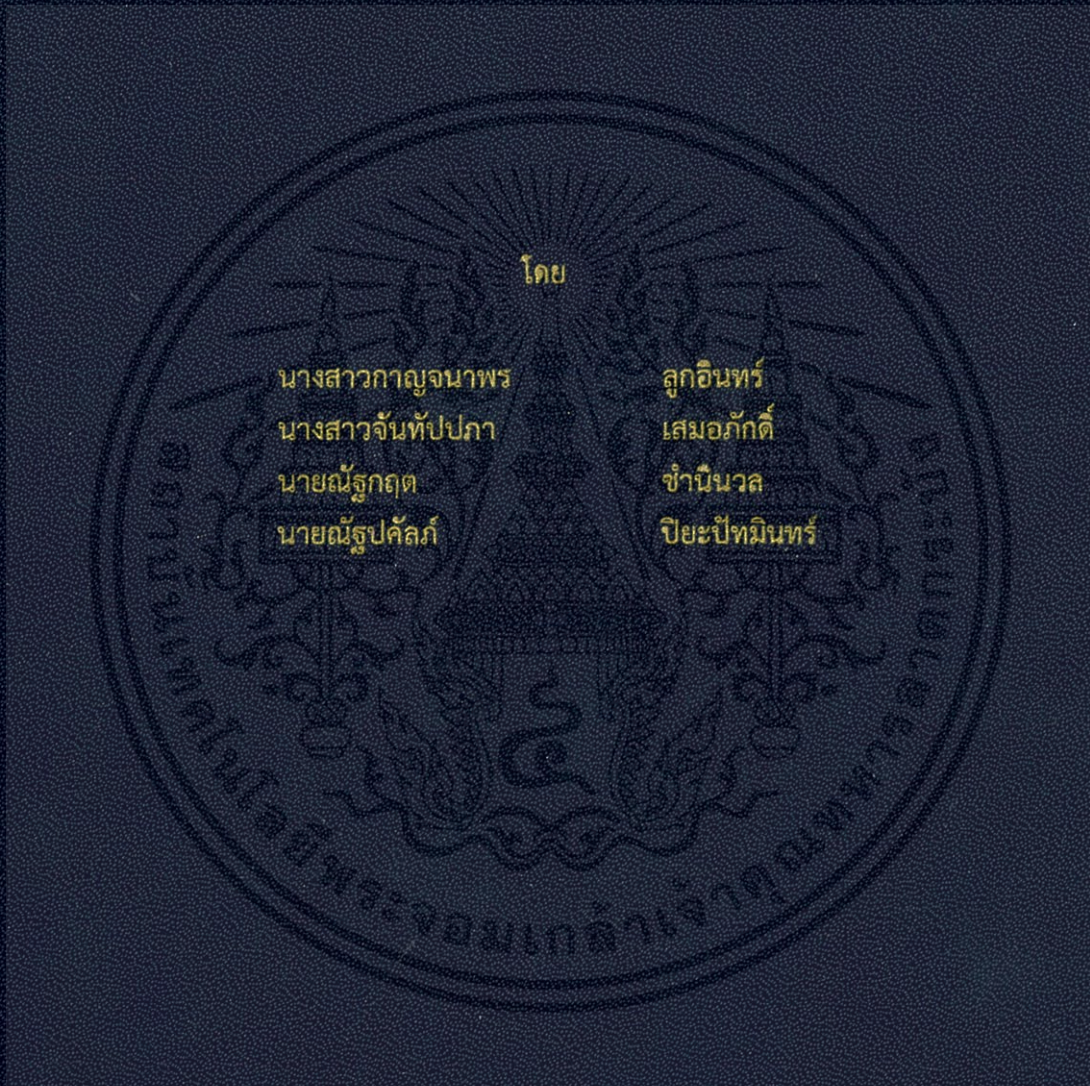


การวินิจฉัยฉนวนหม้อแปลงชนิดน้ำมันด้วยวิธีการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน  
DIAGNOSIS OF OIL IMMERSED TRANSFORMER INSULATION  
BY USING DISSOLVED GAS ANALYSIS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2561

การวินิจฉัยฉนวนหม้อแปลงชนิดน้ำมันด้วยวิธีการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน  
DIAGNOSIS OF OIL IMMERSED TRANSFORMER INSULATION  
BY USING DISSOLVED GAS ANALYSIS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DIAGNOSIS OF OIL IMMERSED TRANSFORMER INSULATION  
BY USING DISSOLVED GAS ANALYSIS



