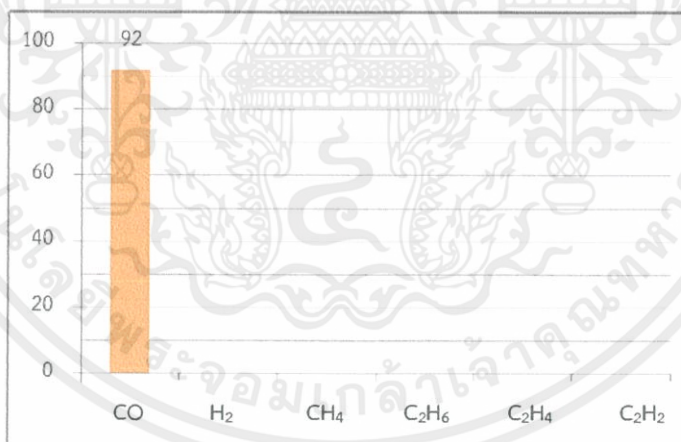
เป็นวิธีที่พิจารณาชนิดของความผิดปกติจากแก๊สที่เกิดขึ้นมาอย่างเด่นชัด ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งเป็นแก๊สที่มีความสำคัญต่อการพิจารณา หรือที่เรียกว่า “Key Gas” โดยความผิดปกติที่เกิดขึ้นนั้นมีการพิจารณามีดังนี้

- เกิดความร้อนที่น้ำมัน แก๊สที่สลายออกมาได้แก่ เอทิลีน และมีเทน รวมถึงไฮโดรเจนปริมาณเล็กน้อยและอีเทน และจะพบอะซิโทธิลินด้วย หากเกิดความผิดปกติที่รุนแรงหรือเกินขึ้นที่บริเวณหน้าสัมผัส ในกรณีนี้ Key Gas คือ แก๊สเอทิลีน



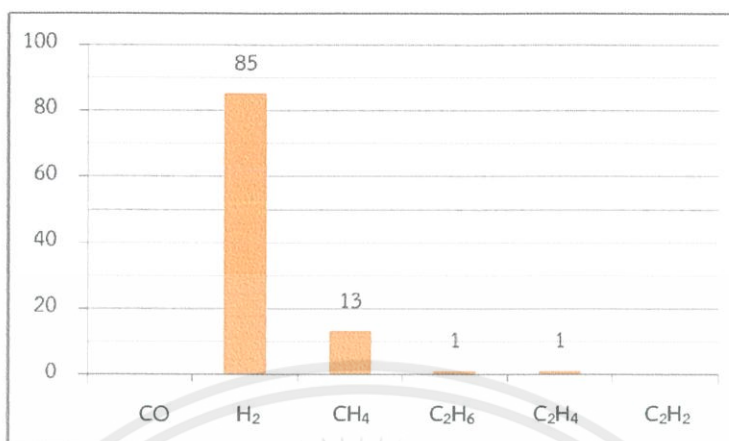
รูปที่ 2.36 แก๊สที่เกิดในขณะที่เกิดความร้อนในน้ำมัน [15]

- เกิดความร้อนที่เซลลูโลส (ถ่านแข็ง) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนนอกไซด์จำนวนมาก เกิดจากความร้อนสูงที่เซลลูโลส แก๊สกลุ่มไฮโดรคาร์บอน เช่น มีเทน และเอทิลีน จะปรากฏขึ้นหากเกิดความผิดปกติบริเวณโครงสร้างที่ซุบน้ำมัน ในกรณีนี้ Key Gas คือ แก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์



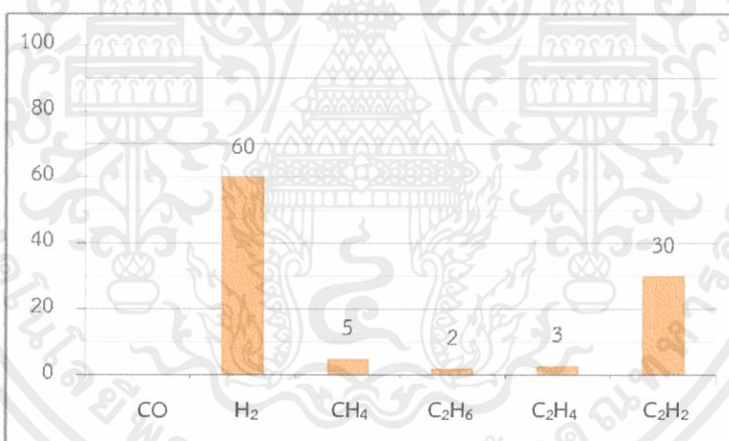
รูปที่ 2.37 แก๊สที่เกิดในขณะที่เกิดความร้อนในเซลลูโลส [15]

- การเกิดดิสชาร์จบางส่วน เป็นการดิสชาร์จทางไฟฟ้าที่มีพลังงานต่ำ ซึ่งจะทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทน กับอีเทนและเอทิลีนเล็กน้อย ในกรณีนี้ Key Gas คือ แก๊สไฮโดรเจน



รูปที่ 2.38 แก๊สที่เกิดในขณะที่เกิดการดิสชาร์จบางส่วน [15]

- การเกิดอาร์ค จะทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนและอะซิทีลีนจำนวนมาก พร้อมกับมีเทนและแก๊สเอทิลีนเล็กน้อย หากเกิดการอาร์คที่เซลล์โวลอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาคาร์บอนไนซ์และกลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ ในกรณีนี้ Key Gas คือ แก๊สอะซิทีลีน



รูปที่ 2.39 แก๊สที่เกิดในขณะที่เกิดการอาร์ค [15]

2.20.2 การพิจารณาชนิดของความผิดปกติด้วยวิธี Doernenburg Ratio [15]

สำหรับการแปลผลด้วยวิธี Doernenburg Ratio จะใช้อัตราส่วน 4 อัตราส่วนในการพิจารณา ดังที่แสดงต่อไปนี้

- อัตราส่วนที่ 1 (R1) = CH_4/H_2
- อัตราส่วนที่ 2 (R2) = $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$
- อัตราส่วนที่ 3 (R3) = $\text{C}_2\text{H}_2/\text{CH}_4$
- อัตราส่วนที่ 4 (R4) = $\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_2\text{H}_2$

วิธีการนี้จะใช้ปริมาณของแก๊สเป็นส่วนสำคัญในการพิจารณาความผิดพลาดให้มีความถูกต้องมากขึ้น ซึ่งแก๊สที่ใช้สำหรับวิธีการนี้จะต้องเป็นแก๊สที่ถูกแยกออกมาจากน้ำมันหม้อแปลงเท่านั้น โดยมีขั้นตอนการวินิจฉัย 5 ขั้นตอน ดังนี้

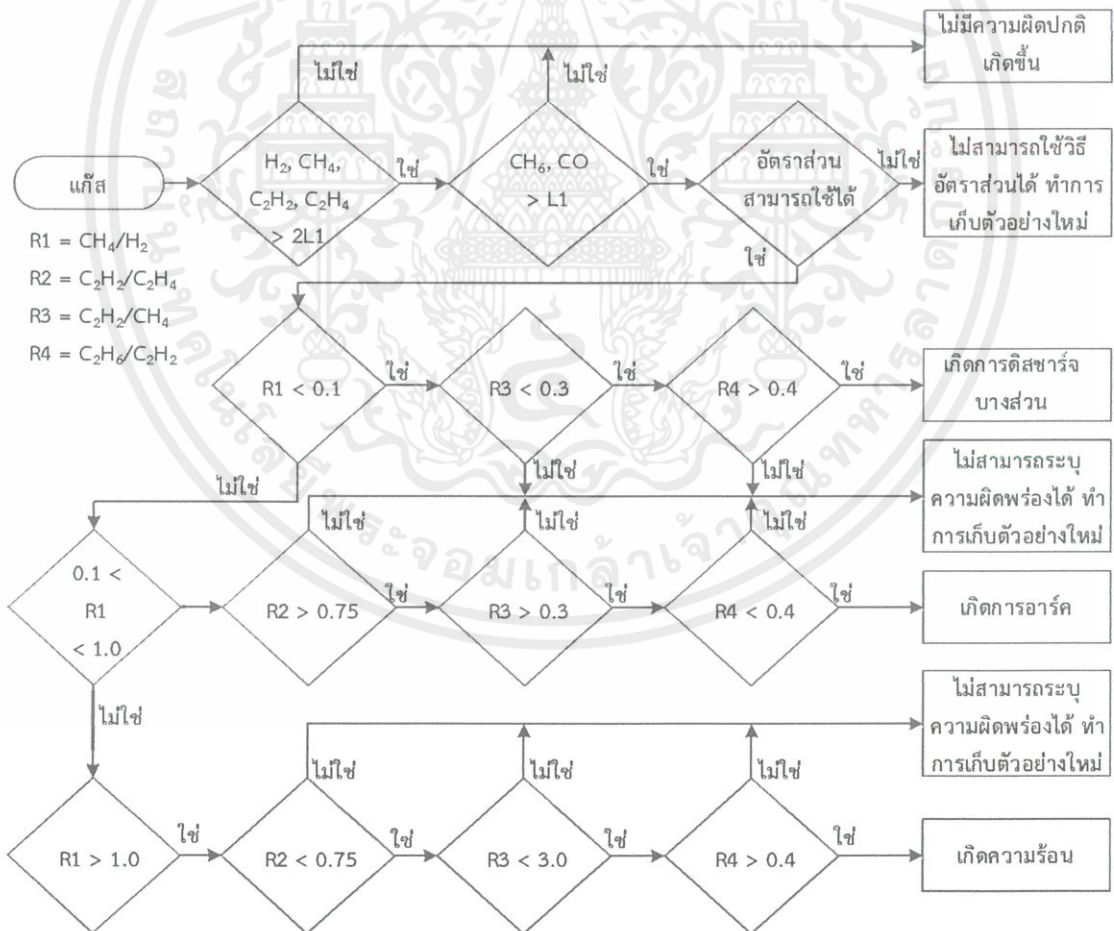
- ขั้นตอนที่ 1 ทำการวัดความเข้มข้นของแก๊ส จากการแยกแก๊สออกมาด้วยการทำโครมาโทกราฟี
- ขั้นตอนที่ 2 พิจารณา หากมีแก๊สอย่างน้อย 1 ชนิด(จาก H_2 , CH_4 , C_2H_2 , และ C_2H_4) มีความเข้มข้นมากกว่า 2 เท่าของค่า L1(ตารางที่ 2.10) และมีแก๊สชนิดใดชนิดหนึ่ง(จาก CO และ CH_6) มีค่ามากกว่าค่า L1 แปลว่าตัวอย่างมีความผิดพลาดเกิดขึ้น จากนั้นก็จะเข้าสู่ขั้นตอนที่ 3 ซึ่งเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของอัตราส่วน
- ขั้นตอนที่ 3 การตรวจสอบความถูกต้องของอัตราส่วน ถ้าแก๊สอย่างน้อย 1 ชนิดในแต่ละอัตราส่วน (R1, R2, R3, หรือ R4) มีค่ามากกว่า L1 จะถือว่าอัตราส่วนมีความถูกต้องแล้ว มิเช่นนั้นอัตราส่วนนั้นจะไม่สามารถบอกอะไรได้ จึงควรจะต้องมีการเก็บตัวอย่างใหม่ หรืออาจใช้การตรวจสอบอื่น
- ขั้นตอนที่ 4 ในขั้นตอนนี้จะสมมติว่า อัตราส่วนมีความถูกต้องแล้ว ทำการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนกับค่าที่ระบุไว้ในตารางที่ 2.11 ตามลำดับ R1, R2, R3, และ R4
- ขั้นตอนที่ 5 หากปฏิบัติทุกขั้นตอนถูกต้อง จะสามารถระบุความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้จากตารางที่ 2.11 ได้อย่างถูกต้อง

ตารางที่ 2.10 ปริมาณแก๊สอ้างอิง (L1) [15]

Key gas	ความเข้มข้น (ppm)
H_2	100
CH_4	120
CO	350
C_2H_2	1
C_2H_4	50
C_2H_6	65

ตารางที่ 2.11 การแปลผลจากวิธี Doernenburg Ratio [15]

ความผิดปกติ	อัตราส่วนที่ 1 (R1) CH ₄ /H ₂		อัตราส่วนที่ 2 (R2) C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄		อัตราส่วนที่ 3 (R3) C ₂ H ₂ /CH ₄		อัตราส่วนที่ 4 (R4) C ₂ H ₆ /C ₂ H ₂	
	ในน้ำมัน	Gas space	ในน้ำมัน	Gas space	ในน้ำมัน	Gas space	ในน้ำมัน	Gas space
	1.การสลายตัวจากความร้อน	> 1.0	> 0.1	< 0.75	< 1.0	< 0.3	< 0.1	> 0.4
2.การเกิดดิสซาร์จบางส่วน	< 0.1	< 0.01	-	-	< 0.3	< 0.1	> 0.4	> 0.2
3.การเกิดอาร์ค	0.1 - 1.0	0.01 - 0.1	> 0.75	> 1.0	> 0.3	> 0.1	< 0.4	< 0.2



รูปที่ 2.40 โฟลชาร์จของวิธีการ Doernenburg Ratio [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.20.3 การพิจารณาชนิดของความผิดปกติด้วยวิธี Roger Ratio [15]

วิธี Roger Ratio ใช้เพียง 3 อัตราส่วนในการพิจารณา ได้แก่

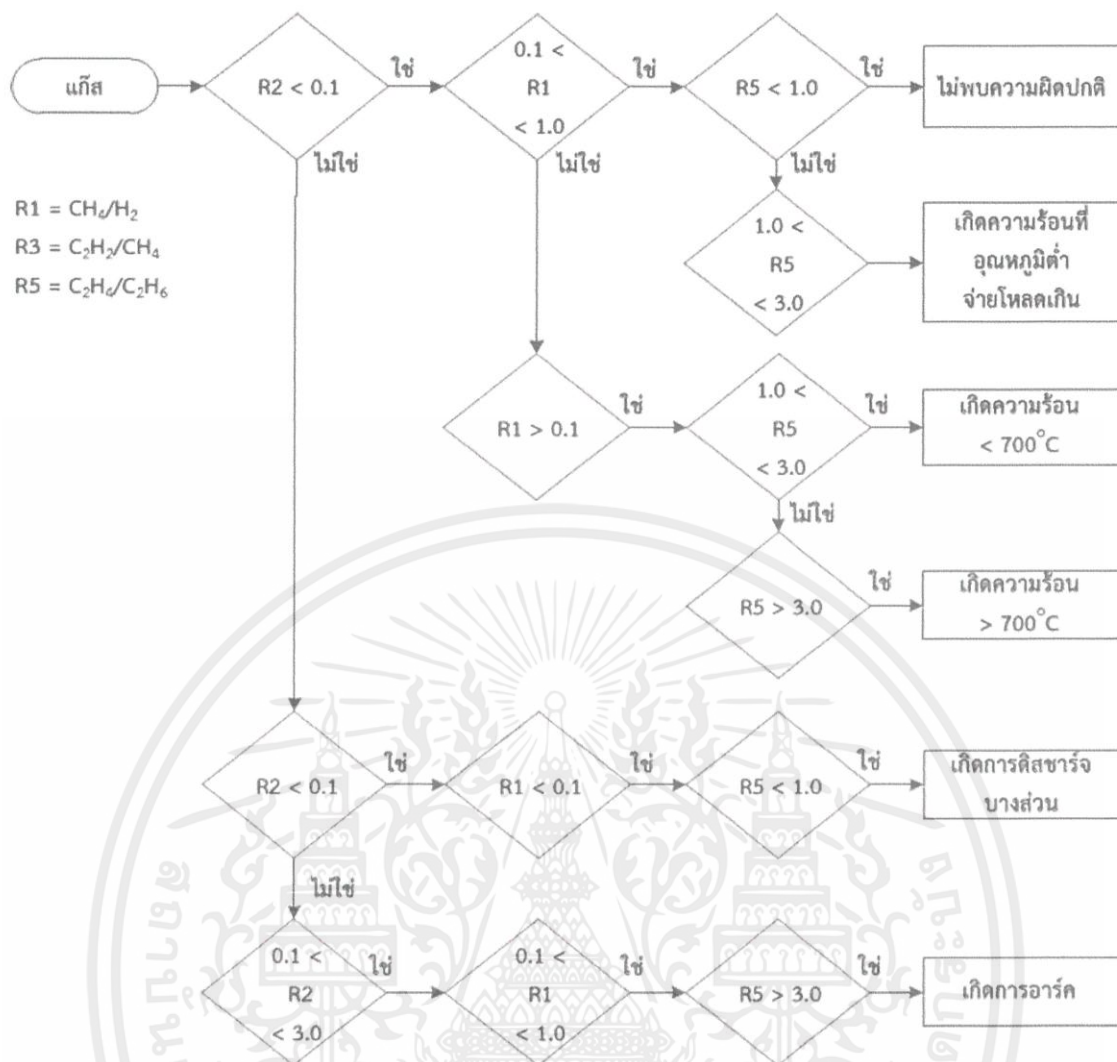
- อัตราส่วนที่ 1 (R1) = CH_4/H_2
- อัตราส่วนที่ 2 (R2) = $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$
- อัตราส่วนที่ 5 (R5) = $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$

โดยความถูกต้องของวิธีการนี้มาจากจำนวนผลลัพธ์ที่แสดงว่าเกิดความผิดปกติ และเช่นเดียวกันกับวิธีการของ Doernenburg Ratio มักจะเกิดกรณีที่ไม่ตรงกับตาราง จึงต้องมีการการประเมินสภาพของหม้อแปลงโดยใช้ความเข้มข้นของแก๊สแต่ละชนิดและค่า TDCG ประกอบด้วย การแปลผลด้วยวิธี Roger Ratio มีขั้นตอนดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 ทำการวัดความเข้มข้นของแก๊ส จากการแยกแก๊สออกมาด้วยการทำโครมาโทกราฟี
- ขั้นตอนที่ 2 พิจารณา หากมีแก๊สอย่างน้อย 1 ชนิด(จาก H_2 , CH_4 , C_2H_2 , และ C_2H_4) มีความเข้มข้นมากกว่า 2 เท่าของค่า L1(ตารางที่ 2.10) และมีแก๊สชนิดใดชนิดหนึ่ง(จาก CO และ CH_6) มีค่ามากกว่าค่า L1 แปลว่าตัวอย่างมีความผิดปกติเกิดขึ้น จากนั้นก็จะเข้าสู่ขั้นตอนที่ 3 ซึ่งเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของอัตราส่วน
- ขั้นตอนที่ 3 การตรวจสอบความถูกต้องของอัตราส่วน ถ้าแก๊สอย่างน้อย 1 ชนิดในแต่ละอัตราส่วน (R1, R2, และ R5) มีค่ามากกว่า L1 จะถือว่าอัตราส่วนมีความถูกต้องแล้ว มิเช่นนั้นอัตราส่วนนั้นจะไม่สามารถบอกอะไรได้ จึงควรจะต้องมีการเก็บตัวอย่างใหม่ หรืออาจใช้การตรวจสอบอื่น
- ขั้นตอนที่ 4 ในขั้นตอนนี้จะสมมติว่า อัตราส่วนมีความถูกต้องแล้ว ทำการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนกับค่าที่ระบุไว้ในตารางที่ 2.12 ตามลำดับ R1, R2, และ R5
- ขั้นตอนที่ 5 หากปฏิบัติทุกขั้นตอนถูกต้อง จะสามารถระบุความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้จากตารางที่ 2.12 ได้อย่างถูกต้อง

ตารางที่ 2.12 การแปลผลจากวิธี Roger Ratio [15]

กรณี	อัตราส่วนที่ 2 (R2) $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$	อัตราส่วนที่ 1 (R1) CH_4/H_2	อัตราส่วนที่ 5 (R5) $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$	ความผิดปกติที่เป็นไปได้
0	< 0.1	0.1 – 1.0	< 0.1	ไม่มีความผิดปกติ
1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	เกิดดิสชาร์จบางส่วน
2	0.1 – 3.0	0.1 – 1.0	> 3.0	เกิดการอาร์ค
3	< 0.1	0.1 – 1.0	1.0 – 3.0	เกิดความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ
4	< 0.1	> 1.0	1.0 – 3.0	เกิดความร้อน <700°C
5	< 0.1	> 1.0	> 3.0	เกิดความร้อน >700°C



รูปที่ 2.41 โพลซาร์จของวิธีการ Roger Ratio [15]

2.20.4 การแปลผลด้วยวิธี IEC Ratio [6,18]

การแปลผลด้วยวิธี IEC Ratio นั้นใช้อัตราส่วนของแก๊ส 3 ชนิดในการวิเคราะห์ โดยรายละเอียดในการแปลผลนั้นแสดงในตารางที่ 2.13 ซึ่งข้อเสียของการแปลผลด้วยวิธี IEC Ratio นั้นคือจะมีกรณีที่ทำค่าตอบไม่ได้อยู่หากเงื่อนไขของอัตราส่วนแก๊สนั้นไม่ตรงตามที่ได้มีการระบุไว้

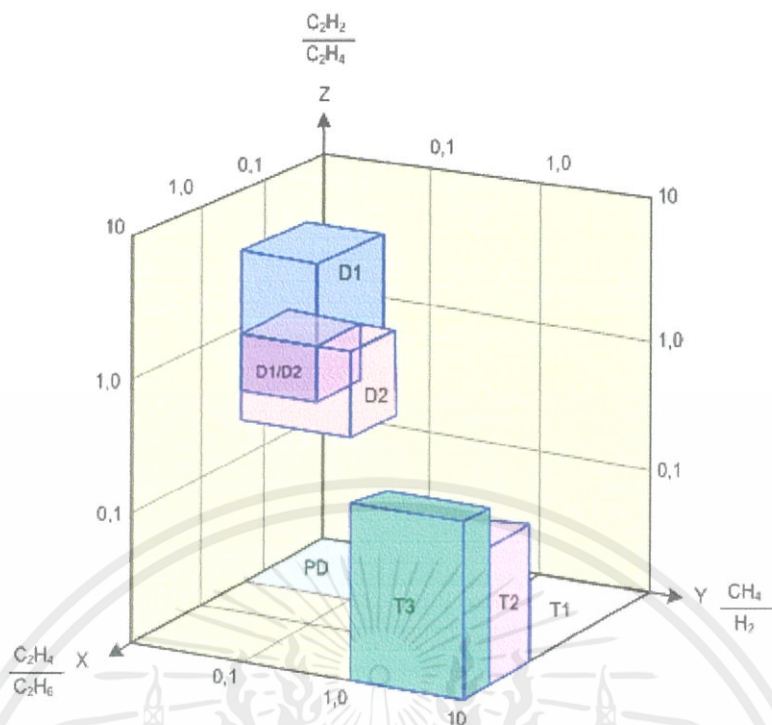
ตารางที่ 2.13 การแปลผล DGA วิธี IEC Ratio [6]

กรณี	ชนิดของ fault	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6
PD	ดิสชาร์จบางส่วน	NS ¹⁾	<0.1	<0.2
D1	ดิสชาร์จพลังงานต่ำ	>1	0.1-0.5	>1
D2	ดิสชาร์จพลังงานสูง	0.6-2.5	0.1-1	>2
T1	ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300°C	NS ¹⁾	>1 แต่ NS ¹⁾	<1
T2	ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 300°C ถึง 700°C	<0.1	>1	1-4
T3	ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 700°C	<0.2 ²⁾	>1	>4
<p>หมายเหตุ 1-ในบางประเทศ อัตราการใช้ C_2H_4/C_2H_6 มากกว่าอัตราส่วน CH_4/H_2</p> <p>หมายเหตุ 2-ควรคำนวณค่าถ้ามีแก๊สอย่างน้อยหนึ่งชนิดมีอัตราเพิ่มขึ้นเหนือค่าทั่วไป</p> <p>หมายเหตุ 3- $CH_4/H_2 < 0.7$ สำหรับดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงวัด, $CH_4/H_2 < 0.07$ สำหรับดิสชาร์จบางส่วนใน Bushings</p> <p>หมายเหตุ 4-รูปแบบการสลายตัวของแก๊สที่คล้ายดิสชาร์จบางส่วนมีผลมากจากการสลายตัวของฟิล์มน้ำมันบางๆ เหนือแกนเหล็กที่อุณหภูมิ 140°C</p> <p>NS¹⁾ ไม่มีนัยสำคัญ</p> <p>²⁾ C_2H_2 มีค่าเพิ่มขึ้นอาจบ่งบอกว่ามีจุดร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,000°C</p>				

ตารางที่ 2.14 การตีความอย่างง่ายด้วยวิธี IEC Ratio [6]

กรณี	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6
PD		<0.2	
D	>0.2		
T	<0.2		

ในกรณีที่ IEC Ratio นั้นไม่มีคำตอบเกิดขึ้นอาจทำการพิจารณาชนิดของความผิดปกติด้วยวิธีใช้กราฟช่วย โดยทำการวิเคราะห์ดังนี้ ทำการกำหนดค่าทั้ง 3 แกนโดยที่แกน X เป็นอัตราส่วนระหว่าง C_2H_4/C_2H_6 แกน Y เป็นอัตราส่วนระหว่าง CH_4/H_2 และแกน Z เป็นอัตราส่วนระหว่าง C_2H_2/C_2H_4 หลังจากนั้นทำการดูตำแหน่งที่ได้บนกราฟ 3 มิติ ถ้าตำแหน่งที่กำหนดไม่อยู่ในช่วงที่มีให้หาระยะทางที่สั้นที่สุดจากจุดที่กำหนดค่าไปยังพื้นที่แล้วให้ผลลัพธ์เป็นไปตามพื้นที่นั้น



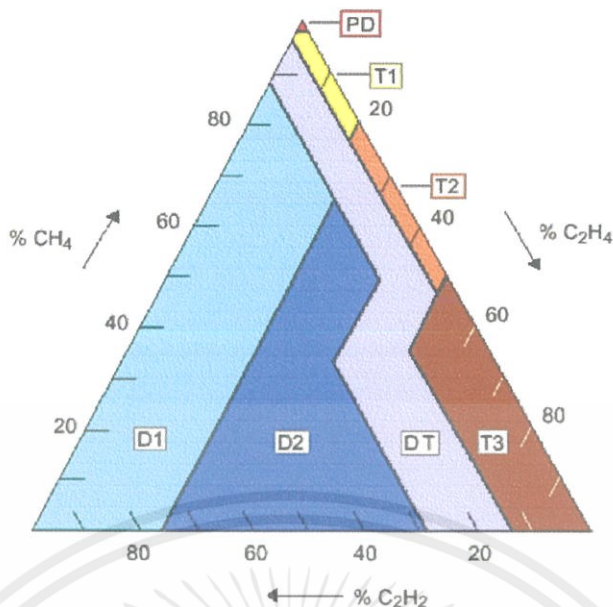
รูปที่ 2.42 กราฟิก 2 อัตราส่วนแก๊สตามมาตรฐาน IEC [6]

2.20.5 การแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle [6,18]

วิธีวิเคราะห์ด้วย Duval Triangle เป็นอีกวิธีที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายและมีความถูกต้องของค่าตอบค่อนข้างสูง โดยขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยวิธี Duval Triangle นั้นมีดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 ต้องมีแก๊สไฮโดรคาร์บอนอยู่ในเงื่อนไข L1 และมีอัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊ส G2 จากตารางที่ 2.9 ก่อนที่จะยืนยันปัญหา
- ขั้นตอนที่ 2 ก่อนที่จะพล็อตค่าลงใน Duval Triangle จะเริ่มต้นด้วยค่าความเข้มข้นของ 3 แก๊ส ประกอบไปด้วย $CH_4=A$, $C_2H_4=B$, $C_2H_2=C$ ในหน่วย ppm จากนั้นคำนวณผลรวมของค่าทั้ง 3 ($CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2$)= S แล้วคำนวณสัดส่วนของ 3 แก๊สในหน่วยเปอร์เซ็นต์ $X=\% CH_4 = 100 (A/S)$, $Y=\% C_2H_4 = 100 (B/S)$, $Z=\% C_2H_2 = 100 (C/S)$ พล็อตค่า X, Y และ Z ลงใน Duval Triangle
- ขั้นตอนที่ 3 พื้นที่ใน Duval Triangle ซึ่งให้เห็นปัญหาที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง

ถ้าการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของ H_2 มีเฉพาะ CO , CO_2 และมีแก๊สไฮโดรคาร์บอนเพียงเล็กน้อย ให้ใช้อัตราส่วน CO_2/CO เพื่อหาความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับฉนวนเซลลูโลส



รูปที่ 2.43 กราฟิก 3 อัตราส่วนแก๊ส Duval Triangle [6]

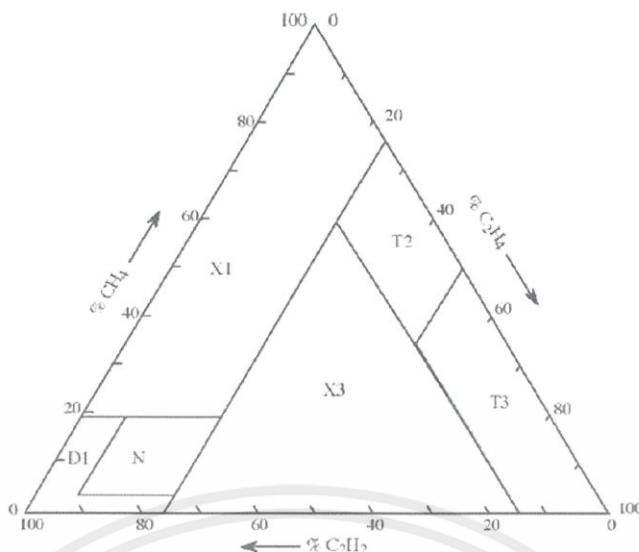
คำอธิบายจากกราฟิก 3 อัตราส่วนแก๊ส Duval Triangle

- PD หมายถึง ดิสชาร์จบางส่วน
- T1 หมายถึง ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิน้อยกว่า 300°C
- T2 หมายถึง ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 300°C ถึง 700°C
- T3 หมายถึง ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 700°C
- D1 หมายถึง ดิสชาร์จพลังงานต่ำ
- D2 หมายถึง ดิสชาร์จพลังงานสูง
- DT หมายถึง ผสมระหว่างความผิดปกติเนื่องจากความร้อนและความผิดปกติทางไฟฟ้า

นอกจากนี้ยังมี Duval Triangle ชนิดอื่นๆ อีก สำหรับปริยญาณิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึง Duval Triangle 2, Duval Triangle 4 และ Duval Triangle 5

Duval Triangle 2 ใช้ในการแปลผลค่าแก๊สของ OLTC ชนิดที่ใช้ น้ำมัน ซึ่งมีการแบ่งโซนที่แสดงถึงปัญหาที่เกิดขึ้นดังนี้

- N หมายถึง สถานะปกติ (Normal Operation)
- T3 หมายถึง ปัญหาเกี่ยวกับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 700°C เกิด Heavy Coking
- T2 หมายถึง ปัญหาเกี่ยวกับความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 300°C ถึง 700° เกิด Coking
- X3 หมายถึง กำลังเกิดปัญหาเกี่ยวกับ Coking หรือ การเกิดดิสชาร์จพลังงานสูง (D2)
- D1 หมายถึง การเกิดดิสชาร์จพลังงานต่ำ (D1)
- X1 หมายถึง การเกิดดิสชาร์จพลังงานต่ำ (D1) หรือกำลังเกิดปัญหาเกี่ยวกับความร้อน

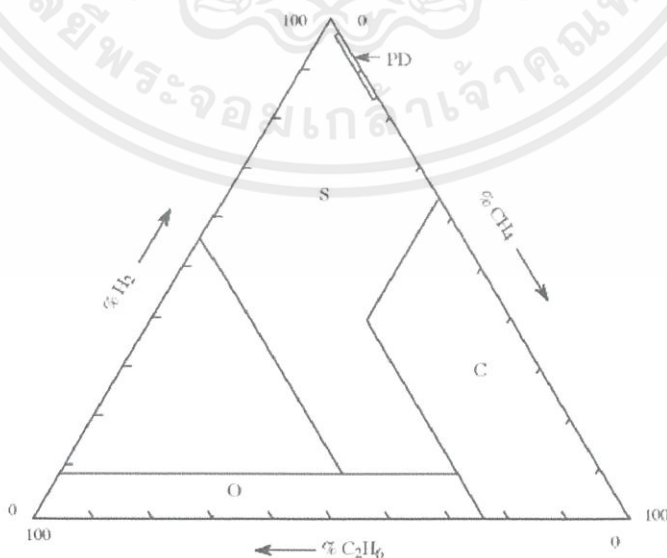


รูปที่ 2.44 Duval Triangle 2 [18]

Duval Triangle 4 และ Duval Triangle 5 ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาในหม้อแปลงในกรณีที่เป็นปัญหาเกี่ยวกับความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ โดยจะนำค่าแก๊สของหม้อแปลงที่อยู่ในโซน PD, T1 และ T2 ใน Duval Triangle 1 มาทำการแปลผล เพื่อระบุปัญหาได้อย่างชัดเจนมากขึ้น ซึ่ง Duval Triangle 4 มีการแบ่งโซนที่แสดงถึงปัญหาที่เกิดขึ้นดังนี้

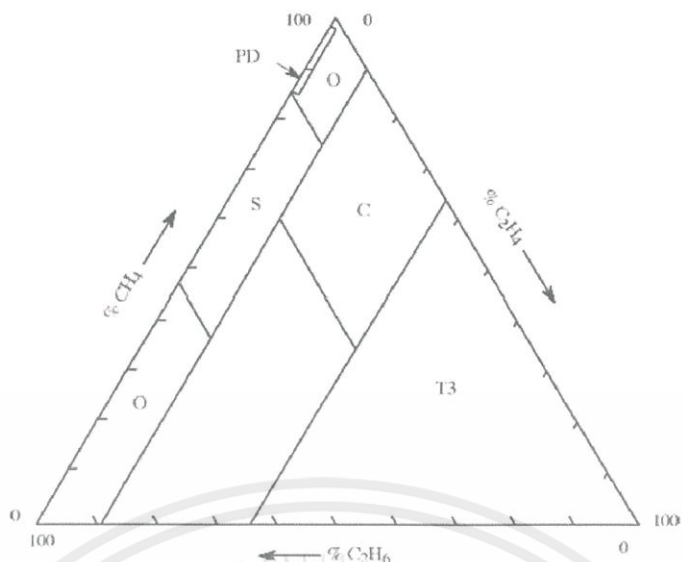
- PD หมายถึง การเกิดโคโรนาดิสชาร์จ
- C หมายถึง ปัญหาเกี่ยวกับความร้อน ร่วมกับปฏิกิริยา Carbonization ในกระดาษ
- O หมายถึง Overheating (อุณหภูมิ <math>< 250^{\circ}\text{C}</math>)
- S หมายถึง Stray Gassing

ส่วน Duval Triangle 5 มีการแบ่งโซนที่แสดงถึงปัญหาเหมือนกับ Duval Triangle 4 แต่เพิ่มโซนปัญหา T3 ขึ้นมา ซึ่งหมายถึง ปัญหาเกี่ยวกับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 700°C



รูปที่ 2.45 Duval Triangle 4 [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.46 Duval Triangle 5 [18]

2.20.6 การแปลผลด้วยวิธี Duval Pentagon [19]

วิธีการ Duval Pentagon จะใช้ความสัมพันธ์ของแก๊สหลักๆ 5 ชนิด ได้แก่ H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 และ C_2H_2 มาวิเคราะห์และคำนวณดังนี้

- คำนวณเปอร์เซ็นต์ของแก๊สแต่ละชนิด
- นำไปพล็อตบนแกนต่างๆ ทั้ง 5 แกน ตามแกนของแก๊สแต่ละชนิด
- ทำการแตกแกนไปยังแกน X และแกน Y จะได้จุดคู่อันดับ (x_i, y_i) 5 จุด
- คำนวณหาจุด Centroid ด้วยสูตรดังต่อไปนี้

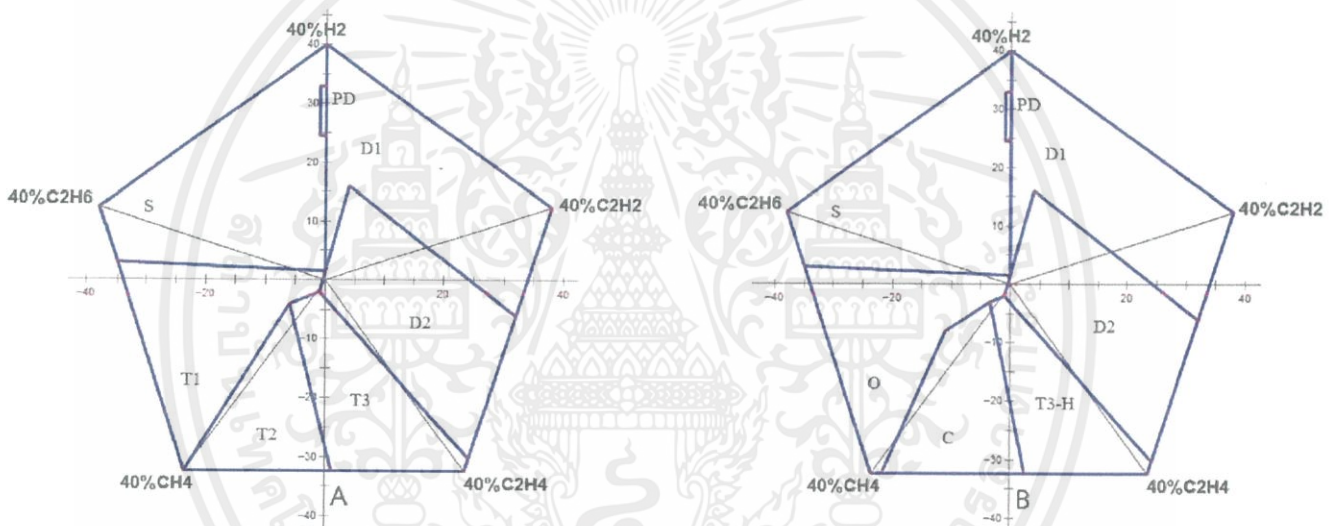
$$C_x = \frac{1}{6A} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i + x_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad 2.13$$

$$C_y = \frac{1}{6A} \sum_{i=0}^{n-1} (y_i + y_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad 2.14$$

และ A คำนวณได้จาก $A = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i)$ 2.15

Duval Pentagon จะมี 2 รูปแบบ โดยมีความแตกต่างกันตรงที่การระบุโซนของปัญหาที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง ได้แก่

- 1) Duval Pentagon 1 ประกอบด้วยโซนที่แสดงถึงปัญหาทางไฟฟ้าและความร้อนพื้นฐานที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง 6 โซน
- 2) Duval Pentagon 2 ประกอบด้วย โซนที่แสดงถึงปัญหา 3 ชนิด (PD, D1, D2) และโซนที่ระบุปัญหาได้แม่นยำมากขึ้น 4 โซน ได้แก่
 - T3-H หมายถึง ปัญหาเกี่ยวกับความร้อน ที่เกิดในน้ำมัน
 - C หมายถึง ปัญหาเกี่ยวกับความร้อน ร่วมกับปฏิกิริยา Carbonization ในกระดาษ
 - O หมายถึง Overheating
 - S หมายถึง Stray Gassing



รูปที่ 2.47 Duval Pentagon 1 (A) และ Duval Pentagon 2 (B) [19]

สำหรับการใช้งานนั้นสามารถเลือกใช้ Duval Pentagon 1 หรือ 2 อย่างใดอย่างหนึ่งก็ได้ หรือจะใช้ร่วมกันกับ Duval Triangle 1-4-5 เพื่อความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น แต่ถ้าหาก Duval Pentagon 1-2 และ Duval Triangle 1-4-5 ให้ผลออกมาแตกต่างกัน นั้นหมายถึงอาจเกิดปัญหาหลายชนิดผสมกัน (Mixture of Faults) ในหม้อแปลง นั้นเป็นเพราะแต่ละ Pentagon และ Triangle ให้ความสำคัญของแก๊สไม่เหมือนกัน

2.20.7 การแปลผลโดยใช้อัตราส่วน CO₂ ต่อ CO [6]

การเพิ่มขึ้นของ CO₂ และ CO จากฉนวนกระดาศที่ช่องว่างถูกแทนที่ด้วยน้ำมันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ถ้าการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน CO₂ ต่อ CO น้อยกว่า 3 เท่าโดยทั่วไปจะถือว่ากระดาศเสื่อมสภาพ

บางครั้ง CO₂ สามารถดูดซับมาจากบรรยากาศ และควรดูประวัติของค่า CO₂ และ CO ที่มีผลมาจากอายุการใช้งาน, การให้ความร้อน

เมื่อกระดาศถูกย่อยสลาย (CO₂ ต่อ CO <3) ควรจะวิเคราะห์โดยวิธีการของ Furanic หรือวัดความแข็งแรงของกระดาศ

2.21 การปรับปรุงคุณภาพน้ำมัน [19]

การปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันที่ผ่านการใช้งานมาแล้วนั้นเป็นการทำเพื่อให้้ำมันมีคุณภาพดีขึ้นและเป็นการยืดอายุการใช้งาน คุณสมบัติของน้ำมันหลังการปรับปรุงคุณภาพนั้นขึ้นอยู่กับ การตกลงกันระหว่างหน่วยงานผู้ทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันและลูกค้า การปรับปรุงคุณภาพน้ำมันต้องทำด้วยความระมัดระวังเป็นอย่างมาก ดังนั้นผู้ทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันจึงต้องเป็นผู้ที่มีความเชี่ยวชาญ นอกจากนี้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันจำเป็นต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อสุขภาพของผูทำงานและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพราะของเสียที่ได้จากการกรองน้ำมันอาจเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้ การปรับปรุงคุณภาพน้ำมันมีหลากหลายวิธี ดังนี้

1) การรีคอนดิชัน (Reconditioning) เป็นการกำจัดสารปนเปื้อนด้วยวิธีทางกายภาพ เช่น การกรอง (Filtration) การกำจัดแก๊ส (Degassing) เป็นต้น การปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีนี้จะเป็นการกำจัดอนุภาคของแข็งของสารปนเปื้อน ความชื้น และสามารถลดปริมาณของแก๊สที่ละลายในน้ำ และฟูแรนได้เล็กน้อย

2) การรีเคลม (Reclaiming) เป็นกระบวนการกำจัดและลดปริมาณของสารปนเปื้อนแบบมีขั้วทั้งแบบที่ละลายและไม่ละลายในน้ำมันด้วยวิธีการทางเคมีและทางกายภาพ

3) การกำจัดสาร PCB ออกจากน้ำมัน (Decontaminant of Oils Containing PCBs) เป็นการใช้วิธีการทางเคมีเพื่อกำจัดสาร PCB หรือโพลีคลอริเนทไบฟีนิล (Polychlorinated Biphenyls) ออกจากน้ำมัน เนื่องจาก PCB เป็นสารอันตราย ซึ่งอาจทำให้เกิดสารพิษที่จะส่งผลกระทบต่อสุขภาพ หรือรับประทานเข้าไป และพื้นที่บางพื้นที่ไม่อนุญาตให้ใช้น้ำมันที่ปนเปื้อน PCB

บทที่ 3

การออกแบบการทดสอบ

3.1 การประเมินสภาพหม้อแปลงและแปลผลค่าแก๊สด้วยวิธีการตามมาตรฐาน

3.1.1 การประเมินสภาพหม้อแปลง

- การประเมินสภาพหม้อแปลงตามมาตรฐาน IEEE C57.104
- การประเมินสภาพโดยใช้ปริมาณแก๊สอ้างอิง (L1) และค่าอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าแก๊สต่อเดือนตามตารางที่ 2.9

- การประเมินสภาพหม้อแปลงด้วยวิธี Health Index (เฉพาะ การทำ DGA)

3.1.2 การแปลผลค่าแก๊ส

1) การแปลผลค่าแก๊สตามมาตรฐาน IEEE C57.104

- วิธี Roger Ratio
- วิธี Doernenburg Ratio
- วิธี Key Gas

2) การแปลผลค่าแก๊สแปลผลตามมาตรฐาน IEC 60599

- วิธีอัตราส่วน CO_2/CO
- วิธี IEC Ratio
- วิธี Duval Triangle 1
- วิธี Duval Triangle 2 (OLTC)

3) การแปลผลค่าแก๊สด้วยวิธีที่ไม่ได้อยู่ในมาตรฐาน IEC และ IEEE

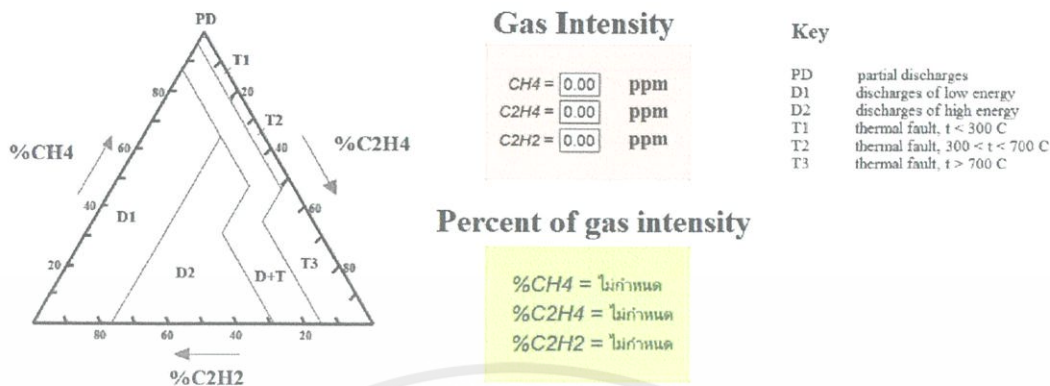
- วิธี Duval Triangle 4
- วิธี Duval Triangle 5
- วิธี Duval Pentagon 1
- วิธี Duval Pentagon 2

หลังทำการแปลผลค่าแก๊สแล้วทำการวิเคราะห์ผล และเปรียบเทียบกันว่าการแปลผลด้วยแต่ละวิธีให้ผลลัพธ์เหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร

3.1.3 การออกแบบโปรแกรมสำหรับแปลผล

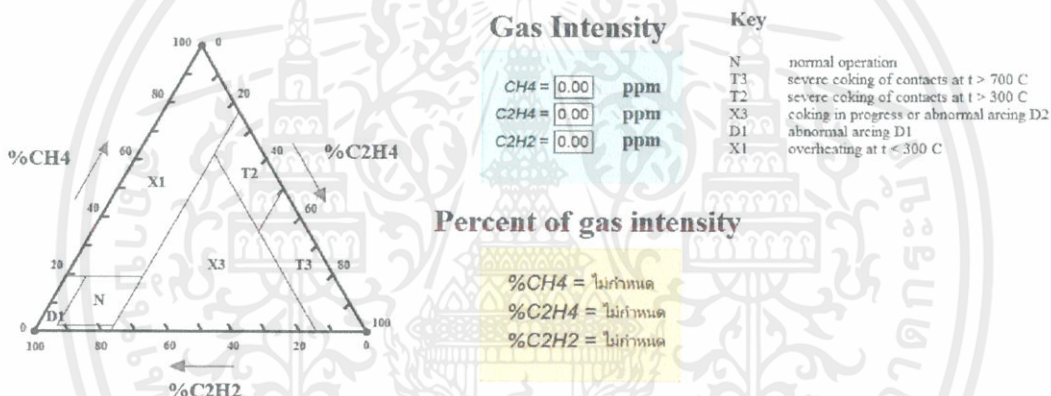
ในการออกแบบโปรแกรม การแปลผลด้วยวิธี Roger Ratio, Doernenburg Ratio, Key Gas, CO_2/CO ratio และ IEC ratio จะใช้ฟังก์ชัน และ เครื่องมือ Visual Basic ในโปรแกรม Microsoft Excel ร่วมกันเขียนโปรแกรมตามเงื่อนไขของวิธีต่างๆ ส่วนวิธี Duval Triangle และ Duval Pentagon ใช้โปรแกรม Geometric Sketchpad (GSP) ในการวาด และพล็อตจุด เพื่อแปลผลค่าแก๊ส

Duval triangle 1 for transformers, bushings and cables



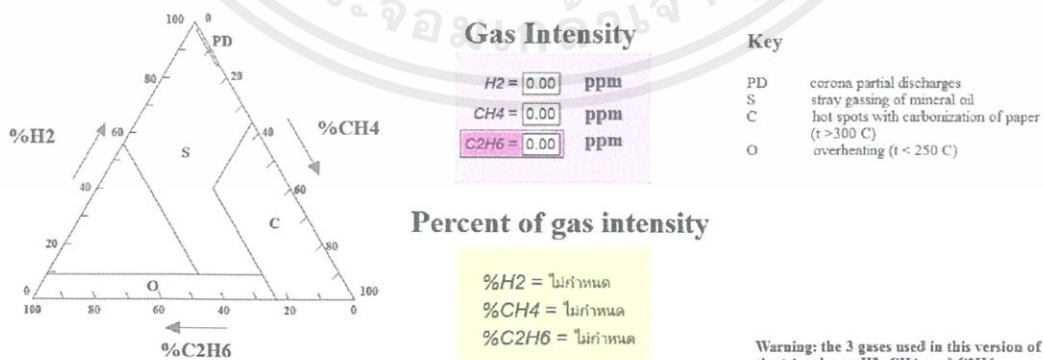
รูปที่ 3.1 Duval Triangle 1 ในโปรแกรม GSP

Duval triangle 2 for OLTCs



รูปที่ 3.2 Duval Triangle 2 ในโปรแกรม GSP

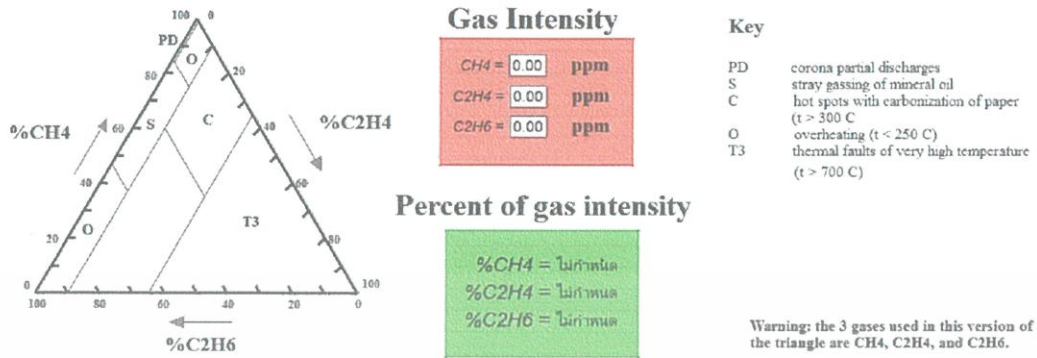
Duval triangle 4 for low-temperature faults in transformers filled with mineral oil.