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

2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2561

การวินิจฉัยฉนวนหม้อแปลงชนิดน้ำมันด้วยวิธีการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน

DIAGNOSIS OF OIL IMMERSSED TRANSFORMER INSULATION

BY USING DISSOLVED GAS ANALYSIS



อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร. นรเศรษฐ พัฒนเดช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2561

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การวินิจฉัยฉนวนหม้อแปลงชนิดน้ำมันด้วยวิธีการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน

ผู้จัดทำ

1. นางสาวกาญจนาพร ลูกอินทร์
2. นางสาวจันทิปปภา เสมอภักดี
3. นายณัฐกฤต ชำนิवल
4. นายณัฐปคัลภ์ ปิยะปัทมินทร์



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร. นรเศรษฐ์ พัฒนเดช)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การวินิจฉัยฉนวนหม้อแปลงชนิดน้ำมันด้วยวิธีการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน

นางสาวกาญจนาพร	ลูกอินทร์
นางสาวจันทภา	เสมอภักดิ์
นายณัฐกฤต	ชานินวล
นายณัฐปคัลภ์	ปิยะปัทมินทร์
รศ.ดร.นรเศรษฐ์	พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2561	

## บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาโครงสร้างส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้า และการวิเคราะห์วิเคราะห์แก๊สที่ละลายในฉนวนเหลว (Dissolved Gas Analysis : DGA) ได้แก่ น้ำมันแร่ เอสเตอร์ธรรมชาติ (น้ำมัน FR3) และน้ำมันพาล์ม แก๊สดังกล่าวเกิดขึ้นจากการจำลองการ ผิดปกติที่เกิดขึ้นได้ในหม้อแปลง โดยทำการจำลองการเกิดเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ของฉนวนเหลวตามมาตรฐาน IEC 60156 การเกิดการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของ เพอร์สบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในฉนวนเหลว การเกิดการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว และชั่วลบของฉนวนเหลวตาม มาตรฐาน IEC 60897 การเกิดการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ชั่วบวกและชั่วลบของเพอร์สบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในฉนวนเหลว และการทดสอบการดิสชาร์จ บางส่วนของฉนวนเหลว แก๊สที่เกิดขึ้นซึ่งละลายอยู่ในน้ำมันจะถูกดึงออกมา เพื่อนำไปศึกษา พฤติกรรมการเกิดขึ้นของแก๊ส พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความเข้มข้นแก๊สที่เกิดขึ้นมาจากชนิดของการ เบรกดาวน์ จำนวนครั้งการเบรกดาวน์ และระยะระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ จากนั้นทำการแปลผลด้วยวิธีตาม มาตรฐาน IEC60599 และมาตรฐาน IEEE C57.104 พบว่า ความถูกต้องของวิธีการแปลผลแต่ละวิธี ไม่ครอบคลุมกรณีศึกษาทั้งหมด ดังนั้นจะต้องเลือกใช้วิธีการแปลผลให้เหมาะสมกับปัญหาแต่ละชนิด

# DIAGNOSIS OF OIL IMMERSED TRANSFORMER INSULATION BY USING DISSOLVED GAS ANALYSIS

Kanchanaporn

Luk-in

Chantapapa

Samerpak

Nattakrit

Chumninuan

Nadpakul

Piyapatamin

Assoc. Prof. Dr. techn. Norasage Pattanadech Advisor

## Abstract

The objectives of this project are to study the principal parts of a transformer and the dissolved gas analysis (DGA) of insulation liquids i.e., mineral oil, FR3 fluid, and palm oil. The insulation liquid dissolved gases were generated according to the fault types occurring in the transformers. The aforementioned simulations were comprised of 1) AC breakdown of insulation liquids according to IEC 60156, 2) AC breakdown of liquid impregnated pressboards, 3) standard lightning impulse breakdown (both positive and negative polarities) of insulation liquids in accordance with IEC 60897, 4) standard lightning impulse breakdown (both positive and negative polarities) of liquid impregnated pressboards, and 5) partial discharges of liquid insulation. The dissolved gasses were extracted and examined the behavior of gas generation. It was found that the concentration of such dissolved gasses depended on the breakdown voltage types, number of breakdowns, and the gap distance between electrodes. The dissolved gas interpretation was performed which was complied with IEC 60599 and IEEE C57.104. Each interpretation method was suitable for different types of fault problems. Therefore, the interpretation method needs to be used relevant to the problems.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นเรศรชฎ พัฒนาเดช อาจารย์ที่ปรึกษา รวมไปถึง คุณปณยวีร์ ฉายศิริ ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี ขอขอบคุณคุณกิตติพิศ จรียนนุรัตน์ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ที่ได้ให้ความเอาใจใส่ และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณ บริษัท เมเดนเซ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เรื่องทุนทรัพย์