รูปที่ 3.3 Duval triangle 4 ในโปรแกรม GSP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Duval triangle 5
for low-temperature faults in transformers filled with mineral oil.



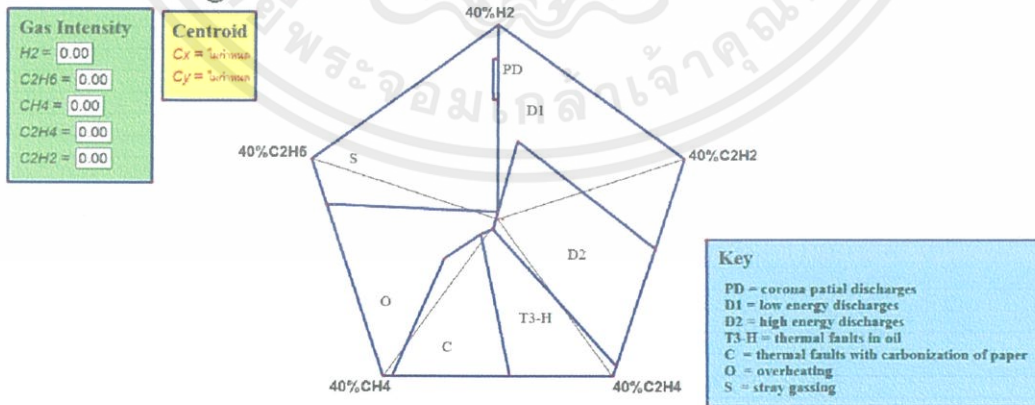
รูปที่ 3.4 Duval triangle 5 ในโปรแกรม GSP

Duval Pentagon 1



รูปที่ 3.5 Duval Pentagon 1 ในโปรแกรม GSP

Duval Pentagon 2



รูปที่ 3.6 Duval Pentagon 2 ในโปรแกรม GSP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้. สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การเตรียมฉนวนสำหรับการทดสอบ

3.2.1 การเตรียมน้ำมันหม้อแปลง สำหรับการทดสอบ

อบน้ำมันหม้อแปลงเพื่อลดความชื้นที่อุณหภูมิ 60 °C ในตู้อบสูญญากาศเป็นเวลา 12 ชั่วโมง



รูปที่ 3.7 ตู้อบสูญญากาศ

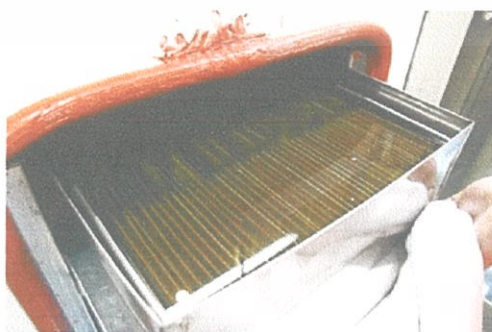
หมายเหตุ คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงที่นำมาใช้ทดสอบสามารถดูได้จากภาคผนวก ง

3.2.2 การเตรียมเพรสบอร์ดสำหรับการทดสอบ

- 1) ตัดเพรสบอร์ดให้มีขนาด 10×10 cmหนา 1.6 mm และ 3.2 mm
- 2) อบเพรสบอร์ดเพื่อลดความชื้นที่อุณหภูมิ 80 °C ในตู้อบสูญญากาศเป็นเวลา 12 ชั่วโมง
- 3) อิมเพรกเนตเพรสบอร์ดด้วยน้ำมันหม้อแปลงที่อุณหภูมิ 60°C ในตู้อบสูญญากาศเป็นเวลา 12 ชั่วโมง



รูปที่ 3.8 เพรสบอร์ด



รูปที่ 3.9 การเตรียมอิมเพรกเนตเพรสบอร์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิดแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมัน

การทดสอบแบ่งเป็น 5 ประเภทได้แก่

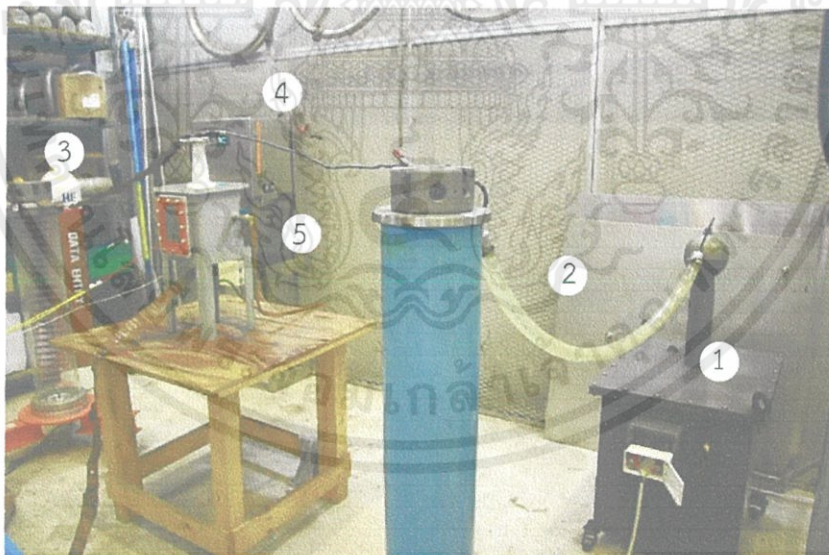
1. การทดสอบการเกิดโครนาดีสชาร์จในน้ำมันหม้อแปลงและตรวจจับแก๊สที่ละลายในน้ำมันโดยใช้เครื่องวัดแบบออนไลน์ (DGA Online)
2. การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านน้ำมันหม้อแปลง
3. การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านอิมเพรกเนตเพรสเซอร์ที่บรรจุอยู่ในชุดทดสอบที่ใส่น้ำมันหม้อแปลง
4. การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าผ่านน้ำมันหม้อแปลงที่บรรจุในชุดทดสอบ
5. การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าผ่านอิมเพรกเนตเพรสเซอร์ที่บรรจุอยู่ในชุดทดสอบที่ใส่น้ำมันหม้อแปลง

หมายเหตุ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสามารถดูได้จากภาคผนวก ก

3.3 การทดสอบการเกิดโครนาดีสชาร์จในน้ำมันหม้อแปลงและตรวจจับแก๊สที่ละลายในน้ำมันโดยใช้เครื่องวัดแบบออนไลน์ (DGA Online)

3.3.1 วงจรทดสอบ

การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิดแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงเนื่องจากการเกิดโครนาดีสชาร์จในน้ำมันหม้อแปลงโดยใช้เครื่องวัดแบบออนไลน์ (DGA Online) ต่อวงจรทดสอบดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วงจรทดสอบการเกิดโครนาดีสชาร์จในน้ำมันหม้อแปลงและตรวจจับแก๊สที่ละลายในน้ำมันโดยใช้เครื่องวัดแบบออนไลน์ (DGA Online)

1. หม้อแปลงทดสอบ
2. ตัวต้านทานน้ำ
3. โวลเตจดีไวเดอร์
4. เครื่องวัด DGA Online (Calisto9)
5. ชุดทดสอบการเกิดโครนาดีสชาร์จ



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.11 (ก) ชุดทดสอบการเกิดโคโรนาดิสชาร์จ (ข) เครื่องวัด DGA Online (Calisto9)

3.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. ต่อวงจรทดสอบตามรูปที่ 3.10
2. บรรจุน้ำมันหม้อแปลงที่ผ่านการอบในชุดทดสอบ
3. ตรวจสอบน้ำมันหม้อแปลงที่ถูกเทในชุดทดสอบว่ามีฟองอากาศอยู่หรือไม่ ถ้ามีฟองอากาศต้องตั้งพักชุดทดสอบทิ้งไว้ให้ฟองอากาศหายไป
4. ทำการขึ้นแรงดันด้วยอัตราการเพิ่มแรงดันคงที่ 1 kV/s จนถึง PDIV (14.4 kV) เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
5. บันทึกค่าแก๊สที่อ่านได้จากเครื่องวัด DGA Online (Calisto9)
6. ทำความสะอาดชุดทดสอบ เปลี่ยนเข็มที่ใช้ในการทดสอบ และเปลี่ยนน้ำมันหม้อแปลงจากนั้นตั้งพักชุดทดสอบทิ้งไว้ 5 นาที
7. ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 3-6 แต่ทดสอบโดยเพิ่มแรงดันให้เป็น 1.5PDIV (21.6 kV) และ 1.7PDIV (24.5 kV)

หมายเหตุ [21] Partial Discharge Inception Voltage, PDIV หรือ แรงดันเริ่มต้นของการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน ซึ่งหาค่าจากวิธี Ramp Method นั่นคือการเพิ่มแรงดันด้วยอัตรา 1 kV/s จนถึงค่าแรกที่เกิดการดิสชาร์จของประจุไฟฟ้า ≥ 100 pC และหาค่าเฉลี่ยของ PDIV จากการทดสอบ 10 ครั้ง

3.4 การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านน้ำมันหม้อแปลง

3.4.1 เครื่องที่ใช้ทดสอบ

การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเกิดแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงเนื่องจากการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านน้ำมันหม้อแปลง โดยใช้เครื่องทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนเหลวดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนเหลว

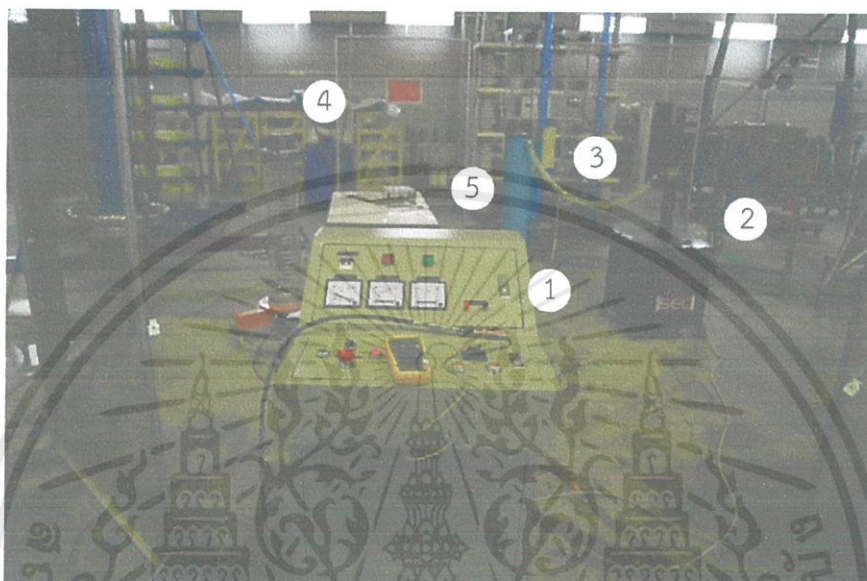
3.4.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. บรรจุน้ำมันหม้อแปลงที่ผ่านการอบในชุดทดสอบ
2. ตรวจสอบน้ำมันหม้อแปลงที่ถูกเทในชุดทดสอบว่ามีฟองอากาศอยู่หรือไม่ ถ้ามีฟองอากาศต้องตั้งพักชุดทดสอบทิ้งไว้ให้ฟองอากาศหายไป
3. นำชุดทดสอบใส่ในเครื่องทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนเหลว เปิดเครื่องทดสอบและใช้การทดสอบตามมาตรฐาน IEC 156
4. ทดสอบให้เกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสะสมในน้ำมันหม้อแปลง 6 ครั้ง แล้วเก็บตัวอย่างในขวดแก้วสีชาขนาด 100 mL
5. บันทึกความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบ
6. ทำความสะอาดชุดทดสอบ และทำซ้ำในขั้นตอนที่ 1-5 แต่ทดสอบให้เกิดเบรกดาวน์สะสมในน้ำมันหม้อแปลงจำนวน 12 และ 18 ครั้ง ตามลำดับ
7. นำตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ผ่านการเบรกดาวน์ไปทดสอบผล DGA

3.5 การทดสอบการเกิดเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านอิมเพรกเนตเพรสบอร์ดที่บรรจุอยู่ในชุดทดสอบที่ใส่น้ำมันหม้อแปลง

3.5.1 วงจรทดสอบ

การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเกิดแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงเนื่องจากการเกิดเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านอิมเพรกเนตเพรสบอร์ดที่บรรจุอยู่ในชุดทดสอบที่ใส่น้ำมันหม้อแปลง ต้องวงจรทดสอบ ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วงจรทดสอบการเกิดเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านอิมเพรกเนตเพรสบอร์ด

- 1.ชุดควบคุมแรงดัน 2.หม้อแปลงทดสอบ 3.ตัวต้านทานน้ำ 4.โวลเตจดีไวเดอร์
- 5.ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ด



รูปที่ 3.14 ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ด

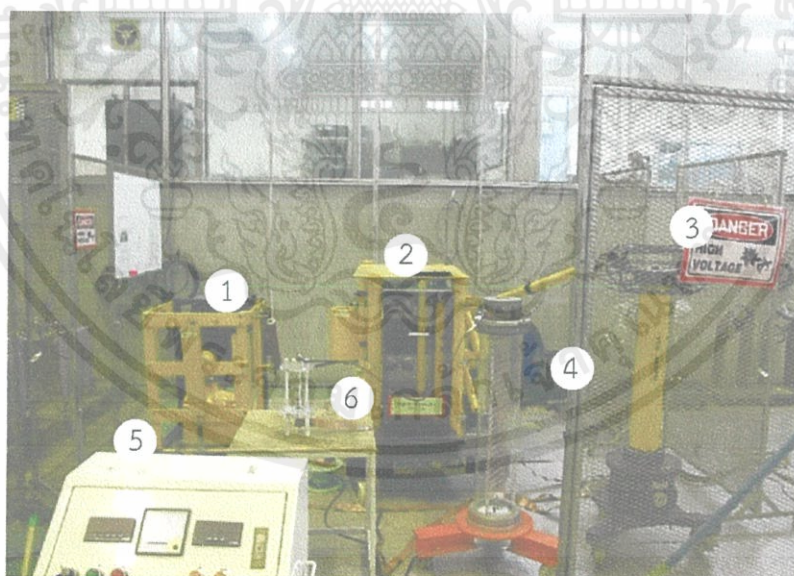
3.5.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. ต่อบางจรทดสอบตามรูปที่ 3.13
2. นำเพรสบอร์ดที่อิมเพกเน็ตแล้ว ใส่ในชุดทดสอบและเทน้ำมันหม้อแปลงลงในชุดทดสอบ
3. ตรวจสอบน้ำมันหม้อแปลงที่ถูกเทในชุดทดสอบว่ามีฟองอากาศอยู่หรือไม่ ถ้ามีฟองอากาศต้องตั้งพักชุดทดสอบทิ้งไว้ให้ฟองอากาศหายไป
4. ทำการขึ้นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยอัตราการเพิ่มแรงดันคงที่ 2 kV/s จนกระทั่งเกิดการเบรกดาวน
5. บันทึกความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับที่อ่านได้จากมิเตอร์วัดแรงดัน
6. เก็บตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงในขวดแก้วสีชาขนาด 100 mL
7. ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 2-5 แต่ทดสอบให้เกิดเบรกดาวนที่สะสมในน้ำมันหม้อแปลง 3 และ 5 ครั้ง ตามลำดับ โดยทุกครั้งที่เกิดเบรกดาวนต้องเปลี่ยนเพรสบอร์ดใหม่ทุกครั้ง
8. นำตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ผ่านการเบรกดาวนไปทดสอบผล DGA

3.6 การทดสอบการเกิดเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าผ่านน้ำมันหม้อแปลงที่บรรจุในชุดทดสอบ

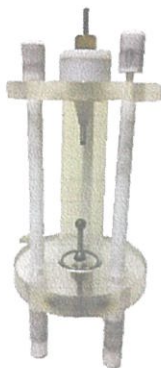
3.6.1 วงจรทดสอบ

การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิดแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงเนื่องจากการเกิดเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าผ่านน้ำมันหม้อแปลงที่บรรจุในชุดทดสอบ ต่อบางจรทดสอบ ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 วงจรทดสอบการเกิดเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าผ่านน้ำมันหม้อแปลง

- 1.ชุดอัดประจุ 2.เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 3.โวลเตจดีไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุ 4.โวลเตจดีไวเดอร์
- 5.ชุดควบคุมชุดกำเนิดอิมพัลส์ 6.ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว



รูปที่ 3.16 ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว

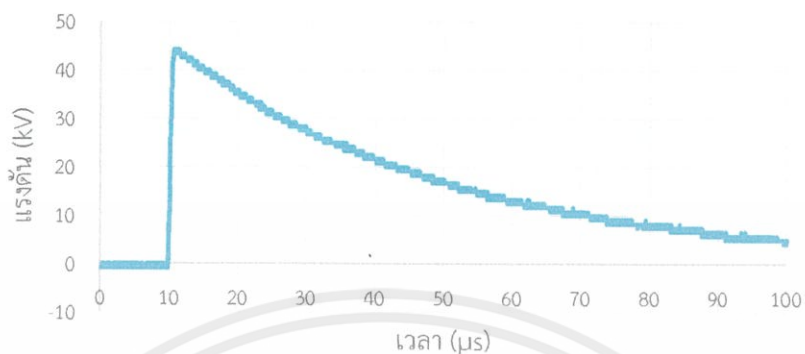
3.6.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. ต่อบรรจุชุดทดสอบตามรูปที่ 3.15
2. บรรจุน้ำมันหม้อแปลงที่ผ่านการอบในชุดทดสอบ
3. ตรวจสอบน้ำมันหม้อแปลงที่ถูกเทในชุดทดสอบว่ามีฟองอากาศอยู่หรือไม่ ถ้ามีฟองอากาศต้องตั้งพักชุดทดสอบทิ้งไว้ให้ฟองอากาศหายไป
4. ทำการขึ้นแรงดันด้วยอัตราการเพิ่มแรงดันคงที่ 2 kV/s จนกระทั่งเกิดการเบรกดาวน
5. บันทึกกราฟค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ที่อ่านได้จากออสซิลโลสโคป
6. เก็บตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงในขวดแก้วสีชาขนาด 100 mL
7. ทำความสะอาดชุดทดสอบ เปลี่ยนเข็มที่ใช้ในการทดสอบ และเปลี่ยนน้ำมันหม้อแปลง จากนั้นตั้งพักชุดทดสอบทิ้งไว้ 5 นาที
8. ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 3-7 แต่ทดสอบให้เกิดเบรกดาวนสะสมในน้ำมันหม้อแปลง 3 และ 5 ครั้ง ตามลำดับ
9. ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 3-8 แต่กลับขั้วไดโอดของวงจรทดสอบเพื่อเปลี่ยนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ขั้วบวกเป็นขั้วลบ
10. นำตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ผ่านการเบรกดาวนไปทดสอบผล DGA

3.6.3 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ใช้ในการทดสอบ

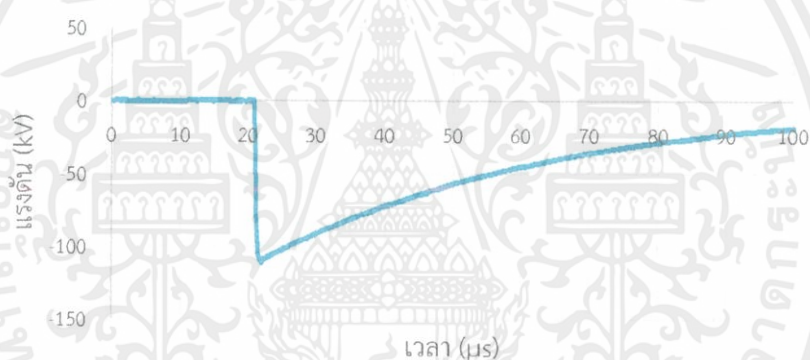
แรงดันที่ใช้ในการทดสอบใช้แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามมาตรฐาน เวลาหน้าคลื่น $1.2 \mu\text{s} \pm 30\%$ และเวลาช่วงหางคลื่น $50 \mu\text{s} \pm 20\%$ ดังแสดงในรูป 3.17 และ 3.18

1. แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วบวก



รูปที่ 3.17 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วบวก 1.2/50 μs ที่ใช้ในการทดสอบ

2. แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบ

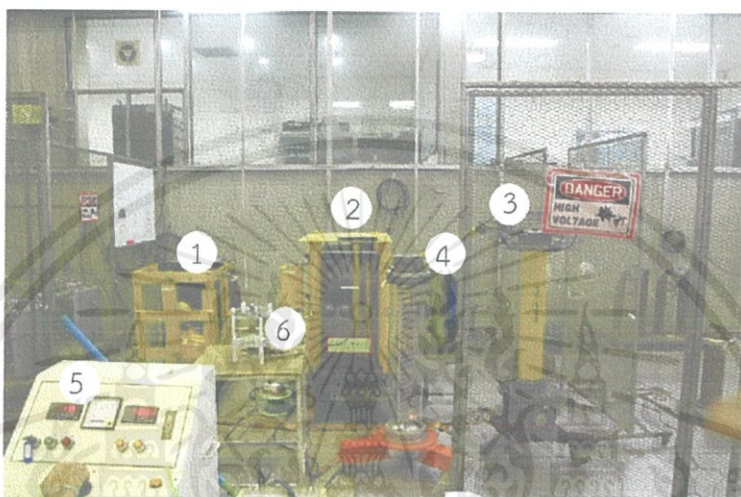


รูปที่ 3.18 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบ 1.2/50 μs ที่ใช้ในการทดสอบ

3.7 การทดสอบการเกิดเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าผ่านอิมเพกต์เพรสบอร์ดที่บรรจุอยู่ในชุดทดสอบที่ใส่น้ำมันหม้อแปลง

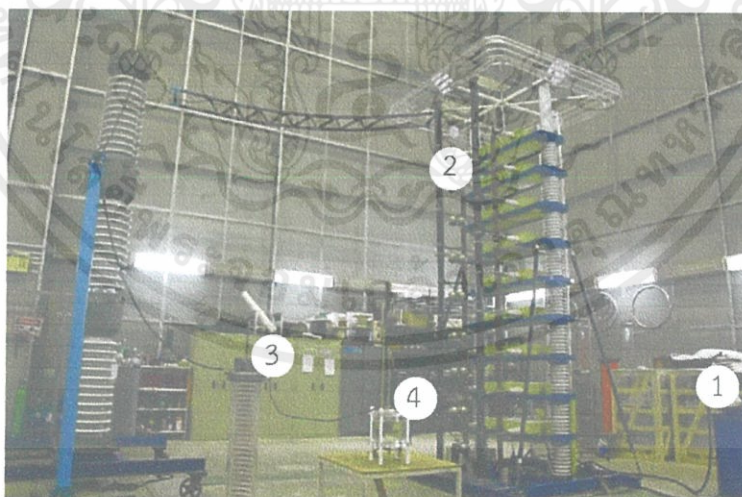
3.7.1 วงจรทดสอบ

การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิดแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงเนื่องจากการเกิดเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าผ่านอิมเพกต์เพรสบอร์ดหนา 1.6 mm ที่บรรจุอยู่ในชุดทดสอบที่ใส่น้ำมันหม้อแปลง ต่อวงจรทดสอบ ดังรูปที่ 3.19 และ 3.2 mm ที่บรรจุอยู่ในชุดทดสอบที่ใส่น้ำมันหม้อแปลง ต่อวงจรทดสอบ ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.19 วงจรทดสอบการเกิดเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าผ่านน้ำมันหม้อแปลง

1. ชุดอัดประจุ 2. เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 3. โวลต์เตจดีไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุ 4. โวลต์เตจดีไวเดอร์
5. ชุดควบคุมชุดกำเนิดอิมพัลส์ 6. ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด



รูปที่ 3.20 วงจรทดสอบการเกิดเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าผ่านอิมเพกต์เพรสบอร์ด

1. ชุดอัดประจุ 2. ชุดกำเนิดอิมพัลส์ 3. โวลต์เตจดีไวเดอร์ 4. ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด



รูปที่ 3.21 ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด

3.7.2 ขั้นตอนการทดสอบ

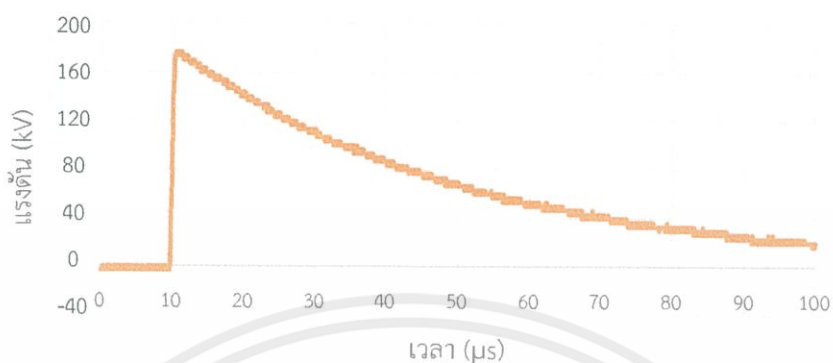
1. ต่อบางจรทดสอบตามรูปที่ 3.19 สำหรับอิมเพรเกนต์เพรสบอร์ดหนา 1.6 mm และต่อบางจรทดสอบตามรูปที่ 3.20 สำหรับอิมเพรเกนต์เพรสบอร์ดหนา 3.2 mm
2. นำเพรสบอร์ดที่อิมเพรเกนต์แล้ว ใส่ในชุดทดสอบและเติมน้ำมันหม้อแปลงลงในชุดทดสอบ
3. ตรวจสอบน้ำมันหม้อแปลงที่ถูกเทในชุดทดสอบว่ามีฟองอากาศอยู่หรือไม่ ถ้ามีฟองอากาศต้องตั้งพักชุดทดสอบทิ้งไว้ให้ฟองอากาศหายไป
4. ทำการขึ้นแรงดันด้วยอัตราการเพิ่มแรงดันคงที่ 2 kV/s จนกระทั่งเกิดการเบรกดาวนผ่านเพรสบอร์ด
5. บันทึกกราฟค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ที่อ่านได้จากออสซิลโลสโคป
6. เก็บตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงในขวดแก้วสีชาขนาด 100 mL
7. ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 2-5 แต่ทดสอบให้เกิดเบรกดาวนสะสมในน้ำมันหม้อแปลง 3 และ 5 ครั้ง ตามลำดับ โดยทุกครั้งที่เกิดเบรกดาวนต้องเปลี่ยนเพรสบอร์ดใหม่ทุกครั้ง
8. ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 3-8 แต่กลับขั้วไดโอดของวงจรทดสอบเพื่อเปลี่ยนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ขั้วบวกเป็นขั้วลบ
9. นำตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ผ่านการเบรกดาวนนี้ไปทดสอบผล DGA

3.7.3 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ใช้ในการทดสอบ

แรงดันที่ใช้ในการทดสอบใช้แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามมาตรฐาน เวลาช่วงหน้าคลื่น

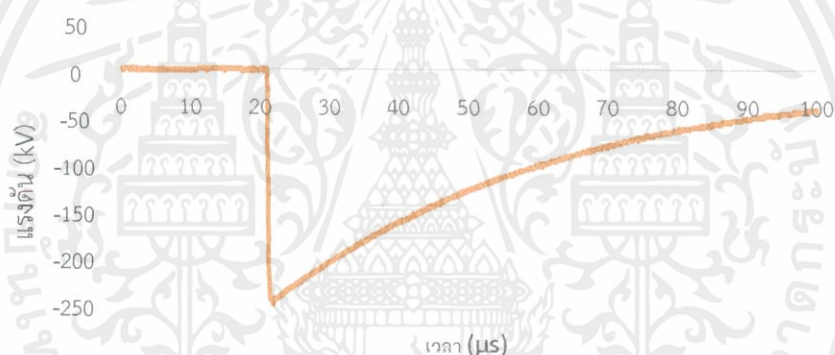
$1.2 \mu\text{s} \pm 30\%$ และเวลาช่วงหางคลื่น $50 \mu\text{s} \pm 20\%$ ดังแสดงในรูป 3.22 และ 3.23

1. แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วบวก



รูปที่ 3.22 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วบวก $1.2/50 \mu\text{s}$ ที่ใช้ในการทดสอบ

2. แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบ



รูปที่ 3.23 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบ $1.2/50 \mu\text{s}$ ที่ใช้ในการทดสอบ

บทที่ 4

การทดสอบและผลการทดสอบ

การทดสอบและผลการทดสอบแบ่งเป็น 2 ตอน ได้แก่

- 1) การแปลผลและวิเคราะห์ข้อมูลแก๊สจากหม้อแปลงของการไฟฟ้านครหลวง (MEA)
- 2) การแปลผลและวิเคราะห์ข้อมูลแก๊สจากการจำลองปัญหาที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง

4.1 ข้อมูลเบื้องต้นและการประเมินสภาพหม้อแปลง

4.1.1 ข้อมูลเบื้องต้นของหม้อแปลงไฟฟ้า

ก่อนการวิเคราะห์ข้อมูลต้องมีการรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นของหม้อแปลงไฟฟ้าจากเว็บไซต์รวมทั้งสิ้น 132 ตัว แสดงไว้ในตารางในภาคผนวก ข โดยแยกจากพิกัดกำลังและพิกัดแรงดัน ได้แก่

- 1) หม้อแปลงไฟฟ้าที่พิกัดกำลัง 40 MVA จำนวน 44 ตัวแบ่งเป็น
 - พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV จำนวน 42 ตัว
 - พิกัดแรงดัน 115/24 kV จำนวน 2 ตัว
- 2) หม้อแปลงไฟฟ้าที่พิกัดกำลัง 60 MVA จำนวน 81 ตัว แบ่งเป็น
 - พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV จำนวน 70 ตัว
 - พิกัดแรงดัน 115/24 kV จำนวน 11 ตัว
- 3) หม้อแปลงไฟฟ้าที่พิกัดกำลัง 250 MVA จำนวน 3 ตัว แบ่งเป็น
 - พิกัดแรงดัน 230/69/24 kV จำนวน 3 ตัว
- 4) หม้อแปลงไฟฟ้าที่พิกัดกำลัง 300 MVA จำนวน 4 ตัว แบ่งเป็น
 - พิกัดแรงดัน 230/69/24 kV จำนวน 2 ตัว
 - พิกัดแรงดัน 230/115/24 kV จำนวน 2 ตัว

4.1.2 การประเมินสภาพหม้อแปลง

การประเมินสภาพหม้อแปลงเป็นการจำแนกหม้อแปลงที่มีโอกาสเกิดปัญหา หรือเกิดการชำรุด โดยจะจำแนกจากค่าแก๊สที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง โดยใช้ 3 วิธี

- 1) การประเมินสภาพหม้อแปลงตามมาตรฐาน IEEE C57.104
- 2) การประเมินสภาพหม้อแปลงด้วยการทำ HI เฉพาะการทำ DGA
- 3) การประเมินสภาพหม้อแปลงด้วยปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 ในตารางที่ 2.9

หมายเหตุ การประเมินสภาพหม้อแปลงตามมาตรฐาน IEEE C57.104 ระบุเป็นระดับ 1 – 4 การประเมินสภาพหม้อแปลงด้วยการทำ HI ระบุเป็นระดับ A – E การประเมินสภาพหม้อแปลงด้วยปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 ในตารางที่ 2.9 หากค่าแก๊สตัวหนึ่งเกินจะแสดงด้วยเครื่องหมาย “√”



ตารางที่ 4.1 การประเมินสภาพหม้อแปลง

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	TDCG	HI Rating code	IEEE Condition	Limits L1
1	CHIDLUM	CLT-TR-1	30/40	69/12	24	63	0.5	12	238	162	2395	499.5	C	3	✓
2	BANGBON	BB-TR-3	30/40	69/24-12	29	58	0	8	194	87	2387	376	C	3	✓
3	BANGKRACHAO	BC-TR-1	30/40	69/24-12	49	35	1.5	30	21	570	3392	706.5	A	2	
4	BANGKRACHAO	BC-TR-2	30/40	69/24-12	16	7	0.5	48	16	375	2860	462.5	A	2	
5	BANGKLO	BL-TR-1	30/40	69/24-12	7	20	0	6	12	552	3533	597	A	2	
6	BANGKLO	BL-TR-2	30/40	69/24-12	9	77	0	31	849	206	2119	1172	D	3	✓
7	BANGKHOONPROM	BR-TR-1	30/40	69/24-12	10	124	0	12	326	226	2905	698	D	3	✓
8	BANGKHOONPROM	BR-TR-2	30/40	69/24-12	13	96	0	8	266	156	2908	539	D	3	✓
9	BANGKHOONPROM	BR-TR-3	30/40	69/24-12	14	73	0.5	21	200	125	2027	433.5	C	3	
10	KLONGSAN	KN-TR-1	30/40	69/24-12	74	257	0	29	640	247	7821	1247	D	3	✓
11	KLONGSAN	KN-TR-2	30/40	69/24-12	70	209	0	35	739	170	5664	1223	D	3	✓
12	KLONGSANAMCHAI	KSC-TR-3	30/40	69/24-12	16	14	0	17	9	580	5986	636	B	2	
13	KLONGTOEY	KT-TR-1	30/40	69/24-12	13	63	0	10	256	156	2946	498	C	3	✓
14	KLONGTOEY	KT-TR-2	30/40	69/24-12	19	115	0.5	37	295	176	2959	642.5	D	3	✓
15	MAHAMEK	MM-TR-1	30/40	69/24-12	14	64	1	23	124	376	3365	602	C	3	✓

ตารางที่ 4.1(ต่อ) การประเมินสภาพหม้อแปลง

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	TDCG	HI Rating code	IEEE Condition	Limits L1
16	MAHAISAWAN	MN-TR-1	30/40	69/24-12	50	88	0	47	215	205	3577	605	D	3	✓
17	MAHAISAWAN	MN-TR-2	30/40	69/24-12	40	60	0.5	18	299	143	1858	560.5	C	3	✓
18	NANGLERNG	NLG-TR-1	30/40	69/24-12	5	5	0	5	6	54	1385	75	A	1	
19	NANGLERNG	NLG-TR-2	30/40	69/24-12	23	82	0	11	161	196	3036	473	D	3	✓
20	NANGLERNG	NLG-TR-3	30/40	69/24-12	5	20	0	9	8	484	2976	526	A	2	
21	PRAPRADANG	PD-TR-2	30/40	69/24-12	53	92	1	7	112	188	1953	453	C	3	✓
22	PRAPRADANG	PD-TR-3	30/40	69/24-12	12	28	1.5	14	132	480	1860	667.5	C	3	✓
23	PRAKANONG	PK-TR1	30/40	69/24-12	84	70	0.5	22	22	581	5799	779.5	B	2	
24	PATHUMWAN	PM-TR3	30/40	69/24-12	40	100	2	96	180	260	3203	678	D	3	✓
25	RASBURANA	RN-TR3	30/40	69/24-12	5	56	0	66	154	744	9094	1025	D	3	✓
26	SAPANDUM	SD-TR1	30/40	69/24-12	11	27	8	34	161	367	5610	608	D	3	✓
27	SAPANDUM	SD-TR2	30/40	69/24-12	15	18	7.5	49	29	335	3112	453.5	C	3	✓
28	SAPANDUM	SD-TR3	30/40	69/24-12	23	113	0	82	142	175	2791	535	D	3	✓
29	SAPANDUM	SD-TR4	30/40	69/24-12	13	24	1	63	23	300	3421	424	B	2	
30	SURAWONG	SU-TR1	30/40	69/24-12	12	84	0	25	92	274	6688	487	C	2	✓

ตารางที่ 4.1(ต่อ) การประเมินสภาพหม้อแปลง

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	TDCG	HI Rating code	IEEE Condition	Limits L1
31	SURAWONG	SU-TR2	30/40	69/24-12	7	79	0	17	638	93	1523	834	D	3	V
32	SURAWONG	SU-TR3	30/40	69/24-12	32	43	1	33	282	64	1283	455	C	3	V
33	SIPRAYA	SY-TR1	30/40	69/24-12	44	120	5	78	74	507	4763	828	D	3	V
34	SIPRAYA	SY-TR2	30/40	69/24-12	10	137	1.5	109	411	170	2378	838.5	D	3	V
35	THONBURI	TR-1	30/40	69/24-12	16	88	0.5	11	353	154	1317	622.5	D	3	V
36	TAKSIN	TR-1	30/40	69/24-12	7	7	0.5	49	23	217	2350	303.5	A	1	
37	TAKSIN	TR-2	30/40	69/24-12	5	3	0.5	8	14	39	483	69.5	A	1	
38	TANONTOK	TR-3	30/40	69/24-12	5	4	0	12	9	61	545	91	A	1	
39	WATLIEB	TR-1	30/40	69/24-12	15	81	0.5	8	64	136	2808	304.5	B	2	V
40	WATLIEB	TR-2	30/40	69/24-12	19	56	0.5	6	49	143	2748	273.5	A	2	
41	WATLIEB	TR-3	30/40	69/24-12	11	53	0	6	44	148	1777	252.5	A	1	
42	WATPRACHABAMRUNG	TR-1	30/40	69/24-12	30	35	0.5	37	50	511	6665	663.5	B	2	
43	THAWEEWATTANA	TR-1	30/40	115/24	5	70	1	15	208	507	2474	806	C	3	V
44	THAWEEWATTANA	TR-2	30/40	115/24	5	14	0	4	26	202	1959	251	A	1	
45	BANGBON	BB-TR-1	36/48/60	69/24-12	5	2	0	3	1	73	238	84	A	1	

ตารางที่ 4.1(ต่อ) การประเมินสภาพหม้อแปลง

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	TDCG	HI Rating code	IEEE Condition	Limits L1
46	BANGBON	BB-TR-2	36/48/60	69/24-12	5	2	0.5	1	1	52	303	61.5	A	1	
47	BANGPRAKOD	BK-TR-1	36/48/60	69/24-12	19	118	1	12	544	148	2495	842	D	3	✓
48	BANGPRAKOD	BK-TR-2	36/48/60	69/24-12	38	161	0	12	468	207	1997	886	D	3	✓
49	BANGPRAKOD	BK-TR-3	36/48/60	69/24-12	11	114	1.5	17	272	216	1713	631.5	D	3	✓
50	BANGKRADEE	BKD-TR-1	36/48/60	69/24-12	46	66	0	13	158	173	2032	456	C	3	✓
51	BANGMOD	BM-TR-1	36/48/60	69/24-12	5	6	0	2	4	53	854	70	A	1	
52	BANGMOD	BM-TR-2	36/48/60	69/24-12	36	18	0.5	16	14	266	2854	350.5	A	2	
53	BANGKOKNOI	BOT-TR-1	36/48/60	69/24-12	37	41	0	5	177	86	1566	346	C	3	✓
54	BANGKOKNOI	BOT-TR-2	36/48/60	69/24-12	54	44	1	10	176	76	1376	361	C	3	✓
55	BANGKOKNOI	BOT-TR-3	36/48/60	69/24-12	26	43	1	8	98	83	2357	259	B	1	✓
56	JANGRON	JRN-TR-1	36/48/60	69/24-12	20	59	1	28	149	340	2812	597	C	2	✓
57	JANGRON	JRN-TR-2	36/48/60	69/24-12	10	87	1	12	343	161	1138	614	D	3	✓
58	KLONGSANPASAMIT	KS-TR-1	36/48/60	69/24-12	29	36	1.5	11	96	196	2915	369.5	B	1	✓
59	KLONGSANPASAMIT	KS-TR-2	36/48/60	69/24-12	14	21	0	7	112	259	3403	413	C	2	✓
60	KLONGSANAMCHAI	KSC-TR-1	36/48/60	69/24-12	17	73	1.5	7	145	83	2083	326.5	C	2	✓

ตารางที่ 4.1(ต่อ) การประเมินสภาพหม้อแปลง

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	TDCG	HI Rating code	IEEE Condition	Limits L1
61	KLONGSANAMCHAI	KSC-TR-2	36/48/60	69/24-12	12	16	0.5	7	19	127	1727	181.5	A	1	
62	KRUNAI	KU-TR-1	36/48/60	69/24-12	5	2	2	2	1	95	1679	107	A	2	
63	KRUNAI	KU-TR-2	36/48/60	69/24-12	5	14	2.5	3	1	66	1431	91.5	A	2	
64	KLONGWATSING	KWS-TR-1	36/48/60	69/24-12	11	162	0	38	1065	207	2188	1483	D	3	✓
65	KLONGWATSING	KWS-TR-2	36/48/60	69/24-12	11	166	2.5	25	699	194	1673	1097.5	D	3	✓
66	LUMPINI	LN-TR-4	36/48/60	69/24-12	12	58	0.5	12	23	817	5209	922.5	B	2	✓
67	LADYA	LYA-TR-1	36/48/60	69/24-12	5	11	0.5	6	3	467	1838	492.5	A	2	
68	LADYA	LYA-TR-2	36/48/60	69/24-12	5	15	1.5	6	15	749	3845	791.5	B	2	✓
69	MAHAMEK	MM-TR-2	36/48/60	69/24-12	6	8	0.5	3	3	144	495	164.5	A	1	
70	MAHAMEK	MM-TR-3	36/48/60	69/24-12	6	6	1.5	2	4	169	522	188.5	A	1	
71	NONGKHAM	NH-TR-1	36/48/60	69/24-12	12	14	0	3	12	499	3800	540	A	2	
72	NONGKHAM	NH-TR-2	36/48/60	69/24-12	82	63	0	56	20	878	9658	1099	C	2	✓
73	NONSEE	NS-TR-1	36/48/60	69/24-12	5	16	0.5	5	6	463	1414	495.5	A	2	
74	NONSEE	NS-TR-2	36/48/60	69/24-12	5	9	1	2	5	358	829	380	A	2	
75	PRAPRADANG	PD-TR-1	36/48/60	69/24-12	12	37	0.5	12	1	505	5795	567.5	B	2	

ตารางที่ 4.1(ต่อ) การประเมินสภาพหม้อแปลง

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	TDCG	HI Rating code	IEEE Condition	Limits L1
76	PHAISINGTO	PI-TR1	36/48/60	69/24-12	79	37	2.5	1	26	667	7918	812.5	B	2	✓
77	PHAISINGTO	PI-TR2	36/48/60	69/24-12	21	67	0	1	53	1010	10625	1152	B	2	✓
78	PHAISINGTO	PI-TR3	36/48/60	69/24-12	9	37	0.5	4	21	711	7268	782.5	B	2	✓
79	PHAISINGTO	PI-TR4	36/48/60	69/24-12	29	19	1.5	11	9	1158	4747	1227.5	B	2	✓
80	PRAKANONG	PK-TR2	36/48/60	69/24-12	17	40	0.5	9	14	402	3894	482.5	A	2	
81	PATHUMWAN	PM-TR1	36/48/60	69/24-12	64	2	0.5	11	9	173	2645	259.5	A	2	
82	PATHUMWAN	PM-TR2	36/48/60	69/24-12	8	14	0.5	23	7	593	2247	645.5	A	2	
83	RASBURANA	RN-TR1	36/48/60	69/24-12	3	2	0	8	7	134	428	154	A	1	
84	RASBURANA	RN-TR2	36/48/60	69/24-12	1	6	0	4	12	152	459	175	A	1	
85	SAINAMTHIP	SA-TR1	36/48/60	69/24-12	26	101	0.5	11	247	316	3954	701.5	D	3	✓
86	SAINAMTHIP	SA-TR2	36/48/60	69/24-12	23	99	0.5	10	340	231	2895	703.5	D	3	✓
87	SILOM	SL-TR1	36/48/60	69/24-12	56	15	1.5	12	6	340	4377	430.5	A	2	
88	SILOM	SL-TR2	36/48/60	69/24-12	16	14	0	17	9	580	5986	636	B	2	
89	SURASAK	SRK-TR1	36/48/60	69/24-12	25	45	1.5	1	118	87	1225	277.5	C	2	✓
90	SURASAK	SRK-TR2	36/48/60	69/24-12	35	43	0.5	9	139	79	1600	305.5	C	2	✓

ตารางที่ 4.1(ต่อ) การประเมินสภาพหม้อแปลง

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	TDCG	HI Rating code	IEEE Condition	Limits L1
91	SOUTH THONBURI	STT-TR1	36/48/60	69/24-12	33	81	0	14	323	171	2386	622	D	3	✓
92	SOUTH THONBURI	STT-TR2	36/48/60	69/24-12	9	126	1.5	14	643	147	2272	940.5	D	3	✓
93	SOUTH THONBURI	STT-TR3	36/48/60	69/24-12	46	43	1.5	10	19	706	5362	825.5	B	2	✓
94	THONBURI	TR-2	36/48/60	69/24-12	65	72	1	6	76	465	4977	685	B	2	✓
95	THONBURI	TR-3	36/48/60	69/24-12	11	153	0.5	15	619	151	1201	949.5	D	3	✓
96	TANONTOK	TR-1	36/48/60	69/24-12	5	163	2	25	867	200	3164	1262	D	3	✓
97	TANONTOK	TR-2	36/48/60	69/24-12	5	120	0.5	17	457	202	3786	801.5	D	3	✓
98	THONBURIROM	TR-1	36/48/60	69/24-12	15	99	0.5	11	200	287	3551	612.5	D	3	✓
99	THONBURIROM	TR-2	36/48/60	69/24-12	26	161	0	48	1347	249	2855	1831	D	3	✓
100	WANGPETCHABOON	TR-1	36/48/60	69/24-12	29	14	1	6	10	601	4041	661	B	2	
101	WANGPETCHABOON	TR-2	36/48/60	69/24-12	81	45	5	35	26	929	7431	1121	C	2	✓
102	WANGPETCHABOON	TR-3	36/48/60	69/24-12	13	42	0.5	1	15	165	5938	236.5	B	2	
103	WATKAMPANG	TR-1	36/48/60	69/24-12	32	43	2	23	18	552	11182	670	B	3	✓
104	WATKAMPANG	TR-2	36/48/60	69/24-12	14	20	0	3	46	634	11706	717	B	3	✓
105	YENARKART	TR-1	36/48/60	69/24-12	34	26	3	8	33	63	3953	167	A	2	

ตารางที่ 4.1(ต่อ) การประเมินสภาพหม้อแปลง

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	TDCG	HI Rating code	IEEE Condition	Limits L1
106	YENARKART	TR-2	36/48/60	69/24-12	43	17	0.5	5	12	663	4391	740.5	B	2	
107	YENARKART	TR-3	36/48/60	69/24-12	36	16	2.5	6	12	703	4353	775.5	B	2	V
108	CHIDLOM	CLT-TR-2	36/48/60	69/12	13	68	0	13	144	128	1263	366	C	2	V
109	LUMPINI	LN-TR-1	36/48/60	69/24	6	12	0	6	8	567	2219	599	A	2	
110	LUMPINI	LN-TR-2	36/48/60	69/24	10	19	0.5	7	7	548	2133	591.5	A	2	
111	LUMPINI	LN-TR-3	36/48/60	69/24	13	13	0	7	10	533	2388	576	A	2	
112	MAHASAWAN	MN-TR-3	36/48/60	69/24	38	35	0	11	302	33	1310	419	C	3	V
113	WATKUSANG	TR-1	36/48/60	69/24	5	3	0.5	2	2	104	287	116.5	A	1	
114	WATKUSANG	TR-2	36/48/60	69/24	5	1	0.5	2	7	109	464	124.5	A	1	
115	BANGPONGPANG	BPP-TR-1	36/48/60	115/24-12	5	21	0.5	4	8	443	2043	481.5	A	2	
116	BANGPONGPANG	BPP-TR-2	36/48/60	115/24-12	5	11	0.5	2	7	294	860	319.5	A	1	
117	EKACHAI	EKC-TR-1	36/48/60	115/24-12	11	24	0.5	6	15	220	7150	276.5	B	2	V
118	SAMYAN	SAM-TR1	36/48/60	115/24-12	5	12	0	13	14	251	2188	295	A	1	
119	SAMYAN	SAM-TR2	36/48/60	115/24-12	5	4	0	4	8	311	786	332	A	1	
120	EKACHAI	EKC-TR-2	36/48/60	115/24	5	14	0	4	14	578	2796	615	A	2	

ตารางที่ 4.1(ต่อ) การประเมินสภาพหม้อแปลง

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	TDCG	HI Rating code	IEEE Condition	Limits L1
121	SAMYAN	SAM-TR3	36/48/60	115/24	45	74	0.5	4	45	311	3150	479.5	A	2	
122	SRIWIANG	SWG-TR1	36/48/60	115/24	5	20	0.5	6	1	332	2117	364.5	A	1	
123	SRIWIANG	SWG-TR2	36/48/60	115/24	5	11	0.5	3	10	229	1517	258.5	A	1	
124	YANNAWA	TR-1	36/48/60	115/24	5	4	0	6	9	347	846	371	A	1	
125	YANNAWA	TR-2	36/48/60	115/24	5	4	1	4	9	432	1242	455	A	2	
126	CHIDLOM	CLT-TX-3	150/200/250	230/69/24	25	12	0.5	7	5	545	2929	594.5	A	2	
127	TANONTOK	TX-2	150/200/250	230/69/24	55	53	5.5	64	18	1024	4753	1219.5	C	3	√
128	TANONTOK	TX-3	150/200/250	230/69/24	21	13	2	9	6	565	3810	616	A	2	
129	CHIDLOM	CLT-TX-1	180/240/300	230/69/24	3	126	2.5	133	50	406	4686	720.5	D	3	√
130	CHIDLOM	CLT-TX-2	180/240/300	230/69/24	1	37	0	7	23	337	2771	405	A	1	
131	TANONTOK	TX-1	150/240/300	230/115/24	27	23	1	4	9	428	1819	492	A	2	
132	TANONTOK	TX-4	180/240/300	230/115/24	9	23	1.5	3	7	341	1428	384.5	A	2	

4.2 การแปลผลแก๊สด้วยวิธีการตามมาตรฐานและไม่อยู่ในมาตรฐาน

4.2.1 การแปลผลแก๊สและวิเคราะห์ด้วยวิธีการ Doernenburg Ratio และ Roger Ratio

1. ขั้นตอนการแปลผลด้วยวิธีการ Doernenburg Ratio และ Roger Ratio

1) ทั้ง 2 วิธีจะมีตรวจสอบข้อมูลก่อนการแปลผล โดยมีเงื่อนไขดังนี้

- จะต้องมีค่าแก๊ส อย่างน้อย 1 ชนิด ซึ่งได้แก่ H_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 และ C_2H_6 จะต้องมีค่าสูงกว่า 2 เท่าของค่า L1 และค่าแก๊ส CO มีค่าสูงกว่าค่า L1 (ดูค่า L1 ในตารางที่ 2.10) หากผ่านเงื่อนไขในข้อนี้แสดง ว่ามีความเป็นไปได้ที่หม้อแปลงจะเกิดความผิดปกติขึ้น ให้ตรวจสอบในเงื่อนไขต่อไปแต่ถ้าไม่ผ่านเงื่อนไขดังกล่าวจะถือว่าไม่เกิดปัญหาขึ้นในหม้อแปลง (No fault)
- ตรวจสอบว่าอัตราส่วนใช้งานได้หรือไม่ โดยต้องตรวจสอบว่า แก๊สชนิดใดชนิดหนึ่งในแต่ละอัตราส่วน (R1, R2, R3, R4 สำหรับวิธี Doernenburg Ratio และ R1, R2, R5 สำหรับวิธี Roger Ratio) จะต้องมีค่าสูงกว่าค่า L1 (ดูค่า L1 ในตารางที่ 2.10) หากไม่ผ่านเงื่อนไขนี้ ให้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันใหม่ (Resample)

2) เมื่อผ่านทั้ง 2 เงื่อนไขแล้ว จึงสามารถทำการแปลผลด้วยวิธีการ Doernenburg Ratio และ Roger Ratio

2. การแปลผล

จากการตรวจสอบพบว่าข้อมูลผ่านเงื่อนไขทั้ง 2 ข้อ เพียงชุดเดียวได้แก่ หม้อแปลงพิกัดกำลัง 180/ 240/300 MW พิกัดแรงดัน 230/69/24 kV ที่เขตชิดลม (CLT-TX-1) ได้ผลการแปลด้วยวิธี Doernenburg Ratio และ Roger Ratio ดังตารางที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ การตรวจสอบเงื่อนไขแสดงไว้ในภาคผนวก ค

ตารางที่ 4.2 การคำนวณอัตราส่วนและการแปลผลด้วยวิธีการ Doernenburg Ratio

TR	R1 (CH_4/H_2)	R2 (C_2H_2/C_2H_4)	R3 (C_2H_2/CH_4)	R4 (C_2H_6/C_2H_2)	Result
CLT-TX-1	42.00	0.02	0.02	20.00	Thermal Decomposition

ตารางที่ 4.3 การคำนวณอัตราส่วนและการแปลผลด้วยวิธีการ Roger Ratio

TR	R1 (CH_4/H_2)	R2 (C_2H_2/C_2H_4)	R5 (C_2H_4/C_2H_6)	Result
CLT-TX-1	42.00	0.02	2.66	Thermal < 700°C

3. การวิเคราะห์การแปลผลด้วยวิธี Doernenburg Ratio และ Roger Ratio

จากการแปลผลด้วย Doernenburg Ratio และ Roger Ratio เมื่อพิจารณาเงื่อนไขก่อนการแปลผลอย่างละเอียด ทำให้เหลือหม้อแปลง 1 ตัว จาก 132 ตัว ที่ผ่านเงื่อนไข จึงทำการพิจารณาแค่เงื่อนไขค่าแก๊สตัวใดตัวหนึ่งว่าเกิน 2 เท่าของ L1 หรือไม่ เท่านั้น จากนั้นทำการแปลผลด้วยวิธี Doernenburg Ratio และ Roger Ratio ได้ผลดังตารางที่ 4.4 พบว่าวิธีการของ Doernenburg Ratio ส่วนใหญ่ระบุปัญหาของหม้อแปลงว่า เกิดปัญหาที่เกี่ยวข้องกับความร้อน (Thermal) คิดเป็น 36.36% ของหม้อแปลงทั้งหมด ส่วนวิธี Roger Ratio ส่วนใหญ่ไม่สามารถระบุปัญหาได้ (Unknown) เนื่องจากอัตราส่วนแก๊สไม่เข้ากับเงื่อนไข ส่วนที่ตรงกับเงื่อนไขก็จะระบุว่าเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 700°C

เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่าง 2 วิธีจะเห็นข้อเสียของวิธีการ Roger Ratio นั่นคือหากค่าอัตราส่วนที่คำนวณออกมาไม่ตรงกับเงื่อนไขจะไม่สามารถบอกปัญหาใดๆ ได้เลย แต่การแปลผลด้วยวิธี Doernenburg Ratio ถึงแม้ว่าจะจำแนกปัญหาได้ไม่ละเอียดเท่าวิธี Roger Ratio แต่เงื่อนไขของค่าอัตราส่วนจะครอบคลุมมากกว่า (สามารถแปลผลได้) วิธี Roger Ratio



ตารางที่ 4.4 การแปลผลด้วยวิธี Doernenburg Ratio และ Roger Ratio เมื่อพิจารณาเพียงเงื่อนไขค่าแก๊ส

No	SUB	Rated Power	Rated Voltage	TR	Doernenburg Ratio						Roger Ratio			
					R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R5	Result	
1	CHIDLOM	30/40	69/12	CLT-TR-1	2.63	0.04	0.01	476			2.63	0.04	0.05	Unknown
2	BANGBON	30/40	69/24-12	BB-TR-3	2.00	0.00	0.00	-			2.00	0.00	0.04	Unknown
3	BANGKLO	30/40	69/24-12	BL-TR-2	8.56	0.00	0.00	-			8.56	0.00	0.04	Unknown
4	BANGKHOONPROM	30/40	69/24-12	BR-TR-1	12.40	0.00	0.00	-			12.40	0.00	0.04	Unknown
5	BANGKHOONPROM	30/40	69/24-12	BR-TR-2	7.38	0.00	0.00	-			7.38	0.00	0.03	Unknown
6	BANGKHOONPROM	30/40	69/24-12	BR-TR-3	5.21	0.02	0.01	400			5.21	0.02	0.11	Unknown
7	KLONGSAN	30/40	69/24-12	KN-TR-1	3.47	0.00	0.00	-			3.47	0.00	0.05	Unknown
8	KLONGSAN	30/40	69/24-12	KN-TR-2	2.99	0.00	0.00	-			2.99	0.00	0.05	Unknown
9	KLONGTOEY	30/40	69/24-12	KT-TR-1	4.85	0.00	0.00	-			4.85	0.00	0.04	Unknown
10	KLONGTOEY	30/40	69/24-12	KT-TR-2	6.05	0.01	0.00	590			6.05	0.01	0.13	Unknown
11	MAHAISAWAN	30/40	69/24-12	MN-TR-1	1.76	0.00	0.00	-			1.76	0.00	0.22	Unknown
12	MAHAISAWAN	30/40	69/24-12	MN-TR-2	1.50	0.03	0.01	598			1.50	0.03	0.06	Unknown
13	NANGLERNG	30/40	69/24-12	NILG-TR-2	3.57	0.00	0.00	-			3.57	0.00	0.07	Unknown
14	PRAPRADANG	30/40	69/24-12	PD-TR-3	2.33	0.11	0.05	88			2.33	0.11	0.11	Unknown
15	PATHUMWAN	30/40	69/24-12	PM-TR3	2.50	0.02	0.02	90			2.50	0.02	0.53	Unknown

ตารางที่ 4.4(ต่อ) การแปลผลด้วยวิธี Doernenburg Ratio และ Roger Ratio เมื่อพิจารณาเพียงเงื่อนไขค่าแก๊ส

No	SUB	Rated Power	Rated Voltage	TR	Doernenburg Ratio						Roger Ratio		
					R1	R2	R3	R4	Result	R1	R2	R5	Result
16	RASBURANA	30/40	69/24-12	RN-TR3	11.20	0.00	0.00	-	Thermal	11.20	0.00	0.43	Unknown
17	SAPANDUM	30/40	69/24-12	SD-TR1	2.45	0.24	0.30	20	Thermal	2.45	0.24	0.21	Unknown
18	SAPANDUM	30/40	69/24-12	SD-TR2	1.20	0.15	0.42	4	Resample	1.20	0.15	1.69	Unknown
19	SAPANDUM	30/40	69/24-12	SD-TR3	4.91	0.00	0.00	-	Thermal	4.91	0.00	0.58	Unknown
20	SURAWONG	30/40	69/24-12	SU-TR2	11.29	0.00	0.00	-	Thermal	11.29	0.00	0.03	Unknown
21	SURAWONG	30/40	69/24-12	SU-TR3	1.34	0.03	0.02	282	Thermal	1.34	0.03	0.12	Unknown
22	SIPRAYA	30/40	69/24-12	SY-TR1	2.73	0.06	0.04	15	Thermal	2.73	0.06	1.05	Thermal <700C
23	SIPRAYA	30/40	69/24-12	SY-TR2	13.70	0.01	0.01	274	Thermal	13.70	0.01	0.27	Unknown
24	THONBURI	30/40	69/24-12	TB-TR-1	5.50	0.05	0.01	706	Thermal	5.50	0.05	0.03	Unknown
25	THAWEEWATTANA	30/40	115/24	TWN-TR-1	14.00	0.07	0.01	208	Thermal	14.00	0.07	0.07	Unknown
26	BANGPRAKOD	36/48/60	69/24-12	BK-TR-1	6.21	0.08	0.01	544	Thermal	6.21	0.08	0.02	Unknown
27	BANGPRAKOD	36/48/60	69/24-12	BK-TR-2	4.24	0.00	0.00	-	Thermal	4.24	0.00	0.03	Unknown
28	BANGPRAKOD	36/48/60	69/24-12	BK-TR-3	10.36	0.09	0.01	181	Thermal	10.36	0.09	0.06	Unknown
29	BANGKRADEE	36/48/60	69/24-12	BKD-TR-1	1.43	0.00	0.00	-	Thermal	1.43	0.00	0.08	Unknown
30	BANGKOKNOI	36/48/60	69/24-12	BOT-TR-1	1.11	0.00	0.00	-	Thermal	1.11	0.00	0.03	Unknown

ตารางที่ 4.4(ต่อ) การแปลผลด้วยวิธี Doernenburg Ratio และ Roger Ratio เมื่อพิจารณาเพียงเงื่อนไขค่าแก๊ส

No	SUB	Rated Power	Rated Voltage	TR	Doernenburg Ratio						Roger Ratio		
					R1	R2	R3	R4	Result	R1	R2	R5	Result
31	BANGKOKNOI	36/48/60	69/24-12	BOT-TR-2	0.81	0.10	0.02	176	Thermal	0.81	0.10	0.06	Unknown
32	JANGRON	36/48/60	69/24-12	JRN-TR-1	2.95	0.04	0.02	149	Thermal	2.95	0.04	0.19	Unknown
33	JANGRON	36/48/60	69/24-12	JRN-TR-2	8.70	0.08	0.01	343	Thermal	8.70	0.08	0.03	Unknown
34	KLONGSANAMCHAI	36/48/60	69/24-12	KSC-TR-1	4.29	0.21	0.02	97	Thermal	4.29	0.21	0.05	Unknown
35	KRUNAI	36/48/60	69/24-12	KU-TR-2	2.80	0.83	0.18	0	Thermal	2.80	0.83	3.00	Unknown
36	KLONGWATSING	36/48/60	69/24-12	KWS-TR-1	14.73	0.00	0.00	-	Thermal	14.73	0.00	0.04	Unknown
37	KLONGWATSING	36/48/60	69/24-12	KWS-TR-2	15.09	0.10	0.02	280	Thermal	15.09	0.10	0.04	Unknown
38	PHAISINGTO	36/48/60	69/24-12	PI-TR1	0.47	2.50	0.07	10	Resample	0.47	2.50	0.04	Unknown
39	SAINAMTHIP	36/48/60	69/24-12	SA-TR1	3.88	0.05	0.00	494	Thermal	3.88	0.05	0.04	Unknown
40	SAINAMTHIP	36/48/60	69/24-12	SA-TR2	4.30	0.05	0.01	680	Thermal	4.30	0.05	0.03	Unknown
41	SURASAK	36/48/60	69/24-12	SRK-TR2	1.23	0.06	0.01	278	Thermal	1.229	0.056	0.065	Unknown
42	SOUTH THONBURI	36/48/60	69/24-12	STT-TR1	2.45	0.00	0.00	-	Thermal	2.455	0.000	0.043	Unknown
43	SOUTH THONBURI	36/48/60	69/24-12	STT-TR2	14.00	0.11	0.01	429	Thermal	14.000	0.107	0.022	Unknown
44	THONBURI	36/48/60	69/24-12	TB-TR-3	13.91	0.03	0.00	1238	Thermal	13.909	0.033	0.024	Unknown
45	TANONTOK	36/48/60	69/24-12	TTT-TR-1	32.60	0.08	0.01	434	Thermal	32.600	0.080	0.029	Unknown

ตารางที่ 4.4(ต่อ) การแปลผลด้วยวิธี Doernenburg Ratio และ Roger Ratio เมื่อพิจารณาเพียงเงื่อนไขค่าแก๊ส

No	SUB	Rated Power	Rated Voltage	TR	Doernenburg Ratio						Roger Ratio			
					R1	R2	R3	R4	Result	R1	R2	R5	Result	
46	TANONTOK	36/48/60	69/24-12	TTT-TR-2	24.00	0.03	0.00	914	Thermal	24.000	0.029	0.037	Unknown	
47	THONBURIROM	36/48/60	69/24-12	TBR-TR-1	6.60	0.05	0.01	400	Thermal	6.600	0.045	0.055	Unknown	
48	THONBURIROM	36/48/60	69/24-12	TBR-TR-2	6.19	0.00	0.00	-	Thermal	6.192	0.000	0.036	Unknown	
49	WANGPETCHABOON	36/48/60	69/24-12	WB-TR-2	0.56	0.14	0.11	5	Resample	0.556	0.143	1.346	Unknown	
50	WATKAMPANG	36/48/60	69/24-12	WKP-TR-1	1.34	0.09	0.05	9	Thermal	1.344	0.087	1.278	Thermal <700C	
51	YENARKART	36/48/60	69/24-12	YN-TR-1	0.76	0.38	0.12	11	Resample	0.765	0.375	0.242	Unknown	
52	YENARKART	36/48/60	69/24-12	YN-TR-3	0.44	0.42	0.16	5	Resample	0.444	0.417	0.500	Unknown	
53	TANONTOK	150/200/250	230/69/24	TTT-TX-2	0.96	0.09	0.10	3	Resample	0.964	0.086	3.556	Unknown	
54	TANONTOK	150/200/250	230/69/24	TTT-TX-3	0.62	0.22	0.15	3	Resample	0.619	0.222	1.500	Unknown	
55	CHIDLUM	180/240/300	230/69/24	CLT-TX-1	42.00	0.02	0.02	20	Thermal	42.000	0.019	2.660	Thermal <700C	

4.2.2 การแปลผลแก๊สด้วยวิธีการ Key Gas

1. ขั้นตอนการแปลผล

- 1) ทำการคำนวณปริมาณแก๊สเป็นเปอร์เซ็นต์
- 2) พิจารณาแก๊สที่เป็น Key Gas ของปัญหานั้น ประกอบกับพิจารณาแก๊สที่เกิดร่วมกัน
- 3) หากเปอร์เซ็นต์ของแก๊สมีค่าเท่าๆ กัน หรือไม่มีแก๊สใดที่มีเปอร์เซ็นต์ที่โดดเด่น จะถือว่าไม่สามารถระบุปัญหาที่เกิดขึ้นได้

2. ผลการแปลค่าแก๊สด้วยวิธี Key Gas

ผลการแปลค่าแก๊สด้วยวิธี Key Gas แสดงไว้ในตารางที่ 4.5 และ ตารางที่ 4.6



ตารางที่ 4.5 ผลการแปลผลด้วยวิธีการ Key Gas (IEEE)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	Percent of Gas intensity						Result
					H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	
1	CHIDLOM	CLT-TR-1	30/40	69/12	4.81	12.63	0.10	2.40	47.70	32.46	Unidentified
2	BANGBON	BB-TR-3	30/40	69/24-12	7.71	15.43	0.00	2.13	51.60	23.14	Unidentified
3	BANGKRACHAO	BC-TR-1	30/40	69/24-12	6.95	4.96	0.21	4.26	2.98	80.85	Thermal Cellulose
4	BANGKRACHAO	BC-TR-2	30/40	69/24-12	3.46	1.52	0.11	10.39	3.46	81.17	Thermal Cellulose
5	BANGKLO	BL-TR-1	30/40	69/24-12	1.17	3.35	0.00	1.01	2.01	92.46	Thermal Cellulose
6	BANGKLO	BL-TR-2	30/40	69/24-12	0.77	6.57	0.00	2.65	72.44	17.58	Unidentified
7	BANGKHOONPROM	BR-TR-1	30/40	69/24-12	1.43	17.77	0.00	1.72	46.70	32.38	Unidentified
8	BANGKHOONPROM	BR-TR-2	30/40	69/24-12	2.41	17.81	0.00	1.48	49.35	28.94	Unidentified
9	BANGKHOONPROM	BR-TR-3	30/40	69/24-12	3.23	16.86	0.12	4.85	46.19	28.87	Unidentified
10	KLONGSAN	KN-TR-1	30/40	69/24-12	5.93	20.61	0.00	2.33	51.32	19.81	Unidentified
11	KLONGSAN	KN-TR-2	30/40	69/24-12	5.72	17.09	0.00	2.86	60.43	13.90	Unidentified
12	KLONGSANAMCHAI	KSC-TR-3	30/40	69/24-12	2.52	2.20	0.00	2.67	1.42	91.19	Thermal Cellulose
13	KLONGTOEY	KT-TR-1	30/40	69/24-12	2.61	12.65	0.00	2.01	51.41	31.33	Unidentified
14	KLONGTOEY	KT-TR-2	30/40	69/24-12	2.96	17.90	0.08	5.76	45.91	27.39	Unidentified
15	MAHAMEK	MM-TR-1	30/40	69/24-12	2.33	10.63	0.17	3.82	20.60	62.46	Thermal Cellulose

ตารางที่ 4.5(ต่อ) ผลการแปลผลด้วยวิธีการ Key Gas (IEEE)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	Percent of Gas intensity						Result
					H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	
16	MAHAISAWAN	MN-TR-1	30/40	69/24-12	8.26	14.55	0.00	7.77	35.54	33.88	Thermal Cellulose
17	MAHAISAWAN	MN-TR-2	30/40	69/24-12	7.14	10.70	0.09	3.21	53.35	25.51	Unidentified
18	NANGLERNG	NLG-TR-2	30/40	69/24-12	4.86	17.34	0.00	2.33	34.04	41.44	Unidentified
19	NANGLERNG	NLG-TR-3	30/40	69/24-12	0.95	3.80	0.00	1.71	1.52	92.02	Thermal Cellulose
20	PRAPRADANG	PD-TR-2	30/40	69/24-12	11.70	20.31	0.22	1.55	24.72	41.50	Unidentified
21	PRAPRADANG	PD-TR-3	30/40	69/24-12	1.80	4.19	0.22	2.10	19.78	71.91	Thermal Cellulose
22	PRAKANONG	PK-TR1	30/40	69/24-12	10.78	8.98	0.06	2.82	2.82	74.53	Thermal Cellulose
23	PATHUMWAN	PM-TR3	30/40	69/24-12	5.90	14.75	0.29	14.16	26.55	38.35	Unidentified
24	RASBURANA	RN-TR3	30/40	69/24-12	0.49	5.46	0.00	6.44	15.02	72.59	Thermal Cellulose
25	SAPANDUM	SD-TR1	30/40	69/24-12	1.81	4.44	1.32	5.59	26.48	60.36	Thermal Cellulose
26	SAPANDUM	SD-TR2	30/40	69/24-12	3.31	3.97	1.65	10.80	6.39	73.87	Thermal Cellulose
27	SAPANDUM	SD-TR3	30/40	69/24-12	4.30	21.12	0.00	15.33	26.54	32.71	Unidentified
28	SAPANDUM	SD-TR4	30/40	69/24-12	3.07	5.66	0.24	14.86	5.42	70.75	Thermal Cellulose
29	SURAWONG	SU-TR1	30/40	69/24-12	2.46	17.25	0.00	5.13	18.89	56.26	Thermal Cellulose
30	SURAWONG	SU-TR2	30/40	69/24-12	0.84	9.47	0.00	2.04	76.50	11.15	Unidentified

ตารางที่ 4.5(ต่อ) ผลการแปลผลตัววิธีการ Key Gas (IEEE)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	Percent of Gas intensity						Result
					H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	
31	SURAWONG	SU-TR3	30/40	69/24-12	7.03	9.45	0.22	7.25	61.98	14.07	Unidentified
32	SIPRAYA	SY-TR1	30/40	69/24-12	5.31	14.49	0.60	9.42	8.94	61.23	Thermal Cellulose
33	SIPRAYA	SY-TR2	30/40	69/24-12	1.19	16.34	0.18	13.00	49.02	20.27	Unidentified
34	THONBURI	TB-TR-1	30/40	69/24-12	2.57	14.14	0.08	1.77	56.71	24.74	Unidentified
35	WATLIEB	WL-TR-1	30/40	69/24-12	4.93	26.60	0.16	2.63	21.02	44.66	Unidentified
36	WATLIEB	WL-TR-2	30/40	69/24-12	6.95	20.48	0.18	2.19	17.92	52.29	Thermal Cellulose
37	WATRACHABAMRUNG	WPC-TR-1	30/40	69/24-12	4.52	5.28	0.08	5.58	7.54	77.02	Thermal Cellulose
38	THAWEEWATTANA	TWN-TR-1	30/40	115/24	0.62	8.68	0.12	1.86	25.81	62.90	Thermal Cellulose
39	BANGPRAKOD	BK-TR-1	36/48/60	69/24-12	2.26	14.01	0.12	1.43	64.61	17.58	Unidentified
40	BANGPRAKOD	BK-TR-2	36/48/60	69/24-12	4.29	18.17	0.00	1.35	52.82	23.36	Unidentified
41	BANGPRAKOD	BK-TR-3	36/48/60	69/24-12	1.75	18.10	0.24	2.70	43.17	34.29	Unidentified
42	BANGKRADEE	BKD-TR-1	36/48/60	69/24-12	10.09	14.47	0.00	2.85	34.65	37.94	Unidentified
43	BANGMOD	BM-TR-2	36/48/60	69/24-12	10.29	5.14	0.14	4.57	4.00	76.00	Thermal Cellulose
44	BANGKOKNOI	BOT-TR-1	36/48/60	69/24-12	10.69	11.85	0.00	1.45	51.16	24.86	Unidentified
45	BANGKOKNOI	BOT-TR-2	36/48/60	69/24-12	14.96	12.19	0.28	2.77	48.75	21.05	Unidentified

ตารางที่ 4.5(ต่อ) ผลการแปลผลด้วยวิธีการ Key Gas (IEEE)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	Percent of Gas intensity							Result
					H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO		
46	JANGRON	JRN-TR-1	36/48/60	69/24-12	3.35	9.88	0.17	4.69	24.96	56.95	Thermal Cellulose	
47	JANGRON	JRN-TR-2	36/48/60	69/24-12	1.63	14.17	0.16	1.95	55.86	26.22	Unidentified	
48	KLONGSANAMCHAI	KSC-TR-1	36/48/60	69/24-12	5.21	22.36	0.46	2.14	44.41	25.42	Unidentified	
49	KRUNAI	KU-TR-1	36/48/60	69/24-12	4.67	1.87	1.87	1.87	0.93	88.79	Thermal Cellulose	
50	LUMPINI	LN-TR-4	36/48/60	69/24-12	1.30	6.29	0.05	1.30	2.49	88.56	Thermal Cellulose	
51	LADYA	L YA-TR-1	36/48/60	69/24-12	1.02	2.23	0.10	1.22	0.61	94.82	Thermal Cellulose	
52	LADYA	L YA-TR-2	36/48/60	69/24-12	0.63	1.90	0.19	0.76	1.90	94.63	Thermal Cellulose	
53	NONGKHAM	NH-TR-1	36/48/60	69/24-12	2.22	2.59	0.00	0.56	2.22	92.41	Thermal Cellulose	
54	NONGKHAM	NH-TR-2	36/48/60	69/24-12	7.46	5.73	0.00	5.10	1.82	79.89	Thermal Cellulose	
55	PRAPRADANG	PD-TR-1	36/48/60	69/24-12	2.11	6.52	0.09	2.11	0.18	88.99	Thermal Cellulose	
56	PHAISINGTO	PI-TR1	36/48/60	69/24-12	9.72	4.55	0.31	0.12	3.20	82.09	Thermal Cellulose	
57	PHAISINGTO	PI-TR2	36/48/60	69/24-12	1.82	5.82	0.00	0.09	4.60	87.67	Thermal Cellulose	
58	PHAISINGTO	PI-TR3	36/48/60	69/24-12	1.15	4.73	0.06	0.51	2.68	90.86	Thermal Cellulose	
59	PHAISINGTO	PI-TR4	36/48/60	69/24-12	2.36	1.55	0.12	0.90	0.73	94.34	Thermal Cellulose	
60	PRAKANONG	PK-TR2	36/48/60	69/24-12	3.52	8.29	0.10	1.87	2.90	83.32	Thermal Cellulose	

ตารางที่ 4.5(ต่อ) ผลการแปลผลด้วยวิธีการ Key Gas (IEEE)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	Percent of Gas intensity							Result
					H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO		
61	PATHUMWAN	PM-TR1	36/48/60	69/24-12	24.66	0.77	0.19	4.24	3.47	66.67	Thermal Cellulose	
62	PATHUMWAN	PM-TR2	36/48/60	69/24-12	1.24	2.17	0.08	3.56	1.08	91.87	Thermal Cellulose	
63	SAINAMTHIP	SA-TR1	36/48/60	69/24-12	3.71	14.40	0.07	1.57	35.21	45.05	Unidentified	
64	SAINAMTHIP	SA-TR2	36/48/60	69/24-12	3.27	14.07	0.07	1.42	48.33	32.84	Unidentified	
65	SILOM	SL-TR1	36/48/60	69/24-12	13.01	3.48	0.35	2.79	1.39	78.98	Thermal Cellulose	
66	SILOM	SL-TR2	36/48/60	69/24-12	2.52	2.20	0.00	2.67	1.42	91.19	Thermal Cellulose	
67	SOUTH THONBURI	SIT-TR1	36/48/60	69/24-12	5.31	13.02	0.00	2.25	51.93	27.49	Unidentified	
68	SOUTH THONBURI	SIT-TR2	36/48/60	69/24-12	0.96	13.40	0.16	1.49	68.37	15.63	Unidentified	
69	SOUTH THONBURI	SIT-TR3	36/48/60	69/24-12	5.57	5.21	0.18	1.21	2.30	85.52	Thermal Cellulose	
70	THONBURI	TB-TR-2	36/48/60	69/24-12	9.49	10.51	0.15	0.88	11.09	67.88	Thermal Cellulose	
71	THONBURI	TB-TR-3	36/48/60	69/24-12	1.16	16.11	0.05	1.58	65.19	15.90	Unidentified	
72	TANONTOK	TTT-TR-1	36/48/60	69/24-12	0.40	12.92	0.16	1.98	68.70	15.85	Unidentified	
73	TANONTOK	TTT-TR-2	36/48/60	69/24-12	0.62	14.97	0.06	2.12	57.02	25.20	Unidentified	
74	THONBURIROM	TBR-TR-1	36/48/60	69/24-12	2.45	16.16	0.08	1.80	32.65	46.86	Unidentified	
75	THONBURIROM	TBR-TR-2	36/48/60	69/24-12	1.42	8.79	0.00	2.62	73.57	13.60	Unidentified	

ตารางที่ 4.5(ต่อ) ผลการแปลผลตัวชี้วัดการ Key Gas (IEEE)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	Percent of Gas intensity							Result
					H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO		
76	WANGPETCHABOON	WB-TR-1	36/48/60	69/24-12	4.39	2.12	0.15	0.91	1.51	90.92	Thermal Cellulose	
77	WANGPETCHABOON	WB-TR-2	36/48/60	69/24-12	7.23	4.01	0.45	3.12	2.32	82.87	Thermal Cellulose	
78	WANGPETCHABOON	WB-TR-3	36/48/60	69/24-12	5.50	17.76	0.21	0.42	6.34	69.77	Thermal Cellulose	
79	WATKAMPANG	WKP-TR-1	36/48/60	69/24-12	4.78	6.42	0.30	3.43	2.69	82.39	Thermal Cellulose	
80	WATKAMPANG	WKP-TR-2	36/48/60	69/24-12	1.95	2.79	0.00	0.42	6.42	88.42	Thermal Cellulose	
81	YENARKART	YK-TR-1	36/48/60	69/24-12	20.36	15.57	1.80	4.79	19.76	37.72	Unidentified	
82	YENARKART	YK-TR-2	36/48/60	69/24-12	5.81	2.30	0.07	0.68	1.62	89.53	Thermal Cellulose	
83	YENARKART	YK-TR-3	36/48/60	69/24-12	4.64	2.06	0.32	0.77	1.55	90.65	Thermal Cellulose	
84	CHIDLUM	CLT-TR-2	36/48/60	69/12	3.55	18.58	0.00	3.55	39.34	34.97	Unidentified	
85	LUMPINI	LN-TR-1	36/48/60	69/24	1.00	2.00	0.00	1.00	1.34	94.66	Thermal Cellulose	
86	LUMPINI	LN-TR-2	36/48/60	69/24	1.69	3.21	0.08	1.18	1.18	92.65	Thermal Cellulose	
87	LUMPINI	LN-TR-3	36/48/60	69/24	2.26	2.26	0.00	1.22	1.74	92.53	Thermal Cellulose	
88	MAHASAWAN	MN-TR-3	36/48/60	69/24	9.07	8.35	0.00	2.63	72.08	7.88	Unidentified	
89	BANGPONGPANG	BPP-TR-1	36/48/60	115/24-12	1.04	4.37	0.10	0.83	1.66	92.10	Thermal Cellulose	
90	EKACHAI	EKC-TR-1	36/48/60	115/24-12	3.99	8.70	0.18	2.17	5.43	79.71	Thermal Cellulose	

ตารางที่ 4.5(ต่อ) ผลการแปลผลด้วยวิธีการ Key Gas (IEEE)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	Percent of Gas intensity						Result
					H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	
91	EKACHAI	EKC-TR-2	36/48/60	115/24	0.81	2.28	0.00	0.65	2.28	93.98	Thermal Cellulose
92	SAMYAN	SAM-TR3	36/48/60	115/24	9.38	15.43	0.10	0.83	9.38	64.86	Thermal Cellulose
93	YANNAWA	YNW-TR-2	36/48/60	115/24	1.10	0.88	0.22	0.88	1.98	94.95	Thermal Cellulose
94	CHIDLOM	CLT-TX-3	150/200/250	230/69/24	4.21	2.02	0.08	1.18	0.84	91.75	Thermal Cellulose
95	TANONTOK	TTT-TX-2	150/200/250	230/69/24	4.51	4.35	0.45	5.25	1.48	83.97	Thermal Cellulose
96	TANONTOK	TTT-TX-3	150/200/250	230/69/24	3.41	2.11	0.32	1.46	0.97	91.72	Thermal Cellulose
97	CHIDLOM	CLT-TX-1	180/240/300	230/69/24	0.42	17.55	0.35	18.52	6.96	56.55	Thermal Cellulose
98	TANONTOK	TTT-TX-1	150/240/300	230/115/24	5.49	4.67	0.20	0.81	1.83	86.99	Thermal Cellulose
99	TANONTOK	TTT-TX-4	180/240/300	230/115/24	2.34	5.98	0.39	0.78	1.82	88.69	Thermal Cellulose

ตารางที่ 4.6 ผลการแปลผลด้วยวิธีการ Key Gas (HI)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	Percent of Gas intensity						Result
					H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	
1	CHIDLUM	CLT-TR-1	30/40	69/12	4.81	12.63	0.10	2.40	47.70	32.46	Unidentified
2	BANGBON	BB-TR-3	30/40	69/24-12	7.71	15.43	0.00	2.13	51.60	23.14	Unidentified
3	BANGKLO	BL-TR-2	30/40	69/24-12	0.77	6.57	0.00	2.65	72.44	17.58	Unidentified
4	BANGKHOONPROM	BR-TR-1	30/40	69/24-12	1.43	17.77	0.00	1.72	46.70	32.38	Unidentified
5	BANGKHOONPROM	BR-TR-2	30/40	69/24-12	2.41	17.81	0.00	1.48	49.35	28.94	Unidentified
6	BANGKHOONPROM	BR-TR-3	30/40	69/24-12	3.23	16.86	0.12	4.85	46.19	28.87	Unidentified
7	KLONGSAN	KN-TR-1	30/40	69/24-12	5.93	20.61	0.00	2.33	51.32	19.81	Unidentified
8	KLONGSAN	KN-TR-2	30/40	69/24-12	5.72	17.09	0.00	2.86	60.43	13.90	Unidentified
9	KLONGTOEY	KT-TR-1	30/40	69/24-12	2.61	12.65	0.00	2.01	51.41	31.33	Unidentified
10	KLONGTOEY	KT-TR-2	30/40	69/24-12	2.96	17.90	0.08	5.76	45.91	27.39	Unidentified
11	MAHAMEK	MM-TR-1	30/40	69/24-12	2.33	10.63	0.17	3.82	20.60	62.46	Thermal Cellulose
12	MAHAISAWAN	MN-TR-1	30/40	69/24-12	8.26	14.55	0.00	7.77	35.54	33.88	Unidentified
13	MAHAISAWAN	MN-TR-2	30/40	69/24-12	7.14	10.70	0.09	3.21	53.35	25.51	Unidentified
14	NANGLERNG	NLG-TR-2	30/40	69/24-12	4.86	17.34	0.00	2.33	34.04	41.44	Unidentified
15	PRAPRADANG	PD-TR-2	30/40	69/24-12	11.70	20.31	0.22	1.55	24.72	41.50	Unidentified

ตารางที่ 4.6(ต่อ) ผลการแปลผลด้วยวิธีการ Key Gas (HI)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	Percent of Gas intensity						Result
					H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	
16	PRAPRADANG	PD-TR-3	30/40	69/24-12	1.80	4.19	0.22	2.10	19.78	71.91	Thermal Cellulose
17	PATHUMWAN	PM-TR3	30/40	69/24-12	5.90	14.75	0.29	14.16	26.55	38.35	Unidentified
18	RASBURANA	RN-TR3	30/40	69/24-12	0.49	5.46	0.00	6.44	15.02	72.59	Thermal Cellulose
19	SAPANDUM	SD-TR1	30/40	69/24-12	1.81	4.44	1.32	5.59	26.48	60.36	Thermal Cellulose
20	SAPANDUM	SD-TR2	30/40	69/24-12	3.31	3.97	1.65	10.80	6.39	73.87	Thermal Cellulose
21	SAPANDUM	SD-TR3	30/40	69/24-12	4.30	21.12	0.00	15.33	26.54	32.71	Unidentified
22	SURAWONG	SU-TR1	30/40	69/24-12	2.46	17.25	0.00	5.13	18.89	56.26	Thermal Cellulose
23	SURAWONG	SU-TR2	30/40	69/24-12	0.84	9.47	0.00	2.04	76.50	11.15	Unidentified
24	SURAWONG	SU-TR3	30/40	69/24-12	7.03	9.45	0.22	7.25	61.98	14.07	Unidentified
25	SIPRAYA	SY-TR1	30/40	69/24-12	5.31	14.49	0.60	9.42	8.94	61.23	Thermal Cellulose
26	SIPRAYA	SY-TR2	30/40	69/24-12	1.19	16.34	0.18	13.00	49.02	20.27	Unidentified
27	THONBURI	TB-TR-1	30/40	69/24-12	2.57	14.14	0.08	1.77	56.71	24.74	Unidentified
28	THAWEEWATTANA	TWN-TR-1	30/40	115/24	0.62	8.68	0.12	1.86	25.81	62.90	Thermal Cellulose
29	BANGPRAKOD	BK-TR-1	36/48/60	69/24-12	2.26	14.01	0.12	1.43	64.61	17.58	Unidentified
30	BANGPRAKOD	BK-TR-2	36/48/60	69/24-12	4.29	18.17	0.00	1.35	52.82	23.36	Unidentified

ตารางที่ 4.6(ต่อ) ผลการแปลผลตัวชี้วัดการ Key Gas (HI)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	Percent of Gas intensity						Result
					H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	
31	BANGPRAKOD	BK-TR-3	36/48/60	69/24-12	1.75	18.10	0.24	2.70	43.17	34.29	Unidentified
32	BANGKRADEE	BKD-TR-1	36/48/60	69/24-12	10.09	14.47	0.00	2.85	34.65	37.94	Unidentified
33	BANGKOKNOI	BOT-TR-1	36/48/60	69/24-12	10.69	11.85	0.00	1.45	51.16	24.86	Unidentified
34	BANGKOKNOI	BOT-TR-2	36/48/60	69/24-12	14.96	12.19	0.28	2.77	48.75	21.05	Unidentified
35	JANGRON	JRN-TR-1	36/48/60	69/24-12	3.35	9.88	0.17	4.69	24.96	56.95	Thermal Cellulose
36	JANGRON	JRN-TR-2	36/48/60	69/24-12	1.63	14.17	0.16	1.95	55.86	26.22	Unidentified
37	KLONGSANPASAMIT	KS-TR-2	36/48/60	69/24-12	3.39	5.08	0.00	1.69	27.12	62.71	Thermal Cellulose
38	KLONGSANAMCHAI	KSC-TR-1	36/48/60	69/24-12	5.21	22.36	0.46	2.14	44.41	25.42	Unidentified
39	KLONGWATSING	KWS-TR-1	36/48/60	69/24-12	0.74	10.92	0.00	2.56	71.81	13.96	Unidentified
40	KLONGWATSING	KWS-TR-2	36/48/60	69/24-12	1.00	15.13	0.23	2.28	63.69	17.68	Unidentified
41	NONGKHAM	NH-TR-2	36/48/60	69/24-12	7.46	5.73	0.00	5.10	1.82	79.89	Thermal Cellulose
42	SAINAMTHIP	SA-TR1	36/48/60	69/24-12	3.71	14.40	0.07	1.57	35.21	45.05	Unidentified
43	SAINAMTHIP	SA-TR2	36/48/60	69/24-12	3.27	14.07	0.07	1.42	48.33	32.84	Unidentified
44	SURASAK	SRK-TR1	36/48/60	69/24-12	9.01	16.22	0.54	0.36	42.52	31.35	Unidentified
45	SURASAK	SRK-TR2	36/48/60	69/24-12	11.46	14.08	0.16	2.95	45.50	25.86	Unidentified

ตารางที่ 4.6(ต่อ) ผลการแปลผลด้วยวิธีการ Key Gas (HI)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	Percent of Gas intensity						Result
					H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	
46	SOUTH THONBURI	STT-TR1	36/48/60	69/24-12	5.31	13.02	0.00	2.25	51.93	27.49	Unidentified
47	SOUTH THONBURI	STT-TR2	36/48/60	69/24-12	0.96	13.40	0.16	1.49	68.37	15.63	Unidentified
48	THONBURI	TB-TR-3	36/48/60	69/24-12	1.16	16.11	0.05	1.58	65.19	15.90	Unidentified
49	TANONTOK	TTT-TR-1	36/48/60	69/24-12	0.40	12.92	0.16	1.98	68.70	15.85	Unidentified
50	TANONTOK	TTT-TR-2	36/48/60	69/24-12	0.62	14.97	0.06	2.12	57.02	25.20	Unidentified
51	THONBURIROM	TBR-TR-1	36/48/60	69/24-12	2.45	16.16	0.08	1.80	32.65	46.86	Unidentified
52	THONBURIROM	TBR-TR-2	36/48/60	69/24-12	1.42	8.79	0.00	2.62	73.57	13.60	Unidentified
53	WANGPETCHABOON	WB-TR-2	36/48/60	69/24-12	7.23	4.01	0.45	3.12	2.32	82.87	Thermal Cellulose
54	CHIDLOM	CLT-TR-2	36/48/60	69/12	3.55	18.58	0.00	3.55	39.34	34.97	Unidentified
55	MAHAISAWAN	MN-TR-3	36/48/60	69/24	9.07	8.35	0.00	2.63	72.08	7.88	Unidentified
56	TANONTOK	TTT-TX-2	150/200/250	230/69/24	4.51	4.35	0.45	5.25	1.48	83.97	Thermal Cellulose
57	CHIDLOM	CLT-TX-1	180/240/300	230/69/24	0.42	17.55	0.35	18.52	6.96	56.55	Thermal Cellulose

3. การวิเคราะห์การแปลผลค่าแก๊สด้วยวิธี Key Gas

จากการแปลผลดังตาราง 4.5 และ 4.6 สามารถนำมาจำแนกตามพิกัดกำลังและพิกัดแรงดันได้ดังนี้

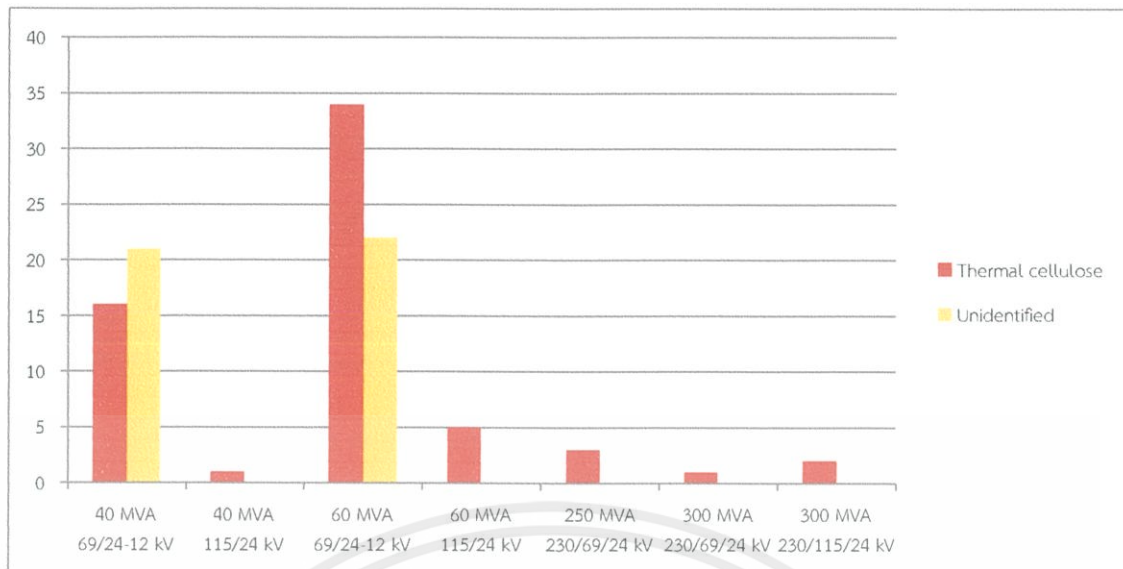
ตารางที่ 4.7 จำนวนหม้อแปลงที่ผ่านการแปลผลด้วยวิธี Key Gas จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน

Rated Power (MVA)	Rated Voltage (kV)	Key Gas			
		IEEE		HI	
		Thermal Cellulose	Unidentified	Thermal Cellulose	Unidentified
40	69/24-12	16	21	7	20
	115/24	1	0	1	0
60	69/24-12	34	22	4	23
	115/24	5	0	0	0
250	230/69/24	3	0	1	0
300	230/69/24	1	0	1	0
	230/115/24	2	0	0	0
Total		62	43	14	43

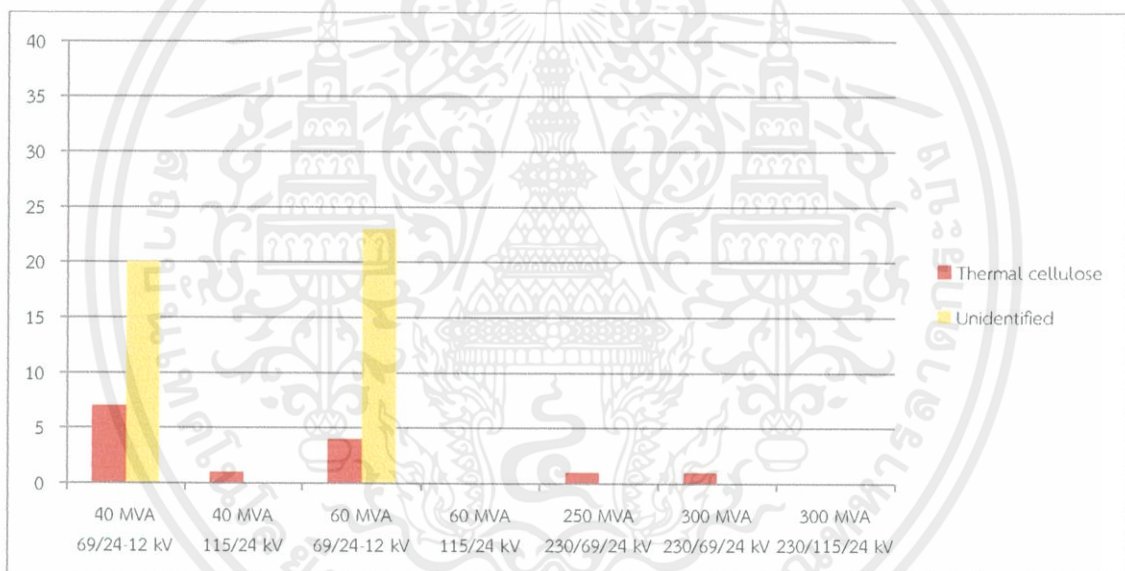
ตารางที่ 4.8 จำนวนหม้อแปลงที่ผ่านการแปลผลด้วยวิธี Key Gas จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์)