ขอขอบคุณ คุณมิเชล ดูวอล ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือเพื่อใช้ในการแปลผลแก๊สที่ได้จากการทดสอบ

ขอขอบคุณ บริษัท ดาต้า เอ็นทรี กรุป จำกัด บริษัท ทีม ทู เซอร์วิส จำกัด และบริษัท เทสลา เพาเวอร์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านความรู้ ข้อมูล เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบ จนกระทั่งสอบเสร็จสมบูรณ์

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงิน ยานพาหนะ และให้กำลังใจ อีกทั้งเพื่อน ๆ พี่ ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านให้คำแนะนำ การใช้อุปกรณ์ และการทดสอบ ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ ด้วย

คณะผู้จัดทำ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	X
สารบัญตาราง	XVI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอน และวิธีการดำเนิน	2
1.5 แผนการดำเนินงาน	3
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีบทที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ส่วนประกอบภายนอกของหม้อแปลง	5
2.1.1 ถังเก็บน้ำมันสำรอง	6
2.1.2 ชุดกรองความชื้น	6
2.1.3 อุปกรณ์ระบายความดัน	7
2.1.4 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ น้ำมัน และขดลวด	7
2.1.5 บุชโฮล์ทรีเลย์	7
2.1.6 ถังหม้อแปลง	8
2.1.7 ครีระบายความร้อน	8
2.1.8 พัดลมระบายความร้อน	9
2.1.9 บุชชิง	9
2.1.10 ก๊ับดักล่อฟ้า	11
2.2 ส่วนประกอบภายในของหม้อแปลง	11
2.2.1 แกนเหล็ก	11
2.2.2 แคลมป์ยึดแกนเหล็ก	12
2.2.3 ขดลวด	13

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 น้ำมันหม้อแปลง	14
2.3.1 น้ำมันแร่ (Mineral Oil)	14
2.3.2 น้ำมันเอสเทอร์ธรรมชาติ (Natural Ester Oil)	15
2.4 ฉนวนแข็งในหม้อแปลง	20
2.5 การเกิดแก๊สในฉนวนน้ำมัน	23
2.5.1 การสลายตัวของเซลลูโลส	23
2.5.2 การสลายตัวของน้ำมัน	23
2.5.3 Stray Gassing	24
2.5.4 แก๊สที่เกิดขึ้นในฉนวนน้ำมันและฉนวนกระดาษ	24
2.6 การแปลผลแก๊ส	25
2.6.1 การแปลผลแก๊สตามมาตรฐาน IEEE	25
2.6.2 การแปลผลแก๊สตามมาตรฐาน IEC	25
2.7 การตรวจสอบและวิเคราะห์แก๊สที่ติดไฟได้ละลายอยู่ในน้ำมัน	26
2.7.1 อัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมัน	26
2.7.2 ปริมาตรของแก๊สที่ติดไฟได้ที่ละลายอยู่ในน้ำมัน	27
2.7.3 การประเมินสภาพหม้อแปลงโดยใช้ความเข้มข้นของแก๊สแต่ละชนิดและ TDCG	27
2.7.4 การกำหนดขั้นตอนการปฏิบัติงานและความถี่ในการเก็บตัวอย่างน้ำมันจากระดับ TDCG และอัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊ส	28
2.7.5 การประเมินความผิดปกติโดยใช้วิธีคีย์แก๊ส	30
2.7.6 การประเมินความผิดปกติโดยวิธีวิเคราะห์อัตราส่วนแก๊สที่ติดไฟได้	31
2.7.7 การประเมินความผิดปกติโดยวิธี IEC Ratio	35
2.7.8 การประเมินความผิดปกติโดยวิธี Duval Triangle	37
2.7.9 การประเมินความผิดปกติโดยวิธี Duval Pentagon	44
2.8 รูปแบบมาตรฐานสำหรับแรงดันกระแสสลับเพื่อการทดสอบ	49
2.9 ทฤษฎีการสร้าง และการวัดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า	50
2.9.1 รูปลิ้นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน	50
2.9.2 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า	52
2.9.3 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าหลายชั้น	53
2.10 การเก็บตัวอย่างน้ำมัน	54
2.10.1 ภาชนะเก็บตัวอย่าง	54
2.10.2 การทำความสะอาดตำแหน่งเก็บตัวอย่าง	55

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.10.3 การเก็บตัวอย่างน้ำมันด้วยไซรินจ์	55
2.10.4 การเก็บตัวอย่างน้ำมันด้วยขวดแก้วหรือขวดโลหะ	56
2.11 การแยกแก๊สด้วยวิธี Headspace	58
2.11.1 คำนิยาม	58
2.11.2 หลักการของวิธี Headspace	58
2.12 การแยกแก๊สโดยวิธีการแก๊สโครมาโทกราฟี	59
2.12.1 แก๊สโครมาโทกราฟี	60
2.12.2 คอลัมน์ (Column)	60
<b>บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง</b>	<b>61</b>
3.1 เตรียมการทดลอง	61
3.1.1 อุปกรณ์	61
3.1.2 ฉนวนเหลว	65
3.1.3 ขั้นตอนการเตรียมฉนวนเหลว	65
3.1.4 กระจกตาช	65
3.1.5 ขั้นตอนการเตรียมฉนวนกระจกตาช	66
3.2 การทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของน้ำมัน	66
3.2.1 วงจรทดสอบ	66
3.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ	66
3.3 การทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าของน้ำมัน	67
3.3.1 วงจรทดสอบ	67
3.3.2 ขั้นตอนการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่วบว	67
3.3.3 ขั้นตอนการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่วล	68
3.4 การทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่วลบของน้ำมัน	69
3.4.1 วงจรทดสอบ	69
3.4.2 ขั้นตอนการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่วล	69
3.5 การทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพอร์สอร์บ์ที่ถูก อิมเพรเกนตในน้ำมันที่บรรจุอยู่ในชุดทดสอบที่ใส่ฉนวนน้ำมัน กรณีเบรกดาวนซ้ำจุดเดิม	70
3.5.1 วงจรทดสอบ	70
3.5.2 ขั้นตอนการทดสอบ	70

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6 การทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ดที่ถูก อิมเพรกเนตในน้ำมันที่บรรจุอยู่ในชุดทดสอบที่ใส่ฉนวนน้ำมัน กรณีเบรกดาวนไม่ซ้ำจุดเดิม	71
3.6.1 วงจรทดสอบ	71
3.6.2 ขั้นตอนการทดสอบ	71
3.7 การทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดที่ถูก อิมเพรกเนต ในน้ำมันที่บรรจุอยู่ในชุดทดสอบที่ใส่ฉนวนน้ำมัน กรณีเบรกดาวน ซ้ำจุดเดิม	72
3.7.1 วงจรทดสอบ	72
3.7.2 ขั้นตอนการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว กรณีเบรกดาวนซ้ำจุดเดิม	73
3.7.3 ขั้นตอนการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบ กรณีเบรกดาวนซ้ำจุดเดิม	73
3.8 การทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดที่ถูก อิมเพรกเนตในน้ำมันที่บรรจุอยู่ในชุดทดสอบที่ใส่ฉนวนน้ำมัน กรณีเบรกดาวนไม่ซ้ำจุดเดิม	74
3.8.1 วงจรทดสอบ	74
3.8.2 ขั้นตอนการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว กรณีเบรกดาวนไม่ซ้ำจุดเดิม	74
3.8.3 ขั้นตอนการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบ กรณีเบรกดาวนไม่ซ้ำจุดเดิม	75
3.9 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมัน	76
3.9.1 การประเมินความผิดปกติตามมาตรฐาน IEEE C57.104	76
3.9.2 การประเมินความผิดปกติตามมาตรฐาน IEC 60599	76
3.9.3 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธีที่ไม่ใช่มาตรฐาน IEEE C57.104 และไม่ใช้มาตรฐาน IEC 60599	76
<b>บทที่ 4 ผลการทดสอบและการแปลผล</b>	<b>77</b>
4.1 ผลการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน (DGA)	77
4.1.1 การทดสอบน้ำมันแร่	78
4.1.2 การทดสอบน้ำมัน FR3	84
4.1.3 การทดสอบน้ำมันปาล์ม	91