Rated Power (MVA)	Rated Voltage (kV)	Key Gas			
		IEEE		HI	
		Thermal Cellulose	Unidentified	Thermal Cellulose	Unidentified
40	69/24-12	12.12	15.91	5.30	15.15
	115/24	0.76	0.00	0.76	0.00
60	69/24-12	25.76	16.67	3.03	17.42
	115/24	3.79	0.00	0.00	0.00
250	230/69/24	2.27	0.00	0.76	0.00
300	230/69/24	0.76	0.00	0.76	0.00
	230/115/24	1.52	0.00	0.00	0.00
Total		46.97	32.58	10.61	32.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 กราฟจำนวนหม้อแปลงที่ประเมินด้วยเงื่อนไข IEEE และผ่านการแปลผลด้วยวิธี Key Gas จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน



รูปที่ 4.2 กราฟจำนวนหม้อแปลงที่ประเมินด้วยวิธี HI และผ่านการแปลผลด้วยวิธี Key Gas จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน

จากตารางที่ 4.7 และ 4.8 การแปลผลด้วยวิธี Key Gas แยกเป็น 2 กรณี คือกรณีแรก ทำการแปลผลจากหม้อแปลงที่อยู่ใน Condition 2 ขึ้นไปจากการประเมินสภาพตามมาตรฐาน IEEE และกรณีที่สองคือ ทำการแปลผลจากหม้อแปลงที่มีคะแนน C, D และ E จากการประเมินสภาพด้วยวิธี HI

กรณีประเมินด้วยมาตรฐาน IEEE หม้อแปลงส่วนมาก มีปัญหาเกี่ยวกับความร้อนที่เกิดขึ้นที่เซลล์ลอส โดยพบปัญหาที่ หม้อแปลงพิกัดกำลัง 60 MVA พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV มากที่สุด และหม้อแปลงอีก 32.58% ยังไม่สามารถระบุปัญหาที่ชัดเจนได้

กรณีประเมินสภาพหม้อแปลงด้วยวิธี HI หม้อแปลงส่วนมาก มีปัญหาเกี่ยวกับความร้อนเกิดขึ้นที่เซลลูโลส โดยพบปัญหาที่หม้อแปลงพิกัดกำลัง 40 MVA พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV มากที่สุด และหม้อแปลงอีก 32.58% ยังไม่สามารถระบุปัญหาที่ชัดเจนได้

จากการวิเคราะห์จะเห็นว่าวิธีการนี้ไม่สามารถบอกอะไรได้มากนัก เพราะวิธีนี้เป็นเพียงการพิจารณาจากค่าแก๊สที่เกิดขึ้นมาอย่างโดดเด่น จากตาราง 4.6 จะเห็นว่ามีเพียงแก๊ส CO เท่านั้นที่มีค่าสูงอย่างชัดเจน ซึ่งแก๊ส CO เป็น Key Gas ของปัญหาที่เกี่ยวกับความร้อนที่เกิดขึ้นที่เซลลูโลส ส่วนปัญหาชนิดอื่นๆ ไม่สามารถระบุได้อย่างชัดเจน เพราะค่าแก๊สที่เป็น Key Gas ของปัญหานั้นๆ ไม่ได้มีค่าสูงอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามวิธีการนี้เป็นเพียงการพิจารณาเบื้องต้น ซึ่งขึ้นอยู่กับประสบการณ์และดุลยพินิจของวิศวกรผู้แปลผลด้วย

4.2.3 การแปลผลแก๊สด้วยวิธีการ CO_2/CO Ratio

1. ขั้นตอนการแปลผล

การเกิดแก๊ส CO_2 และ CO ในอุปกรณ์ที่มีฉนวนกระดาษที่ผ่านการอิมเพรกเนทด้วยน้ำมันหม้อแปลงจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแปรผันตามอุณหภูมิ

- CO ที่มีค่ามากจนทำให้ CO_2/CO มีค่าน้อยกว่า 3 อาจจะเป็นตัวชี้วัดได้ว่าเกิดความผิดปกติบางอย่างโดยมีฉนวนกระดาษเข้ามาเกี่ยวข้อง และอาจเกิดคาร์บอนไนเซชันที่กระดาษด้วย
- CO_2 ที่มีค่าสูงจนทำให้ CO_2/CO มีค่ามากกว่า 10 อาจเป็นตัวชี้วัดได้ว่าเกิดโอเวอร์ฮีทที่กระดาษที่อุณหภูมิต่ำกว่า $160^{\circ}C$ หรืออาจเกิดออกซิเดชันในน้ำมัน

การเกิดความผิดปกติที่กระดาษไม่จำเป็นว่าจะต้องสังเกตจาก CO และ CO_2 เท่านั้น แต่จำเป็นต้องสังเกตค่าแก๊สชนิดอื่นๆ ร่วมด้วย ถ้าหากตรวจพบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเกิดความผิดปกติขึ้นที่กระดาษ หรือมีการเสื่อมที่กระดาษ จะต้องมีการตรวจสอบด้วยวิธีอื่นเข้ามาร่วมด้วย

2. ผลการแปลด้วยวิธี CO_2/CO

ผลการแปลด้วยวิธี CO_2/CO แสดงไว้ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลการแปลผลด้วยวิธีการ CO₂/CO Ratio

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	CO	CO ₂	CO ₂ /CO Ratio	Result
1	KLONGSAN	KN-TR-1	30/40	69/24-12	247	7821	31.66	Overheat of Paper
2	RASBURANA	RN-TR3	30/40	69/24-12	744	9094	12.22	Overheat of Paper
3	LUMPINI	LN-TR-4	36/48/60	69/24-12	817	5209	6.38	Normal Operation
4	LADYA	LYA-TR-2	36/48/60	69/24-12	749	3845	5.13	Normal Operation
5	NONGKHAM	NH-TR-2	36/48/60	69/24-12	878	9658	11.00	Overheat of Paper
6	PHAISINGTO	PI-TR1	36/48/60	69/24-12	667	7918	11.87	Overheat of Paper
7	PHAISINGTO	PI-TR2	36/48/60	69/24-12	1010	10625	10.52	Overheat of Paper
8	PHAISINGTO	PI-TR3	36/48/60	69/24-12	711	7268	10.22	Overheat of Paper
9	PHAISINGTO	PI-TR4	36/48/60	69/24-12	1158	4747	4.10	Normal Operation
10	SOUTH THONBURI	STT-TR3	36/48/60	69/24-12	706	5362	7.59	Normal Operation
11	WANGPETCHABOON	WB-TR-2	36/48/60	69/24-12	929	7431	8.00	Normal Operation
12	WATKAMPANG	WKP-TR-1	36/48/60	69/24-12	552	11182	20.26	Overheat of Paper
13	WATKAMPANG	WKP-TR-2	36/48/60	69/24-12	634	11706	18.46	Overheat of Paper
14	YENARKART	YK-TR-3	36/48/60	69/24-12	703	4353	6.19	Normal Operation
15	EKACHAI	EKC-TR-1	36/48/60	115/24-12	220	7150	32.50	Overheat of Paper
16	TANONTOK	TTT-TX-2	150/200/250	230/69/24	1024	4753	4.64	Normal Operation

3. การวิเคราะห์การแปลผลค่าแก๊สด้วยวิธี CO₂/CO Ratio

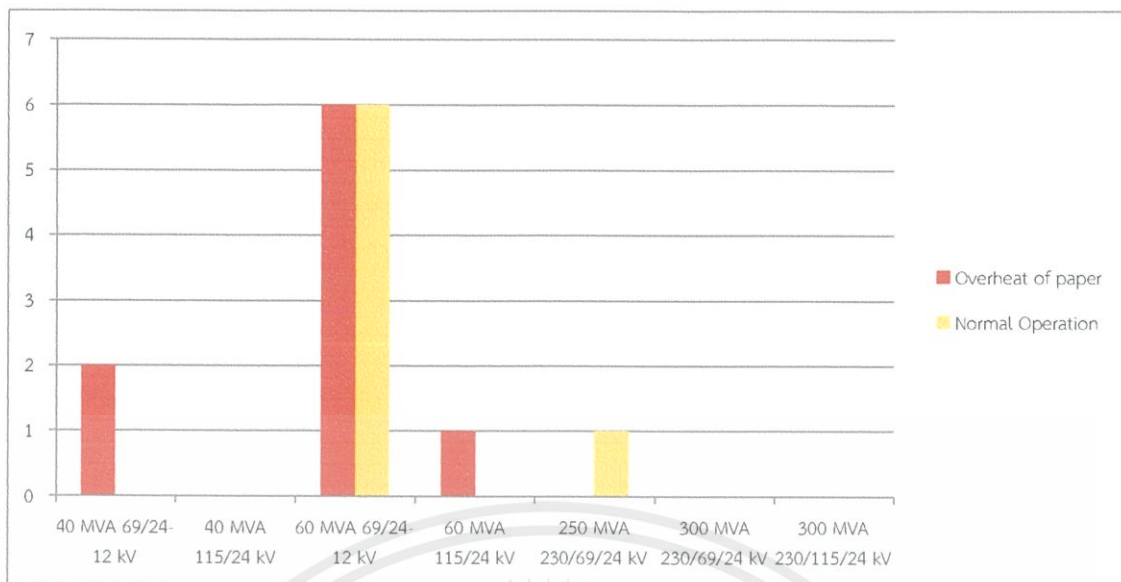
จากการแปลผลดังตาราง 4.9 สามารถนำมาจำแนกตามพิกัดกำลังและพิกัดแรงดันได้ดังตารางที่ 4.10 เมื่อ O หมายถึง Overheat of Paper และ N หมายถึง Normal Operation

ตารางที่ 4.10 จำนวนหม้อแปลงที่ผ่านการแปลผลด้วยวิธี CO₂/CO Ratio จำแนกตามพิกัดกำลังและพิกัดแรงดัน

Rated Power (MVA)	Rated Voltage (kV)	CO ₂ /CO Ratio	
		O	N
40	69/24-12	2	0
	115/24	0	0
60	69/24-12	6	6
	115/24-12	1	0
250	230/69/24	0	1
300	230/69/24	0	0
	230/115/24	0	0
Total		9	7

ตารางที่ 4.11 จำนวนหม้อแปลงที่ผ่านการแปลผลด้วยวิธี CO₂/CO Ratio จำแนกตามพิกัดกำลังและพิกัดแรงดัน (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์)

Rated Power (MVA)	Rated Voltage (kV)	CO ₂ /CO Ratio	
		O	N
40	69/24-12	1.52	0.00
	115/24	0.00	0.00
60	69/24-12	4.55	4.55
	115/24-12	0.76	0.00
250	230/69/24	0.00	0.76
300	230/69/24	0.00	0.00
	230/115/24	0.00	0.00
Total		6.82	5.3



รูปที่ 4.3 กราฟจำนวนหม้อแปลงที่ประเมินด้วยปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 และผ่านการแปลผลด้วยวิธี CO₂/CO Ratio จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน

การแปลผลด้วย CO₂/CO Ratio เป็นเพียงการแปลผลเพื่อบอกถึงความผิดปกติเกิดขึ้นที่บริเวณฉนวนเซลลูโลสหรือไม่ โดยวิเคราะห์จากอัตราส่วนระหว่าง CO₂ และ CO เงื่อนไขในการวิเคราะห์คือ หม้อแปลงต้องมี CO₂ > 7000 ppm และ CO > 700 ppm จึงจะทำการวิเคราะห์ได้จากตาราง 4.9 พบว่ามีหม้อแปลงที่มีแก๊ส CO หรือ CO₂ สูงกว่ามาตรฐานทั้งหมด 16 ตัว โดยมีหม้อแปลงที่มีแนวโน้มที่จะเกิดปัญหาความร้อนเกินในฉนวนกระดาษ 6.82% หม้อแปลงพิกัดกำลัง 60 MVA พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV มีแนวโน้มที่จะเกิดปัญหาดังกล่าวมากที่สุด และอีก 5.30% เป็นหม้อแปลงที่ถึงแม้จะมีค่าแก๊สเกินมาตรฐานแต่มีแนวโน้มที่จะไม่เกิดความผิดปกติขึ้นบริเวณกระดาษ

4.2.4 การแปลผลแก๊สด้วยวิธีการ IEC Ratio

1. ขั้นตอนการแปลผล

- 1) คำนวณอัตราส่วนแก๊ส
- 2) ทำการเปรียบเทียบกับเงื่อนไขในตารางที่ 2.13 เพื่อระบุปัญหาที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงถ้าหากค่าที่คำนวณได้ไม่ตรงกับเงื่อนไข อาจเป็นเพราะเกิดความผิดปกติหลายชนิดผสมกัน หรืออาจเกิดความผิดปกติขึ้นใหม่โดยที่ค่าแก๊สในน้ำมันมีค่าสูงอยู่แล้ว
- 3) พล็อตจุดลงบนกราฟเพื่อแปลผลจะทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ แต่การพล็อตจุดลงบนกราฟ 3 มิติ นั้นเขียนโปรแกรมได้ยาก ในปริญญาโทฉบับนี้จึงเขียนโค้ดในโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อทำการวิเคราะห์ค่าตามตารางเท่านั้น

2. ผลการแปลด้วยวิธี IEC Ratio

ผลการแปลด้วยวิธี IEC Ratio แสดงไว้ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ผลการแปลผลด้วยวิธีการ IEC Ratio (ปริมาณแก๊สอ้างอิง L1)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	Result
1	CHIDLOM	CLT-TR-1	30/40	69/12	0.04	2.63	0.05	T1
2	BANGBON	BB-TR-3	30/40	69/24-12	0.00	2.00	0.04	T1
3	BANGKLO	BL-TR-2	30/40	69/24-12	0.00	8.56	0.04	T1
4	BANGKHOONPROM	BR-TR-1	30/40	69/24-12	0.00	12.40	0.04	T1
5	BANGKHOONPROM	BR-TR-2	30/40	69/24-12	0.00	7.38	0.03	T1
6	KLONGSAN	KN-TR-1	30/40	69/24-12	0.00	3.47	0.05	T1
7	KLONGSAN	KN-TR-2	30/40	69/24-12	0.00	2.99	0.05	T1
8	KLONGTOEY	KT-TR-1	30/40	69/24-12	0.00	4.85	0.04	T1
9	KLONGTOEY	KT-TR-2	30/40	69/24-12	0.01	6.05	0.13	T1
10	MAHAMEK	MM-TR-1	30/40	69/24-12	0.04	4.57	0.19	T1
11	MAHAISAWAN	MN-TR-1	30/40	69/24-12	0.00	1.76	0.22	T1
12	MAHAISAWAN	MN-TR-2	30/40	69/24-12	0.03	1.50	0.06	T1
13	NANGLERNG	NLG-TR-2	30/40	69/24-12	0.00	3.57	0.07	T1
14	PRAPRADANG	PD-TR-2	30/40	69/24-12	0.14	1.74	0.06	T1
15	PRAPRADANG	PD-TR-3	30/40	69/24-12	0.11	2.33	0.11	T1

ตารางที่ 4.12(ต่อ) ผลการแปลผลด้วยวิธีการ IEC Ratio (ปริมาณแก๊สอ้างอิง L1)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	Result
16	PATHUMWAN	PM-TR3	30/40	69/24-12	0.02	2.50	0.53	T1
17	RASBURANA	RN-TR3	30/40	69/24-12	0.00	11.20	0.43	T1
18	SAPANDUM	SD-TR1	30/40	69/24-12	0.24	2.45	0.21	T1
19	SAPANDUM	SD-TR3	30/40	69/24-12	0.00	4.91	0.58	T1
20	SURAWONG	SU-TR1	30/40	69/24-12	0.00	7.00	0.27	T1
21	SURAWONG	SU-TR2	30/40	69/24-12	0.00	11.29	0.03	T1
22	SURAWONG	SU-TR3	30/40	69/24-12	0.03	1.34	0.12	T1
23	SIPRAYA	SY-TR1	30/40	69/24-12	0.06	2.73	1.05	T2
24	SIPRAYA	SY-TR2	30/40	69/24-12	0.01	13.70	0.27	T1
25	THONBURI	TB-TR-1	30/40	69/24-12	0.05	5.50	0.03	T1
26	WATLIEB	WL-TR-1	30/40	69/24-12	0.06	5.40	0.13	T1
27	THAWEEWATTANA	TWN-TR-1	30/40	115/24	0.07	14.00	0.07	T1
28	BANGPRAKOD	BK-TR-1	36/48/60	69/24-12	0.08	6.21	0.02	T1
29	BANGPRAKOD	BK-TR-2	36/48/60	69/24-12	0.00	4.24	0.03	T1
30	BANGPRAKOD	BK-TR-3	36/48/60	69/24-12	0.09	10.36	0.06	T1

ตารางที่ 4.12(ต่อ) ผลการแปลผลด้วยวิธีการ IEC Ratio (ปริมาณแก๊สอ้างอิง L1)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	Result
31	BANGKRADEE	BKD-TR-1	36/48/60	69/24-12	0.00	1.43	0.08	T1
32	BANGKOKNOI	BOT-TR-1	36/48/60	69/24-12	0.00	1.11	0.03	T1
33	BANGKOKNOI	BOT-TR-2	36/48/60	69/24-12	0.10	0.81	0.06	Unknown
34	BANGKOKNOI	BOT-TR-3	36/48/60	69/24-12	0.13	1.65	0.08	T1
35	JANGRON	JRN-TR-1	36/48/60	69/24-12	0.04	2.95	0.19	T1
36	JANGRON	JRN-TR-2	36/48/60	69/24-12	0.08	8.70	0.03	T1
37	KLONGSANPASAMIT	KS-TR-1	36/48/60	69/24-12	0.14	1.24	0.11	T1
38	KLONGSANPASAMIT	KS-TR-2	36/48/60	69/24-12	0.00	1.50	0.06	T1
39	KLONGSANAMCHAI	KSC-TR-1	36/48/60	69/24-12	0.21	4.29	0.05	T1
40	KLONGWATSING	KWS-TR-1	36/48/60	69/24-12	0.00	14.73	0.04	T1
41	KLONGWATSING	KWS-TR-2	36/48/60	69/24-12	0.10	15.09	0.04	T1
42	LUMPINI	LN-TR-4	36/48/60	69/24-12	0.04	4.83	0.52	T1
43	LADYA	LYA-TR-2	36/48/60	69/24-12	0.25	3.00	0.40	T1
44	NONGKHAM	NIH-TR-2	36/48/60	69/24-12	0.00	0.77	2.80	Unknown
45	PHAISINGTO	PI-TR1	36/48/60	69/24-12	2.50	0.47	0.04	Unknown

ตารางที่ 4.12(ต่อ) ผลการแปลผลตัวบ่งชี้การ IEC Ratio (ปริมาณแก๊สอ้างอิง L1)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	Result
46	PHAISINGTO	PI-TR2	36/48/60	69/24-12	0.00	3.19	0.02	T1
47	PHAISINGTO	PI-TR3	36/48/60	69/24-12	0.13	4.11	0.19	T1
48	PHAISINGTO	PI-TR4	36/48/60	69/24-12	0.14	0.66	1.22	Unknown
49	SAINAMTHIP	SA-TR1	36/48/60	69/24-12	0.05	3.88	0.04	T1
50	SAINAMTHIP	SA-TR2	36/48/60	69/24-12	0.05	4.30	0.03	T1
51	SURASAK	SRK-TR1	36/48/60	69/24-12	1.50	1.80	0.01	T1
52	SURASAK	SRK-TR2	36/48/60	69/24-12	0.06	1.23	0.06	T1
53	SOUTH THONBURI	STT-TR1	36/48/60	69/24-12	0.00	2.45	0.04	T1
54	SOUTH THONBURI	STT-TR2	36/48/60	69/24-12	0.11	14.00	0.02	T1
55	SOUTH THONBURI	STT-TR3	36/48/60	69/24-12	0.15	0.93	0.53	Unknown
56	THONBURI	TB-TR-2	36/48/60	69/24-12	0.17	1.11	0.08	T1
57	THONBURI	TB-TR-3	36/48/60	69/24-12	0.03	13.91	0.02	T1
58	TANONTOK	TTT-TR-1	36/48/60	69/24-12	0.08	32.60	0.03	T1
59	TANONTOK	TTT-TR-2	36/48/60	69/24-12	0.03	24.00	0.04	T1
60	THONBURIROM	TBR-TR-1	36/48/60	69/24-12	0.05	6.60	0.06	T1

ตารางที่ 4.12(ต่อ) ผลการแปลผลตัวชี้วัดการ IEC Ratio (ปริมาณแก๊สอ้างอิง L1)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	Result
61	THONBURIROM	TBR-TR-2	36/48/60	69/24-12	0.00	6.19	0.04	T1
62	WANGPETCHABOON	WB-TR-1	36/48/60	69/24-12	0.17	0.48	0.60	Unknown
63	WANGPETCHABOON	WB-TR-2	36/48/60	69/24-12	0.14	0.56	1.35	Unknown
64	WATKAMPANG	WKP-TR-1	36/48/60	69/24-12	0.09	1.34	1.28	T2
65	WATKAMPANG	WKP-TR-2	36/48/60	69/24-12	0.00	1.43	0.07	T1
66	YENARKART	YN-TR-3	36/48/60	69/24-12	0.42	0.44	0.50	Unknown
67	CHIDLUM	CLT-TR-2	36/48/60	69/12	0.00	5.23	0.09	T1
68	MAHAISAWAN	MN-TR-3	36/48/60	69/24	0.00	0.92	0.04	Unknown
69	EKACHAI	EKC-TR-1	36/48/60	115/24-12	0.08	2.18	0.40	T1
70	TANONTOK	TFT-TX-2	150/200/250	230/69/24	0.09	0.96	3.56	Unknown
71	CHIDLUM	CLT-TX-1	180/240/300	230/69/24	0.02	42.00	2.66	T2

ตารางที่ 4.13 ผลการแปลผลด้วยวิธีการ IEC Ratio (HI)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	IEC Ratio
1	CHIDLOM	CLT-TR-1	30/40	69/12	0.04	2.63	0.05	T1
2	BANGBON	BB-TR-3	30/40	69/24-12	0.00	2.00	0.04	T1
3	BANGKLO	BL-TR-2	30/40	69/24-12	0.00	8.56	0.04	T1
4	BANGKHOONPROM	BR-TR-1	30/40	69/24-12	0.00	12.40	0.04	T1
5	BANGKHOONPROM	BR-TR-2	30/40	69/24-12	0.00	7.38	0.03	T1
6	BANGKHOONPROM	BR-TR-3	30/40	69/24-12	0.02	5.21	0.11	T1
7	KLONGSAN	KN-TR-1	30/40	69/24-12	0.00	3.47	0.05	T1
8	KLONGSAN	KN-TR-2	30/40	69/24-12	0.00	2.99	0.05	T1
9	KLONGTOEY	KT-TR-1	30/40	69/24-12	0.00	4.85	0.04	T1
10	KLONGTOEY	KT-TR-2	30/40	69/24-12	0.01	6.05	0.13	T1
11	MAHAMEK	MM-TR-1	30/40	69/24-12	0.04	4.57	0.19	T1
12	MAHAISAWAN	MN-TR-1	30/40	69/24-12	0.00	1.76	0.22	T1
13	MAHAISAWAN	MN-TR-2	30/40	69/24-12	0.03	1.50	0.06	T1
14	NANGLERNG	NLG-TR-2	30/40	69/24-12	0.00	3.57	0.07	T1
15	PRAPRADANG	PD-TR-2	30/40	69/24-12	0.14	1.74	0.06	T1

ตารางที่ 4.13(ต่อ) ผลการแปลผลตัวชี้วัดการ IEC Ratio (HI)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	IEC Ratio
16	PRAPRADANG	PD-TR-3	30/40	69/24-12	0.11	2.33	0.11	T1
17	PATHUMWAN	PM-TR3	30/40	69/24-12	0.02	2.50	0.53	T1
18	RASBURANA	RN-TR3	30/40	69/24-12	0.00	11.20	0.43	T1
19	SAPANDUM	SD-TR1	30/40	69/24-12	0.24	2.45	0.21	T1
20	SAPANDUM	SD-TR2	30/40	69/24-12	0.15	1.20	1.69	Unknown
21	SAPANDUM	SD-TR3	30/40	69/24-12	0.00	4.91	0.58	T1
22	SURAWONG	SU-TR1	30/40	69/24-12	0.00	7.00	0.27	T1
23	SURAWONG	SU-TR2	30/40	69/24-12	0.00	11.29	0.03	T1
24	SURAWONG	SU-TR3	30/40	69/24-12	0.03	1.34	0.12	T1
25	SIPRAYA	SY-TR1	30/40	69/24-12	0.06	2.73	1.05	T2
26	SIPRAYA	SY-TR2	30/40	69/24-12	0.01	13.70	0.27	T1
27	THONBURI	TB-TR-1	30/40	69/24-12	0.05	5.50	0.03	T1
28	THAWEEWATTANA	TWN-TR-1	30/40	115/24	0.07	14.00	0.07	T1
29	BANGPRAKOD	BK-TR-1	36/48/60	69/24-12	0.08	6.21	0.02	T1
30	BANGPRAKOD	BK-TR-2	36/48/60	69/24-12	0.00	4.24	0.03	T1

ตารางที่ 4.13(ต่อ) ผลการแปลผลตัวชี้วัดการ IEC Ratio (HI)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	IEC Ratio
31	BANGPRAKOD	BK-TR-3	36/48/60	69/24-12	0.09	10.36	0.06	T1
32	BANGKRADEE	BKD-TR-1	36/48/60	69/24-12	0.00	1.43	0.08	T1
33	BANGKOKNOI	BOT-TR-1	36/48/60	69/24-12	0.00	1.11	0.03	T1
34	BANGKOKNOI	BOT-TR-2	36/48/60	69/24-12	0.10	0.81	0.06	Unknown
35	JANGRON	JRN-TR-1	36/48/60	69/24-12	0.04	2.95	0.19	T1
36	JANGRON	JRN-TR-2	36/48/60	69/24-12	0.08	8.70	0.03	T1
37	KLONGSANPASAMIT	KS-TR-2	36/48/60	69/24-12	0.00	1.50	0.06	T1
38	KLONGSANAMCHAI	KSC-TR-1	36/48/60	69/24-12	0.21	4.29	0.05	T1
39	KLONGWATSING	KWS-TR-1	36/48/60	69/24-12	0.00	14.73	0.04	T1
40	KLONGWATSING	KWS-TR-2	36/48/60	69/24-12	0.10	15.09	0.04	T1
41	NONGKHAM	NH-TR-2	36/48/60	69/24-12	0.00	0.77	2.80	Unknown
42	SAINAMTHIP	SA-TR1	36/48/60	69/24-12	0.05	3.88	0.04	T1
43	SAINAMTHIP	SA-TR2	36/48/60	69/24-12	0.05	4.30	0.03	T1
44	SURASAK	SRK-TR1	36/48/60	69/24-12	1.50	1.80	0.01	T1
45	SURASAK	SRK-TR2	36/48/60	69/24-12	0.06	1.23	0.06	T1

3. การวิเคราะห์การแปลผลค่าแก๊สด้วยวิธี IEC Ratio

จากการแปลผลดังตาราง 4.12 และ 4.13 สามารถนำมาจำแนกตามพิกัดกำลังและพิกัดแรงดันได้ดังนี้

ตารางที่ 4.14 จำนวนหม้อแปลงที่ผ่านการแปลผลด้วยวิธี IEC Ratio จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน

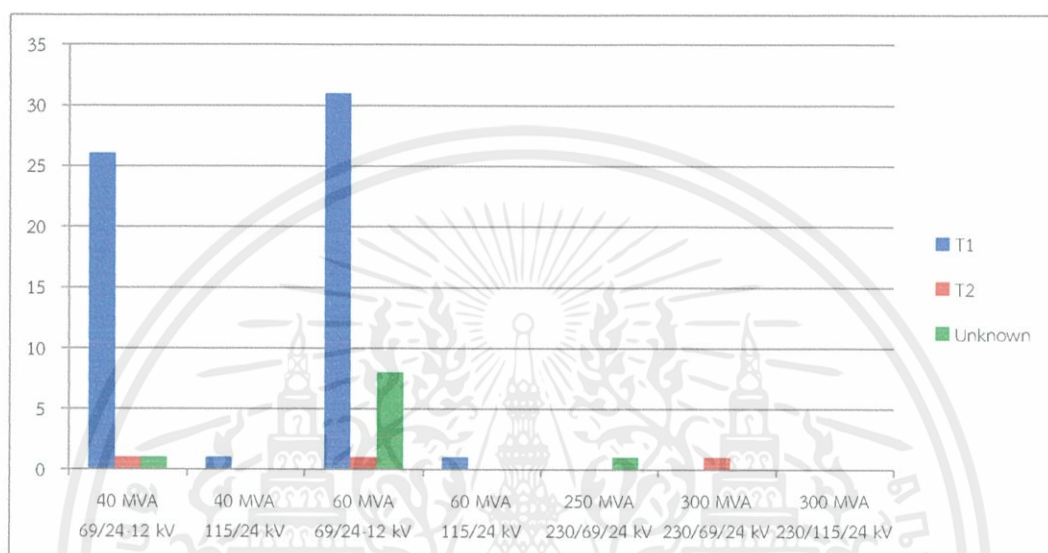
Rated Power (MVA)	Rated Voltage (kV)	IEC Ratio					
		เงื่อนไขปริมาณแก๊สอ้างอิง L1			HI		
		T1	T2	UN	T1	T2	UN
40	69/24-12	26	1	1	25	1	1
	115/24	1	0	0	1	0	0
60	69/24-12	31	1	8	23	0	4
	115/24	1	0	0	0	0	0
250	230/69/24	0	0	1	0	0	1
300	230/69/24	0	1	0	0	1	0
	230/115/24	0	0	0	0	0	0
Total		59	3	10	49	2	6

ตารางที่ 4.15 จำนวนหม้อแปลงที่ผ่านการแปลผลด้วยวิธี IEC Ratio จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์)

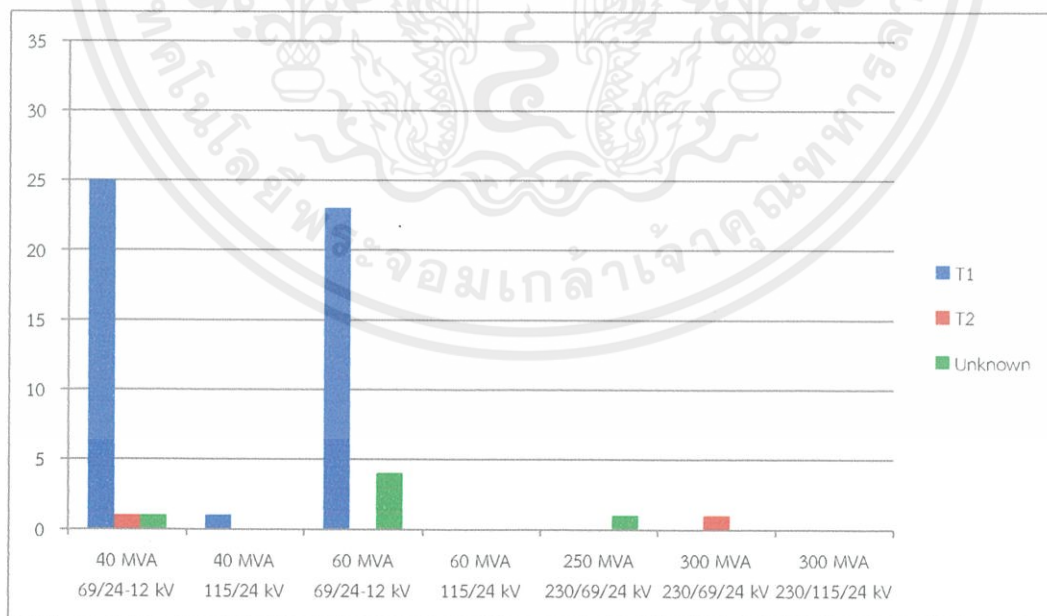
Rated Power (MVA)	Rated Voltage (kV)	IEC Ratio					
		เงื่อนไขปริมาณแก๊สอ้างอิง L1			HI		
		T1	T2	UN	T1	T2	UN
40	69/24-12	19.70	0.76	0.76	18.94	0.76	0.76
	115/24	0.76	0.00	0.00	0.76	0.00	0.00
60	69/24-12	23.48	0.76	6.06	17.42	0.00	3.03
	115/24	0.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
250	230/69/24	0.00	0.00	0.76	0.00	0.00	0.76
300	230/69/24	0.00	0.76	0.00	0.00	0.76	0.00
	230/115/24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total		44.70	2.27	7.58	37.12	1.52	4.55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตาราง 4.14 กรณีประเมินสภาพโดยใช้ปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 จากตารางที่ 2.9 พบว่ามีหม้อแปลงเกิดปัญหาเกี่ยวกับความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300°C (T1) สูงสุด โดยหม้อแปลงพิกัดกำลัง 60 MVA พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV เกิดปัญหาดังกล่าวมากที่สุด และอีก 7.58% ไม่สามารถระบุปัญหาที่เกิดขึ้นได้ ส่วนกรณีการประเมินสภาพหม้อแปลงด้วยวิธี HI พบว่า มีหม้อแปลงที่มีปัญหาเกี่ยวกับความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300°C (T1) สูงสุด โดยหม้อแปลงพิกัดกำลัง 40 MVA พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV เกิดปัญหาดังกล่าวมากที่สุด ส่วนหม้อแปลงอีก 4.55% ไม่สามารถระบุปัญหาที่เกิดขึ้นได้



รูปที่ 4.4 กราฟจำนวนหม้อแปลงที่ประเมินด้วยปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 และผ่านการแปลผลด้วยวิธี IEC Ratio จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน



รูปที่ 4.5 กราฟจำนวนหม้อแปลงที่ประเมินด้วยวิธี HI และผ่านการแปลผลด้วยวิธี IEC Ratio จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 การแปลผลแก๊สด้วยวิธีการ Duval Triangle และ Duval Pentagon

1. ขั้นตอนการแปลผล

- ขั้นตอนการแปลผลสำหรับ Duval Triangle 1
ใส่ค่าแก๊สทั้ง 3 ชนิด ที่ได้จากการทำ DGA ในหน่วย ppm ลงในช่องใส่ค่าแก๊สในรูปที่ 3.1 โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าที่ใส่ลงไปเป็นเปอร์เซ็นต์แล้วทำการพล็อตจุดลงบนกราฟสามเหลี่ยมโดยอัตโนมัติ ทำการอ่านผลลัพธ์ที่ได้แล้วบันทึกผล
- ขั้นตอนการแปลผลสำหรับ Duval Triangle 4
นำค่าแก๊สทั้ง 3 ชนิดจากหม้อแปลงที่ Duval Triangle 1 แปลผลออกมาอยู่ในโซน PD, T1 และ T2 ใส่ค่าแก๊สลงในช่องสำหรับใส่ค่าแก๊สในรูปที่ 3.3 โดยโปรแกรมจะทำการคำนวณค่าที่ใส่ลงไปเป็นเปอร์เซ็นต์แล้วทำการพล็อตจุดลงบนกราฟสามเหลี่ยมโดยอัตโนมัติ ทำการอ่านผลลัพธ์ที่ได้แล้วบันทึกผล
- ขั้นตอนการแปลผลสำหรับ Duval Triangle 5
นำค่าแก๊สทั้ง 3 ชนิดจากหม้อแปลงที่ Duval Triangle 4 แปลผลออกมาอยู่ในโซน Unnamed ใส่ค่าแก๊สลงในช่องสำหรับใส่ค่าแก๊สในรูปที่ 3.4 โดยโปรแกรมจะทำการคำนวณค่าที่ใส่ลงไปเป็นเปอร์เซ็นต์แล้วทำการพล็อตจุดลงบนกราฟสามเหลี่ยมโดยอัตโนมัติ ทำการอ่านผลลัพธ์ที่ได้แล้วบันทึกผล
- ขั้นตอนการแปลผลสำหรับ Duval Pentagon 1 และ Duval Pentagon 2
ใส่ค่าแก๊สทั้ง 5 ชนิด ที่ได้จากการทำ DGA ในหน่วย ppm ที่ต้องการแปลผลด้วย Duval Pentagon 1 และ Duval Pentagon 2 ในโปรแกรมในรูปที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าที่ใส่ลงไปเป็นเปอร์เซ็นต์แล้วทำการหาจุด Centroid และพล็อตจุดลงบนรูปห้าเหลี่ยมโดยอัตโนมัติ ทำการอ่านผลลัพธ์ที่ได้แล้วบันทึกผล

2. ผลการแปลด้วยวิธี Duval Triangle และ Duval Pentagon

ผลการแปลด้วยวิธี Duval Triangle และ Duval Pentagon แสดงไว้ในตารางที่ 4.16 และ ตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.16 ผลการแปลผลด้วยวิธีการ Duval Triangle และ Duval Pentagon (ปริมาณแก๊สอ้างอิง L1)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	Duval Triangle 1	Duval Triangle 4	Duval Triangle 5	Duval Pentagon 1	Duval Pentagon 2
1	CHIDLOM	CLT-TR-1	30/40	69/12	T1	O	-	S	S
2	BANGBON	BB-TR-3	30/40	69/24-12	T1	Unnamed	O	S	S
3	BANGKLO	BL-TR-2	30/40	69/24-12	T2	O	-	S	S
4	BANGKHOONPROM	BR-TR-1	30/40	69/24-12	T1	O	-	T1	O
5	BANGKHOONPROM	BR-TR-2	30/40	69/24-12	T1	O	-	T1	O
6	KLONGSAN	KN-TR-1	30/40	69/24-12	T1	O	-	T1	O
7	KLONGSAN	KN-TR-2	30/40	69/24-12	T1	O	-	S	S
8	KLONGTOEY	KT-TR-1	30/40	69/24-12	T1	O	-	S	S
9	KLONGTOEY	KT-TR-2	30/40	69/24-12	T2	O	-	T1	O
10	MAHAMEK	MM-TR-1	30/40	69/24-12	T2	O	-	T1	O
11	MAHAISAWAN	MN-TR-1	30/40	69/24-12	T2	Unnamed	Unnamed	T1	O
12	MAHAISAWAN	MN-TR-2	30/40	69/24-12	T2	Unnamed	O	S	S
13	NANGLERNG	NLG-TR-2	30/40	69/24-12	T1	O	-	T1	O
14	PRAPRADANG	PD-TR-2	30/40	69/24-12	T1	S	-	T1	O
15	PRAPRADANG	PD-TR-3	30/40	69/24-12	T2	O	-	S	S

ตารางที่ 4.16(ต่อ) ผลการแปลผลด้วยวิธีการ Duval Triangle และ Duval Pentagon (ปริมาณแก๊สอ้างอิง L1)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	Duval Triangle 1	Duval Triangle 4	Duval Triangle 5	Duval Pentagon 1	Duval Pentagon 2
16	PATHUMWAN	PM-TR3	30/40	69/24-12	T2	Unnamed	Unnamed	T1	O
17	RASBURANA	RN-TR3	30/40	69/24-12	T3	-	-	T1	O
18	SAPANDUM	SD-TR1	30/40	69/24-12	D+T	-	-	S	S
19	SAPANDUM	SD-TR2	30/40	69/24-12	T3	-	-	T3	T3-H
20	SAPANDUM	SD-TR3	30/40	69/24-12	T2	O	-	T1	O
21	SURAWONG	SU-TR1	30/40	69/24-12	T2	O	-	T1	O
22	SURAWONG	SU-TR2	30/40	69/24-12	T1	O	-	S	S
23	SURAWONG	SU-TR3	30/40	69/24-12	T2	O	-	S	S
24	SIPRAYA	SY-TR1	30/40	69/24-12	T2	S	-	T2	C
25	SIPRAYA	SY-TR2	30/40	69/24-12	T2	O	-	T1	O
26	THONBURI	TB-TR-1	30/40	69/24-12	T1	O	-	S	S
27	WATLIEB	WL-TR-1	30/40	69/24-12	T1	S	-	T1	O
28	THAWEEWATTANA	TWN-TR-1	30/40	115/24	T1	O	-	T1	O
29	BANGPRAKOD	BK-TR-1	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	S
30	BANGPRAKOD	BK-TR-2	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	T1	O

ตารางที่ 4.1.6(ต่อ) ผลการแปลผลด้วยวิธีการ Duval Triangle และ Duval Pentagon (ปริมาณแก๊สอ้างอิง L1)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	Duval Triangle 1	Duval Triangle 4	Duval Triangle 5	Duval Pentagon 1	Duval Pentagon 2
31	BANGPRAKOD	BK-TR-3	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	T1	O
32	BANGKRADEE	BKD-TR-1	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	S
33	BANGKOKNOI	BOT-TR-1	36/48/60	69/24-12	T1	Unnamed	O	S	S
34	BANGKOKNOI	BOT-TR-2	36/48/60	69/24-12	T1	Unnamed	O	S	S
35	BANGKOKNOI	BOT-TR-3	36/48/60	69/24-12	T1	Unnamed	O	S	S
36	JANGRON	JRN-TR-1	36/48/60	69/24-12	T2	O	-	T1	O
37	JANGRON	JRN-TR-2	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	S
38	KLONGSANPASAMIT	KS-TR-1	36/48/60	69/24-12	T2	Unnamed	O	S	S
39	KLONGSANPASAMIT	KS-TR-2	36/48/60	69/24-12	T2	Unnamed	O	S	S
40	KLONGSANAMCHAI	KSC-TR-1	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	T1	O
41	KLONGWATSING	KWS-TR-1	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	S
42	KLONGWATSING	KWS-TR-2	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	S
43	LUMPINI	LN-TR-4	36/48/60	69/24-12	T1	S	-	T1	O
44	LADYA	LYA-TR-2	36/48/60	69/24-12	D+T	S	-	T1	O
45	NONGKHAM	NH-TR-2	36/48/60	69/24-12	T2	C	-	T3	T3-H

ตารางที่ 4.16(ต่อ) ผลการแปลผลด้วยวิธีการ Duval Triangle และ Duval Pentagon (ปริมาณแก๊สอ้างอิง L1)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	Rated Triangle 1	Duval Triangle 4	Duval Triangle 5	Duval Pentagon 1	Duval Pentagon 2
46	PHAISINGTO	PI-TR1	36/48/60	69/24-12	D+T	-	-	S	S
47	PHAISINGTO	PI-TR2	36/48/60	69/24-12	PD	S	-	T1	O
48	PHAISINGTO	PI-TR3	36/48/60	69/24-12	T1	S	-	T2	C
49	PHAISINGTO	PI-TR4	36/48/60	69/24-12	D+T	S	-	T3	T3-H
50	SAINAMTHIP	SA-TR1	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	T1	O
51	SAINAMTHIP	SA-TR2	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	S
52	SURASAK	SRK-TR1	36/48/60	69/24-12	T1	Unnamed	O	S	S
53	SURASAK	SRK-TR2	36/48/60	69/24-12	T1	Unnamed	O	S	S
54	SOUTH THONBURI	STT-TR1	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	S
55	SOUTH THONBURI	STT-TR2	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	S
56	SOUTH THONBURI	STT-TR3	36/48/60	69/24-12	T1	C	-	T1	O
57	THONBURI	TB-TR-2	36/48/60	69/24-12	T1	S	-	S	S
58	THONBURI	TB-TR-3	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	S
59	TANONTOK	TTT-TR-1	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	S
60	TANONTOK	TTT-TR-2	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	T1	O

ตารางที่ 4.16(ต่อ) ผลการแปลผลด้วยวิธีการ Duval Triangle และ Duval Pentagon (ปริมาณแก๊สอ้างอิง L1)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	Rated Triangle 1	Duval Triangle 1	Duval Triangle 4	Duval Triangle 5	Duval Pentagon 1	Duval Pentagon 2
61	THONBURIOM	TBR-TR-1	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	-	T1	O
62	THONBURIOM	TBR-TR-2	36/48/60	69/24-12	T2	O	-	-	S	S
63	WANGPETCHABOON	WB-TR-2	36/48/60	69/24-12	D+T	S	-	-	T1	O
64	WATKAMPANG	WKP-TR-1	36/48/60	69/24-12	T2	C	-	-	T2	C
65	WATKAMPANG	WKP-TR-2	36/48/60	69/24-12	T1	Unnamed	O	-	S	S
66	YENARKART	YN-TR-3	36/48/60	69/24-12	D+T	-	-	-	S	S
67	CHIDLOM	CLT-TR-2	36/48/60	69/12	T1	O	-	-	T1	O
68	MAHAISAWAN	MN-TR-3	36/48/60	69/24	T2	Unnamed	O	-	S	S
69	EKACHAI	EKC-TR-1	36/48/60	115/24-12	T1	S	-	-	T1	O
70	TANONTOK	TTT-TX-2	150/200/250	230/69/24	T3	-	-	-	T3	T3-H
71	CHIDLOM	CLT-TX-1	180/240/300	230/69/24	T3	-	-	-	T2	C

ตารางที่ 4.17 ผลการแปลผลด้วยวิธีการ Duval Triangle และ Duval Pentagon (HI)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	Duval Triangle 1	Duval Triangle 4	Duval Triangle 5	Duval Pentagon 1	Duval Pentagon 2
1	CHIDLOM	CLT-TR-1	30/40	69/12	T1	O	-	S	-
2	BANGBON	BB-TR-3	30/40	69/24-12	T1	Unnamed	O	S	-
3	BANGKLO	BL-TR-2	30/40	69/24-12	T2	O	-	S	-
4	BANGKHOONPROM	BR-TR-1	30/40	69/24-12	T1	O	-	T1	O
5	BANGKHOONPROM	BR-TR-2	30/40	69/24-12	T1	O	-	T1	O
6	BANGKHOONPROM	BR-TR-3	30/40	69/24-12	T2	O	-	T1	O
7	KLONGSAN	KN-TR-1	30/40	69/24-12	T1	O	-	T1	O
8	KLONGSAN	KN-TR-2	30/40	69/24-12	T1	O	-	S	-
9	KLONGTOEY	KT-TR-1	30/40	69/24-12	T1	O	-	S	-
10	KLONGTOEY	KT-TR-2	30/40	69/24-12	T2	O	-	T1	O
11	MAHAMEK	MM-TR-1	30/40	69/24-12	T2	O	-	T1	O
12	MAHAISAWAN	MN-TR-1	30/40	69/24-12	T2	Unnamed	Unnamed	T1	O
13	MAHAISAWAN	MN-TR-2	30/40	69/24-12	T2	Unnamed	O	S	-
14	NANGLERNG	NLG-TR-2	30/40	69/24-12	T1	O	-	T1	O
15	PRAPRADANG	PD-TR-2	30/40	69/24-12	T1	S	-	T1	O

ตารางที่ 4.17(ต่อ) ผลการแปลผลตัวชี้วัดการ Duval Triangle และ Duval Pentagon (HI)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	Duval Triangle 1	Duval Triangle 4	Duval Triangle 5	Duval Pentagon 1	Duval Pentagon 2
16	PRAPRADANG	PD-TR-3	30/40	69/24-12	T2	O	-	S	-
17	PATHUMWAN	PM-TR3	30/40	69/24-12	T2	Unnamed	Unnamed	T1	O
21	SAPANDUM	SD-TR3	30/40	69/24-12	T2	O	-	T1	O
22	SURAWONG	SU-TR1	30/40	69/24-12	T2	O	-	T1	O
23	SURAWONG	SU-TR2	30/40	69/24-12	T1	O	-	S	-
24	SURAWONG	SU-TR3	30/40	69/24-12	T2	O	-	S	-
25	SIPRAYA	SY-TR1	30/40	69/24-12	T2	S	-	T2	C
26	SIPRAYA	SY-TR2	30/40	69/24-12	T2	O	-	T1	O
27	THONBURI	TB-TR-1	30/40	69/24-12	T1	O	-	S	-
28	THAWEEWATTANA	TWN-TR-1	30/40	115/24	T1	O	-	T1	O
29	BANGPRAKOD	BK-TR-1	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	-
30	BANGPRAKOD	BK-TR-2	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	T1	O