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.4 การทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันแร่	99
4.1.5 การทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน FR3	106
4.1.6 การทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์ม	113
4.2 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมัน	120
4.2.1 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบน้ำมันแร่	121
4.2.2 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบน้ำมัน FR3	124
4.2.3 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบน้ำมันปาล์ม	127
4.2.4 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันแร่	130
4.2.5 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน FR3	133
4.2.6 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์ม	136
4.3 การวิเคราะห์การประเมินความผิดปกติ	139
4.3.1 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบน้ำมันแร่	139
4.3.2 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบน้ำมัน FR3	140
4.3.3 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบน้ำมันปาล์ม	141
4.3.4 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันแร่	145
4.3.5 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน FR3	146
4.3.6 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์ม	148
4.3.7 เพอร์เซ็นต์ความถูกต้องจากการประเมินความผิดปกติ	152

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ</b>	<b>153</b>
5.1 สรุปผลการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน	153
5.1.1 การทดสอบน้ำมันแร่	153
5.1.2 การทดสอบน้ำมัน FR3	153
5.1.3 การทดสอบน้ำมันปาล์ม	154
5.1.4 การทดสอบเพอร์สโอร์ตที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันแร่	154
5.1.5 การทดสอบเพอร์สโอร์ตที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน FR3	155
5.1.6 การทดสอบเพอร์สโอร์ตที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์ม	155
5.2 สรุปการประเมินความผิดปกติ	156
5.2.1 วิธี Key Gas	156
5.2.2 วิธี Doernenberg	156
5.2.3 วิธี Rogers	156
5.2.4 วิธี IEC Ratio	157
5.2.5 วิธี Duval Triangle 1	157
5.2.6 วิธี Duval Triangle 3	157
5.2.7 วิธี Duval Pentagon 1	158
5.2.8 วิธี Duval Pentagon 2	158
5.2.9 วิธี Duval Pentagon 3	158
5.3 ข้อเสนอแนะ	159
<b>บรรณานุกรม</b>	<b>160</b>
<b>ภาคผนวก</b>	<b>163</b>
ภาคผนวก ก Poster	164
ภาคผนวก ข บทความวิชาการ	166
ภาคผนวก ค รูปภาพ	175
<b>ประวัติผู้เขียน</b>	<b>184</b>

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ส่วนประกอบภายนอกของหม้อแปลง	5
2.2	ถังเก็บน้ำมันสำรอง	6
2.3	ชุดกรองความชื้น	6
2.4	อุปกรณ์ระบายความดัน	7
2.5	อุปกรณ์วัดอุณหภูมิน้ำมัน และขดลวด	7
2.6	หลักการทำงานของบุชโฮล์ทรีเลย์	8
2.7	บุชโฮล์ทรีเลย์	8
2.8	ครีระบายความร้อน	8
2.9	พัดลมระบายความร้อน	9
2.10	บุชชิงชนิดกระเบื้องตัน	9
2.11	บุชชิงชนิดขั้วสายเคเบิล	10
2.12	บุชชิงชนิดคอนเดนเซอร์	10
2.13	กั๊บดักล่อฟ้า	11
2.14	แกนเหล็กตัดที่มุม 45 องศา	11
2.15	การประกอบแกนเหล็ก	12
2.16	แคลมป์ยึดแกนเหล็ก	12
2.17	ลักษณะการพันขดลวด	13
2.18	พาราฟินแบบลูกโซ่	15
2.19	พาราฟินแบบกิ่ง	15
2.20	แนพทิน	15
2.21	อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน	15
2.22	โครงสร้างโมเลกุลของ Palmitic Acid	16
2.23	โครงสร้างโมเลกุลของ Stearic Acid	17
2.24	โครงสร้างโมเลกุลของ Oleic Acid	17
2.25	โครงสร้างโมเลกุลของ Linoleic Acid	17
2.26	โครงสร้างโมเลกุลของ $\alpha$ -Linolenic Acid	18
2.27	โครงสร้างโมเลกุลของ Gamma-Linolenic Acid	18
2.28	โครงสร้างโมเลกุลของฉนวนกระดาษ	21
2.29	กระดาษอัดแรง (Pressboard)	21
2.30	กระดาษเครป (Crepe Paper)	22
2.31	กระดาษเครปพันตัวนำ	22