ตารางที่ 4.17(ต่อ) ผลการแปดผลตัววิธีการ Duval Triangle และ Duval Pentagon (HI)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	Duval Triangle 1	Duval Triangle 4	Duval Triangle 5	Duval Pentagon 1	Duval Pentagon 2
31	BANGPRAKOD	BK-TR-3	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	T1	O
32	BANGKRADEE	BKD-TR-1	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	-
33	BANGKOKNOI	BOT-TR-1	36/48/60	69/24-12	T1	Unnamed	O	S	-
34	BANGKOKNOI	BOT-TR-2	36/48/60	69/24-12	T1	Unnamed	O	S	-
35	JANGRON	JRN-TR-1	36/48/60	69/24-12	T2	O	-	T1	O
36	JANGRON	JRN-TR-2	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	-
37	KLONGSANPASAMIT	KS-TR-2	36/48/60	69/24-12	T2	Unnamed	O	S	-
38	KLONGSANAMCHAI	KSC-TR-1	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	T1	O
39	KLONGWATSING	KWS-TR-1	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	-
40	KLONGWATSING	KWS-TR-2	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	-
41	NONGKHAM	NH-TR-2	36/48/60	69/24-12	T2	C	-	T3	T3-H
42	SAINAMTHIP	SA-TR1	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	T1	O
43	SAINAMTHIP	SA-TR2	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	-
44	SURASAK	SRK-TR1	36/48/60	69/24-12	T1	Unnamed	O	S	-
45	SURASAK	SRK-TR2	36/48/60	69/24-12	T1	Unnamed	O	S	-

ตารางที่ 4.17(ต่อ) ผลการแปดผลด้วยวิธีการ Duval Triangle และ Duval Pentagon (HI)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	Duval Triangle 1	Duval Triangle 4	Duval Triangle 5	Duval Pentagon 1	Duval Pentagon 2
46	SOUTH THONBURI	S TT-TR1	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	-
47	SOUTH THONBURI	S TT-TR2	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	-
48	THONBURI	TB-TR-3	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	-
49	TANONTOK	TTT-TR-1	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	-
50	TANONTOK	TTT-TR-2	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	T1	O
51	THONBURIROM	TBR-TR-1	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	T1	O
52	THONBURIROM	TBR-TR-2	36/48/60	69/24-12	T2	O	-	S	-
53	WANGPETCHABOON	WB-TR-2	36/48/60	69/24-12	T2	S	-	S	-
54	CHIDLOM	CLT-TR-2	36/48/60	69/12	T1	O	-	T1	O
55	MAHAISAWAN	MN-TR-3	36/48/60	69/24	T2	Unnamed	O	S	-
56	TANONTOK	TTT-TX-2	150/200/250	230/69/24	T3	-	-	T3	T3-H
57	CHIDLOM	CLT-TX-1	180/240/300	230/69/24	T3	-	-	T2	C

3. การวิเคราะห์การแปลผลค่าแก๊สด้วยวิธี Duval Triangle และ วิธี Duval Pentagon

1) การวิเคราะห์การแปลผลค่าแก๊สด้วยวิธี Duval Triangle 1

ตารางที่ 4.18 จำนวนหม้อแปลงที่ผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 1 จำแนกตามพิกัดกำลัง และแรงดัน

Rated Power (MVA)	Rated Voltage (kV)	Duval Triangle 1								
		เงื่อนไขปริมาณแก๊สอ้างอิง L1					HI			
		D+T	T1	T2	T3	PD	D+T	T1	T2	T3
40	69/24-12	1	12	12	2	0	1	11	13	2
	115/24	0	1	0	0	0	0	1	0	0
60	69/24-12	5	27	7	0	1	2	21	7	0
	115/24-12	0	1	0	0	0	0	0	0	0
250	230/69/24	0	0	0	1	0	0	0	0	1
300	230/69/24	0	0	0	1	0	0	0	0	1
	230/115/24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total		6	41	19	4	1	3	33	20	4

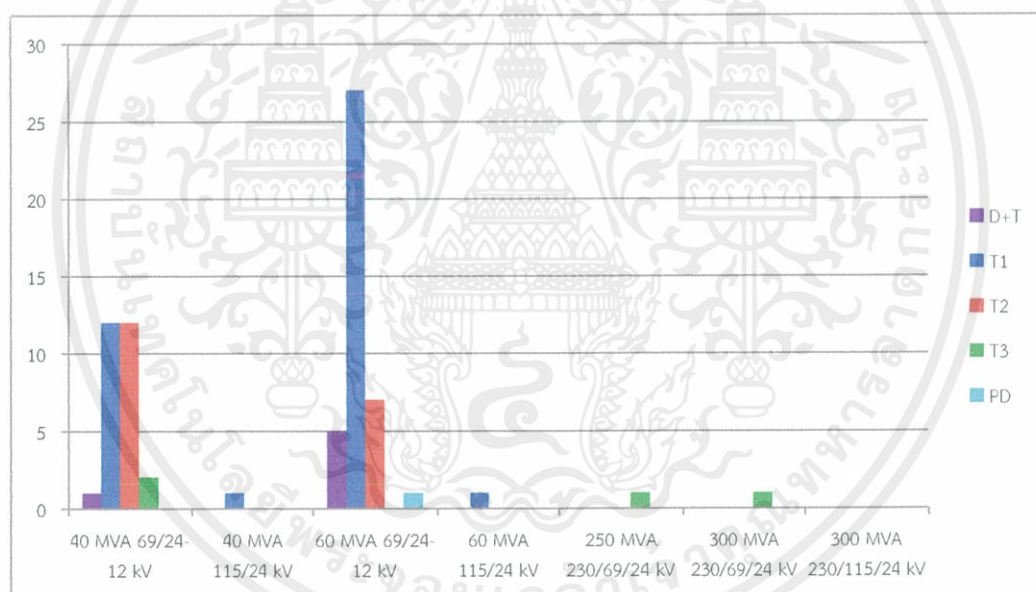
ตารางที่ 4.19 จำนวนหม้อแปลงที่ผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 1 จำแนกตามพิกัดกำลัง และแรงดัน (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์)

Rated Power (MVA)	Rated Voltage (kV)	Duval Triangle 1 (%)								
		เงื่อนไขปริมาณแก๊สอ้างอิง L1					HI			
		D+T	T1	T2	T3	PD	D+T	T1	T2	T3
40	69/24-12	0.76	9.09	9.09	1.52	0	0.76	8.33	9.85	1.52
	115/24	0	0.76	0	0	0	0	0.76	0	0
60	69/24-12	3.79	20.45	5.3	0	0.76	1.52	15.91	5.3	0
	115/24-12	0	0.76	0	0	0	0	0	0	0
250	230/69/24	0	0	0	0.76	0	0	0	0	0.76
300	230/69/24	0	0	0	0.76	0	0	0	0	0.76
	230/115/24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total		4.55	31.06	14.39	3.03	0.76	2.27	25	15.15	3.03

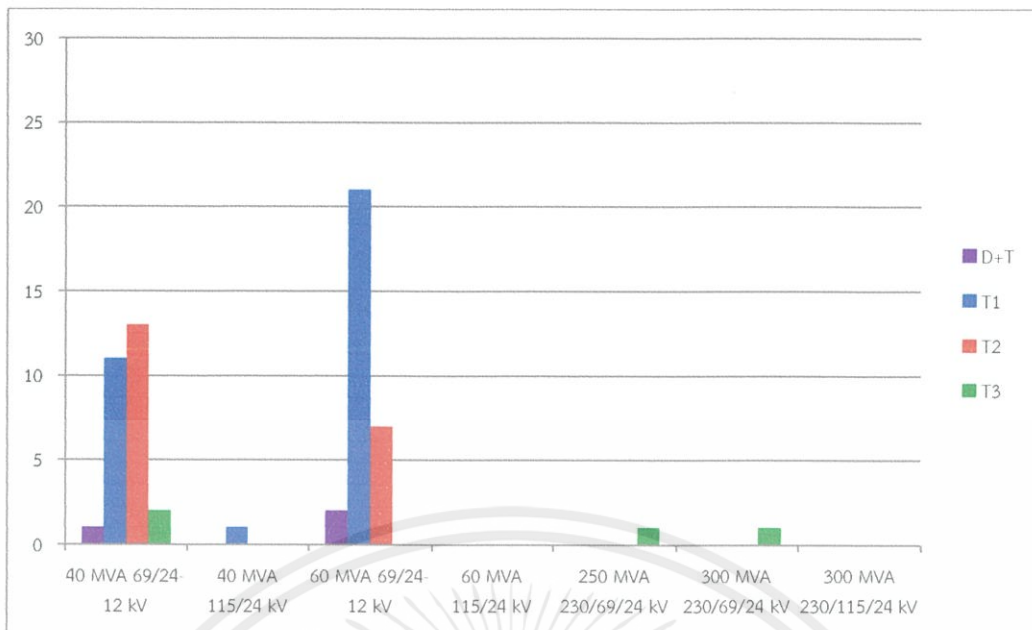
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.18 และ 4.19 พบว่าหม้อแปลงมีปัญหาเกี่ยวกับการเกิดความผิดปกติทางความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300°C (T1) มากที่สุด คิดเป็น 31.06% กรณีการประเมินสภาพโดยใช้ปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 จากตารางที่ 2.9 และ 25% กรณีประเมินสภาพด้วยวิธี HI สาเหตุอาจเกิดจากการเกิดโอเวอร์โหลดขึ้นที่หม้อแปลง หม้อแปลงที่มีปัญหามากคือหม้อแปลงที่พิกัดกำลัง 60 MVA พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV และหม้อแปลงที่พิกัดกำลัง 40 MVA พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV นอกจากนี้ยังพบปัญหาเกี่ยวกับการเกิดความผิดปกติทางความร้อนที่อุณหภูมิในช่วง $300 - 700^{\circ}\text{C}$ (T2) และการเกิดความผิดปกติทางความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 700°C (T3) ด้วย ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากความไม่สมบูรณ์ของส่วนประกอบทางกล เช่น นี้อทลวมที่บริเวณบัสบาร์ จุดต่อสายลวม เป็นต้น หม้อแปลงที่พิกัดกำลัง 250 MVA และ 300 MVA ที่ทุกพิกัดแรงดันมีปัญหาบ่อยมากอาจเป็นเพราะเป็นหม้อแปลงตัวใหญ่จึงมีการดูแลรักษาอย่างดี เพราะถ้าหากหม้อแปลงในกลุ่มนี้เกิดความเสียหายจนถึงขั้นต้องหยุดการทำงานก็อาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดความเสียหายหลายอย่างเกิดขึ้นตามมา

แต่อย่างไรก็ตามหม้อแปลงที่ถูกแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 1 แล้วได้ผลลัพธ์ออกมาเป็น PD, T1 และ T2 สามารถนำข้อมูลแก๊สไปแปลผลอีกครั้งด้วย Duval Triangle 4 และ 5 เพื่อให้ระบุปัญหาได้ละเอียดมากขึ้น



รูปที่ 4.6 กราฟจำนวนหม้อแปลงที่ประเมินปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 และผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 1 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน



รูปที่ 4.7 กราฟจำนวนหม้อแปลงที่ประเมินด้วยเงื่อนไข HI และผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 1 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน

2) การวิเคราะห์การแปลผลค่าแก๊สด้วยวิธี Duval Triangle 4 และ Duval Triangle 5 Duval Triangle 4 และ Duval Triangle 5 นั้นจะใช้งานเมื่อทำการแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 1 แล้วผลลัพธ์ออกมาอยู่ในโซน PD T1 และ T2 และต้องใช้คู่กันตามเหตุผลที่กล่าวไปในวิธีการใช้งาน จากผลการแปลผลดังตาราง 4.16 และ 4.17 สามารถนำมาจำแนกตามพิกัดกำลังและพิกัดแรงดันได้ดังตารางที่ 4.20 – 4.23

ตารางที่ 4.20 จำนวนหม้อแปลงที่ผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 4 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน

Rated Power (MVA)	Rated Voltage (kV)	Duval Triangle 4							
		เงื่อนไขปริมาณแก๊สอ้างอิง L1				HI			
		Unnamed	S	O	C	Unnamed	S	O	C
40	69/24-12	4	3	17	0	4	2	18	0
	115/24	0	0	1	0	0	0	1	0
60	69/24-12	9	7	19	3	6	1	19	2
	115/24-12	0	1	0	0	0	0	0	0
250	230/69/24	0	0	0	0	0	0	0	0
300	230/69/24	0	0	0	0	0	0	0	0
	230/115/24	0	0	0	0	0	0	0	0
Total		13	11	37	3	10	3	18	2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.21 จำนวนหม้อแปลงที่ผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 5 จำแนกตามพิกัดกำลัง และแรงดัน

Rated Power (MVA)	Rated Voltage (kV)	Duval Triangle 5			
		เงื่อนไขปริมาณแก๊สอ้างอิง L1		HI	
		Unnamed	O	Unnamed	O
40	69/24-12	2	2	2	2
	115/24	0	0	0	0
60	69/24-12	0	9	0	6
	115/24-12	0	0	0	0
250	230/69/24	0	0	0	0
300	230/69/24	0	0	0	0
	230/115/24	0	0	0	0
Total		2	11	2	8

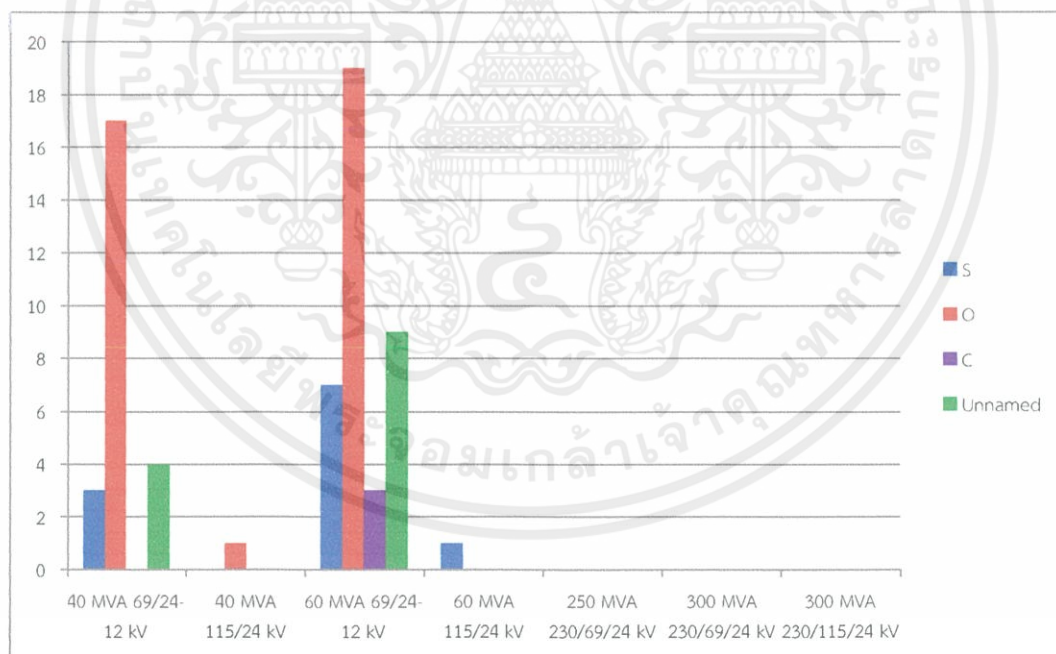
ตารางที่ 4.22 จำนวนหม้อแปลงที่ผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 4 จำแนกตามพิกัดกำลัง และแรงดัน (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์)

Rated Power (MVA)	Rated Voltage (kV)	Duval Triangle 4 (%)							
		เงื่อนไขปริมาณแก๊สอ้างอิง L1				HI			
		Unnamed	S	O	C	Unnamed	S	O	C
40	69/24-12	3.03	2.27	12.88	0	3.03	1.52	13.64	0
	115/24	0	0	0.76	0	0	0	0.76	0
60	69/24-12	6.82	5.3	14.39	2.27	4.55	0.76	14.39	1.52
	115/24-12	0	0.76	0	0	0	0	0	0
250	230/69/24	0	0	0	0	0	0	0	0
300	230/69/24	0	0	0	0	0	0	0	0
	230/115/24	0	0	0	0	0	0	0	0
Total		9.85	8.33	28.03	2.27	7.58	2.27	28.79	1.52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

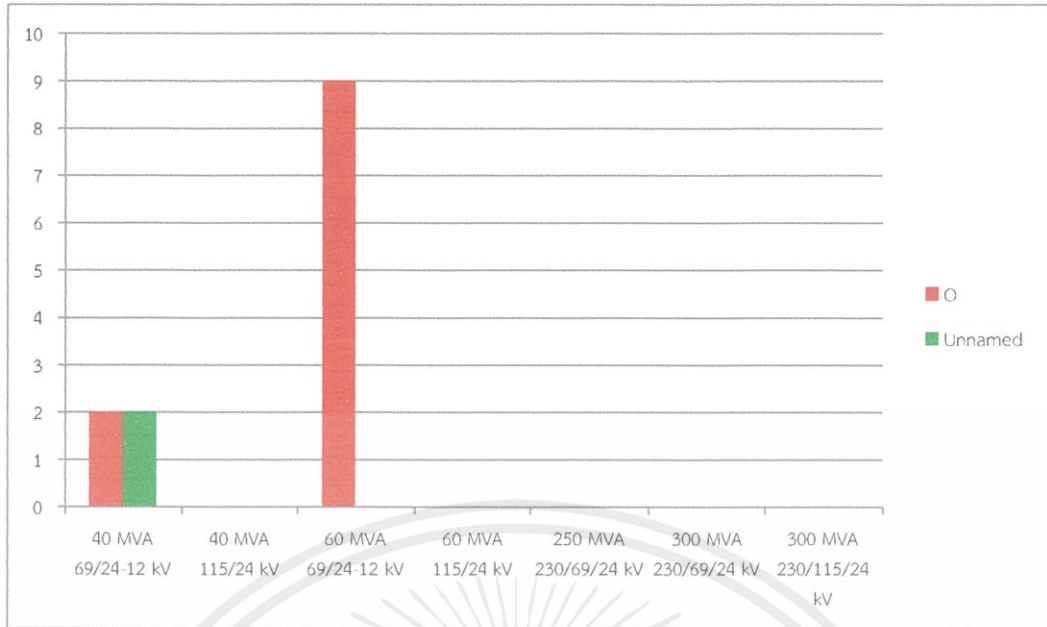
ตารางที่ 4.23 จำนวนหม้อแปลงที่ผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 5 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์)

Rated Power (MVA)	Rated Voltage (kV)	Duval Triangle 5 (%)			
		เงื่อนไขปริมาณแก๊สอ้างอิง L1		HI	
		Unnamed	O	Unnamed	O
40	69/24-12	1.52	1.52	1.52	1.52
	115/24	0	0	0	0
60	69/24-12	0	6.82	0	4.55
	115/24-12	0	0	0	0
250	230/69/24	0	0	0	0
300	230/69/24	0	0	0	0
	230/115/24	0	0	0	0
Total		1.52	8.33	1.52	6.06

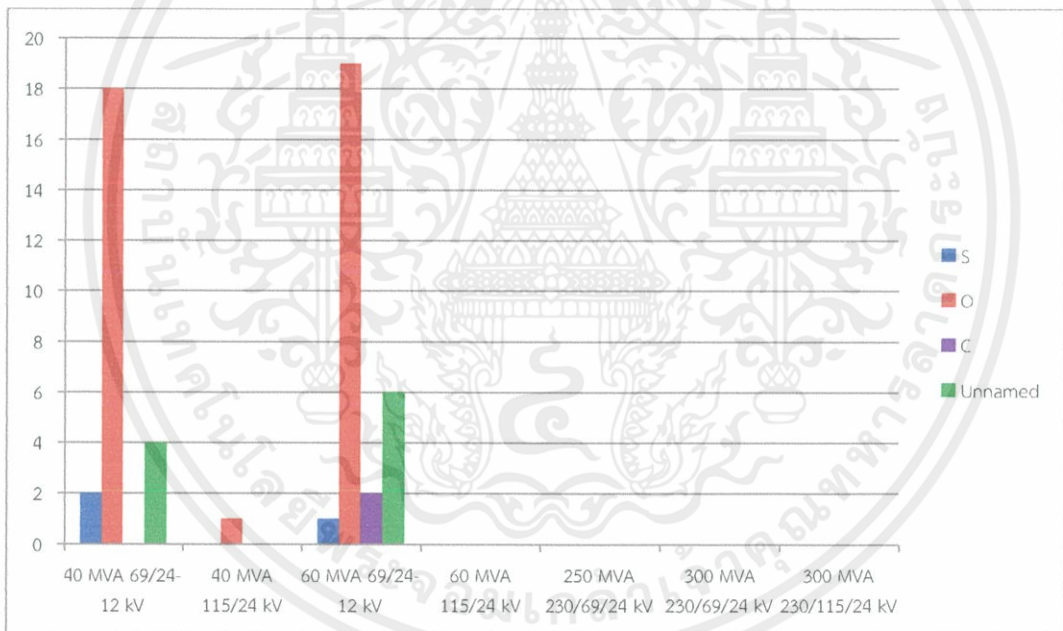


รูปที่ 4.8 กราฟจำนวนหม้อแปลงที่ประเมินด้วยปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 และผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 4 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

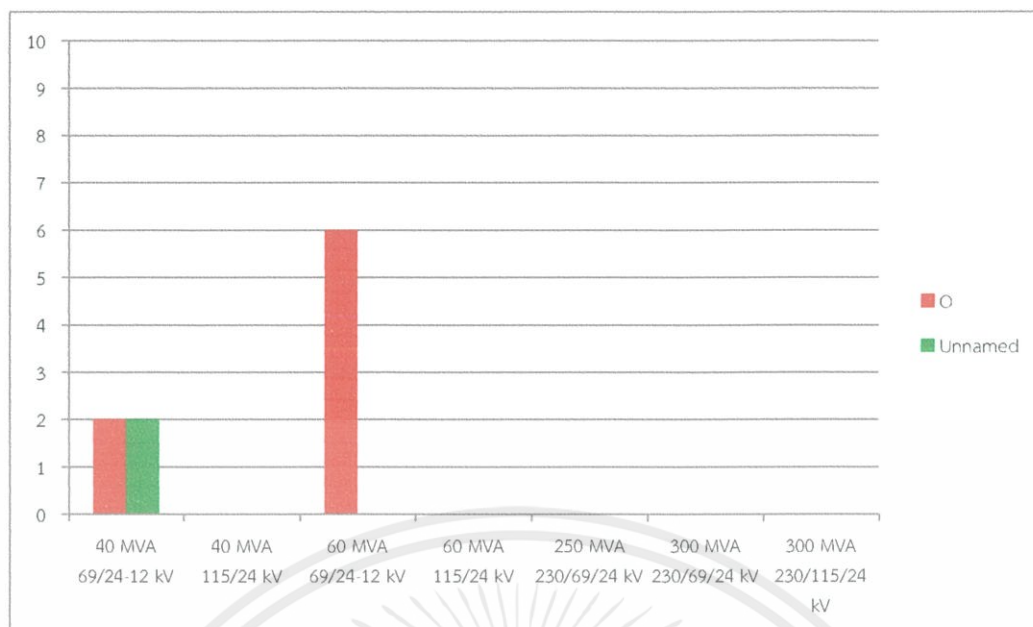


รูปที่ 4.9 กราฟจำนวนหม้อแปลงที่ประเมินด้วยปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 และผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 5 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน



รูปที่ 4.10 กราฟจำนวนหม้อแปลงที่ประเมินด้วยวิธี HI และผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 4 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 กราฟจำนวนหม้อแปลงที่ประเมินด้วยวิธี HI และผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 5 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน

จากตาราง 4.20 และ 4.21 เมื่อพิจารณาทั้งจากตารางผลการแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 4 จะสังเกตเห็นว่าหม้อแปลงที่มีปัญหามากที่สุดคือหม้อแปลงที่พิกัดกำลัง 60 MVA พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV และหม้อแปลงที่พิกัดกำลัง 40 MVA พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV ปัญหาที่เกิดขึ้นคือการเกิดโอเวอร์ฮีต (อุณหภูมิต่ำกว่า 250°C) และมีหม้อแปลง 8.83% ในกรณีการประเมินสภาพหม้อแปลงโดยใช้ปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 จากตารางที่ 2.9 และมีหม้อแปลง 2.27% ในกรณีการประเมินสภาพหม้อแปลงด้วยวิธี HI ที่มีแนวโน้มที่จะทำงานเป็นปกติแต่เกิดปัญหาด้านการเกิด Stray Gassing ขึ้นและจะพบว่าหม้อแปลง 13 ตัว ในกรณีการประเมินสภาพหม้อแปลงโดยใช้ปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 จากตารางที่ 2.8 และหม้อแปลง 10 ตัว ในกรณีประเมินสภาพด้วยวิธี HI ที่หลังจากทำการแปลผลแล้วได้ผลลัพธ์ออกมาอยู่ในโซน Unnamed หม้อแปลงเหล่านี้จะต้องนำไปทำการแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 5 ต่อ เพื่อหาปัญหาที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง

จากตาราง 4.22 และ 4.23 หลังจากทำการแปลผลหม้อแปลงที่อยู่ในโซน Unnamed ด้วยวิธี Duval Triangle 5 พบว่าหม้อแปลงพิกัดกำลัง 60 MVA พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV เกิดปัญหาเกี่ยวกับการเกิดโอเวอร์ฮีต (อุณหภูมิต่ำกว่า 250°C) มากที่สุด และมีหม้อแปลง 2 ตัวที่อยู่ในโซน Unnamed หมายความว่าหม้อแปลงทั้ง 2 ตัวนี้ไม่สามารถแปลผลได้ ส่วนหม้อแปลงที่พิกัดกำลัง 250 MVA และ 300 MVA ที่ทุกพิกัดแรงดันมีปัญหาบ่อยมากอาจเป็นเพราะเป็นหม้อแปลงตัวใหญ่จึงมีการดูแลรักษาอย่างดี เพราะถ้าหากหม้อแปลงในกลุ่มนี้เกิดความเสียหายหนักขึ้น จนถึงขั้นที่ต้องหยุดการทำงานก็อาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดความเสียหายหลายอย่างเกิดขึ้นตามมา

3) การวิเคราะห์การแปลผลค่าแก๊สด้วยวิธี Duval Pentagon 1 และ 2

ตารางที่ 4.24 จำนวนหม้อแปลงที่ผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Pentagon 1 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน

Rated Power (MVA)	Rated Voltage (kV)	Duval Pentagon 1							
		เงื่อนไขปริมาณแก๊สอ้างอิง L1				HI			
		S	T1	T2	T3	S	T1	T2	T3
40	69/24-12	11	14	1	1	11	14	1	1
	115/24	0	1	0	0	0	1	0	0
60	69/24-12	23	13	2	2	19	8	2	1
	115/24-12	0	1	0	0	0	0	0	0
250	230/69/24	0	0	0	1	0	0	0	1
300	230/69/24	0	0	1	0	0	0	1	0
	230/115/24	0	0	0	0	0	0	0	0
Total		34	29	4	4	30	23	4	3

ตารางที่ 4.25 จำนวนหม้อแปลงที่ผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Pentagon 2 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน

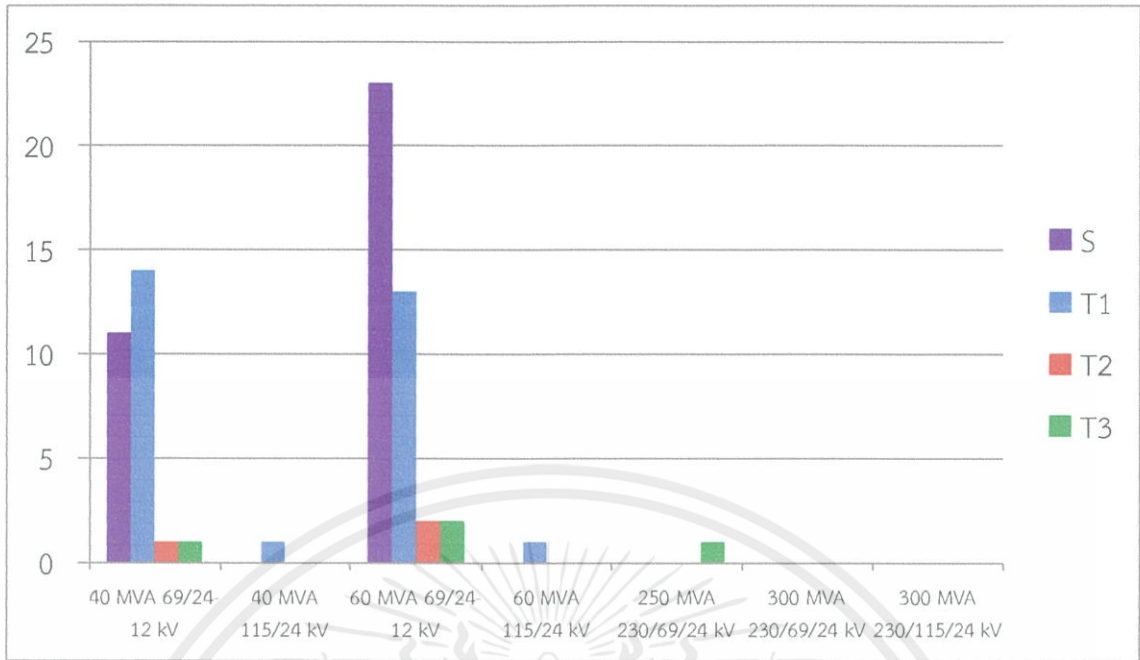
Rated Power (MVA)	Rated Voltage (kV)	Duval Pentagon 2					
		เงื่อนไขปริมาณแก๊สอ้างอิง L1			HI		
		O	C	T3-H	O	C	T3-H
40	69/24-12	14	1	1	14	1	1
	115/24	1	0	0	1	0	0
60	69/24-12	13	2	2	8	2	1
	115/24-12	1	0	0	0	0	0
250	230/69/24	0	0	1	0	0	1
300	230/69/24	0	1	0	0	1	0
	230/115/24	0	0	0	0	0	0
Total		29	4	4	23	4	3

ตารางที่ 4.26 จำนวนหม้อแปลงที่ผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Pentagon 1 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์)

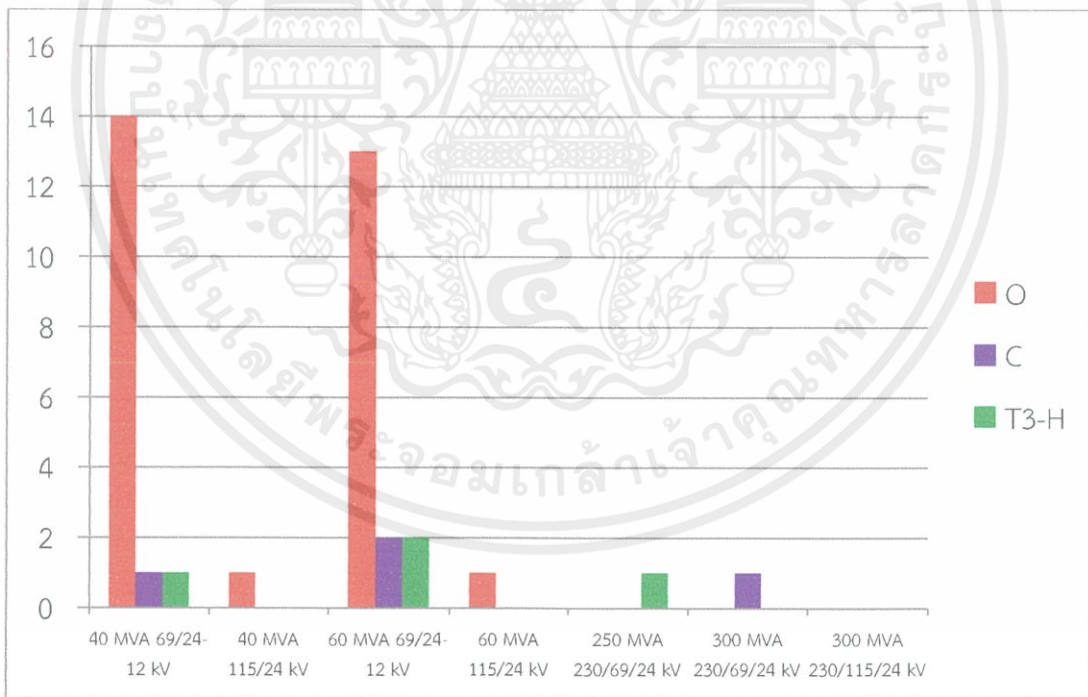
Rated Power (MVA)	Rated Voltage (kV)	Duval Pentagon 1 (%)							
		เงื่อนไขปริมาณแก๊สอ้างอิง L1				HI			
		S	T1	T2	T3	S	T1	T2	T3
40	69/24-12	8.33	10.61	0.76	0.76	8.33	10.61	0.76	0.76
	115/24	0	0.76	0	0	0	0.76	0	0
60	69/24-12	17.42	9.85	1.52	1.52	14.39	6.06	1.52	0.76
	115/24-12	0	0.76	0	0	0	0	0	0
250	230/69/24	0	0	0	0.76	0	0	0	0.76
300	230/69/24	0	0	0.76	0	0	0	0.76	0
	230/115/24	0	0	0	0	0	0	0	0
Total		25.76	21.97	3.03	3.03	22.73	17.42	3.03	2.27

ตารางที่ 4.27 จำนวนหม้อแปลงที่ผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Pentagon 2 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์)

Rated Power (MVA)	Rated Voltage (kV)	Duval Pentagon 2 (%)					
		เงื่อนไขปริมาณแก๊สอ้างอิง L1			HI		
		O	C	T3-H	O	C	T3-H
40	69/24-12	10.61	0.76	0.76	10.61	0.76	0.76
	115/24	0.76	0	0	0.76	0	0
60	69/24-12	9.85	1.52	1.52	6.06	1.52	0.76
	115/24-12	0.76	0	0	0	0	0
250	230/69/24	0	0	0.76	0	0	0.76
300	230/69/24	0	0.76	0	0	0.76	0
	230/115/24	0	0	0	0	0	0
Total		21.97	3.03	3.03	17.42	3.03	2.27

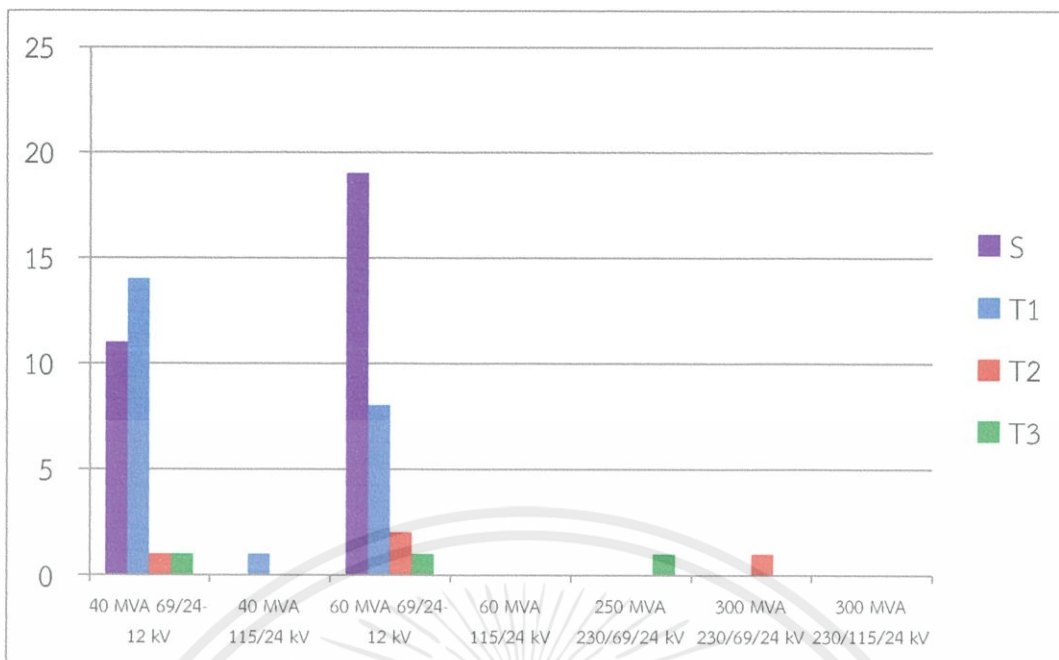


รูปที่ 4.12 กราฟจำนวนหม้อแปลงที่ประเมินด้วยปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 และผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Pentagon 1 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน

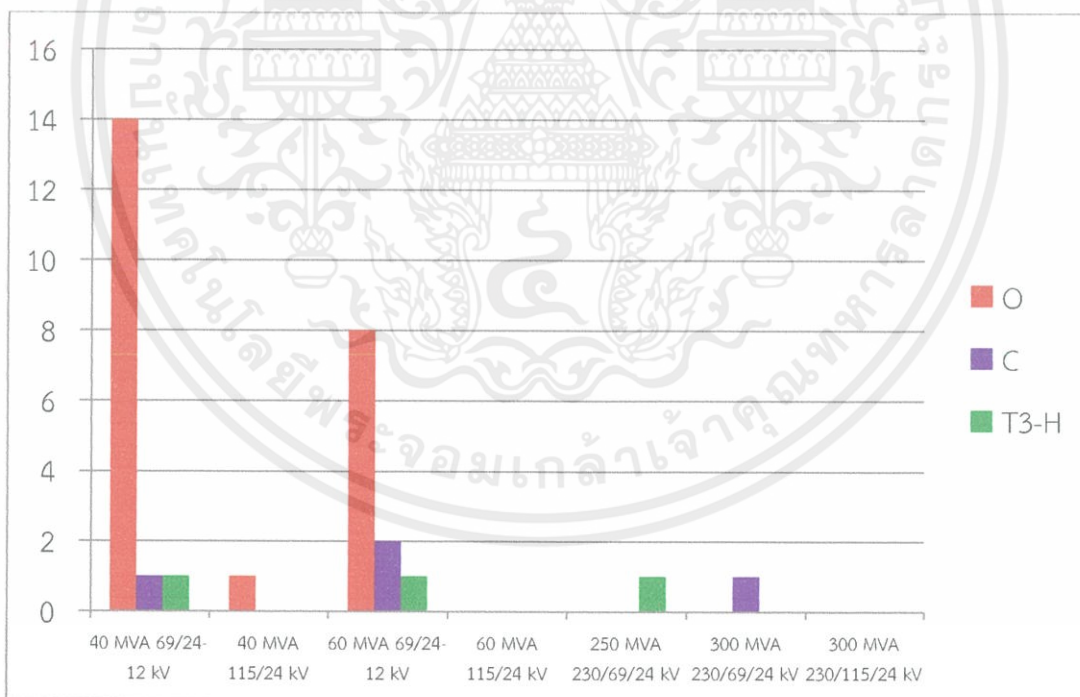


รูปที่ 4.13 กราฟจำนวนหม้อแปลงที่ประเมินด้วยปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 และผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Pentagon 2 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 กราฟจำนวนหม้อแปลงที่ประเมินด้วยวิธี HI และผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Pentagon 1 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน



รูปที่ 4.15 กราฟจำนวนหม้อแปลงที่ประเมินด้วยวิธี HI และผ่านการแปลผลด้วยวิธี Duval Pentagon 2 จำแนกตามพิกัดกำลังและแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.24 – 4.27 เมื่อพิจารณาทั้งจากตารางผลการแปลผลด้วยวิธี Duval Pentagon 1 และ Duval Pentagon 2 จะสังเกตเห็นว่าหม้อแปลงที่มีปัญหามากคือหม้อแปลงที่พิกัดกำลัง 60 MVA พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV และหม้อแปลงที่พิกัดกำลัง 40 MVA พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV ปัญหาที่เกิดขึ้นคือ การเกิดความผิดปกติทางความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300 °C เมื่อประเมินผลด้วย Duval Pentagon 1 และการเกิดโอเวอร์ฮีท (อุณหภูมิต่ำกว่า 250 °C) เมื่อประเมินผลด้วย Duval Pentagon 2 ซึ่งความผิดปกติทั้งสองชนิดนี้เป็นความผิดปกติชนิดเดียวกัน โดยการแปลผลด้วย Duval Pentagon 2 นั้นเป็นการแปลผลในเชิงลึกมากกว่า Duval Pentagon 1 ตามที่ได้กล่าวไปในวิธีการใช้งาน หม้อแปลงที่พิกัดแรงกำลัง 250 MVA และ 300 MVA ที่ทุกพิกัดแรงดันมีปัญหาบ่อยมากอาจเป็นเพราะเป็นหม้อแปลงตัวใหญ่จึงมีการดูแลรักษาอย่างดี เพราะถ้าหากหม้อแปลงในกลุ่มนี้เกิดความเสียหายจนขั้นต้องหยุดการทำงานก็อาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดความเสียหายหลายอย่างเกิดขึ้นตามมา

4) การวิเคราะห์ผลการแปลผลค่าแก๊สเมื่อใช้การแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 1-4-5 และ Duval Pentagon 1-2 ร่วมกัน

ในการวิเคราะห์ผลค่าแก๊สเมื่อใช้การแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 1, Duval Triangle 4 Duval Triangle 5, Duval Pentagon1 และ Duval Pentagon 2 ร่วมกันนั้นถ้าหากผลลัพธ์จากการแปลผลด้วยแต่ละวิธีออกมาไม่ตรงกันแสดงว่ามีความเป็นไปได้ที่หม้อแปลงตัวนั้นมีความผิดปกติหลายชนิดเกิดขึ้นผสมกัน ดังนั้นเมื่อนำข้อมูลมาจำแนกใหม่ภายใต้เงื่อนไขหม้อแปลงที่มีความผิดปกติเกิดขึ้นเพียงชนิดเดียวและหม้อแปลงที่เกิดความผิดปกติหลายชนิดเกิดขึ้นผสมกันจะได้ผลเป็นดังนี้

กรณีประเมินสภาพหม้อแปลงด้วยปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 ในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 4.28 หม้อแปลงที่เกิดความผิดปกติขึ้นเพียงชนิดเดียว (ประเมินสภาพด้วยปริมาณแก๊สอ้างอิง L1)

No	TR	Rated Power	Rated Voltage	Duval Triangle 1	Duval Triangle 4	Duval Triangle 5	Duval Pentagon 1	Duval Pentagon 2
1	CLT-TR-1	30/40	69/12	T1	O	-	S	S
2	BB-TR-3	30/40	69/24-12	T1	UN	O	S	S
3	BR-TR-1	30/40	69/24-12	T1	O	-	T1	O
4	BR-TR-2	30/40	69/24-12	T1	O	-	T1	O
5	KN-TR-1	30/40	69/24-12	T1	O	-	T1	O
6	KN-TR-2	30/40	69/24-12	T1	O	-	S	S
7	KT-TR-1	30/40	69/24-12	T1	O	-	S	S
8	NLG-TR-2	30/40	69/24-12	T1	O	-	T1	O
9	PD-TR-2	30/40	69/24-12	T1	S	-	T1	O
10	SD-TR1	30/40	69/24-12	D+T	-	-	S	S
11	SD-TR2	30/40	69/24-12	T3	-	-	T3	T3-H
12	SU-TR2	30/40	69/24-12	T1	O	-	S	S
13	TR-1	30/40	69/24-12	T1	O	-	S	S
14	TR-1	30/40	69/24-12	T1	S	-	T1	O
15	TR-1	30/40	115/24	T1	O	-	T1	O
16	BK-TR-1	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	S
17	BK-TR-2	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	T1	O
18	BK-TR-3	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	T1	O
19	BOT-TR-1	36/48/60	69/24-12	T1	UN	O	S	S
20	BOT-TR-2	36/48/60	69/24-12	T1	UN	O	S	S
21	BOT-TR-3	36/48/60	69/24-12	T1	UN	O	S	S
22	JRN-TR-2	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	S
23	KSC-TR-1	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	T1	O
24	KWS-TR-1	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	S

หมายเหตุ UN หมายถึง Unnamed

ตารางที่ 4.28(ต่อ) หม้อแปลงที่เกิดความผิดปกติขึ้นเพียงชนิดเดียว (ประเมินสภาพด้วยปริมาณแก๊สอ้างอิง L1)

No	TR	Rated Power	Rated Voltage	Duval Triangle 1	Duval Triangle 4	Duval Triangle 5	Duval Pentagon 1	Duval Pentagon 2
25	KWS-TR-2	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	S
26	LN-TR-4	36/48/60	69/24-12	T1	S	-	T1	O
27	SA-TR1	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	T1	O
28	SA-TR2	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	S
29	SRK-TR1	36/48/60	69/24-12	T1	UN	O	S	S
30	SRK-TR2	36/48/60	69/24-12	T1	UN	O	S	S
31	STT-TR1	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	S
32	STT-TR2	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	S
33	STT-TR3	36/48/60	69/24-12	T1	C	-	T1	O
34	TR-2	36/48/60	69/24-12	T1	S	-	S	S
35	TR-3	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	S
36	TR-1	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	S
37	TR-2	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	T1	O
38	TR-1	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	T1	O
39	TR-1	36/48/60	69/24-12	T2	C	-	T2	C
40	TR-2	36/48/60	69/24-12	T1	UN	O	S	S
41	CLT-TR-2	36/48/60	69/12	T1	O	-	T1	O
42	EKC-TR-1	36/48/60	115/24-12	T1	S	-	T1	O
43	TX-2	150/200/ 250	230/69/24	T3	-	-	T3	T3-H

หมายเหตุ UN หมายถึง Unnamed

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.29 หม้อแปลงที่เกิดความผิดปกติขึ้นหลายชนิดผสมกัน (ประเมินสภาพด้วยปริมาณแก๊สอ้างอิง L1)

No	TR	Rated Power	Rated Voltage	Duval Triangle 1	Duval Triangle 4	Duval Triangle 5	Duval Pentagon 1	Duval Pentagon 2
1	BL-TR-2	30/40	69/24-12	T2	O	-	S	S
2	KT-TR-2	30/40	69/24-12	T2	O	-	T1	O
3	MM-TR-1	30/40	69/24-12	T2	O	-	T1	O
4	MN-TR-1	30/40	69/24-12	T2	UN	UN	T1	O
5	MN-TR-2	30/40	69/24-12	T2	UN	O	S	S
6	PD-TR-3	30/40	69/24-12	T2	O	-	S	S
7	PM-TR3	30/40	69/24-12	T2	UN	UN	T1	O
8	RN-TR3	30/40	69/24-12	T3	-	-	T1	O
9	SD-TR3	30/40	69/24-12	T2	O	-	T1	O
10	SU-TR1	30/40	69/24-12	T2	O	-	T1	O
11	SU-TR3	30/40	69/24-12	T2	O	-	S	S
12	SY-TR1	30/40	69/24-12	T2	S	-	T2	C
13	SY-TR2	30/40	69/24-12	T2	O	-	T1	O
14	BKD-TR-1	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	S
15	JRN-TR-1	36/48/60	69/24-12	T2	O	-	T1	O
16	KS-TR-1	36/48/60	69/24-12	T2	UN	O	S	S
17	KS-TR-2	36/48/60	69/24-12	T2	UN	O	S	S
18	LYA-TR-2	36/48/60	69/24-12	D+T	S	-	T1	O
19	NH-TR-2	36/48/60	69/24-12	T2	C	-	T3	T3-H
20	PI-TR1	36/48/60	69/24-12	D+T	-	-	S	S

หมายเหตุ UN หมายถึง Unnamed

ตารางที่ 4.29(ต่อ) หม้อแปลงที่เกิดความผิดปกติขึ้นหลายชนิดผสมกัน (ประเมินสภาพด้วยปริมาณแก๊สอ้างอิง L1)

No	TR	Rated Power	Rated Voltage	Duval Triangle 1	Duval Triangle 4	Duval Triangle 5	Duval Pentagon 1	Duval Pentagon 2
21	PI-TR2	36/48/60	69/24-12	PD	S	-	T1	O
22	PI-TR3	36/48/60	69/24-12	T1	S	-	T2	C
23	PI-TR4	36/48/60	69/24-12	D+T	S	-	T3	T3-H
24	TR-2	36/48/60	69/24-12	T2	O	-	S	S
25	TR-2	36/48/60	69/24-12	D+T	S	-	T1	O
26	TR-3	36/48/60	69/24-12	D+T	-	-	S	S
27	MN-TR-3	36/48/60	69/24	T2	UN	O	S	S
28	CLT-TX-1	180/240/300	230/69/24	T3	-	-	T2	C