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.32	การเกิดแก๊สเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ	24
2.33	คีย์แก๊สที่สัมพันธ์กับความผิดปกติ	30
2.34	โพลชาร์จของวิธีการอัตราส่วน Doernenburg	32
2.35	โพลชาร์จของวิธีการอัตราส่วน Rogers	34
2.36	กราฟอัตราส่วนแก๊สตามมาตรฐาน IEC	36
2.37	Duval Triangle 1	38
2.38	Duval Triangle 2	39
2.39	Duval Triangle 3	40
2.40	Duval Triangle 4	41
2.41	Duval Triangle 5	41
2.42	Duval Triangle 6	42
2.43	Duval Triangle 7	43
2.44	ตัวอย่างของจุดที่แสดงบน Duval Triangle 1	44
2.45	Duval Pentagon 1	45
2.46	Duval Pentagon 2	46
2.47	Duval Pentagon 3 สำหรับน้ำมันดอกทานตะวัน	46
2.48	Duval Pentagon 3 สำหรับน้ำมันเรพซีด (Rapeseed)	47
2.49	Duval Pentagon 3 สำหรับน้ำมันมิเดล (Midel)	47
2.50	Duval Pentagon 3 สำหรับน้ำมัน FR3	47
2.51	รูปคลื่นมาตรฐานสำหรับแรงดันกระแสสลับ	49
2.52	แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม	51
2.53	แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตัดหน้าคลื่น	51
2.54	แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตัดหน้าคลื่น	52
2.55	วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดอิมพัลส์ วงจร A	52
2.56	วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดอิมพัลส์ วงจร B	52
2.57	วงจรเครื่องกำเนิดอิมพัลส์แบบหลายขั้นตามวงจรมาร์กซ์	53
2.58	การเก็บตัวอย่างน้ำมันด้วยไซรินจ์	55
2.59	การเก็บตัวอย่างน้ำมันด้วยขวด	56
2.60	การเก็บตัวอย่างน้ำมันด้วยขวด	57
2.61	การแยกแก๊สด้วยวิธี Headspace	58
2.62	ไดอะแกรมของเครื่องมือในการแยกแก๊ส	60

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.1	ชุดทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของน้ำมัน	61
3.2	ชุดทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้าอิมพัลส์ฟ้าผ่าของน้ำมัน	62
3.3	ชุดทดสอบการเบรกดาวนของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน	62
3.4	อิเล็กทรอนิกส์แบบเข็ม	63
3.5	เครื่องทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของน้ำมัน	63
3.6	ปีกเกอร์ขนาด 2,000 มิลลิลิตร	64
3.7	ตู้อบสูญญากาศ	64
3.8	น้ำมันแร่ น้ำมัน FR3 และน้ำมันปาล์ม	65
3.9	เพรสบอร์ด	65
3.10	เครื่องทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของน้ำมัน	66
3.11	วงจรถดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของน้ำมัน	67
3.12	วงจรถดสอบการดิสชาร์จบางส่วนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบของน้ำมัน	69
3.13	วงจรถดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน กรณีเบรกดาวนซ้ำจุดเดิม	70
3.14	วงจรถดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน กรณีเบรกดาวนไม่ซ้ำจุดเดิม	71
3.15	วงจรถดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน กรณีเบรกดาวนซ้ำจุดเดิม	72
3.16	วงจรถดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน กรณีเบรกดาวนไม่ซ้ำจุดเดิม	74
4.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวนในการทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของน้ำมันแร่	81
4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวนในการทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบของน้ำมันแร่	81
4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวนในการทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบของน้ำมันแร่	82
4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวนในการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนด้วย แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบของน้ำมันแร่	82
4.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวนในการทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ของน้ำมัน FR3	87
4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวนในการทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบของน้ำมัน FR3	88

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวนในการทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบของน้ำมัน FR3	89
4.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวนในการทดสอบการติสซาร์จบางส่วนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบของน้ำมัน FR3	90
4.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวนในการทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของน้ำมันปาล์ม	94
4.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวนในการทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วบวกของน้ำมันปาล์ม	95
4.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวนในการทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบของน้ำมันปาล์ม	96
4.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวนในการทดสอบการติสซาร์จบางส่วนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบของน้ำมันปาล์ม	97
4.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวนในการทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันแร่ กรณีเบรกดาวนซ้ำจุดเดิม	102
4.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวนในการทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันแร่ กรณีเบรกดาวนไม่ซ้ำจุดเดิม	102
4.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวนในการทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วบวกของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันแร่ กรณีเบรกดาวนซ้ำจุดเดิม	103
4.16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวนในการทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วบวกของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันแร่ กรณีเบรกดาวนไม่ซ้ำจุดเดิม	104
4.17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวนในการทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันแร่ กรณีเบรกดาวนซ้ำจุดเดิม	104
4.18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวนในการทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันแร่ กรณีเบรกดาวนไม่ซ้ำจุดเดิม	105

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวน์ในการทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน FR3 กรณีเบรกดาวน์ซ้ำจุดเดิม	109
4.20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวน์ในการทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน FR3 กรณีเบรกดาวน์ไม่ซ้ำจุดเดิม	109
4.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวน์ในการทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน FR3 กรณีเบรกดาวน์ซ้ำจุดเดิม	110
4.22	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวน์ในการทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน FR3 กรณีเบรกดาวน์ไม่ซ้ำจุดเดิม	111
4.23	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวน์ในการทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของอิมเพรกเนตเพรสบอร์ดในน้ำมัน FR3 กรณีเบรกดาวน์ซ้ำจุดเดิม	111
4.24	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวน์ในการทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน FR3 กรณีเบรกดาวน์ไม่ซ้ำจุดเดิม	112
4.25	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวน์ในการทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์ม กรณีเบรกดาวน์ซ้ำจุดเดิม	116
4.26	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวน์ในการทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์ม กรณีเบรกดาวน์ไม่ซ้ำจุดเดิม	116
4.27	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวน์ในการทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์ม กรณีเบรกดาวน์ซ้ำจุดเดิม	117
4.28	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวน์ในการทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์ม กรณีเบรกดาวน์ไม่ซ้ำจุดเดิม	118

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.29	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวนในการทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่วลบของตเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนในน้ำมันปาล์ม กรณีเบรกดาวนซ้ำจุดเดิม	118
4.30	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวนในการทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่วลบของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์ม กรณีเบรกดาวนไม่ซ้ำจุดเดิม	119



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
1.1	วิธีการดำเนินงาน	3
2.1	ชนิดของฉนวนเหลวที่ใช้ในหม้อแปลงและหม้อแปลงเครื่องมีดัด	14
2.2	คุณสมบัติของน้ำมันพีช ปริมาณองค์ประกอบของกรดไขมัน และจำนวนพันธะคู่	16
2.3	คุณสมบัติของน้ำมันถั่วเหลืองเทียบกับน้ำมันแร่	18
2.4	คุณสมบัติของน้ำมันปาล์มเทียบกับน้ำมันแร่	19
2.5	ประเภทของฉนวนไฟฟ้าที่แบ่งตามอุณหภูมิใช้งานสูงสุด	20
2.6	คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนผสม (กระดาษและน้ำมัน)	22
2.7	ค่าเปอร์มิตติวิตีของกระดาษที่ถูก Impregnated ที่ 20 °C ( $\epsilon_{res}$ )	22
2.8	การประเมินสภาพหม้อแปลงโดยใช้ความเข้มข้นของแก๊สแต่ละชนิด และ TDCG	28
2.9	ขั้นตอนการปฏิบัติงานและความถี่ในการเก็บตัวอย่างน้ำมันจากระดับค่า TDCG และอัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊ส	29
2.10	ปริมาณแก๊สอ้างอิง (L1)	32
2.11	การประเมินความผิดปกติโดยใช้วิธีการอัตราส่วน Doernenburg	33
2.12	การประเมินความผิดปกติโดยใช้วิธีอัตราส่วน Rogers	33
2.13	การประเมินความผิดปกติโดยวิธี IEC Ratio	35
2.14	การประเมินความผิดปกติโดยวิธี IEC Ratio อย่างง่าย	36
2.15	ระบุโซนความผิดปกติของ Duval Triangle 1	37
2.16	ตารางระบุโซนความผิดปกติของ Duval Triangle 2	38
2.17	ตารางระบุโซนความผิดปกติของ Duval Triangle 4 และ Duval Triangle 5	41
2.18	ตารางระบุโซนความผิดปกติของ Duval Triangle 6	42
2.19	ตารางระบุโซนความผิดปกติของ Duval Triangle 7	43
2.20	แสดงถึงความผิดปกติชนิดต่างๆที่ระบุใน Duval Pentagon	45
2.21	แสดงถึงความผิดปกติชนิดต่างๆที่ระบุใน Duval Pentagon	46
2.22	ภาวะที่เก็บตัวอย่างสำหรับการทดสอบน้ำมัน	54
2.23	สัมประสิทธิ์การแบ่งตัวของน้ำมันแร่ที่อุณหภูมิ 70°C	59
4.1	ผลการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมันน้ำมันแร่	79
4.2	ผลการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน FR3	84
4.3	ผลการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมันปาล์ม	91
4.4	ผลการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมันแร่ จากการทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูก อิมเพรกเนตในน้ำมันแร่	99
4.5	ผลการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน FR3 จากการทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูก อิมเพรกเนตในน้ำมัน FR3	106
4.6	ผลการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมันปาล์ม จากการทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูก อิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์ม	113
4.7	การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบน้ำมันแร่	121