หมายเหตุ UN หมายถึง Unnamed

จากตารางที่ 4.28 และตารางที่ 4.29 มีหม้อแปลงที่ผ่านการแปลผลค่าแก๊สทั้งหมด 71 ตัว แสดงว่ามีหม้อแปลงที่มีแนวโน้มที่จะเกิดความผิดปกติขึ้นจำนวน 53.79% จากหม้อแปลงที่ทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 132 ตัว ถ้าหากนำหม้อแปลงจากตารางที่ 4.29 และตารางที่ 4.30 มาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยคิดเทียบกับจำนวนหม้อแปลงที่พิกัดกำลังและพิกัดแรงดันเดียวกันเพื่อดูแนวโน้มว่าหม้อแปลงที่พิกัดกำลังและพิกัดแรงดันต่างๆ มีความผิดปกติเกิดขึ้นชนิดเดียวหรือความผิดปกติหลายชนิดเกิดขึ้นผสมกันมากน้อยเพียงใดจะได้ผลดังตารางที่ 4.30 และตารางที่ 4.31

ตารางที่ 4.30 จำนวนหม้อแปลงที่เกิดความผิดปกติเกิดขึ้นเพียงชนิดเดียว (เปอร์เซ็นต์คิดเทียบกับจำนวนหม้อแปลงที่พิกัดกำลังและพิกัดแรงดันเดียวกัน)

Rated Power (MVA)	Rated Voltage (kV)	หม้อแปลงที่เกิดความผิดปกติขึ้นเพียงชนิดเดียว	
		จำนวน	คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ (%)
40	69/24-12	14	33.33
	115/24	1	50
60	69/24-12	26	37.14
	115/24-12	1	9.09
250	230/69/24	1	33.33
300	230/69/24	0	0
	230/115/24	0	0

ตารางที่ 4.31 จำนวนหม้อแปลงที่มีความผิดปกติเกิดขึ้นหลายชนิดผสมกัน (เปอร์เซ็นต์คิดเทียบกับจำนวนหม้อแปลงที่พิกัดกำลังและพิกัดแรงดันเดียวกัน)

Rated Power (MVA)	Rated Voltage (kV)	หม้อแปลงที่เกิดความผิดปกติขึ้นหลายชนิดผสมกัน	
		จำนวน	คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ (%)
40	69/24-12	13	30.95
	115/24	0	0
60	69/24-12	14	20
	115/24-12	0	0
250	230/69/24	0	0
300	230/69/24	1	50
	230/115/24	0	0

จากตารางที่ 4.30 จำนวนหม้อแปลงที่มีความผิดปกติเกิดขึ้นเพียงชนิดเดียว พบว่าหม้อแปลงที่พิกัดกำลัง 40 MVA ที่พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV, หม้อแปลงที่พิกัดกำลัง 60 MVA ทั้งที่พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV และ 115/24-12 kV เป็นหม้อแปลงที่มีโอกาสเกิดความผิดปกติเพียงชนิดเดียวค่อนข้างสูง ความผิดปกติที่เกิดบ่อยครั้งคือ ความผิดปกติทางความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300 °C (T1) และการเกิดโอเวอร์ฮีท (อุณหภูมิต่ำกว่า 250 °C) ซึ่งเป็นความผิดปกติชนิดเดียวกันในขณะหม้อแปลงที่พิกัดกำลัง 40 MVA ที่พิกัดแรงดัน 115/24 และหม้อแปลงที่พิกัดกำลัง 250 MVA ที่พิกัดแรงดัน 230/69/24 เองก็มีเปอร์เซ็นต์การเกิดความผิดปกติเพียงชนิดเดียวค่อนข้างสูงเช่นกัน แต่หม้อแปลงทั้ง 2 ชนิดนี้มีตัวอย่างข้อมูลน้อยมาก ดังนั้นค่าที่สรุปออกมาจึงอาจไม่ถูกต้องมากนักและเชื่อถือได้ยาก

จากตารางที่ 4.31 จำนวนหม้อแปลงที่มีความผิดปกติเกิดขึ้นหลายชนิดผสมกัน พบว่าหม้อแปลงที่พิกัดกำลัง 40 MVA ที่พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV, หม้อแปลงที่พิกัดกำลัง 60 MVA ที่พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV เป็นหม้อแปลงที่มีโอกาสเกิดความผิดปกติหลายชนิดผสมกันค่อนข้างสูง ความผิดปกติที่มักเกิดร่วมกันคือ ความผิดปกติทางความร้อนที่อุณหภูมิในช่วง 300 °C-700 °C (T2) ความผิดปกติทางความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300 °C (T1) และการเกิดโอเวอร์ฮีท (อุณหภูมิต่ำกว่า 250 °C) ส่วนหม้อแปลงพิกัดแรงดัน 300 kVA ที่พิกัดแรงดัน 230/69/24 kV มีเปอร์เซ็นต์การเกิดความผิดปกติหลายชนิดผสมกันสูงเช่นเดียวกันนั้นเป็นข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือต่ำ เพราะมีตัวอย่างข้อมูลน้อยเหมือนกับกรณีก่อนหน้านี้

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.30 และตารางที่ 4.31 ร่วมกัน พบว่าหม้อแปลงที่พิกัดกำลัง 40 MVA ที่พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV มีโอกาสเกิดความผิดปกติขึ้นเพียงชนิดเดียวและโอกาสเกิดความผิดปกติหลายชนิดผสมกันได้ในอัตราเท่าๆ กัน (ประมาณ 30%) และหม้อแปลงที่พิกัดกำลัง 60 MVA ที่พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV มีโอกาสเกิดความผิดปกติเพียงชนิดเดียวสูงกว่าโอกาสในการเกิดความผิดปกติหลายชนิดผสมกัน

กรณีประเมินสภาพด้วยวิธี HI

ตารางที่ 4.32 หม้อแปลงที่เกิดความผิดปกติขึ้นเพียงชนิดเดียว (ประเมินสภาพด้วยวิธี HI)

No	TR	Rated Power	Rated Voltage	Duval Triangle 1	Duval Triangle 4	Duval Triangle 5	Duval Pentagon 1	Duval Pentagon 2
1	CLT-TR-1	30/40	69/12	T1	O	-	S	-
2	BB-TR-3	30/40	69/24-12	T1	UN	O	S	-
3	BR-TR-1	30/40	69/24-12	T1	O	-	T1	O
4	BR-TR-2	30/40	69/24-12	T1	O	-	T1	O
5	KN-TR-1	30/40	69/24-12	T1	O	-	T1	O
6	KN-TR-2	30/40	69/24-12	T1	O	-	S	-
7	KT-TR-1	30/40	69/24-12	T1	O	-	S	-
8	NLG-TR-2	30/40	69/24-12	T1	O	-	T1	O
9	PD-TR-2	30/40	69/24-12	T1	S	-	T1	O
10	SD-TR2	30/40	69/24-12	T3	-	-	T3	T3-H
11	SU-TR2	30/40	69/24-12	T1	O	-	S	-
12	TR-1	30/40	69/24-12	T1	O	-	S	-
13	TR-1	30/40	115/24	T1	O	-	T1	O
14	BK-TR-1	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	-
15	BK-TR-2	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	T1	O
16	BK-TR-3	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	T1	O
17	BKD-TR-1	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	-
18	BOT-TR-1	36/48/60	69/24-12	T1	UN	O	S	-
19	BOT-TR-2	36/48/60	69/24-12	T1	UN	O	S	-
20	JRN-TR-2	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	-
21	KSC-TR-1	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	T1	O
22	KWS-TR-1	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	-
23	KWS-TR-2	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	-
24	SA-TR1	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	T1	O
25	SA-TR2	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	-
26	SRK-TR1	36/48/60	69/24-12	T1	UN	O	S	-
27	SRK-TR2	36/48/60	69/24-12	T1	UN	O	S	-
28	STT-TR1	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	-
29	STT-TR2	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	-
30	TR-3	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	-
31	TR-1	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	S	-
32	TR-2	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	T1	O
33	TR-1	36/48/60	69/24-12	T1	O	-	T1	O
34	TR-1	36/48/60	69/24-12	T2	C	-	T2	C
35	CLT-TR-2	36/48/60	69/12	T1	O	-	T1	O
36	TX-2	150/200/250	230/69/24	T3	-	-	T3	T3-H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.33 หม้อแปลงที่เกิดความผิดปกติขึ้นหลายชนิดผสมกัน (ประเมินสภาพด้วยวิธี HI)

No	TR	Rated Power	Rated Voltage	Duval Triangle 1	Duval Triangle 4	Duval Triangle 5	Duval Pentagon 1	Duval Pentagon 2
1	BL-TR-2	30/40	69/24-12	T2	O	-	S	-
2	BR-TR-3	30/40	69/24-12	T2	O	-	T1	O
3	KT-TR-2	30/40	69/24-12	T2	O	-	T1	O
4	MM-TR-1	30/40	69/24-12	T2	O	-	T1	O
5	MN-TR-1	30/40	69/24-12	T2	UN	UN	T1	O
6	MN-TR-2	30/40	69/24-12	T2	UN	O	S	-
7	PD-TR-3	30/40	69/24-12	T2	O	-	S	-
8	PM-TR3	30/40	69/24-12	T2	UN	UN	T1	O
9	RN-TR3	30/40	69/24-12	T3	-	-	T1	O
10	SD-TR1	30/40	69/24-12	D+T	-	-	S	-
11	SD-TR3	30/40	69/24-12	T2	O	-	T1	O
12	SU-TR1	30/40	69/24-12	T2	O	-	T1	O
13	SU-TR3	30/40	69/24-12	T2	O	-	S	-
14	SY-TR1	30/40	69/24-12	T2	S	-	T2	C
15	SY-TR2	30/40	69/24-12	T2	O	-	T1	O
16	JRN-TR-1	36/48/60	69/24-12	T2	O	-	T1	O
17	KS-TR-2	36/48/60	69/24-12	T2	UN	O	S	-
18	KU-TR-2	36/48/60	69/24-12	D+T	-	-	T2	C
19	NH-TR-2	36/48/60	69/24-12	T2	C	-	T3	T3-H
20	PI-TR1	36/48/60	69/24-12	D+T	-	-	S	-
21	TR-2	36/48/60	69/24-12	T2	O	-	S	-
22	TR-2	36/48/60	69/24-12	T2	S	-	S	-
23	MN-TR-3	36/48/60	69/24	T2	UN	O	S	-
24	TX-3	150/200/250	230/69/24	-	-	-	-	-
25	CLT-TX-1	180/240/300	230/69/24	T3	-	-	T2	C

หมายเหตุ UN หมายถึง Unnamed

จากตารางที่ 4.34 และ 4.35 หม้อแปลงที่เกิดปัญหารวมมีทั้งหมด 61 ตัว คิดเป็น 46:21% จากหม้อแปลงทั้งหมด 132 ตัว และคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับจำนวนหม้อแปลงที่มีพิกัดกำลัง และ พิกัดแรงดันเดียวกัน จะได้ผลดังตารางที่ 4.36 และ ตารางที่ 4.37

ตารางที่ 4.34 จำนวนหม้อแปลงที่มีความผิดปกติเกิดขึ้นเพียงชนิดเดียว (เปอร์เซ็นต์คิดเทียบกับจำนวนหม้อแปลงที่พิกัดกำลังและพิกัดแรงดันเดียวกัน)

Rated Power (MVA)	Rated Voltage (kV)	หม้อแปลงที่เกิดความผิดปกติขึ้นเพียงชนิดเดียว	
		จำนวน	คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ (%)
30/40	69/24-12	13	30.95
	115/24	0	0.00
36/48/60	69/24-12	22	31.43
	115/24	0	0.00
150/200/250	230/69/24	1	33.33
180/240/300	230/69/24	0	0.00
	230/115/24	0	0.00

ตารางที่ 4.35 จำนวนหม้อแปลงที่มีความผิดปกติเกิดขึ้นหลายชนิดผสมกัน (เปอร์เซ็นต์คิดเทียบกับจำนวนหม้อแปลงที่พิกัดกำลังและพิกัดแรงดันเดียวกัน)

Rated Power (MVA)	Rated Voltage (kV)	หม้อแปลงที่เกิดความผิดปกติขึ้นเพียงชนิดเดียว	
		จำนวน	คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ (%)
30/40	69/24-12	15	35.71
	115/24	0	0.00
36/48/60	69/24-12	8	11.43
	115/24	0	0.00
150/200/250	230/69/24	1	33.33
180/240/300	230/69/24	1	50.00
	230/115/24	0	0.00

จากตารางที่ 4.34 จำนวนหม้อแปลงที่มีความผิดปกติเกิดขึ้นเพียงชนิดเดียว พบว่าหม้อแปลงที่พิกัดกำลัง 40 MVA ที่พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV, หม้อแปลงที่พิกัดกำลัง 60 MVA ที่พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV เป็นหม้อแปลงที่มีโอกาสเกิดความผิดปกติเพียงชนิดเดียวค่อนข้างสูง ความผิดปกติที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งคือ ความผิดปกติทางความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300°C (T1) และการเกิดความร้อนเกิน (overheat อุณหภูมิต่ำกว่า 250°C) ซึ่งเป็นความผิดปกติชนิดเดียวกัน ขณะที่หม้อแปลงที่พิกัดกำลัง 250 MVA ที่พิกัดแรงดัน 230/69/24 kV เองก็มีเปอร์เซ็นต์การเกิดความผิดปกติเพียงชนิดเดียวค่อนข้างสูงเช่นกัน แต่หม้อแปลงชนิดนี้มีตัวอย่างข้อมูลน้อยมาก ดังนั้นค่าที่สรุปออกมาจึงอาจไม่ถูกต้องมากนักและเชื่อถือได้ยาก

จากตารางที่ 4.35 จำนวนหม้อแปลงที่มีความผิดปกติเกิดขึ้นหลายชนิดผสมกัน พบว่าหม้อแปลงที่พิกัดกำลัง 40 MVA ที่พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV, หม้อแปลงที่พิกัดกำลัง 60 MVA ที่พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV เป็นหม้อแปลงที่มีโอกาสเกิดความผิดปกติหลายชนิดผสมกันค่อนข้างสูง ความผิดปกติที่มักเกิดร่วมกันคือ ความผิดปกติเกี่ยวกับความร้อนที่อุณหภูมิในช่วง 300°C – 700°C (T2) กับความผิดปกติเกี่ยวกับความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300°C (T1) และการเกิดความร้อนเกิน (overheat อุณหภูมิต่ำกว่า 250°C) ส่วนหม้อแปลงพิกัดกำลัง 250 MVA และ 300 MVA ที่พิกัดแรงดัน 230/69/24 kV ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การเกิดความผิดปกติหลายชนิดผสมกันสูงเช่นเดียวกันนั้น เป็นข้อมูลที่เชื่อถือได้ยาก เพราะมีตัวอย่างข้อมูลน้อยเหมือนกับกรณีก่อนหน้านี้

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.34 และตารางที่ 4.35 ร่วมกัน พบว่าหม้อแปลงที่พิกัดกำลัง 40 MVA ที่พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV มีโอกาสเกิดความผิดปกติขึ้นเพียงชนิดเดียวและโอกาสเกิดความผิดปกติหลายชนิดผสมกันได้ในอัตราเท่าๆ กัน (ประมาณ 30%-35%) และหม้อแปลงที่พิกัดกำลัง 60 MVA ที่พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV มีโอกาสเกิดความผิดปกติเพียงชนิดเดียวสูงกว่าโอกาสในการเกิดความผิดปกติหลายชนิดผสมกัน

การแปลผลที่กล่าวไปทั้งหมดเป็นเพียงการแปลผลจากข้อมูลของน้ำมันจากหม้อแปลงซึ่งหม้อแปลงแต่ละตัวมีข้อมูลค่าแก๊สเพียง 1 ค่า จึงทำให้ไม่สามารถหาค่าอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าแก๊สซึ่งเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์ที่สุดอย่างหนึ่งได้ การหาอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าแก๊สจะทำให้เราสามารถวิเคราะห์ได้ง่ายขึ้นว่ามีความผิดปกติเกิดขึ้นจริงหรือไม่ ดังนั้นถ้าหากเจอหม้อแปลงตัวใดที่เมื่อพิจารณาจากค่าแก๊สแล้วมีปัญหาจำเป็นต้องทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันเพื่อมาตรวจสอบเพิ่ม โดยความถี่ของการเก็บแปรผันกับค่าแก๊สที่เกิดขึ้น เพื่อให้การวิเคราะห์ความผิดปกติมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

4.3 การแปลผลแก๊สจาก OLTC ด้วยวิธี Duval Triangle 2

ค่าแก๊สของ OLTC ที่ติดตั้งใช้งานที่โรงไฟฟ้า Glow แต่ละแห่งจะถูกแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 2 ซึ่งเป็นวิธีที่เพิ่มเข้ามาในมาตรฐาน IEC 60599 ฉบับปี 2015 โดยใช้โปรแกรม GSP เข้ามาช่วยในการทำการพล็อตจุดลงบนสามเหลี่ยม Duval Triangle 2

4.3.1 ผลการแปลค่าแก๊สจาก OLTC

แปลผลโดยใช้งานโปรแกรมจาก GSP คือ ใส่ค่าแก๊สทั้ง 3 ชนิด ที่ได้จากการทำ DGA ในหน่วย ppm ลงในช่องใส่ค่าแก๊สในรูปที่ 3.2 โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าที่ใส่ลงไปเป็นเปอร์เซ็นต์แล้วทำการพล็อตจุดลงบนกราฟสามเหลี่ยมโดยอัตโนมัติ จากนั้นทำการอ่านผลลัพธ์ที่ได้แล้วบันทึกผลเงื่อนไขของการประเมินผลด้วยวิธี Duval Triangle 2 คือ ค่าแก๊สของ C_2H_4 และ C_2H_2 จะต้องมียุคมากกว่า 10 ppm จึงจะทำการแปลผลด้วยวิธีนี้ได้ ผลการแปลแสดงค่าดังตารางที่ 4.36

ตารางที่ 4.36 ผลการแปลผลค่าแก๊สจาก OLTC ด้วยวิธี Duval Triangle 2

Item	Equipment NO.	Location	Rated power (MVA)	Rated Voltage (kV)	Years	Sampling point	Sampling Date	Test Date	CH4	C2H4	C2H2	Result
1	50BAT01GT001	phase 5	227/325	115/20	2010	OLTC(A)	28/12/2011	4/1/2012	0	9	201	D1
							11/6/2012	14/1/2012	0	35	258	D1
							16/1/2013	20/1/2013	15	28	250	N
						OLTC(B)	28/12/2011	4/1/2012	0	9	139	D1
							11/6/2012	14/1/2012	29	28	142	N
							16/1/2013	20/1/2013	30	34	176	N
OLTC(C)	28/12/2011	4/1/2012	0	13	228	D1						
	11/6/2012	14/1/2012	42	36	194	N						
	16/1/2013	20/1/2013	29	44	198	N						
2	52BAT01GT001	phase 5	122/175	115/15.57	2010	OLTC	28/12/2011	4/1/2012	3	15	321	D1
							11/6/2012	14/1/2012	0	8	565	D1
							16/1/2013	20/1/2013	5	1	321	D1
3	KT51A	MTP1 Sub.	50	115/22	1994	OLTC	28/06/2013	1/7/2013	1	ND	2	-
							20/12/2013	25/12/2013	0	ND	ND	-
							24/07/2014	25/07/2013	2	ND	ND	-

4.3.2 การวิเคราะห์ผลการแปลผลค่าแก๊สจาก OLTC

จากตารางที่ 4.36 มี OLTC ทั้งหมด 5 ตัว จากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังทั้งหมด 3 ตัว โดยหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังตัวแรกใช้ OLTC ชนิด 1 เฟส 3 ตัว และหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังตัวอื่นๆ ใช้ OLTC ชนิด 3 เฟส มี OLTC ชนิด 1 เฟส จำนวน 3 ตัวของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังตัวแรก ทำงานในสภาวะปกติ (N) OLTC ชนิด 3 เฟสของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังตัวที่สอง ทำงานในสภาวะที่เกิดดิสชาร์จพลังงานต่ำ (D1) และ OLTC ชนิด 3 เฟสของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังตัวที่ 3 ทำงานในสภาวะปกติ เพราะ มีค่าแก๊สในน้ำมันต่ำมาก (C_2H_4 และ C_2H_2 มีค่าต่ำกว่า 10 ppm) จนไม่สามารถประเมินผลได้ด้วยวิธี Duval Triangle 2 ถ้าหากพิจารณาค่าแก๊สย้อนหลัง 5-6 ค่า ของ OLTC ตัวนี้จะพบว่าค่าแก๊ส OLTC ตัวนี้มีค่าสูงและมีแนวโน้มที่จะมีปัญหาการทำงานในสภาวะที่เกิดดิสชาร์จพลังงานต่ำ (D1) แต่ในปัจจุบันค่าแก๊สต่ำลงมาก มีความเป็นไปได้ที่มีการเปลี่ยนน้ำมันหรือมีการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันเพื่อป้องกันการเกิดความผิดปกติและบำรุงรักษา OLTC ตัวดังกล่าว

การใช้งาน Duval Triangle 2 ไม่ได้ให้ผลที่ถูกต้อง 100% แต่เป็นเพียงการแสดงให้เห็นแนวโน้มของปัญหาที่มีโอกาสเกิดขึ้นเท่านั้น ในการทดลอง ดังนั้นการใช้งาน Duval Triangle 2 จะต้องใช้ประสบการณ์การทำงานของวิศวกรผู้ทำการแปลผลเข้าร่วมด้วยเพื่อให้มีความถูกต้องเพิ่มมากขึ้น



การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมกาเกิดแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง

การทดสอบแบ่งเป็น 5 ประเภทได้แก่

1. การทดสอบการเกิดโครนาดีสชาร์จในน้ำมันหม้อแปลงและตรวจจับแก๊สที่ละลายในน้ำมันโดยใช้เครื่องวัดแบบออนไลน์ (DGA Online)
2. การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านน้ำมันหม้อแปลง
3. การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านอิมเพรกเนตเพรสเซอร์ที่บรรจุอยู่ในชุดทดสอบที่ใส่น้ำมันหม้อแปลง
4. การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าผ่านน้ำมันหม้อแปลงที่บรรจุในชุดทดสอบ
5. การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าผ่านอิมเพรกเนตเพรสเซอร์ที่บรรจุอยู่ในชุดทดสอบที่ใส่น้ำมันหม้อแปลง

4.4 การทดสอบการเกิดโครนาดีสชาร์จในน้ำมันหม้อแปลงโดยใช้เครื่องวัดแบบออนไลน์ (DGA Online)

4.4.1 ผลการทดสอบ

การทดสอบการเกิดโครนาดีสชาร์จในน้ำมันหม้อแปลงและตรวจจับแก๊สที่ละลายในน้ำมันโดยใช้เครื่องวัดแบบออนไลน์ (DGA Online) สามารถตรวจสอบผล DGA ตามเวลาที่เกิดขึ้นจริง (Real Time) แสดงดังตารางที่ 4.37

ตารางที่ 4.37 ผลการทดสอบ DGA ของการเกิดโครนาดีสชาร์จในน้ำมันหม้อแปลง

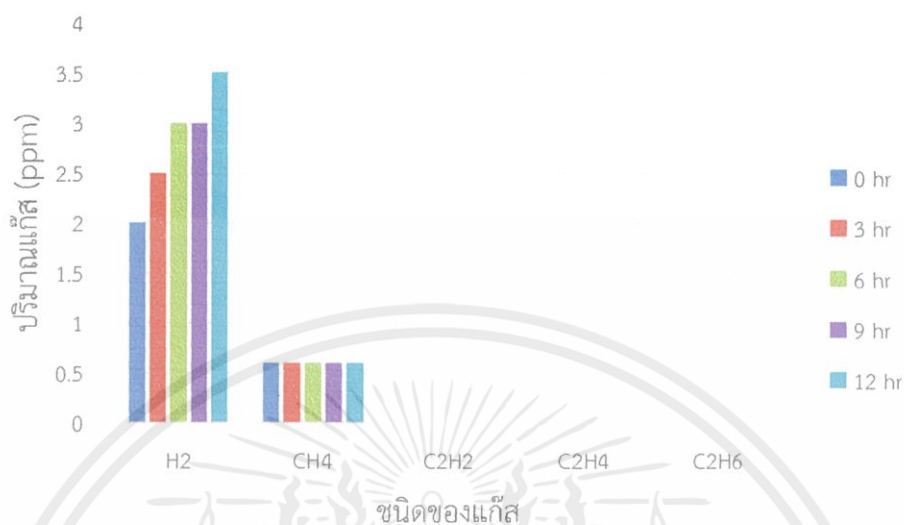
แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณแก๊ส (ppm)						
		H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
PDIV (14.4 kV)	0	2	0.6	<LDL	<LDL	<LDL	<LDL	265
	3	2.5	0.6	<LDL	<LDL	<LDL	<LDL	300
	6	3	0.6	<LDL	<LDL	<LDL	<LDL	320
	9	3	0.6	<LDL	<LDL	<LDL	<LDL	335
	12	3.5	0.6	<LDL	<LDL	<LDL	<LDL	350
1.5PDIV (21.6 kV)	0	1	0.4	<LDL	<LDL	0.6	<LDL	225
	3	1.5	0.6	<LDL	<LDL	1	<LDL	240
	6	2	0.6	0.8	<LDL	2.4	<LDL	265
	9	2.5	0.6	2.2	<LDL	3.2	<LDL	285
	12	3	0.6	3.8	<LDL	4	<LDL	305
1.7PDIV (24.5 kV)	0	3.5	0.8	5	<LDL	4.8	<LDL	375
	3	3.5	0.8	5.2	<LDL	4.8	<LDL	375
	6	4	1	7.2	<LDL	5.4	<LDL	400
	9	6.5	1.2	4.8	<LDL	4	10	425
	12	7	1.4	6.4	<LDL	4.6	10	430

หมายเหตุ LDL คือ เครื่องวัดไม่สามารถอ่านค่าได้

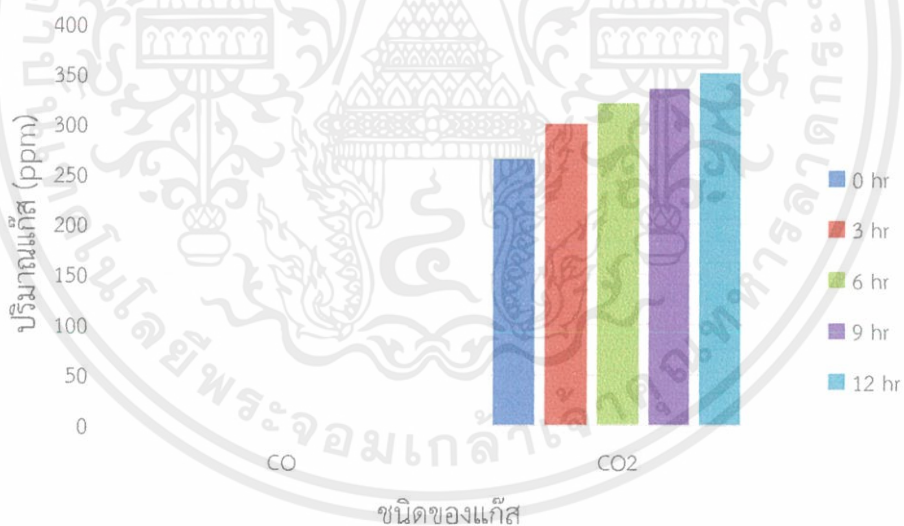
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 การวิเคราะห์ผล

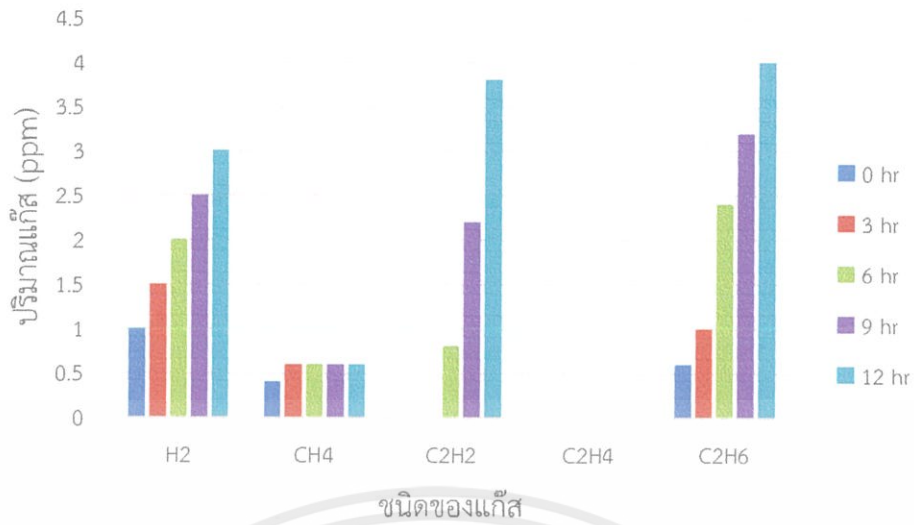
นำผลค่าแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันที่ได้จากการทดสอบการเกิดโคโรนาดีสชาร์จในน้ำมันหม้อแปลงมาพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของแก๊สที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 4.16 - 4.21



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (H₂, CH₄, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆) ที่เกิดขึ้นกับระยะเวลาในการทดสอบที่ PDIV



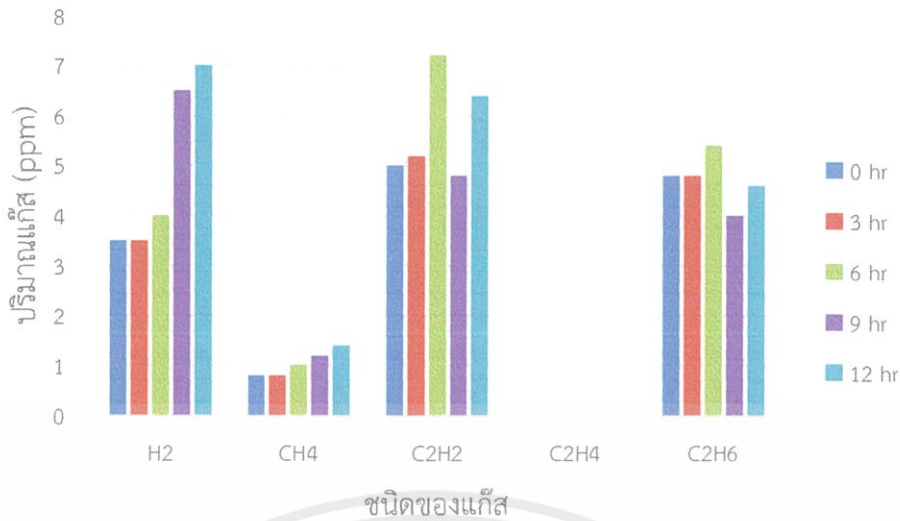
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (CO, CO₂) ที่เกิดขึ้นกับระยะเวลาในการทดสอบที่ PDIV



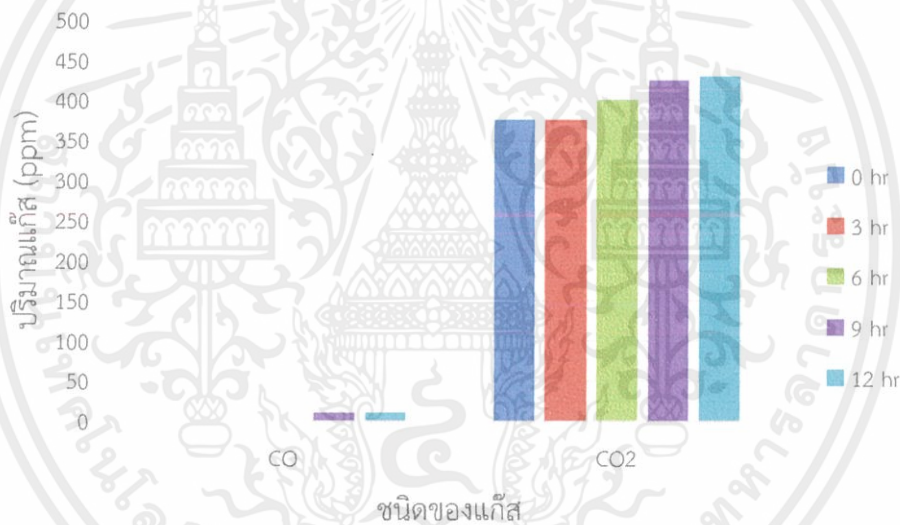
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (H₂, CH₄, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆) ที่เกิดขึ้นกับระยะเวลาในการทดสอบที่ 1.5PDIV



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (CO, CO₂) ที่เกิดขึ้นกับระยะเวลาในการทดสอบที่ 1.5PDIV



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (H₂, CH₄, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆) ที่เกิดขึ้นกับระยะเวลาในการทดสอบที่ 1.7PDIV



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (CO, CO₂) ที่เกิดขึ้นกับระยะเวลาในการทดสอบที่ 1.7PDIV

4.5 การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านน้ำมันหม้อแปลง

4.5.1 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

ผลการทดสอบ DGA และแปลผลค่าแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง เมื่อทำการทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านน้ำมันหม้อแปลง แสดงดังตารางที่ 4.38

ตารางที่ 4.38 ผลการทดสอบ DGA และการแปลผลการเกิดเบรกความด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านน้ำมันหม้อแปลง

เงื่อนไขการทดสอบ	ปริมาณแก๊ส (ppm)								Key Gas	Doernenberg Ratio	Roger Ratio	IEC Ratio	Duval Triangle 1	Duval Pentagon 1
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	O ₂						
Base	0	1	0.0	0	0	0	369	27770	61815	-	-	-	-	-
แกป 2 มม 6 ครั้ง	2	1	3.0	0	0	0	412	28041	61871	UN	Discharge Arcing	Cannot be Diagnosed	D1	D1
แกป 2 มม 12 ครั้ง	19	3	15.1	1	0	0	464	31023	68621	UN	Discharge Arcing	Cannot be Diagnosed	D1	D1
แกป 2 มม 18 ครั้ง	12	3	23.0	3	0	0	617	31153	68032	UN	Discharge Arcing	Cannot be Diagnosed	D1	D1
แกป 3 มม 6 ครั้ง	21	3	19.7	2	0	0	558	30282	66297	UN	Discharge Arcing	Cannot be Diagnosed	D1	D1
แกป 3 มม 12 ครั้ง	11	2	19.2	2	0	0	579	32118	70382	UN	Discharge Arcing	Cannot be Diagnosed	D1	D1
แกป 3 มม 18 ครั้ง	5	2	9.4	1	0	0	699	38949	85647	UN	Discharge Arcing	Cannot be Diagnosed	D1	D1

4.6 การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านอิมเพรกเนตเพรสเซอร์ที่บรรจุอยู่ในชุดทดสอบที่ใส่น้ำมันหม้อแปลง

4.6.1 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

ผลการทดสอบ DGA และแปลผลค่าแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง เมื่อทำการทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านอิมเพรกเนตเพรสเซอร์หนา 1.6 mm และ 3.2 mm ที่บรรจุอยู่ในชุดทดสอบที่ใส่น้ำมันหม้อแปลง แสดงดังตารางที่ 4.39



ตารางที่ 4.39 ผลการทดสอบ DGA และการแปลผลการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านอิมเพรคเน็ทเพรสจอร์ต

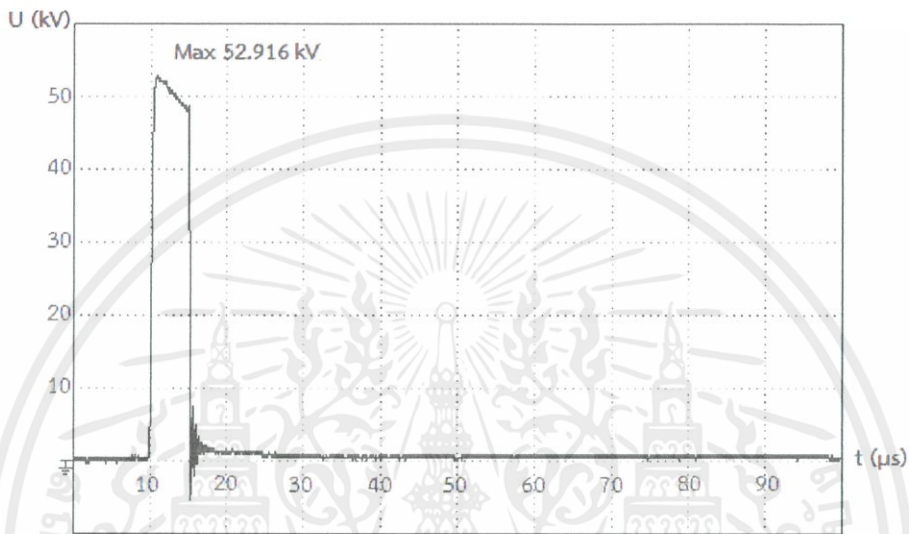
เงื่อนไขการทดสอบ	ปริมาณแก๊ส (ppm)										Key Gas	Doernenberg Ratio	Roger Ratio	IEC Ratio	Duval Triangle 1	Duval Pentagon 1
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	O ₂	N ₂							
Base	0	1	0.0	0	0	0	303	27604	63490	-	-	-	-	-	-	-
1.6 mm 1 ครั้ง	2	1	0.0	0	0	2	428	33333	76315	-	-	-	-	-	-	-
1.6 mm 3 ครั้ง	491	53	572.4	89	16	161	374	31433	72737	UN	Discharge Arcing	Cannot be Diagnosed	D1	D1	D2	
1.6 mm 5 ครั้ง	626	72	836.0	130	26	215	401	30418	68660	UN	Discharge Arcing	Cannot be Diagnosed	D1	D1	D2	
3.2 mm 1 ครั้ง	650	54	679.0	84	19	161	376	29686	66514	UN	Fault not Identifiable	Cannot be Diagnosed	D1	D1	D2	
3.2 mm 3 ครั้ง	2135	178	2170.1	280	130	468	463	35026	78156	UN	Fault not Identifiable	Cannot be Diagnosed	D1	D1	D2	
3.2 mm 5 ครั้ง	3395	277	3374.8	427	50	662	456	34981	78734	UN	Fault not Identifiable	Cannot be Diagnosed	D1	D1	D2	

4.7 การทดสอบการเกิดเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าผ่านน้ำมันหม้อแปลงที่บรรจุในชุดทดสอบ

4.7.1 แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ

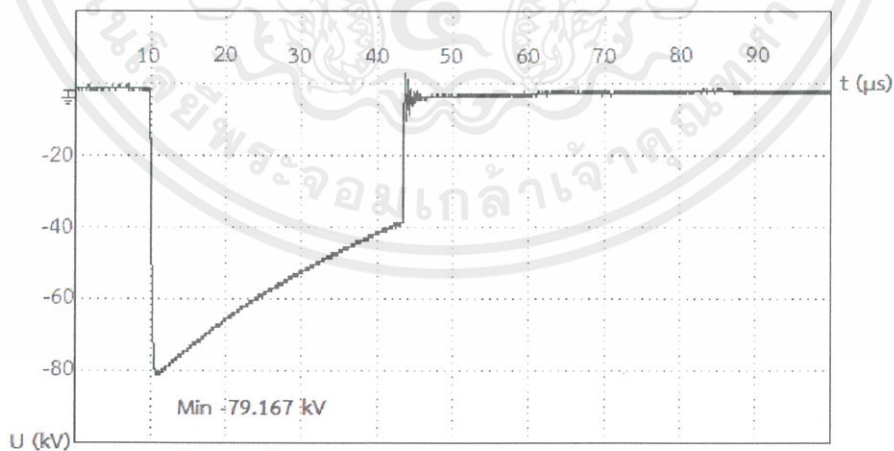
เมื่อเกิดการเบรกดาวน ทำให้เกิดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด (Chopped wave) ดังรูปที่ 4.22 และ 4.23

1) แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วบวก



รูปที่ 4.22 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตัดหลังคลื่นชั่วบวกที่ใช้ในการทดสอบ

2) แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบ



รูปที่ 4.23 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตัดหลังคลื่นชั่วลบที่ใช้ในการทดสอบ

4.7.2 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

ผลการทดสอบ DGA และแปลผลค่าแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง เมื่อทำการทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวและชั่วคราวผ่านน้ำมันหม้อแปลงที่บรรจุในชุดทดสอบ แสดงดังตารางที่ 4.40



ตารางที่ 4.40 ผลการทดสอบ DGA และการเปลี่ยนแปลงการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ที่ผ่านน้ำมันหม้อแปลง

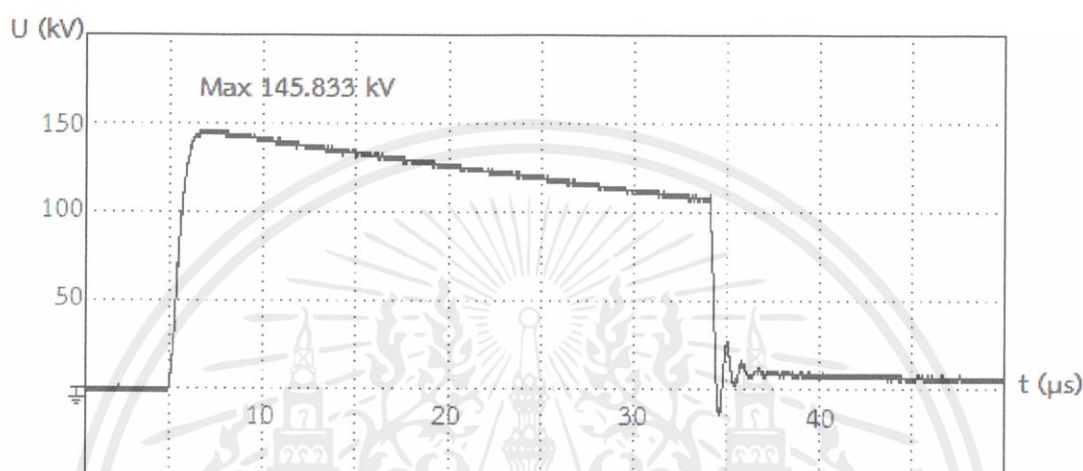
เงื่อนไขการทดสอบ	ปริมาณแก๊ส (ppm)										Key	Doernenberg Ratio	Roger Ratio	IEC Ratio	Duval Triangle 1	Duval Pentagon 1
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	O ₂	N ₂	Gas						
Base	0	1	0.0	0	0	0	369	2770	61815	-	-	-	-	-	-	-
ช่วงบวก(+) 1 ครั้ง	246	40	468.5	90	7	1	417	32580	72123	UN	Discharge Arcing	Cannot be Diagnosed	D1	D1	D2	
ช่วงบวก(+) 3 ครั้ง	622	101	1123.4	210	24	4	396	29523	64493	UN	Discharge Arcing	Cannot be Diagnosed	D1	D1	D2	
ช่วงบวก(+) 5 ครั้ง	1421	256	2609.4	522	17	10	407	33843	74201	UN	Discharge Arcing	Cannot be Diagnosed	D1	D1	D2	
ช่วงลบ(-) 1 ครั้ง	110	27	161.7	35	1	1	535	43151	96847	UN	Discharge Arcing	Cannot be Diagnosed	D1	D1	D2	
ช่วงลบ(-) 3 ครั้ง	354	60	573.1	107	8	3	435	31990	69680	UN	Discharge Arcing	Cannot be Diagnosed	D1	D1	D2	
ช่วงลบ(-) 5 ครั้ง	719	127	1196.0	223	22	8	478	37631	83939	UN	Discharge Arcing	Cannot be Diagnosed	D1	D1	D2	

4.8 การทดสอบการเกิดเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าผ่านอิมเพรกเนตเพรสบอร์ดที่บรรจุอยู่ในชุดทดสอบที่ใส่น้ำมันหม้อแปลง

4.8.1 แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ

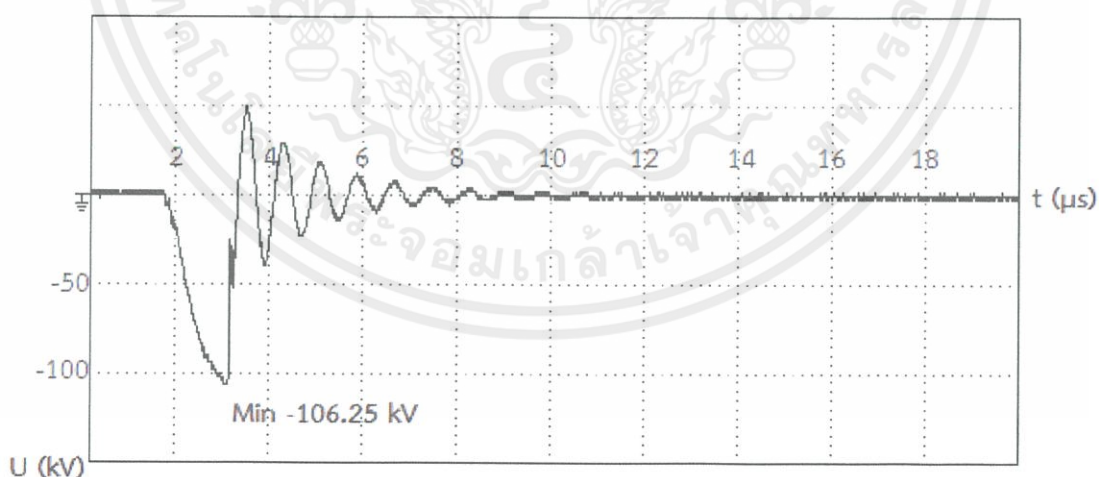
เมื่อเกิดเบรกดาวน ทำให้เกิดรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด (Chopped wave) ดังรูปที่ 2.24 และ 4.25

1) แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่ววอก



รูปที่ 4.24 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตัดหลังคลื่นชั่ววอกที่ใช้ในการทดสอบ

2) แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบ



รูปที่ 4.25 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตัดหน้าคลื่นชั่วลบที่ใช้ในการทดสอบ

4.8.2 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

ผลการทดสอบ DGA และแปลผลค่าแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง เมื่อทำการทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวและชั่วคราวผ่านอิมเพกต์เพรสเซอร์ดันทา 1.6 mm และ 3.2 mm ที่บรรจุอยู่ในชุดทดสอบที่ใส่น้ำมันหม้อแปลง แสดงดังตารางที่ 4.41-4.42



ตารางที่ 4.41 ผลการทดสอบ DGA และการเปลี่ยนแปลงการเกิดเบรกทาวนด์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าผ่านอิมเพกต์เพรสจอร์ตหนา 1.6 mm

เงื่อนไขการทดสอบ	ปริมาณแก๊ส (ppm)										Key Gas	Doernenberg Ratio	Roger Ratio	IEC Ratio	Duval Triangle 1	Duval Pentagon 1
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	O ₂	N ₂							
Base	0	1	0.0	0	0	0	369	27770	61815	-	-	-	-	-	-	-
ชั่วคราว (+) 1 ครั้ง	10	6	10.3	6	0	5	371	28374	61807	UN	Discharge Arcing	High-energy arcing	D2	D2	D2	D2
ชั่วคราว (+) 3 ครั้ง	59	24	78.1	34	3	26	423	31137	66943	UN	Discharge Arcing	High-energy arcing	D1/D2	D2	D2	D2
ชั่วคราว (+) 5 ครั้ง	148	51	179.7	68	6	54	440	35534	78665	UN	Discharge Arcing	High-energy arcing	D1	D1	D2	D2
ชั่วคราว (-) 1 ครั้ง	11	5	13.4	6	0	9	419	31955	69503	UN	Discharge Arcing	High-energy arcing	D1/D2	D2	D2	D2
ชั่วคราว (-) 3 ครั้ง	45	19	57.6	28	2	31	421	33921	74894	UN	Discharge Arcing	High-energy arcing	D1/D2	D2	D2	D2
ชั่วคราว (-) 5 ครั้ง	91	36	146.5	58	4	45	371	29803	65097	UN	Discharge Arcing	High-energy arcing	D1	D2	D2	D2

ตารางที่ 4.42 ผลการทดสอบ DGA และการแปลผลการเกิดเบรกเกอร์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าผ่านอิมเพรคเน็ตเพรสเซอร์ตหนา 3.2 mm

เงื่อนไขการทดสอบ	ปริมาณแก๊ส (ppm)										Key Gas	Doernenberg Ratio	Roger Ratio	IEC Ratio	Duval Triangle	Duval Pentagon	
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	O ₂	N ₂								
Base	0	1	0.0	0	0	1	321	22959	56185	-	-	-	-	-	-	-	-
ชั่วคราว(+) 1 ครั้ง	24	10	21.5	12	1	13	395	22695	50230	UN	Discharge Arcing	High-energy arcing	D1/D2	D2	D2	D2	
ชั่วคราว(+) 3 ครั้ง	47	27	35.0	27	3	36	318	20846	46011	UN	Discharge Arcing	High-energy arcing	D2	D2	D2	D2	
ชั่วคราว(+) 5 ครั้ง	79	50	54.3	46	6	69	344	22874	50840	UN	Discharge Arcing	High-energy arcing	D2	D2	D2	D2	
ชั่วคราว(-) 1 ครั้ง	14	11	4.0	6	1	17	362	25868	57313	UN	Fault not Identifiable	High-energy arcing	D2	D2	T3	T3	
ชั่วคราว(-) 3 ครั้ง	105	45	94.1	50	5	83	370	26245	58313	UN	Discharge Arcing	High-energy arcing	D1/D2	D2	D2	D2	
ชั่วคราว(-) 5 ครั้ง	131	64	155.9	84	9	115	409	25507	54804	UN	Discharge Arcing	High-energy arcing	D1/D2	D2	D2	D2	

4.9 การวิเคราะห์ผลและการแปลผลค่าแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง

การวิเคราะห์เปรียบเทียบการแปลผลค่าแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันแปลงเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาหาข้อดี-ข้อเสียของวิธีการแปลผลค่าแก๊สที่ละลายในน้ำมันหม้อแปลงแต่ละวิธี เนื่องจากผลลัพธ์การแปลผลด้วยแต่ละวิธีที่ออกมาไม่ตรงกัน ไม่สามารถเปรียบเทียบกันได้ มีเพียงวิธี Doernenberg Ratio, Roger Ratio และ IEC Ratio, Duval Triangle 1, Duval Pentagon 1 เท่านั้นที่สามารถเปรียบเทียบการแปลผลได้ จึงทำการเปรียบเทียบวิธีการแปลผลเป็นดังนี้

- IEC Ratio – Duval Triangle 1
- Duval Triangle 1 – Duval Pentagon 1
- Doernenberg Ratio - Roger Ratio

โดยเปรียบเทียบจากผลการแปลผลที่ตรงกัน จากจำนวนการทดสอบทั้งหมดในเงื่อนไขการทดสอบที่ตรงกัน และคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ดังตารางที่ 4.43

จากการแปลผลค่าแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันทั้งข้อมูลจาก MEA และ การทดสอบสามารถสรุปข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธีได้ดังตารางที่ 4.44

ตารางที่ 4.43 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีที่ต่างกัน

การทดสอบ	วิธีแปลผลที่ใช้เปรียบเทียบ	จำนวนผลที่ตรงกัน	จำนวนการทดสอบทั้งหมด	จำนวนผลที่ตรงกัน (%)
การเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันกระแสสลับในน้ำมันหม้อแปลง	IEC Ratio – Duval Triangle 1	6	6	100
	Duval Triangle 1 – Duval Pentagon 1	0	6	0
การเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันกระแสสลับผ่านเพรสบอร์ด	IEC Ratio – Duval Triangle 1	6	6	100
	Duval Triangle 1 – Duval Pentagon 1	0	6	0
การเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าในน้ำมันหม้อแปลง	IEC Ratio – Duval Triangle 1	6	6	100
	Duval Triangle 1 – Duval Pentagon 1	0	6	0
การเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าผ่านเพรสบอร์ด	Doernenberg Ratio - Roger Ratio	11	12	91.67
	IEC Ratio – Duval Triangle 1	11	12	91.67
	Duval Triangle 1 – Duval Pentagon 1	10	12	83.33

ตารางที่ 4.44 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวิธีการแปรรูป

วิธีการแปรรูป	ข้อดี	ข้อเสีย
Doernenberg ratio	1. เป็นวิธีที่ให้ผลลัพธ์ถูกต้องระดับหนึ่ง (ในกรณีที่ค่าแก๊สที่ทำการตรวจสอบผ่านเงื่อนไขการใช้งานทั้งหมดและสามารถนำมาแปรรูปด้วยวิธีนี้ได้)	1. มีเงื่อนไขในการใช้งานเยอะ จนทำให้หลายๆครั้งไม่สามารถใช้วิธีนี้แปรรูปได้ 2. ไม่มีการแปรรูปที่บอกว่าหม้อแปลงทำงานอยู่ในสภาวะปกติ ซึ่งอาจนำไปสู่การวางแผนการซ่อมบำรุงโดยที่ไม่จำเป็น
Roger ratio	1. เป็นวิธีที่ให้ผลลัพธ์ถูกต้องระดับหนึ่ง(มากกว่า Doernenberg ratio) (ในกรณีที่ค่าแก๊สที่ทำการตรวจสอบผ่านเงื่อนไขการใช้งานทั้งหมดและสามารถนำมาแปรรูปด้วยวิธีนี้ได้) 2. มีการแปรรูปที่บอกว่าหม้อแปลงทำงานอยู่ในสภาวะปกติ	1. มีเงื่อนไขในการใช้งานเยอะ จนทำให้หลายๆครั้งไม่สามารถใช้วิธีนี้แปรรูปได้
Key gas	1. เป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็ว (ในกรณีที่ค่าแก๊สเป็นไปตามรูปแบบที่ระบุไว้ในมาตรฐานและสามารถแปรรูปได้)	1. เป็นวิธีการแปรรูปที่ดูรูปแบบของค่าแก๊สที่มีค่ามากอย่างมีนัยยะสำคัญ ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วมีโอกาสไม่มากนักที่จะพบค่าแก๊สที่เพิ่มขึ้นสูงและมีรูปแบบตรงตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้วิธีการนี้แปรรูปได้ 2. ไม่มีการแปรรูปที่บอกว่าหม้อแปลงทำงานอยู่ในสภาวะปกติ ซึ่งอาจนำไปสู่การวางแผนการซ่อมบำรุงโดยที่ไม่จำเป็น 3. เป็นวิธีที่มีความถูกต้องต่ำ

ตารางที่ 4.44(ต่อ) เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวิธีการแปลงผล

วิธีการแปลงผล	ข้อดี	ข้อเสีย
CO ₂ /CO ratio	1. เป็นวิธีที่มีเงื่อนไขการใช้งานน้อย จึงใช้งานง่ายและรวดเร็ว (ในกรณี ที่ค่าแก๊ส เป็นไปตามรูปแบบที่ระบุไว้ใน มาตรฐานและสามารถแปลงผลได้)	1. เป็นวิธีที่ใช้ระบุว่ามีคามผิดปกติ เกิดขึ้นที่บริเวณฉนวนกระดาศ หรือไม่เท่านั้น ไม่สามารถใช้ในกรณี อื่นได้ 2. แก๊ส CO ₂ ที่เป็นแก๊สที่ใช้ในการ แปลงผลด้วยวิธีนี้เป็นแก๊สที่อยู่ ในบรรยากาศและเข้าสู่ภายในหม้อ แปลงได้ง่าย ดังนั้นการจะแปลงผล ค่าแก๊สด้วยวิธีนี้จะต้องแน่ใจด้วยว่า แก๊ส CO ₂ เป็นแก๊สที่เกิดขึ้นภายใน หม้อแปลงเท่านั้น
IEC Ratio	1. สามารถใช้วิธีนี้แปลงผลค่าแก๊ส ของน้ำมันที่มาจากหม้อแปลง เครื่องมือวัดและบุชชิ่งได้	1. ไม่มีการแปลงผลที่บอกว่าหม้อ แปลงทำงานอยู่ในสภาวะปกติ
Duval triangle 1	1. เป็นวิธีที่มีความถูกต้องสูง 2. สามารถใช้วิธีนี้แปลงผลค่าแก๊ส ของน้ำมันที่มาจากสายเคเบิลและ บุชชิ่งได้	1. ไม่มีการแปลงผลที่บอกว่าหม้อ แปลงทำงาน อยู่ในสภาวะปกติ ซึ่งอาจนำไปสู่ การวางแผนการซ่อมบำรุงโดยที่ไม่ จำเป็น
Duval triangle 4 และ 5	1. ทำให้ระบุชนิดของความผิดปกติ ได้ละเอียดมากยิ่งขึ้น 2. มีการแปลงผลที่บอกว่าหม้อแปลง ทำงานอยู่ในสภาวะการเกิด Stray gas ซึ่งหมายความว่าหม้อแปลงตัว นั้นอาจจะไม่ได้ทำงานอยู่ใน สภาวะที่ผิดปกติ	1. เป็นวิธีการแปลงผลที่ไม่ได้อยู่ใน มาตรฐานแสดงว่ายังวิธีนี้ยังมีข้อ ผิดพลาดบางอย่างอยู่ 2. วิธีการแปลงผลนี้จะใช้งานได้เมื่อมี การแปลงผลด้วยวิธี Duval triangle 1 แล้วผลลัพธ์ออกมาอยู่ ในโซน PD T1 และ T2 เท่านั้น ถ้า หากผลลัพธ์อยู่ในโซนอื่นจะไม่ สามารถใช้งานได้ 3. ถ้าหากใช้ Duval triangle 5 แปลงผลแล้วผลลัพธ์ออกมาอยู่ใน โซน Unnamed จะทำให้ไม่ สามารถแปลงผลได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.44(ต่อ) เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวิธีการแปลผล

วิธีการแปลผล	ข้อดี	ข้อเสีย
Duval pentagon 1 และ 2	<p>1. Duval pentagon 2 ทำให้ระบุชนิดของความผิดปกติได้ละเอียดมากยิ่งขึ้น</p> <p>2. มีการแปลผลที่บอกว่าหม้อแปลงทำงานอยู่ในสภาวะการเกิด Stray gas ซึ่งหมายความว่าหม้อแปลงตัวนั้นอาจจะไม่ได้ทำงานอยู่ในสภาวะที่ผิดปกติ</p> <p>3. มีการวิเคราะห์แก๊ส 5 ชนิด พร้อมกัน จากเดิมที่วิเคราะห์แก๊สเพียง 3 ชนิด ซึ่งถ้าหากมีการพัฒนาต่อไปเรื่อยๆ อาจจะทำให้วิธีนี้มีความถูกต้องมากกว่า Duval triangle 1 ซึ่งมีความถูกต้องสูงอยู่ก็เป็นได้</p>	1. เป็นวิธีที่ไม่ได้อยู่ในมาตรฐาน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่สำคัญต่อระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามาก ส่วนประกอบที่สำคัญของหม้อแปลงไฟฟ้า ได้แก่ ตัวถังหม้อแปลง, ถังเก็บน้ำมันสำรอง, Dehydrating Breather, Buchholz Relay, Pressure Relief Device, Arcing Horn และ Tap Changer โดย Tap Changer เป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนแรงดันขาออกของหม้อแปลงไฟฟ้า Tap Changer ที่สามารถเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าได้ขณะที่หม้อแปลงยังทำงานอยู่ เรียกว่า OLTC (On Load Tap Changer) OLTC แบ่งเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 2 ประเภท คือ OLTC แบบไดเวอร์เตอร์สวิตช์และแท็ปซีเลคเตอร์ และ OLTC แบบซีเลคเตอร์สวิตช์ ซึ่งทั้ง 2 ประเภท ยังแบ่งย่อยได้อีก 2 ชนิด คือ ชนิดตัวต้านทานและชนิดตัวเหนี่ยวนำ

หม้อแปลงไฟฟ้าใช้น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนเหลวและตัวระบายความร้อน น้ำมันหม้อแปลงสามารถแยกเป็นประเภทตามสารที่เป็นส่วนประกอบได้ 3 ประเภท ได้แก่ พาราฟินิก แนปทีนิก และโอโรมาติก หม้อแปลงมีการใช้งาน น้ำมันหม้อแปลงจะเกิดการเสื่อมสภาพขึ้นจากสาเหตุต่างๆ ดังนั้นการตรวจสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงจะช่วยให้ สามารถวินิจฉัยปัญหาที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้าได้ การวิเคราะห์ค่าแก๊สที่ละลายในน้ำมันหม้อแปลงหรือการทำ DGA เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้อย่างแพร่หลาย เพราะเมื่อหม้อแปลงเกิดความผิดปกติขึ้น น้ำมันหม้อแปลงที่ทำหน้าที่เป็นฉนวนจะเกิดการสลายตัวกลายเป็นแก๊สและละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง ดังนั้นการวิเคราะห์ค่าแก๊สที่ละลายในน้ำมันหม้อแปลงจึงทำให้สามารถวิเคราะห์ความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงได้

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาเรื่องการประเมินสภาพของหม้อแปลงและการแปลผลค่าแก๊สที่ละลายในน้ำมันจากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้านครหลวง ทั้งหมด 132 ตัว แบ่งออกเป็น

- 1) หม้อแปลงไฟฟ้าที่พิกัดกำลัง 40 MVA จำนวน 44 ตัว แบ่งเป็น
 - พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV จำนวน 42 ตัว
 - พิกัดแรงดัน 115/24 kV จำนวน 2 ตัว
- 2) หม้อแปลงไฟฟ้าที่พิกัดกำลัง 60 MVA จำนวน 81 ตัว แบ่งเป็น
 - พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV จำนวน 70 ตัว
 - พิกัดแรงดัน 115/24 kV จำนวน 11 ตัว
- 3) หม้อแปลงไฟฟ้าที่พิกัดกำลัง 250 MVA จำนวน 3 ตัว แบ่งเป็น
 - พิกัดแรงดัน 230/69/24 kV จำนวน 3 ตัว
- 4) หม้อแปลงไฟฟ้าที่พิกัดกำลัง 300 MVA จำนวน 4 ตัว แบ่งเป็น
 - พิกัดแรงดัน 230/69/24 kV จำนวน 2 ตัว
 - พิกัดแรงดัน 230/115/24 kV จำนวน 2 ตัว

ผลลัพธ์จากการประเมินสภาพของหม้อแปลงและการแปลผลค่าแก๊สที่ละลายในน้ำมันหม้อแปลงด้วยวิธีการตามมาตรฐานและวิธีการที่ไม่ได้อยู่ในมาตรฐาน สามารถสรุปรายละเอียดได้ดังนี้

5.1.1 การแปลผลด้วยวิธี Doernenburg Ratio

- ตรวจสอบเงื่อนไขการใช้งานเต็มรูปแบบ : มีหม้อแปลงผ่านเงื่อนไขทั้งหมด 1 ตัว และสามารถแปลผลได้ทั้งหมด 1 ตัว โดยหม้อแปลงตัวดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะเกิดความผิดปกติทางด้านความร้อน
- ตรวจสอบเงื่อนไขการใช้งานโดยไม่ใช้เงื่อนไขปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 (จากตาราง 2.10) : มีหม้อแปลงผ่านเงื่อนไขทั้งหมด 55 ตัว ต้องทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันใหม่ 7 ตัว และสามารถแปลผลได้ทั้งหมด 48 ตัว โดยหม้อแปลงที่แปลผลได้ทั้งหมดมีแนวโน้มที่จะเกิดความผิดปกติทางด้านความร้อน

5.1.2 การแปลผลด้วยวิธี Roger Ratio

- ตรวจสอบเงื่อนไขการใช้งานเต็มรูปแบบ : มีหม้อแปลงผ่านเงื่อนไขทั้งหมด 1 ตัว และสามารถแปลผลได้ทั้งหมด 1 ตัว โดยหม้อแปลงตัวดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะเกิดความผิดปกติทางด้านความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 700°C
- ตรวจสอบเงื่อนไขการใช้งานโดยไม่ใช้เงื่อนไขปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 (จากตาราง 2.10) : มีหม้อแปลงผ่านเงื่อนไขทั้งหมด 55 ตัว ไม่สามารถแปลผลได้ 52 ตัว และสามารถแปลผลได้ทั้งหมด 3 ตัว โดยหม้อแปลงที่แปลผลได้ทั้งหมดมีแนวโน้มที่จะเกิดความผิดปกติทางด้านความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 700°C

5.1.3 การแปลผลด้วยวิธี Key Gas

- ประเมินสภาพตามมาตรฐาน IEEE : มีหม้อแปลงที่สามารถแปลผลได้ 79.55% ปัญหาที่พบมากที่สุด คือ ปัญหาการเกิดความผิดปกติทางความร้อนบริเวณฉนวนเซลลูโลสทั้งหมด 46.97% โดยพบมากที่สุดที่หม้อแปลงพิกัดกำลัง 60 MVA ที่พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV เป็นจำนวน 25.76% และมีหม้อแปลงที่ไม่สามารถแปลผลได้จำนวน 32.58%
- ประเมินสภาพด้วยวิธี HI : มีหม้อแปลงที่สามารถแปลผลได้ 43.18% ปัญหาที่พบมากที่สุด คือ ปัญหาการเกิดความผิดปกติทางความร้อนบริเวณฉนวนเซลลูโลส ทั้งหมด 10.61% โดยพบมากที่สุดที่หม้อแปลงพิกัดกำลัง 40 MVA ที่พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV เป็นจำนวน 5.30% และมีหม้อแปลงที่ไม่สามารถแปลผลได้จำนวน 32.58%

5.1.4 การแปลผลด้วยวิธี CO₂/CO Ratio

- มีหม้อแปลงที่สามารถแปลผลได้ 12.12% ปัญหาที่พบมากที่สุด คือ ปัญหาการเกิดโอเวอร์ฮีทที่บริเวณฉนวนเซลลูโลส ทั้งหมด 6.82% โดยพบมากที่สุดที่หม้อแปลงพิกัดกำลัง 60 MVA ที่พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV เป็นจำนวน 4.55% และมีหม้อแปลงที่มีแนวโน้มที่จะทำงานเป็นปกติจำนวน 5.30%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.5 การแปลผลด้วยวิธี IEC Ratio

- ประเมินสภาพด้วยปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 (จากตาราง 2.9) : มีหม้อแปลงที่สามารถแปลผลได้ 54.55% ปัญหาที่พบมากที่สุด คือ ปัญหาการเกิดความผิดปกติทางความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300 °C (T1) ทั้งหมด 44.70% โดยพบมากที่สุดที่หม้อแปลงพิกัดกำลัง 60 MVA ที่พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV เป็นจำนวน 23.48% และมีหม้อแปลงที่ไม่สามารถแปลผลได้จำนวน 7.58%
- ประเมินสภาพด้วยวิธี HI : มีหม้อแปลงที่สามารถแปลผลได้ 43.19% ปัญหาที่พบมากที่สุด คือ ปัญหาการเกิดความผิดปกติทางความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300 °C (T1) ทั้งหมด 37.12% โดยพบมากที่สุดที่หม้อแปลงพิกัดกำลัง 40 MVA ที่พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV เป็นจำนวน 18.94% และมีหม้อแปลงที่ไม่สามารถแปลผลได้จำนวน 4.55%

5.1.6 การแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 1

- ประเมินสภาพด้วยปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 (จากตาราง 2.10) : มีหม้อแปลงที่สามารถแปลผลได้ 53.79% ปัญหาที่พบมากที่สุด คือ ปัญหาการเกิดความผิดปกติทางความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300 °C (T1) ทั้งหมด 31.06% โดยพบมากที่สุดที่หม้อแปลงพิกัดกำลัง 60 MVA ที่พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV เป็นจำนวน 20.45%
- ประเมินสภาพด้วยวิธี HI : มีหม้อแปลงที่สามารถแปลผลได้ 45.45% ปัญหาที่พบมากที่สุด คือ ปัญหาการเกิดความผิดปกติทางความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300 °C (T1) ทั้งหมด 25.00% โดยพบมากที่สุดที่หม้อแปลงพิกัดกำลัง 60 MVA ที่พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV เป็นจำนวน 15.91%

5.1.7 การแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 4 และ Duval Triangle 5

1. Duval Triangle 4

- ประเมินสภาพด้วยปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 (จากตาราง 2.10) : มีหม้อแปลงที่สามารถแปลผลได้ 48.48% ปัญหาที่พบมากที่สุด คือ ปัญหาการเกิดโอเวอร์ฮีท (O) ทั้งหมด 28.03% โดยพบมากที่สุดที่หม้อแปลงพิกัดกำลัง 60 MVA ที่พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV เป็นจำนวน 14.39% มีหม้อแปลงที่เกิด Stray gassing ซึ่งไม่เป็นอันตราย 8.33% และมีหม้อแปลงที่ไม่สามารถแปลผลได้ 9.85%
- ประเมินสภาพด้วยวิธี HI : มีหม้อแปลงที่สามารถแปลผลได้ 40.16% ปัญหาที่พบมากที่สุด คือ ปัญหาการเกิดโอเวอร์ฮีท (O) ทั้งหมด 28.79% โดยพบมากที่สุดที่หม้อแปลงพิกัดกำลัง 60 MVA ที่พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV เป็นจำนวน 14.39% มีหม้อแปลงที่เกิด Stray gassing ซึ่งไม่เป็นอันตราย 2.27% และมีหม้อแปลงที่ไม่สามารถแปลผลได้ 7.58%

2. Duval Triangle 5

- ประเมินสภาพด้วยปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 (จากตาราง 2.10) : มีหม้อแปลงที่สามารถแปลงผลได้ 9.85% ปัญหาที่พบมากที่สุด คือ ปัญหาการเกิดโอเวอร์ฮีท (O) ทั้งหมด 8.33% โดยพบมากที่สุดที่หม้อแปลงพิกัดกำลัง 60 MVA ที่พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV เป็นจำนวน 6.82 % และมีหม้อแปลงที่ไม่สามารถแปลงผลได้ 1.52%
- ประเมินสภาพด้วยวิธี HI : มีหม้อแปลงที่สามารถแปลงผลได้ 7.58% ปัญหาที่พบมากที่สุด คือ ปัญหาการเกิดโอเวอร์ฮีท (O) ทั้งหมด 6.06% โดยพบมากที่สุดที่หม้อแปลงพิกัดกำลัง 60 MVA ที่พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV เป็นจำนวน 4.55% และมีหม้อแปลงที่ไม่สามารถแปลงผลได้ 1.52%

5.1.8 การแปลผลด้วยวิธี Duval Pentagon 1 และ Duval Pentagon 2

1. Duval Pentagon 1

- ประเมินสภาพด้วยปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 (จากตาราง 2.10) : มีหม้อแปลงที่สามารถแปลงผลได้ 53.79% ปัญหาที่พบมากที่สุด คือ ปัญหาการเกิดความผิดปกติทางความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300 °C (T1) ทั้งหมด 21.97% โดยพบมากที่สุดที่หม้อแปลงพิกัดกำลัง 40 MVA ที่พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV เป็นจำนวน 10.61% และมีหม้อแปลงที่เกิด Stray Gassing ซึ่งไม่เป็นอันตราย 25.76%
- ประเมินสภาพด้วยวิธี HI : มีหม้อแปลงที่สามารถแปลงผลได้ 45.45% ปัญหาที่พบมากที่สุด คือ ปัญหาการเกิดความผิดปกติทางความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300 °C (T1) ทั้งหมด 17.42% โดยพบมากที่สุดที่หม้อแปลงพิกัดกำลัง 40 MVA ที่พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV เป็นจำนวน 10.61% และมีหม้อแปลงที่เกิด Stray Gassing ซึ่งไม่เป็นอันตราย 22.73%

2. Duval Pentagon 2

- ประเมินสภาพด้วยปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 (จากตาราง 2.10) : มีหม้อแปลงที่สามารถแปลงผลได้ 28.03% ปัญหาที่พบมากที่สุด คือ ปัญหาการเกิดโอเวอร์ฮีท (O) ทั้งหมด 21.97% โดยพบมากที่สุดที่หม้อแปลงพิกัดกำลัง 40 MVA ที่พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV เป็นจำนวน 10.61%
- ประเมินสภาพด้วยวิธี HI : มีหม้อแปลงที่สามารถแปลงผลได้ 22.72% ปัญหาที่พบมากที่สุด คือ ปัญหาการเกิดโอเวอร์ฮีท (O) ทั้งหมด 17.42% โดยพบมากที่สุดที่หม้อแปลงพิกัดกำลัง 40 MVA ที่พิกัดแรงดัน 69/24-12 kV เป็นจำนวน 10.61%

5.1.9 เปรียบเทียบผลการแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 1, Duval Triangle 4, Duval Triangle 5, Duval Pentagon 1 และ Duval Pentagon 2

- ประเมินสภาพด้วยปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 (จากตาราง 2.10) : มีหม้อแปลงที่มีแนวโน้มจะเกิดปัญหาขึ้นเพียงชนิดเดียวจำนวน 32.57% และมีหม้อแปลงที่มีแนวโน้มจะเกิดปัญหาขึ้นหลายชนิดผสมกันจำนวน 21.21%

- ประเมินสภาพด้วยวิธี HI : มีหม้อแปลงที่มีแนวโน้มจะเกิดปัญหาขึ้นเพียงชนิดเดียว จำนวน 27.27% และมีหม้อแปลงที่มีแนวโน้มจะเกิดปัญหาขึ้นหลายชนิดผสมกันจำนวน 18.94%

5.1.10 การแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle 2 ใน OLTC

- มีออนโหลดแท็ปเซนเจอร์ที่แปลผลทั้งหมด 4 ตัว โดยมีออนโหลดแท็ปเซนเจอร์ 3 ตัว ที่มีแนวโน้มที่จะทำงานเป็นปกติ และมีออนโหลดแท็ปเซนเจอร์ 1 ตัว ที่มีแนวโน้มจะเกิดปัญหาการเกิดการอาร์กแบบ D1 ที่ผิดปกติ

การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิดแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงสามารถสรุปละเอียดได้ดังต่อไปนี้

1) จากการทดสอบการเกิดโคโรนาดีสชาร์จในน้ำมันหม้อแปลงและตรวจจับแก๊สที่ละลายในน้ำมันโดยใช้เครื่องวัดแบบออนไลน์ (DGA Online) พบว่า ค่าแก๊สที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าน้อยมาก ไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นด้วยวิธีการแปลผลต่างๆ ได้จึงดูได้เพียงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าแก๊ส จะเห็นได้ว่าปริมาณแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันสัมพันธ์กับระยะเวลาและแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ

2) จากการทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันกระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ในน้ำมันหม้อแปลงและผ่านอิมเพกต์เพรสเจอร์ พบว่า แก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนและเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับจำนวนครั้งที่เกิดเบรกดาวน์สะสมในน้ำมันหม้อแปลง เมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบการแปรผลยังไม่สามารถระบุวิธีการที่ดีที่สุดได้อย่างชัดเจน หากเพียงแต่เป็นแนวทางในการศึกษาต่อไปในอนาคต

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. วิธีการแปลผลจากอัตราส่วน บางวิธีในมาตรฐานยังมีการระบุว่าอัตราส่วนบางอัตราส่วนที่ต้องเปลี่ยนแปลงเมื่อใช้ในประเทศที่ต่างกัน ซึ่งหมายความว่า เป็นไปได้ที่ประเทศไทยเองก็อาจจะต้องใช้อัตราส่วนของค่าแก๊สที่แตกต่างจากที่มีอยู่ในมาตรฐาน ซึ่งในส่วนนี้จะต้องอาศัยผู้ที่เกี่ยวข้องในการเก็บข้อมูลค่าแก๊สจากหม้อแปลงที่ใช้ในประเทศไทย และประวัติการเกิดปัญหาที่ระบุได้ชัดเจนขึ้น ในปริมาณที่มากพอ เพื่อให้ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือ

2. ในการเก็บตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงควรเก็บด้วยวิธีที่ถูกต้องตามมาตรฐาน และต้องระมัดระวัง เนื่องจากการเก็บตัวอย่างน้ำมันที่ไม่ถูกต้องนั้น จะทำให้ค่าแก๊สที่ตรวจวัดออกมาไม่มีความผิดพลาดได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] “หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power Transformer)”, Available: <http://nongcom-electrical.blogspot.com/2015/08/power-transformer.html>, [วันที่เข้าถึง 2 ตุลาคม 2559].
- [2] D. Dohnal, "ON-LOAD TAP-CHANGERS FOR POWER TRANSFORMERS", Regensburg: Maschinenfabrik Reinhausen GmbH, 2006.
- [3] สำรวัย สังข์สะอาด, “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง”, พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์, 2549.
- [4] ผศ.ดร. นรเศร พัฒนเดช, “วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า(เล่ม 1) ฉนวนและวัสดุฉนวนไฟฟ้า Electrical Engineering materials”, กรุงเทพมหานคร: ห้างหุ้นส่วนจำกัด มิน เซอร์วิสเซ็ฟ พลาย, 2557.
- [5] T. JUDENDORFER, “Oil-cellulose insulation systems for HVDC applications”, Dissertation, Department of Electrical and Computer Engineering, Technical University of Munich
- [6] IEC 60599, Edition 3.0 2015-09 Mineral oil-impregnated electrical equipment in service – Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis.
- [7] UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR BUREAU OF RECLAMATION, “TRANSFORMER MAINTENANCE”, FACILITIES INSTRUCTIONS, STANDARDS, AND TECHNIQUES, FIST 3-30, October, 2000.
- [8] ASTM D923-15, Standard Practices for Sampling Electrical Insulating Liquids.
- [9] IEC 60475, Edition 2.0 2011-10 Method of sampling insulating liquids
- [10] “Label sample”, Available: <http://keywordsuggest.org/gallery/238480.html>, [วันที่เข้าถึง 6 กันยายน 2559].
- [11] IEC 60567, Edition 4.0 2011-10 Oil-filled electrical equipment – Sampling of gases and analysis of free and dissolved gases – Guidance.
- [12] H. M. a. J. M.M.ller, "Basic gas chromatography", A Wiley-Inter science Publication, 1998.
- [13] T.A.C. a. J.E.M. Goldsmith, “Laser-enhanced flame ionization Detector,” Available: <https://www.osapublishing.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-26-17-3542>, [วันที่เข้าถึง 2 กันยายน 2559].
- [14] B. S. Valle, “Process Stream Analyzers Training,” Available: benvalle.com/Analyzers/Analyzer.html, [วันที่เข้าถึง 2 กันยายน 2559].
- [15] IEEE Std. C57.104™, 2008 Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers.
- [16] Ali Naderian Jahromi, Ray Piercy, Stephen Cress, Jim R. R. Service, and Wang Fan, “An Approach to Power Transformer Asset Management Using Health Index”, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 25, no. 2, March/April, 2009.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [17] UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR BUREAU OF RECLAMATION, “TRANSFORMER DIAGNOSTICS”, FACILITIES INSTRUCTIONS, STANDARDS, AND TECHNIQUES, vol. 3-31, June, 2003.
- [18] Michel Duval, “The Duval Triangle for Load Tap Changers, Non-Mineral Oils and Low Temperature Faults in Transformers”, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 24, no. 6, November/December, 2008.
- [19] Michel Duval and Laurent Lamarre, “ The Duval Pentagon- A New Complementary Tool for the Interpretation of Dissolved Gas Analysis in Transformers” , IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 30, no. 6, November/December, 2014.
- [20] IEC 60422, Edition 4.0 2013 - 01 Mineral insulating oils in electrical equipment – Supervision and maintenance guidance.
- [21] IEC 61294, Edition 1.0 1993 Insulating liquids - Determination of the partial discharge inception voltage (PDIV).





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวินิจฉัยปัญหาหม้อแปลงชนิดฉนวนน้ำมัน DIAGNOSIS FOR OIL IMMERSED TRANSFORMER PROBLEMS

กนต์สิทธิ์ สะสมผลสวัสดิ์ ฉัฐศัญญ์ วัชรกุลยรัตน์ วรวิษ อังศุศาสตร์ ศศิศ โฆวพรหมานูช

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย จลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-Mail: nattasan.w@gmail.com

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาโครงสร้างพื้นฐานของหม้อแปลงและน้ำมันหม้อแปลง และการวินิจฉัยปัญหาที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยการวิเคราะห์ค่าแก๊สที่ละลายในน้ำมันหม้อแปลง (Dissolved Gas Analysis : DGA) โดยการนำค่าแก๊สที่ละลายในน้ำมันของหม้อแปลงจากการไฟฟ้านครหลวง (MEA) จำนวน 132 ตัว มาทำการประเมินสภาพด้วยวิธีตามมาตรฐาน IEEE C57.104 วิธีการประเมินสภาพด้วยปริมาณแก๊สอ้างอิง L1 และวิธี Health Index จากนั้นจึงนำค่าแก๊สที่ละลายในน้ำมันของหม้อแปลงที่มีแนวโน้มที่จะมีความผิดปกติเกิดขึ้นมาแปลผลด้วยวิธีการตามมาตรฐาน IEC60599 IEEE C57.104 และวิธี Duval Pentagon พบว่าหม้อแปลงส่วนใหญ่มีปัญหาเรื่องการเสื่อมสภาพของฉนวนจากความร้อนที่อุณหภูมิไม่เกิน 300 องศาเซลเซียส รวมทั้งทำการจำลองการเกิดความผิดปกติในระบบการฉนวนของหม้อแปลง ได้แก่ การทดลองการเบรคดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในน้ำมันหม้อแปลง, การทดลองการเบรคดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านเพรสบอร์ดที่ผ่านการอิมเพกเนชันด้วยน้ำมันหม้อแปลง, การทดลองการเบรคดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าน้ำมันหม้อแปลง, และการทดลองการเบรคดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าผ่านเพรสบอร์ดที่ผ่านการอิมเพกเนชันด้วยน้ำมันหม้อแปลง ปริมาณแก๊สที่ตรวจจับได้จากผลการทดลองจะถูกนำมาทำการแปลผลด้วยวิธีการต่างๆ พบว่าการแปลผลด้วยวิธีตามมาตรฐาน IEC และ IEEE ให้ผลสอดคล้องกับปัญหาที่จำลองขึ้น

คำสำคัญ: หม้อแปลง, น้ำมันหม้อแปลง, DGA

Abstract

The objectives of the project are to study basic structure of a power transformer and transformer oil including dissolved gas analysis method (DGA) for transformer problem diagnosis. Dissolved gases in transformer oil of the 132 transformers from Metropolitan Electricity Authority of Thailand according to IEEE C57.104, gas limitation criteria L1 and Health Index method. Then, the problems which may occur in the transformer having a dissolved gas quantity more than the limitation value were evaluated in accordance with IEC 60599, IEEE C57.104 and Duval Pentagon technique. It was found the that most problem of transformer insulation was thermal fault. Besides, the

experiments for faults in the transformer insulation were performed. The dissolved gases in the transformer oil from the AC and lightning impulse breakdowns of the tested transformer oil including the dissolved gassed acquired from the breakdown tests of impregnated pressboards immersed in the transformer oil under AC and impulse voltage respectively were interpreted by using the mentioned techniques. It was found that the referred gas interpretation techniques provided the solution met the simulation problems.

Keyword: transformer, transformer oil, DGA

1. บทนำ

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่สำคัญอย่างหนึ่ง เมื่อหม้อแปลงมีการใช้งานจนอายุไฟฟ้าจะเกิดการเสื่อมสภาพขึ้น โดยส่วนใหญ่หม้อแปลงจะใช้น้ำมันหม้อแปลง (Transformer Oil) หรือน้ำมันแร่ (Mineral Oil) เป็นฉนวนและตัวระบายความร้อน ดังนั้นการตรวจสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงจะช่วยให้สามารถวินิจฉัยปัญหาที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้าได้ การวิเคราะห์แก๊สในน้ำมัน (Dissolved Gas Analysis หรือ DGA) เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยวิธีนี้เป็นกระบวนการเก็บตัวอย่างน้ำมันจากหม้อแปลงเพื่อนำมาวิเคราะห์หาแก๊สที่เกิดขึ้นและละลายอยู่ในน้ำมัน ค่าแก๊สนี้สามารถนำไปวิเคราะห์ต่อเพื่อหาความผิดปกติที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง ทำให้สามารถวางแผนต่อไปได้ว่า จะทำซ่อมบำรุงและดูแลรักษาหม้อแปลงต่อไปอย่างไร

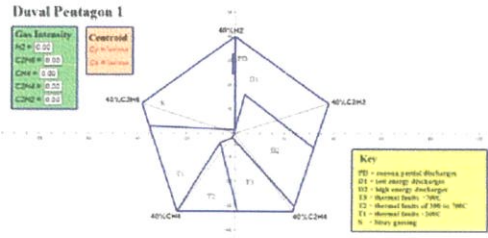
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชนิดของความผิดปกติที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง (Fault) [1]

- ดิสชาร์จบางส่วน (PD) ชนิดโคโรนาอาจจะเป็นผลทำให้เกิด X-Wax มาสะสมที่บริเวณฉนวนเซลลูโลส เป็นความผิดปกติที่ตรวจจับได้ยาก
- ดิสชาร์จพลังงานต่ำ (D1) ในน้ำมันและกระดาษ เกิดจากรอยคาร์บอนเกาะสะสมขนาดใหญ่ในกระดาษ มีรอยไหม้บนฉนวนกระดาษ (Tracking) หรือมีอนุภาคคาร์บอนในน้ำมัน
- ดิสชาร์จพลังงานสูง (D2) เกิดจากกระแสสูงสามารถไหลผ่านน้ำมันและกระดาษได้เนื่องจากฉนวนกระดาษถูกทำลายทำให้เกิดคาร์บอน และมีปริมาณคาร์บอนที่อยู่ในน้ำมันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิน้อยกว่า 300 องศาเซลเซียส (T1) กระจายจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล
- ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 300 องศาเซลเซียส (T2) ถึง 700 องศาเซลเซียส คาร์บอนจะเกิดขึ้น
- ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส (T3) เกิดการหลอมละลายของโลหะ (>1,000 องศาเซลเซียส)
- การเกิด Stray Gassing (S) คือการเกิดแก๊สบางชนิดอะจนเกินมาตรฐาน สาเหตุการณเกิดมาจากโครงสร้างภายในหม้อแปลง



รูปที่ 2 โปรแกรมสำหรับแปลผล Duval Pentagon 1

2.2 การแปลผล DGA [1,2]

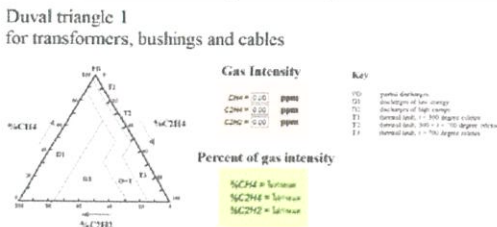
ขั้นตอนการแปลผล DGA เป็นอีกขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญอย่างมากในการวิเคราะห์ เนื่องจากขั้นตอนการแปลผลนั้นเป็นขั้นตอนที่ให้คำตอบของปัญหาว่าหม้อแปลงนั้นมีความผิดปกติหรือมีสถานะอย่างไร วิธีที่นิยมใช้กันนั้นอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC 60599 และ IEEE C57.104 ทั้งนี้คำตอบของการแปลผลของแต่ละวิธีอาจให้คำตอบไม่เหมือนกันในบางครั้ง ดังนั้นการให้คำตอบของปัญหานั้นจะต้องให้ประสบการณ์และความชำนาญของผู้วิเคราะห์ในการตัดสินใจร่วมด้วย ซึ่งประกอบด้วยวิธีดังนี้

- 1) การแปลผลด้วยวิธี Doernenburg Ratio
- 2) การแปลผลด้วยวิธี Rogers Ratio
- 3) การแปลผลด้วยวิธี Key Gas
- 4) การแปลผลโดยใช้อัตราส่วน Carbon dioxide per Carbon monoxide
- 5) การแปลผลด้วยวิธี IEC Ratio
- 6) การแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle
- 7) การแปลผลด้วยวิธี Duval Pentagon

3.การออกแบบโปรแกรมและอุปกรณ์การทดสอบ

3.1 การออกแบบโปรแกรมการแปลผลค่าแก๊ส

ในการออกแบบโปรแกรมการแปลผลด้วยวิธี Roger Ratio, Doernenburg Ratio, Key Gas, Carbon dioxide per Carbon monoxide Ratio และ IEC Ratio จะใช้ฟังก์ชัน และ เครื่องมือ Visual Basic ในโปรแกรม Microsoft Excel ร่วมกันเขียน โปรแกรมตามเงื่อนไขของวิธีต่างๆ ส่วนวิธี Duval Triangle และ Duval Pentagon ใช้โปรแกรม Geometric Sketchpad (GSP) ในการวาดและพล็อตจุด เพื่อแปลผลค่าแก๊ส ตัวอย่างโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 1 และรูปที่ 2



รูปที่ 1 โปรแกรมสำหรับแปลผล Duval Triangle 1

3.2 การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิดแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง

ทำการจำลองความผิดปกติขึ้นที่น้ำมันหม้อแปลงและเพรสเซอร์ที่เชื่อมอยู่ในน้ำมันเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิดแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันและนำมาแปลผลเพื่อวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นและเปรียบเทียบกับแต่ละวิธี โดยจะแบ่งการทดสอบเป็น 5 ประเภท ได้แก่

- 1) การทดสอบการเกิดโคโรนาดีสชาร์จในน้ำมันหม้อแปลงและตรวจจับแก๊สที่ละลายในน้ำมัน โดยใช้เครื่องวัดแบบออนไลน์ (DGA Online)
- 2) การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านน้ำมันหม้อแปลง
- 3) การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านอิมเพกเน็ทเพรสเซอร์ที่บรรจุอยู่ในชุดทดสอบที่ใส่น้ำมันหม้อแปลง
- 4) การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์พีเอฟผ่านน้ำมันหม้อแปลงที่บรรจุในชุดทดสอบ
- 5) การทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์พีเอฟผ่านอิมเพกเน็ทเพรสเซอร์ที่บรรจุอยู่ในชุดทดสอบที่ใส่น้ำมันหม้อแปลง

ตัวอย่างวงจรการทดสอบการเกิดโคโรนาดีสชาร์จในน้ำมันหม้อแปลงและตรวจจับแก๊สที่ละลายในน้ำมัน โดยใช้เครื่องวัดแบบออนไลน์ (DGA Online) ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 วงจรทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลง

- 1.หม้อแปลงทดสอบ 2.ตัวต้านทานน้ำ 3.โวลต์มิเตอร์ 4.เครื่องวัด DGA Online (Calisto9) 5.ชุดทดสอบการเกิดโคโรนาดีสชาร์จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การเตรียมผลนวนสำหรับการทดสอบ

3.3.1 การเตรียมน้ำมันหม้อแปลงสำหรับการทดสอบ

อน้ำมันหม้อแปลงเพื่อลดความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ในตู้อบสุญญากาศเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3.3.2 การเตรียมเพรสบอร์ดสำหรับการทดสอบ

1) คัดเพรสบอร์ดหนา 1.6 mm และ 3.2 mm ให้มีขนาด 10×10 cm

2) อบเพรสบอร์ดเพื่อลดความชื้น ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ใน ตู้อบสุญญากาศเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3) อิมเพรคนัดเพรสบอร์ดด้วยน้ำมันหม้อแปลงที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ในตู้อบสุญญากาศเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

4. การทดสอบและผลการทดสอบ

4.1 การแปลผลค่าแก๊สในน้ำมันหม้อแปลงของกราฟฟ้านครหลวง

ทำการแปลผลค่าแก๊สในน้ำมันหม้อแปลงของกราฟฟ้านครหลวงด้วยวิธีต่างๆ แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้จากแต่ละวิธีมาเปรียบเทียบกับเพื่อสรุปปัญหาที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลง และหาข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธี แล้วทำการสรุปผล

ตารางที่ 1 ผลการแปลผลด้วย Doernenburg ratio และ Roger Ratio โดยใช้เงื่อนไขเดิมรูปแบบ

Method	Passed condition	Interpretable Transformer	Common Problem
Doernenburg Ratio	1	1	Thermal fault
Roger Ratio	1	1	Thermal < 700 °C

ตารางที่ 2 ตารางแสดงพิกัดหม้อแปลงที่มีปัญหามากที่สุดและปัญหาที่พบบ่อยที่สุดจากการแปลผลด้วยวิธีต่างๆ

Method	Transformer which have problem frequently	Common Problem	
		IEEE/L1	HI
Key Gas	60 MVA 69/24-12 kV	Thermal cellulose	Thermal cellulose
CO2/CO Ratio	60 MVA 69/24-12 kV	O (6.82%)	-
IEC Ratio	60 MVA 69/24-12 kV	T1(44.0%)	T1(37.12%)
Duval Triangle 1	60 MVA 69/24-12 kV	T1(31.06%)	T1(25%)
Duval Triangle 4	60 MVA 69/24-12 kV	O(28.03%)	O(28.79%)
Duval Triangle 5	60 MVA 69/24-12 kV	O(8.33%)	O(6.06%)
Duval Pentagon 1	40 MVA 69/24-12 kV	T1(21.97%)	T1(17.42%)
Duval Pentagon 2	40 MVA 69/24-12 kV	O(21.97%)	O(17.42%)

ตารางที่ 3 ตารางแสดงจำนวนหม้อแปลงที่เกิด Stray Gassing หม้อแปลงที่ทำงานเป็นปกติ และหม้อแปลงที่ไม่สามารถแปลผลได้จากผลการแปลผลด้วยวิธีต่างๆ

Method	Stray gassing		Normal operation		Unidentified	
	IEEE/L1	HI	IEEE/L1	HI	IEEE/L1	HI
Key Gas	-	-	-	-	32.58%	32.58%
CO2/CO Ratio	-	-	5.30%	-	-	-
IEC Ratio	-	-	-	-	7.58%	4.55%
Duval Triangle 1	-	-	-	-	-	-
Duval Triangle 4	8.33%	2.27%	-	-	-	-
Duval Triangle 5	-	-	-	-	1.52%	1.52%
Duval Pentagon 1	25.76%	22.73%	-	-	-	-
Duval Pentagon 2	-	-	-	-	-	-

Note: L1 คือ วิธีประเมินสภาพด้วยปริมาณแก๊สยังอิง L1

4.2 การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมกาเกิดของแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมัน

การทดสอบการเกิดโคโรนาดีสชาร์จในน้ำมันหม้อแปลงและตรวจจับแก๊สที่ละลายในน้ำมัน โดยใช้เครื่องวัดแบบออนไลน์ (DGA Online) สามารถตรวจสอบผล DGA ตามเวลาที่เกิดขึ้นจริง (Real Time) แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบ DGA ของการเกิด โคโรนาดีสชาร์จในน้ำมันหม้อแปลง

แรงดันใช้งาน (กิโลโวลต์)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณแก๊ส (ppm)						
		H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
PFM (14.4 kV)	0	2	0.6	<LDL	<LDL	<LDL	<LDL	265
	3	2.5	0.6	<LDL	<LDL	<LDL	<LDL	300
	6	3	0.6	<LDL	<LDL	<LDL	<LDL	320
	9	3	0.6	<LDL	<LDL	<LDL	<LDL	335
	12	3.5	0.8	<LDL	<LDL	<LDL	<LDL	350
1.5PFM (21.6 kV)	0	1	0.4	<LDL	<LDL	<LDL	0.6	<LDL
	3	1.5	0.6	<LDL	<LDL	1	<LDL	240
	6	2	0.6	0.8	<LDL	2.4	<LDL	265
	9	2.5	0.6	2.2	<LDL	3.2	<LDL	285
1.7PFM (24.5 kV)	0	3	0.6	3.8	<LDL	4	<LDL	305
	3	3.5	0.8	5	<LDL	4.8	<LDL	375
	6	4	1	7.2	<LDL	5.4	<LDL	400
	9	6.5	1.2	4.8	<LDL	4	10	425
12	7	1.4	6.4	<LDL	4.6	10	430	

5. สรุปผลการทดลอง

จากตารางที่ 1 จะเห็นว่าวิธีการแปลผลค่าแก๊สที่ละลายในน้ำมันหม้อแปลงด้วยวิธี Doernenburg Ratio และ Roger Ratio สามารถแปลผลค่าแก๊สในน้ำมันจากหม้อแปลงได้เพียง 1 ตัว เพราะค่าแก๊สที่ละลายในน้ำมันหม้อแปลงของMEA มีค่าต่ำกว่าเงื่อนไขการใช้งานของวิธีนี้ วิธี Key Gas, Carbondioxide per Carbonmonoxide Ratio, IEC Ratio, Duval Triangle 1, Duval Triangle 4, Duval Triangle 5, Duval Pentagon 1, และ Duval Pentagon 2 ผลที่ออกมาส่วนใหญ่หม้อแปลงมักจะเกิดปัญหาเกี่ยวกับความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 3 จะเห็นว่าวิธี Key Gas, IEC Ratio, และ Duval Triangle 5 มีกรณีที่ไม่สามารถแปลผลค่าแก๊สที่ละลายในน้ำมันหม้อแปลงได้ วิธี Carbondioxide per Carbonmonoxide Ratio มีกรณีที่แปลผลออกมาแล้วพบว่าหม้อแปลงทำงานเป็นปกติ แต่วิธีการนี้จะต้องแน่ใจว่าแก๊ส Carbondioxide ที่เกิดขึ้นไม่ใช่แก๊สที่มาจากบรรยากาศภายนอก และวิธี Duval Triangle 4 และ Duval Pentagon 1 เป็นวิธีการแปลผลที่บอกว่าหม้อแปลงเกิดปัญหา Stray gassing ซึ่งเป็นปัญหาที่เกิดความเสียหายต่อหม้อแปลงและหม้อแปลงสามารถทำงานต่อไปได้อย่างเป็นปกติ จะเห็นว่าวิธีการแปลผลค่าแก๊สที่ละลายในน้ำมันมีหลายวิธี แต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้งานให้เหมาะสม

จากการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิดแก๊สสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1) จากการทดสอบการเกิดดิซซาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลง พบว่า ค่าแก๊สที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าน้อยมาก ไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นด้วยวิธีการแปลผลต่างๆ ได้จึงดูได้เพียงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าแก๊สที่สัมพันธ์กับระยะเวลาและแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ การวิเคราะห์เปรียบเทียบการแปลผลยังไม่สามารถระบุถึงวิธีการที่ดีที่สุดได้อย่างชัดเจน เพียงแต่เป็นแนวทางในการศึกษาคือไปในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอบคุณ ดร.ธีรพล โทธิ์พงส์วิวัฒน์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา รวมไปถึงคุณบุณยวีร์ จายศิริ ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไข ปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี ขอขอบคุณ คุณวิลาสินี วัฒนไพบูลย์ คุณกิตติพงศ์ จริยาบุรรัตน์ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ที่ได้ให้ความเอาใจใส่ และช่วยเหลือในด้านต่างๆ ด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณ บริษัท เมเดนชะ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เรื่องทุนทรัพย์ การไฟฟ้านครหลวง บริษัท โกลว์ พลังงาน จำกัด (มหาชน) บริษัท โฟกัส แลบบอราทอรีส์ จำกัด และ บริษัท ดัน แอนด์ ซัน จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านความรู้และข้อมูลที่สำคัญในการจัดทำปริญญานิพนธ์จนสำเร็จ

ขอขอบคุณ บริษัท ละมุลวิศวกรรม จำกัด บริษัท อินซูเลชั่น เอนจิเนียริง แอนด์ คอนเซาท์แทนส์ จำกัด และบริษัท ดาวต้า เอนทรี กรุ๊ป จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เกี่ยวกับเครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบ จนการทดสอบเสร็จสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEC 60599, Edition 3.0 2015-09 Mineral oil-impregnated electrical equipment in service – Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis.
- [2] IEEE Std. C57.104™, 2008 Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers.
- [3] Michel Duval, “The Duval Triangle for Load Tap Changers, Non-Mineral Oils and Low Temperature Faults in Transformers”.
- [4] Michel Duval and Laurent Lamarre, “The Duval Pentagon-A New Complementary Tool for the Interpretation of Dissolved Gas Analysis in Transformers”.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ชื่อ-สกุล นาย กันดิพัฑฒ์ สดสมผลสวัสดิ์

เกิดวันที่ 21 ตุลาคม พ.ศ. 2537

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจาก

โรงเรียนแกลง “วิศดาราร”

เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2556



ชื่อ-สกุล นาย ชุตติพงษ์ วัชรกุลย์รัตน์

เกิดวันที่ 15 มกราคม พ.ศ. 2538

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจาก

โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยรามคำแหง

เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2556



ชื่อ-สกุล นาย วรวิช อังสุศาสตร์

เกิดวันที่ 15 ตุลาคม พ.ศ. 2537

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจาก

โรงเรียนมงฟอร์ตวิทยาลัย

เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบัน

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2556



ชื่อ-สกุล นาย สติศ โมพรพหมานุช

เกิดวันที่ 27 มกราคม พ.ศ. 2538

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจาก

โรงเรียนวิสุทธิรังษี จังหวัดกาญจนบุรี

เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบัน

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข. ข้อมูลเบื้องต้นของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันต่ำ (MEA)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	TDCG
1	CHIDLUM	CLT-TR-1	30/40	69/12	24	63	0.5	12	238	162	2395	499.5
2	BANGBON	BB-TR-3	30/40	69/24-12	29	58	0	8	194	87	2387	376
3	BANGKRACHAO	BC-TR-1	30/40	69/24-12	49	35	1.5	30	21	570	3392	706.5
4	BANGKRACHAO	BC-TR-2	30/40	69/24-12	16	7	0.5	48	16	375	2860	462.5
5	BANGKLO	BL-TR-1	30/40	69/24-12	7	20	0	6	12	552	3533	597
6	BANGKLO	BL-TR-2	30/40	69/24-12	9	77	0	31	849	206	2119	1172
7	BANGKHOONPROM	BR-TR-1	30/40	69/24-12	10	124	0	12	326	226	2905	698
8	BANGKHOONPROM	BR-TR-2	30/40	69/24-12	13	96	0	8	266	156	2908	539
9	BANGKHOONPROM	BR-TR-3	30/40	69/24-12	14	73	0.5	21	200	125	2027	433.5
10	KLONGSAN	KN-TR-1	30/40	69/24-12	74	257	0	29	640	247	7821	1247
11	KLONGSAN	KN-TR-2	30/40	69/24-12	70	209	0	35	739	170	5664	1223
12	KLONGSANAMCHAI	KSC-TR-3	30/40	69/24-12	16	14	0	17	9	580	5986	636
13	KLONGTOEY	KT-TR-1	30/40	69/24-12	13	63	0	10	256	156	2946	498
14	KLONGTOEY	KT-TR-2	30/40	69/24-12	19	115	0.5	37	295	176	2959	642.5
15	MAHAMEK	MM-TR-1	30/40	69/24-12	14	64	1	23	124	376	3365	602

ตารางที่ ข.(ต่อ) ข้อมูลเบื้องต้นของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันเฉลี่ย (MEA)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	TDCG
16	MAHAISAWAN	MN-TR-1	30/40	69/24-12	50	88	0	47	215	205	3577	605
17	MAHAISAWAN	MN-TR-2	30/40	69/24-12	40	60	0.5	18	299	143	1858	560.5
18	NANGLERNG	NLG-TR-1	30/40	69/24-12	5	5	0	5	6	54	1385	75
19	NANGLERNG	NLG-TR-2	30/40	69/24-12	23	82	0	11	161	196	3036	473
20	NANGLERNG	NLG-TR-3	30/40	69/24-12	5	20	0	9	8	484	2976	526
21	PRAPRADANG	PD-TR-2	30/40	69/24-12	53	92	1	7	112	188	1953	453
22	PRAPRADANG	PD-TR-3	30/40	69/24-12	12	28	1.5	14	132	480	1860	667.5
23	PRAKANONG	PK-TR1	30/40	69/24-12	84	70	0.5	22	22	581	5799	779.5
24	PATHUMWAN	PM-TR3	30/40	69/24-12	40	100	2	96	180	260	3203	678
25	RASBURANA	RN-TR3	30/40	69/24-12	5	56	0	66	154	744	9094	1025
26	SAPANDUM	SD-TR1	30/40	69/24-12	11	27	8	34	161	367	5610	608
27	SAPANDUM	SD-TR2	30/40	69/24-12	15	18	7.5	49	29	335	3112	453.5
28	SAPANDUM	SD-TR3	30/40	69/24-12	23	113	0	82	142	175	2791	535
29	SAPANDUM	SD-TR4	30/40	69/24-12	13	24	1	63	23	300	3421	424
30	SURAWONG	SU-TR1	30/40	69/24-12	12	84	0	25	92	274	6688	487

ตารางที่ ข.(ต่อ) ข้อมูลเบื้องต้นของหม้อแปลงในควบคุมดูแลของการไฟฟ้านครหลวง (MEA)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	TDCG
31	SURAWONG	SU-TR2	30/40	69/24-12	7	79	0	17	638	93	1523	834
32	SURAWONG	SU-TR3	30/40	69/24-12	32	43	1	33	282	64	1283	455
33	SIPRAYA	SY-TR1	30/40	69/24-12	44	120	5	78	74	507	4763	828
34	SIPRAYA	SY-TR2	30/40	69/24-12	10	137	1.5	109	411	170	2378	838.5
35	THONBURI	TR-1	30/40	69/24-12	16	88	0.5	11	353	154	1317	622.5
36	TAKSIN	TR-1	30/40	69/24-12	7	7	0.5	49	23	217	2350	303.5
37	TAKSIN	TR-2	30/40	69/24-12	5	3	0.5	8	14	39	483	69.5
38	TANONTOK	TR-3	30/40	69/24-12	5	4	0	12	9	61	545	91
39	WATLIEB	TR-1	30/40	69/24-12	15	81	0.5	8	64	136	2808	304.5
40	WATLIEB	TR-2	30/40	69/24-12	19	56	0.5	6	49	143	2748	273.5
41	WATLIEB	TR-3	30/40	69/24-12	11	53	0	6	44	148	1777	252.5
42	WATPRACHABAMRUNG	TR-1	30/40	69/24-12	30	35	0.5	37	50	511	6665	663.5
43	THAWEEWATTANA	TR-1	30/40	115/24	5	70	1	15	208	507	2474	806
44	THAWEEWATTANA	TR-2	30/40	115/24	5	14	0	4	26	202	1959	251
45	BANGBON	BB-TR-1	36/48/60	69/24-12	5	2	0	3	1	73	238	84

ตารางที่ ข.(ต่อ) ข้อมูลเบื้องต้นของหม้อแปลงในความถี่และการไฟฟ้านครหลวง (MEA)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	TDCG
46	BANGBON	BB-TR-2	36/48/60	69/24-12	5	2	0.5	1	1	52	303	61.5
47	BANGPRAKOD	BK-TR-1	36/48/60	69/24-12	19	118	1	12	544	148	2495	842
48	BANGPRAKOD	BK-TR-2	36/48/60	69/24-12	38	161	0	12	468	207	1997	886
49	BANGPRAKOD	BK-TR-3	36/48/60	69/24-12	11	114	1.5	17	272	216	1713	631.5
50	BANGKRADEE	BKD-TR-1	36/48/60	69/24-12	46	66	0	13	158	173	2032	456
51	BANGMOD	BM-TR-1	36/48/60	69/24-12	5	6	0	2	4	53	854	70
52	BANGMOD	BM-TR-2	36/48/60	69/24-12	36	18	0.5	16	14	266	2854	350.5
53	BANGKOKNOI	BOT-TR-1	36/48/60	69/24-12	37	41	0	5	177	86	1566	346
54	BANGKOKNOI	BOT-TR-2	36/48/60	69/24-12	54	44	1	10	176	76	1376	361
55	BANGKOKNOI	BOT-TR-3	36/48/60	69/24-12	26	43	1	8	98	83	2357	259
56	JANGRON	JRN-TR-1	36/48/60	69/24-12	20	59	1	28	149	340	2812	597
57	JANGRON	JRN-TR-2	36/48/60	69/24-12	10	87	1	12	343	161	1138	614
58	KLONGSANPASAMIT	KS-TR-1	36/48/60	69/24-12	29	36	1.5	11	96	196	2915	369.5
59	KLONGSANPASAMIT	KS-TR-2	36/48/60	69/24-12	14	21	0	7	112	259	3403	413
60	KLONGSANAMCHAI	KSC-TR-1	36/48/60	69/24-12	17	73	1.5	7	145	83	2083	326.5

ตารางที่ ข.(ต่อ) ข้อมูลเบื้องต้นของหม้อแปลงในความดูแลของการไฟฟ้านครหลวง (MEA)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	TDCG
61	KLONGSANAMCHAI	KSC-TR-2	36/48/60	69/24-12	12	16	0.5	7	19	127	1727	181.5
62	KRUNAI	KU-TR-1	36/48/60	69/24-12	5	2	2	2	1	95	1679	107
63	KRUNAI	KU-TR-2	36/48/60	69/24-12	5	14	2.5	3	1	66	1431	91.5
64	KLONGWATSING	KWS-TR-1	36/48/60	69/24-12	11	162	0	38	1065	207	2188	1483
65	KLONGWATSING	KWS-TR-2	36/48/60	69/24-12	11	166	2.5	25	699	194	1673	1097.5
66	LUMPINI	LN-TR-4	36/48/60	69/24-12	12	58	0.5	12	23	817	5209	922.5
67	LADYA	LYA-TR-1	36/48/60	69/24-12	5	11	0.5	6	3	467	1838	492.5
68	LADYA	LYA-TR-2	36/48/60	69/24-12	5	15	1.5	6	15	749	3845	791.5
69	MAHAMEK	MM-TR-2	36/48/60	69/24-12	6	8	0.5	3	3	144	495	164.5
70	MAHAMEK	MM-TR-3	36/48/60	69/24-12	6	6	1.5	2	4	169	522	188.5
71	NONGKHAM	NH-TR-1	36/48/60	69/24-12	12	14	0	3	12	499	3800	540
72	NONGKHAM	NH-TR-2	36/48/60	69/24-12	82	63	0	56	20	878	9658	1099
73	NONSEE	NS-TR-1	36/48/60	69/24-12	5	16	0.5	5	6	463	1414	495.5
74	NONSEE	NS-TR-2	36/48/60	69/24-12	5	9	1	2	5	358	829	380
75	PRAPRADANG	PD-TR-1	36/48/60	69/24-12	12	37	0.5	12	1	505	5795	567.5

ตารางที่ ข.(ต่อ) ข้อมูลเบื้องต้นของหม้อแปลงในความถี่และการไฟฟ้านครหลวง (MEA)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	TDCG
76	PHAISINGTO	PI-TR1	36/48/60	69/24-12	79	37	2.5	1	26	667	7918	812.5
77	PHAISINGTO	PI-TR2	36/48/60	69/24-12	21	67	0	1	53	1010	10625	1152
78	PHAISINGTO	PI-TR3	36/48/60	69/24-12	9	37	0.5	4	21	711	7268	782.5
79	PHAISINGTO	PI-TR4	36/48/60	69/24-12	29	19	1.5	11	9	1158	4747	1227.5
80	PRAKANONG	PK-TR2	36/48/60	69/24-12	17	40	0.5	9	14	402	3894	482.5
81	PATHUMWAN	PM-TR1	36/48/60	69/24-12	64	2	0.5	11	9	173	2645	259.5
82	PATHUMWAN	PM-TR2	36/48/60	69/24-12	8	14	0.5	23	7	593	2247	645.5
83	RASBURANA	RN-TR1	36/48/60	69/24-12	3	2	0	8	7	134	428	154
84	RASBURANA	RN-TR2	36/48/60	69/24-12	1	6	0	4	12	152	459	175
85	SAINAMTHIP	SA-TR1	36/48/60	69/24-12	26	101	0.5	11	247	316	3954	701.5
86	SAINAMTHIP	SA-TR2	36/48/60	69/24-12	23	99	0.5	10	340	231	2895	703.5
87	SILOM	SL-TR1	36/48/60	69/24-12	56	15	1.5	12	6	340	4377	430.5
88	SILOM	SL-TR2	36/48/60	69/24-12	16	14	0	17	9	580	5986	636
89	SURASAK	SRK-TR1	36/48/60	69/24-12	25	45	1.5	1	118	87	1225	277.5
90	SURASAK	SRK-TR2	36/48/60	69/24-12	35	43	0.5	9	139	79	1600	305.5

ตารางที่ ข.(ต่อ) ข้อมูลเบื้องต้นของหม้อแปลงในความถี่และการไฟฟ้านครหลวง (MEA)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	TDCG
91	SOUTH THONBURI	S TT-TR1	36/48/60	69/24-12	33	81	0	14	323	171	2386	622
92	SOUTH THONBURI	S TT-TR2	36/48/60	69/24-12	9	126	1.5	14	643	147	2272	940.5
93	SOUTH THONBURI	S TT-TR3	36/48/60	69/24-12	46	43	1.5	10	19	706	5362	825.5
94	THONBURI	TR-2	36/48/60	69/24-12	65	72	1	6	76	465	4977	685
95	THONBURI	TR-3	36/48/60	69/24-12	11	153	0.5	15	619	151	1201	949.5
96	TANONTOK	TR-1	36/48/60	69/24-12	5	163	2	25	867	200	3164	1262
97	TANONTOK	TR-2	36/48/60	69/24-12	5	120	0.5	17	457	202	3786	801.5
98	THONBURIROM	TR-1	36/48/60	69/24-12	15	99	0.5	11	200	287	3551	612.5
99	THONBURIROM	TR-2	36/48/60	69/24-12	26	161	0	48	1347	249	2855	1831
100	WANGPETCHABOON	TR-1	36/48/60	69/24-12	29	14	1	6	10	601	4041	661
101	WANGPETCHABOON	TR-2	36/48/60	69/24-12	81	45	5	35	26	929	7431	1121
102	WANGPETCHABOON	TR-3	36/48/60	69/24-12	13	42	0.5	1	15	165	5938	236.5
103	WATKAMPANG	TR-1	36/48/60	69/24-12	32	43	2	23	18	552	11182	670
104	WATKAMPANG	TR-2	36/48/60	69/24-12	14	20	0	3	46	634	11706	717
105	YENARKART	TR-1	36/48/60	69/24-12	34	26	3	8	33	63	3953	167

ตารางที่ ข.(ต่อ) ข้อมูลเบื้องต้นของหม้อแปลงในความต้องการไฟฟ้านครหลวง (MEA)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	TDCG
106	YENARKART	TR-2	36/48/60	69/24-12	43	17	0.5	5	12	663	4391	740.5
107	YENARKART	TR-3	36/48/60	69/24-12	36	16	2.5	6	12	703	4353	775.5
108	CHIDLUM	CLT-TR-2	36/48/60	69/12	13	68	0	13	144	128	1263	366
109	LUMPINI	LN-TR-1	36/48/60	69/24	6	12	0	6	8	567	2219	599
110	LUMPINI	LN-TR-2	36/48/60	69/24	10	19	0.5	7	7	548	2133	591.5
111	LUMPINI	LN-TR-3	36/48/60	69/24	13	13	0	7	10	533	2388	576
112	MAHAISAWAN	MN-TR-3	36/48/60	69/24	38	35	0	11	302	33	1310	419
113	WATKUSANG	TR-1	36/48/60	69/24	5	3	0.5	2	2	104	287	116.5
114	WATKUSANG	TR-2	36/48/60	69/24	5	1	0.5	2	7	109	464	124.5
115	BANGPONGPANG	BPP-TR-1	36/48/60	115/24-12	5	21	0.5	4	8	443	2043	481.5
116	BANGPONGPANG	BPP-TR-2	36/48/60	115/24-12	5	11	0.5	2	7	294	860	319.5
117	EKACHAI	EKC-TR-1	36/48/60	115/24-12	11	24	0.5	6	15	220	7150	276.5
118	SAMYAN	SAM-TR1	36/48/60	115/24-12	5	12	0	13	14	251	2188	295
119	SAMYAN	SAM-TR2	36/48/60	115/24-12	5	4	0	4	8	311	786	332
120	EKACHAI	EKC-TR-2	36/48/60	115/24	5	14	0	4	14	578	2796	615

ตารางที่ ข.(ต่อ) ข้อมูลเบื้องต้นของหม้อแปลงในความถี่ของการไฟฟ้านครหลวง (MEA)

No	SUB	TR	Rated Power	Rated Voltage	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	TDCG
121	SAMYAN	SAM-TR3	36/48/60	115/24	45	74	0.5	4	45	311	3150	479.5
122	SRIWIANG	SWG-TR1	36/48/60	115/24	5	20	0.5	6	1	332	2117	364.5
123	SRIWIANG	SWG-TR2	36/48/60	115/24	5	11	0.5	3	10	229	1517	258.5
124	YANNAWA	TR-1	36/48/60	115/24	5	4	0	6	9	347	846	371
125	YANNAWA	TR-2	36/48/60	115/24	5	4	1	4	9	432	1242	455
126	CHIDLOM	CLT-TX-3	150/200/250	230/69/24	25	12	0.5	7	5	545	2929	594.5
127	TANONTOK	TX-2	150/200/250	230/69/24	55	53	5.5	64	18	1024	4753	1219.5
128	TANONTOK	TX-3	150/200/250	230/69/24	21	13	2	9	6	565	3810	616
129	CHIDLOM	CLT-TX-1	180/240/300	230/69/24	3	126	2.5	133	50	406	4686	720.5
130	CHIDLOM	CLT-TX-2	180/240/300	230/69/24	1	37	0	7	23	337	2771	405
131	TANONTOK	TX-1	150/240/300	230/115/24	27	23	1	4	9	428	1819	492
132	TANONTOK	TX-4	180/240/300	230/115/24	9	23	1.5	3	7	341	1428	384.5



ตาราง ค.(ต่อ) การตรวจสอบเงื่อนไขและการแปลผลด้วยวิธีการ Doernenburg Ratio และ Roger Ratio

No	SUB	Rated capacity	Rated voltage	TR	Check with 2(L1)				Check with L1				Ratio test for Doernenburg				Ratio test for Roger		Result	
					H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	CO	R1	R2	R3	R4	R1	R2	R5	Doernburg	Roger
26	SAPANDUM	30/40	69/24-12	SD-TR1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	Resample	Roger	
27	SAPANDUM	30/40	69/24-12	SD-TR2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault	
28	SAPANDUM	30/40	69/24-12	SD-TR3	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault	
29	SAPANDUM	30/40	69/24-12	SD-TR4	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault	
30	SURAWONG	30/40	69/24-12	SU-TR1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault	
31	SURAWONG	30/40	69/24-12	SU-TR2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault	
32	SURAWONG	30/40	69/24-12	SU-TR3	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault	
33	SIPRAYA	30/40	69/24-12	SY-TR1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	Resample	Resample		
34	SIPRAYA	30/40	69/24-12	SY-TR2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault		
35	THONBURI	30/40	69/24-12	TR-1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault		
36	TAKSIN	30/40	69/24-12	TR-1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault		
37	TAKSIN	30/40	69/24-12	TR-2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault		
38	TANONTOK	30/40	69/24-12	TR-3	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault		
39	WATLIEB	30/40	69/24-12	TR-1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault		
40	WATLIEB	30/40	69/24-12	TR-2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault		
41	WATLIEB	30/40	69/24-12	TR-3	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault		
42	WATPRACHABAMRUNG	30/40	69/24-12	TR-1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault		
43	THAWEEWATTANA	30/40	115/24	TR-1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	Resample	Resample		
44	THAWEEWATTANA	30/40	115/24	TR-2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault		
45	BANGBON	36/48/60	69/24-12	BB-TR-1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault		
46	BANGBON	36/48/60	69/24-12	BB-TR-2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault		
47	BANGPRAKOD	36/48/60	69/24-12	BK-TR-1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault		
48	BANGPRAKOD	36/48/60	69/24-12	BK-TR-2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault		
49	BANGPRAKOD	36/48/60	69/24-12	BK-TR-3	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault		
50	BANGKRADEE	36/48/60	69/24-12	BKD-TR-1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค. (ต่อ) การตรวจสอบเงื่อนไขและการแปลผลด้วยวิธีการ Doernenburg Ratio และ Roger Ratio

No	SUB	Rated capacity	Rated voltage	TR	Check with 2(L1)				Check with L1				Ratio test for Doernenburg					Ratio test for Roger		Result			
					H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₈	CO	R1	R2	R3	R4	R1	R2	R5	Doernenburg	Roger			
51	BANGMOD	36/48/60	69/24-12	BM-TR-1																	No fault	No fault	
52	BANGMOD	36/48/60	69/24-12	BM-TR-2																		No fault	No fault
53	BANGKOKNOI	36/48/60	69/24-12	BOI-TR-1					/								/					No fault	No fault
54	BANGKOKNOI	36/48/60	69/24-12	BOT-TR-2					/								/					No fault	No fault
55	BAIKOKNOI	36/48/60	69/24-12	BOI-TR-3					/								/					No fault	No fault
56	JANGRON	36/48/60	69/24-12	JRN-TR-1					/								/					No fault	No fault
57	JANGRON	36/48/60	69/24-12	JRN-TR-2					/								/					No fault	No fault
58	KLONGSANPASAMIT	36/48/60	69/24-12	KS-TR-1					/								/					No fault	No fault
59	KLONGSANPASAMIT	36/48/60	69/24-12	KS-TR-2					/								/					No fault	No fault
60	KLONGSANMICHAI	36/48/60	69/24-12	KSC-TR-1					/								/					No fault	No fault
61	KLONGSANMICHAI	36/48/60	69/24-12	KSC-TR-2					/								/					No fault	No fault
62	KRUNAI	36/48/60	69/24-12	KU-TR-1					/								/					No fault	No fault
63	KRUNAI	36/48/60	69/24-12	KU-TR-2					/								/					No fault	No fault
64	KLONGWATSING	36/48/60	69/24-12	KWS-TR-1					/								/					No fault	No fault
65	KLONGWATSING	36/48/60	69/24-12	KWS-TR-2					/								/					No fault	No fault
66	LUMPIJI	36/48/60	69/24-12	LJ-TR-4					/								/					No fault	No fault
67	LADYA	36/48/60	69/24-12	LYA-TR-1					/								/					No fault	No fault
68	LADYA	36/48/60	69/24-12	LYA-TR-2					/								/					No fault	No fault
69	MAHAMEK	36/48/60	69/24-12	MM-TR-2					/								/					No fault	No fault
70	MAHAMEK	36/48/60	69/24-12	MM-TR-3					/								/					No fault	No fault
71	NONGKHAM	36/48/60	69/24-12	NH-TR-1					/								/					No fault	No fault
72	NONGKHAM	36/48/60	69/24-12	NH-TR-2					/								/					No fault	No fault
73	NONSEE	36/48/60	69/24-12	NS-TR-1					/								/					No fault	No fault
74	NONSEE	36/48/60	69/24-12	NS-TR-2					/								/					No fault	No fault
75	PRAPRADANG	36/48/60	69/24-12	PD-TR-1					/								/					No fault	No fault

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.(ต่อ) การตรวจสอบเงื่อนไขและการแปลผลด้วยวิธีการ Doernenburg Ratio และ Roger Ratio

No	SUB	Rated capacity	Rated voltage	TR	Check with 2(1:1)				Check with L1				Ratio test for Doernenburg				Ratio test for Roger		Result	
					H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	R1	R2	R3	R4	R1	R2	R5	Doernenburg	Roger	
76	PHAISING IO	36/48/60	69/24-12	PI-TR1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	Resample	Resample	Roger	
77	PHAISING TO	36/48/60	69/24-12	PI-TR2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault	No fault	
78	PHAISING TO	36/48/60	69/24-12	PI-TR3	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault	No fault	
79	PHAISING TO	36/48/60	69/24-12	PI-TR4	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault	No fault	
80	PRAKANONG	36/48/60	69/24-12	PK-TR2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault	No fault	
81	PATHUMWAN	36/48/60	69/24-12	PM-TR1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault	No fault	
82	PATHUMWAN	36/48/60	69/24-12	PM-TR2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault	No fault	
83	RASBURANA	36/48/60	69/24-12	RN-TR1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault	No fault	
84	RASBURANA	36/48/60	69/24-12	RN-TR2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault	No fault	
85	SAINAMTHIP	36/48/60	69/24-12	SA-TR1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault	No fault	
86	SAINAMTHIP	36/48/60	69/24-12	SA-TR2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault	No fault	
87	SILOM	36/48/60	69/24-12	SL-TR1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault	No fault	
88	SILOM	36/48/60	69/24-12	SL-TR2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault	No fault	
89	SURASAK	36/48/60	69/24-12	SRK-TR1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault	No fault	
90	SURASAK	36/48/60	69/24-12	SRK-TR2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault	No fault	
91	SOUTH THONBURI	36/48/60	69/24-12	STT-TR1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault	No fault	
92	SOUTH THONBURI	36/48/60	69/24-12	STT-TR2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault	No fault	
93	SOUTH THONBURI	36/48/60	69/24-12	STT-TR3	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault	No fault	
94	THONBURI	36/48/60	69/24-12	TR-2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault	No fault	
95	THONBURI	36/48/60	69/24-12	TR-3	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault	No fault	
96	TANONTOK	36/48/60	69/24-12	TR-1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault	No fault	
97	TANONTOK	36/48/60	69/24-12	TR-2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault	No fault	
98	THONBURI ROM	36/48/60	69/24-12	TR-1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault	No fault	
99	THONBURI ROM	36/48/60	69/24-12	TR-2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault	No fault	
100	WANGPETCHABOON	36/48/60	69/24-12	TR-1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault	No fault	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.(ต่อ) การตรวจสอบเงื่อนไขและการเปลี่ยนแปลงด้วยวิธีการ Doernenburg Ratio และ Roger Ratio

No	SUB	Rated capacity	Rated voltage	TR	Check with 2(L1)				Check with L1				Ratio test for Doernenburg					Ratio test for Roger		Result	
					H ₁	CH ₁	C ₁ H ₁	C ₁ H ₁	C ₁ H ₁	CO	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R5	Doernenburg	Roger	
101	WANGPETCHABOON	36/48/60	69/24-12	TR-2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault		
102	WANGPETCHABOON	36/48/60	69/24-12	TR-3	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault		
103	WATKAMPANG	36/48/60	69/24-12	TR-1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	Resample	Resample			
104	WATKAMPANG	36/48/60	69/24-12	TR-2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault			
105	YENARKART	36/48/60	69/24-12	TR-1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault			
106	YENARKART	36/48/60	69/24-12	TR-2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault			
107	YENARKART	36/48/60	69/24-12	TR-3	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	Resample	Resample			
108	CHIDLOM	36/48/60	69/12	CLT-TR-2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault			
109	LUMPINI	36/48/60	69/24	LN-TR-1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault			
110	LUMPINI	36/48/60	69/24	LN-TR-2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault			
111	LUMPINI	36/48/60	69/24	LN-TR-3	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault			
112	MAHAISAWAN	36/48/60	69/24	MN-TR-3	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault			
113	WATKUSANG	36/48/60	69/24	TR-1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault			
114	WATKUSANG	36/48/60	69/24	TR-2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault			
115	BANGPONGPANG	36/48/60	115/24-12	BPP-TR-1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault			
116	BANGPONGPANG	36/48/60	115/24-12	BPP-TR-2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault			
117	EKACHAI	36/48/60	115/24-12	EKC-TR-1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault			
118	SAMYAN	36/48/60	115/24-12	SAM-TR1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault			
119	SAMYAN	36/48/60	115/24-12	SAM-TR2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault			
120	EKACHAI	36/48/60	115/24	EKC-TR-2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault			
121	SAMYAN	36/48/60	115/24	SAM-TR3	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault			
122	SRIWIANG	36/48/60	115/24	SWG-TR1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault			
123	SRIWIANG	36/48/60	115/24	SWG-TR2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault			
124	YANNAWA	36/48/60	115/24	TR-1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault			
125	YANNAWA	36/48/60	115/24	TR-2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	No fault	No fault			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุวิทย์



CERTIFICATE OF QUALITY

Format No.: F/QA/PH3/TO/05

REPORT NO.	: QA/TO/2015-16/FG/S0016	DATE	: 08.04.2015 Page 1 of 1
PRODUCT	: "ELECTROL A" - TRANSFORMER OIL - UNINHIBITED	DATE OF SAMPLE RECEIPT	: 08.04.2015
SPECIFICATION	: IEC: 296 / 1982 CLASS I	SAMPLING PLAN	: IEC: 475
CUSTOMER	: M/s. ACME INSULATION CO. LTD., THAILAND		
BATCH NO.	: V15 - TRO A - 001		
QUANTITY	: 192 DRUMS X 210 LTRS =40.320 KL	CONTAINER NO	: TEMU 205011[4] & MOAU 055634[3]
BUYER'S ORDER NO.	: AICL/PO/2015/249	DATED	: 20.03.2015
INVOICE NO.	: M/EX06018/15-16,M/EX00019/15-16	DATED	: 08.04.2015
L/C NO.	: - - -	DATED	: - - -

Sl.No	CHARACTERISTICS	SPECIFICATION	TEST METHOD	TEST VALUES
1.	Appearance	Clear, free from sediment and suspended matter	IEC 296	Complies with specification
2.	Kinematic Viscosity (mm ² /s) At 40°C At -15°C	<16.5 <800	ISO: 3104	8.854 256.8
3.	Flash Point (°C)	> 140	ISO: 2719	146.0
4.	Pour Point (°C)	<-30	ISO: 3016	-36
5.	Density (Kg/dm ³ C) at 20°C at 29.5°C	<0.895	ISO: 3675	0.8340 0.8290
6.	Interfacial tension at 25°C (N/m)	>0.04	ISO 6295	0.047
7.	Neutralization Value (mg KOH/g)	<0.03	IEC: 296	Nil
8.	Corrosive Sulphur	Non Corrosive	ISO: 5662	Non Corrosive
9.	Water Content (mg/Kg) 1) Bulk 2) Drum	<20 <30	IEC: 733	- 11
10.	Anti Oxidant Additives (%)	Not Detectable	IEC: 666	Not Detected
11.	Oxidation Stability for 164Hrs@100°C a) Neutralization value (mg KOH/g) b) Sludge % by mass	<0.4 <0.1	IEC: 74	0.07 0.026
12.	Break down voltage As delivered (kV) After Treatment (kV)	>30 >50	IEC: 156	65 ---
13.	Dissipation factor (Tan δ) @ 90°C	<0.005	IEC: 247	0.00035
14.	PCB Content	Not Detectable	ASTM D 4059	Not Detected

Remarks: 1. The COA relates only to the Batch No. tested. Conforms to IEC : 296 / 1982 Class I
2. The COA shall not be reproduced except in full, without written approval of the laboratory.

PREPARED & TESTED BY

VERIFIED BY

M. Padalingam
(M.PADALINGAM)

(CHANDRASEKARAN.G)
Sr.MANAGER-QA

CHEMIST-CA

874111


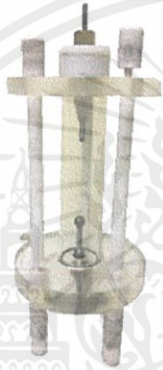

Shri. Padalingam Specialties Pvt. Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้






เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง จ.1 ชุดทดสอบ






ลำดับที่	อุปกรณ์	คุณสมบัติ
1	 <p>รูปที่ 1 ชุดทดสอบการเกิดโคโรนาดีสชาร์จ</p>	<p>หัวอิเล็กโทรดที่ใช้ในชุดทดสอบนั้นทำจากวัสดุที่เป็นทองเหลือง อิเล็กโทรดด้านแรงดันสูงเป็นอิเล็กโทรดแบบรีดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm มีความยาว 25 mm ที่ปลายอิเล็กโทรดใส่เข็มโดยปลายเข็มมีขนาด 10 μm ส่วนอิเล็กโทรดด้านกราวด์เป็นอิเล็กโทรดแบบเฟลนมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 85 mm และมีความสูง 15 mm</p>
2	 <p>รูปที่ 2 ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของฉนวนเหลว</p>	<p>หัวอิเล็กโทรดที่ใช้ในชุดทดสอบนั้นอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC 60243-1 โดยอิเล็กโทรดทรงกลมทำจากวัสดุทองเหลืองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 mm และเข็มทำจากทังสเตน โดยที่ปลายเข็มมีรัศมีความโค้ง 40 μm</p>
3	 <p>รูปที่ 3 ชุดทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ด</p>	<p>หัวอิเล็กโทรดที่ใช้ในชุดทดสอบนั้นทำจากวัสดุที่เป็นทองเหลือง อิเล็กโทรดด้านแรงดันสูงเป็นอิเล็กโทรดแบบรีดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm มีความยาว 25 mm ที่ปลายอิเล็กโทรดใส่เข็มโดยปลายเข็มมีขนาด 10 μm ส่วนอิเล็กโทรดด้านกราวด์เป็นอิเล็กโทรดแบบเฟลนมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 85 mm และมีความสูง 15 mm</p>

ตาราง จ.2 เครื่องมือวัด

ลำดับที่	อุปกรณ์	คุณสมบัติ
1	 <p>รูปที่ 4 เครื่องวัด DGA Online</p>	- Calisto 9
2	 <p>รูปที่ 5 มัลติมิเตอร์</p>	- รุ่น FLUKE 179
3	 <p>รูปที่ 6 ดิจิตอลออสซิลโลสโคป</p>	- YOKOGAWA DL 1640


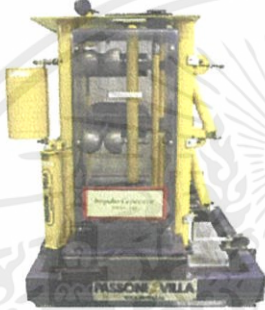


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง จ.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่าน

ลำดับที่	อุปกรณ์	คุณสมบัติ
1	 <p>รูปที่ 7 เครื่องทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวนเหลว</p>	<p>เครื่องทดสอบการเบรกดาวน์ฉนวนเหลว (ตามมาตรฐาน IEC 156)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Input Voltage 250 V_{AC} - Frequency 50/60 Hz
2	 <p>รูปที่ 8 ชุดควบคุมแรงดัน</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Rated power 14000 VA - Input Voltage 220 V - Output Voltage 0-220 V - Frequency 45-60 Hz
3	 <p>รูปที่ 9 หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Rated Power 5 kVA - Input Voltage Max. 300 V 50 Hz - Output Voltage 100 kV 1 P - Output current 50 mA - Frequency 50 Hz
4	 <p>รูปที่ 10 ตัวต้านทานน้ำ</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 10 M Ω
5	 <p>รูปที่ 11 โวลเตจดีไวเดอร์ พิกัด 100kV</p>	<p>100kV บรรจุแก๊ส SF₆</p> <ul style="list-style-type: none"> - Rated Voltage A.C./D.C./Impulse 100kV. - Rated Ratio A.C. 980:1/D.C. 985:1/Impulse 993:1 - Rated Capacitance (High) 110 pF - Rated Capacitance (Low) 110 nF - Rated Resistance (High) 250 MΩ - Rated Resistance (Low) 250 Ω - Frequency 50 Hz


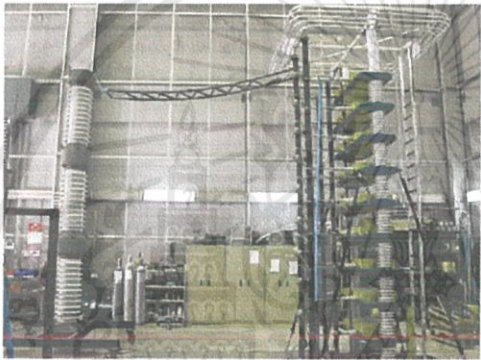
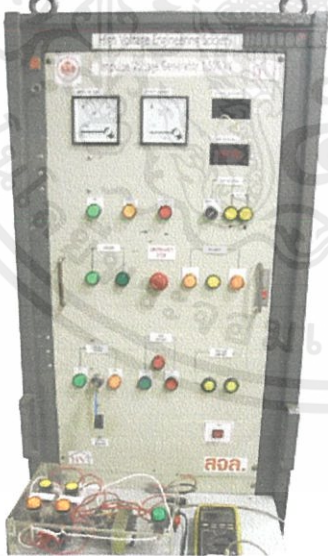
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง จ.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการเกิดการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

ลำดับที่	อุปกรณ์	คุณสมบัติ
1	 <p>รูปที่ 12 ชุดอัดประจุ</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Type 6DC-100 - Rated Voltage 100 kV - Supply Voltage 220 V - Maximum current 0.02 A - Middle Current 0.01 A
2	 <p>รูปที่ 13 ชุดกำเนิดอิมพัลส์</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Test set 200 kV, 7 kJ
3	 <p>รูปที่ 14 โวลเตจดีไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุ</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Impulse Voltage 1.2/50 μS 200 kV - Continuous Voltage 50 Hz 50 kV - Rated Capacitance 4200 pF - Rated series resistance 50 Ω - Connector type LEMO RA 4250
4	 <p>รูปที่ 15 ชุดควบคุมชุดกำเนิดอิมพัลส์</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Rated power 7000 VA - Input Voltage 220 V - Output Voltage 0-220 V - Frequency 45-60 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง จ.4(ต่อ) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

ลำดับที่	อุปกรณ์	คุณสมบัติ
5	 <p>รูปที่ 16 ชุดอัดประจุ</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Type HDV-75K - Input 220 V - Output ± 75 kVDC - Current 25 mA - Capacity 5 kVA
6	 <p>รูปที่ 17 ชุดกำเนิดอิมพัลส์</p>	<ul style="list-style-type: none"> - ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ 31.25 nF - ตัวต้านทานหน้าคลื่น 275 Ω - ตัวต้านทานหลังคลื่น 2185 Ω - ตัวเก็บประจุโหลด 2 nF
7	 <p>รูปที่ 18 ชุดควบคุมชุดกำเนิดอิมพัลส์</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Input Voltage 220 V - Output Voltage 0-220 V - Frequency 45-60 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก๊สที่ไม่ได้เกิดจากความผิดปกติภายในหม้อแปลง

ความหมายของการเกิด Stray gas ตาม CIGRE TF 15/12.01.11 คือ การที่น้ำมันหม้อแปลงได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (100°C ถึง 200°C) และมีแก๊สไฮโดรเจนหรือแก๊สไฮโดรคาร์บอนเกิดขึ้นมา ในบางครั้งการก่อดั้วของแก๊สจะเกิดขึ้นเยอะมากๆ และอัตราการเกิดจะลดลงจนมีค่าน้อยมาก และเมื่อนำน้ำมันไปทำการกำจัดแก๊ส (Degas) แล้วนำกลับมาใช้งานใหม่ก็จะไม่เกิด Stray gas ขึ้นอีก CIGRE TF 15/12.01.11 ได้ทำการทดลองการเกิด Stray gas 2 แบบ คือ

- การให้ความร้อนน้ำมันที่ 120°C พบว่าแก๊สหลักๆ ที่เกิดขึ้นเยอะคือแก๊สไฮโดรเจนตามด้วยแก๊สมีเทน
- การให้ความร้อนน้ำมันที่ 200°C พบว่าแก๊สหลักๆ ที่เกิดขึ้นเยอะคือแก๊สมีเทนและอีเทน

กลไกการเกิดแก๊สของการทดลองที่อุณหภูมิทั้งสองค่านั้นแตกต่างกัน แต่ยังไม่มีการระบุชัดเจนว่ากลไกการเกิดเป็นอย่างไร

ในความเป็นจริงการวิเคราะห์ค่าแก๊สที่ละลายในน้ำมันบอกได้ยากกว่าแก๊สที่เกิดขึ้นมานั้นมาจากการเกิดความผิดปกติจริงๆ หรือเกิดมาจาก Stray gas ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเสตอร์บแก๊สมีเทนหลาย เช่น ชนิดของน้ำมันที่นำมาใช้งาน ถ้าหากมาจากผู้ผลิตที่ต่างกัน คุณสมบัติก็ต่างกัน รวมทั้งการเกิด Stray gas ด้วย ส่วนประกอบในหม้อแปลงบางอย่างอาจเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการเกิด Stray gas อุณหภูมิของน้ำมัน โดยเฉพาะแก๊สไฮโดรเจนที่อุณหภูมิของน้ำมันนั้นมีผลต่อการเกิดมาก เป็นต้น การจะยืนยันให้แน่ชัดว่าแก๊สที่เกิดขึ้นเป็นแก๊สที่เกิดจากความผิดปกติหรือไม่ ไม่สามารถยืนยันอย่างชัดเจนได้ด้วยการทำ DGA ดังนั้นถ้าหากสังเกตเห็นค่าแก๊สเพิ่มขึ้นและกลัวว่าจะเกิดความเสียหายที่รุนแรงขึ้นกับหม้อแปลง ก็ควรจะทำการศึกษาการทำงานของหม้อแปลงเพื่อตรวจสอบปัญหาที่เกิดขึ้นจริงเพื่อให้เกิดความเสียหายน้อยที่สุด

จากการศึกษาการเกิดแก๊สที่ผิดปกติ สามารถสรุปได้ดังนี้

- เกิดแก๊ส H_2 และ Hydrocarbon
- แก๊สเกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่ทำให้เกิด Thermal fault โดยเกิดที่ประมาณ 100-200 องศา
- แยกยากกว่าแก๊สเกิดขึ้นจากฟอลต์จริงๆ หรือเกิดจาก Stray gas
- เมื่อแก๊สเกิดขึ้นจนเยอะมากๆ แล้วจะหยุดเกิด
- ถ้าน้ำมันถูกนำไปดีแก๊สหลังจากที่แก๊สเกิดขึ้นเยอะจนหยุดเกิดแล้ว ก็จะตรวจไม่พบ Stray gas อีก
- การเกิดแก๊สจากทั้ง 2 กรณีใน CIGRE มีกลไกการเกิดที่แตกต่างกัน แต่ยังไม่มีการสรุปอย่างแน่ชัดว่ากระบวนการเป็นอย่างไร
- การก่อดั้วของแก๊สช่วงที่หม้อแปลงเริ่มทำงานใหม่ๆ ขึ้นกับน้ำมันด้วย
- อาจมีสารที่เร่งปฏิกิริยาการเกิด เช่น grain oriented steel หรือส่วนประกอบอื่นๆ ของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- คุณสมบัติของน้ำมันสัมพันธ์กับการเกิดไฮโดรเจน และอาจขึ้นกับการกลั่นน้ำมันของผู้ผลิตซึ่งเป็นการแปรรูปน้ำมันชั้นสูง (Highly refined oil) และใส่สารปรับปรุงความชื้น (Hydro-treatment) รวมทั้งการเร่งปฏิกิริยาจากการที่น้ำมันสัมผัสกับพื้นผิวโลหะของส่วนประกอบหม้อแปลง
- สารเคลือบผิวอาจทำให้เกิดแก๊สอื่นๆนอกจากแก๊สไฮโดรเจน เช่น มีเทน ขึ้น
- การเกิดสารไฮโดรคาร์บอน คือ อีเทน โพรเพน และมีเทนในปริมาณมาก โดยอัตราส่วนของ อีเทน/เอทิลีน และ โพรเพน/โพรพิลีน ต้องมากกว่า 10 อีเทน โพรเพน เอทิลีนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในการทำงานในปีแรก ในขณะที่ไฮโดรเจนและเอทิลีนไม่เพิ่มขึ้นเลยและมีปริมาณน้อย ไม่ว่าหม้อแปลงจะมีอายุมากหรือน้อยแก๊สไฮโดรคาร์บอนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีปริมาณเยอะมากก็จะมีอัตราการเกิดต่ำลงจนเข้าใกล้ 0 กระบวนการเกิดจำเป็นต้องใช้แก๊สออกซิเจนจึงทำให้มีปริมาณออกซิเจนในน้ำมันต่ำกว่าปกติ (การเกิดลักษณะนี้พบได้ใน non inhibited oil)



ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-สกุล นาย กันตัท สะสมผลสวัสดิ์

เกิดวันที่ 21 ตุลาคม พ.ศ. 2537

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจาก โรงเรียนแกลง"วิทยสถาวร"

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนแกลง"วิทยสถาวร"

เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2556

ฝึกงานที่ บริษัท โกลบอล เพาเวอร์ ซินเนอร์ยี จำกัด (มหาชน)

ระหว่าง เดือนมิถุนายน ถึง เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2559



ชื่อ-สกุล นาย ณัฐสัณญ์ วัชรกุลยรัตน์

เกิดวันที่ 15 มกราคม พ.ศ. 2538

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจาก โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัย

รามคำแหง

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัย

รามคำแหง

เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2556

ฝึกงานที่ บริษัท โกลบอล เพาเวอร์ ซินเนอร์ยี จำกัด (มหาชน)

ระหว่าง เดือนมิถุนายน ถึง เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2559



ชื่อ-สกุล นาย วรวิช อังศุศาสตร์

เกิดวันที่ 15 ตุลาคม พ.ศ. 2537

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจาก โรงเรียนมงฟอร์ตวิทยาลัย

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนมงฟอร์ตวิทยาลัย

เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2556

ฝึกงานที่ บริษัท เบสท์ ไดเร็คชั่น ซิสเต็ม จำกัด

ระหว่าง เดือนมิถุนายน ถึง เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2559



ชื่อ-สกุล นาย ศศิศ โมวพรหมานุช

เกิดวันที่ 27 มกราคม พ.ศ. 2538

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจาก โรงเรียนวิสุทธรังษี จังหวัด

กาญจนบุรี

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนวิสุทธรังษี จังหวัด

กาญจนบุรี

เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2556

ฝึกงานที่ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เขื่อนศรีนครินทร์

ระหว่าง เดือนมิถุนายน ถึง เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2559