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8	การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบน้ำมัน FR3	124
4.9	การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบน้ำมันปาล์ม	127
4.10	การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบเพอร์สโอร์ตที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันแร่	130
4.11	การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบเพอร์สโอร์ตที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน FR3	133
4.12	การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบเพอร์สโอร์ตที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์ม	136
4.13	เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องจากการประเมินความผิดปกติด้วยวิธีต่าง ๆ	152



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากมีหน้าที่ไม่ให้เกิดการลัดวงจรถึงกันระหว่างตัวนำ หรือส่วนที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยหม้อแปลงไฟฟ้ามีการใช้ฉนวนทั้งสามชนิด คือ ฉนวนแข็ง ฉนวนเหลว และฉนวนแก๊ส โดยปริญญาณิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาเฉพาะฉนวนเหลว และฉนวนแข็ง คือ น้ำมัน และกระดาษ เนื่องจากฉนวนภายในหม้อแปลงสามารถนำมาวินิจฉัยถึงปัญหาที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อป้องกันความเสียหาย และประเมินสภาพของหม้อแปลง โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แก๊สในน้ำมัน (Dissolved Gas Analysis; DGA) ซึ่งเป็นวิธีที่มีการใช้อย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์ฉนวนน้ำมัน

เนื่องจากปัจจุบันมีการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมมากขึ้นทำให้มีการใช้น้ำมันเอสเทอร์ธรรมชาติมากขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1999 และมีแนวโน้มในการใช้ที่เพิ่มขึ้น ผู้จัดทำจึงได้เห็นความสำคัญของน้ำมันเอสเทอร์ธรรมชาติ อีกทั้งน้ำมัน FR3 มีการใช้อย่างกว้างขวางในอุปกรณ์ไฟฟ้า และประเทศไทยมีผลผลิตน้ำมันปาล์มเป็นอันดับสามของโลกผู้จัดทำจึงได้ศึกษาทั้งน้ำมันแร่ น้ำมัน FR3 และน้ำมันปาล์ม

### 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาโครงสร้างพื้นฐานของหม้อแปลง
2. เพื่อศึกษาโครงสร้างฉนวนเหลวสามชนิด คือ น้ำมันแร่ น้ำมัน FR3 และน้ำมันปาล์ม
3. เพื่อศึกษาปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันทั้งสามชนิดที่เกิดจากการทดสอบน้ำมันด้วยการเบรกดาวนจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และจากการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบ
4. เพื่อศึกษาปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันทั้งสามชนิดที่เกิดจากการทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันด้วยการเบรกดาวนจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า
5. เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มของปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นในความผิดปกติชนิดต่าง ๆ
6. เพื่อศึกษาวิธีการแปลผลค่าแก๊สที่ละลายในน้ำมัน
7. เพื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการแปลผลแต่ละวิธี

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษาโครงสร้างพื้นฐานหม้อแปลงไฟฟ้า
2. ศึกษาโครงสร้างฉนวนเหลวสามชนิด คือ น้ำมันแร่ น้ำมัน FR3 และน้ำมันปาล์ม
3. การทดสอบฉนวนน้ำมัน จะทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันกระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า โดยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจะทดสอบสองชนิด คือ แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว และแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบ และการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบ
4. การทดสอบฉนวนกระดาษที่ถูกรวมเพรกดเนต จะทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันกระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า โดยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจะทดสอบสองชนิด คือ แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว และแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบ
5. การทดสอบฉนวนกระดาษที่ถูกรวมเพรกดเนต จะทดสอบด้วยแรงดันกระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า โดยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจะทดสอบสองชนิด คือ แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว และแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบ
6. แก๊สที่ทำการสังเกตการณ์ คือ แก๊สเอทิลีน แก๊สอะเซทิลีน แก๊สฮีเทน แก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน
7. ใช้วิธี Doernenburg Ratio, วิธี Rogers Ratio, วิธี Keys Gas, วิธี IEC Method, วิธี Duval Triangle และวิธี Duval Pentagon ในการพิจารณาเพื่อวิเคราะห์ชนิดของความผิดปกติ

### 1.4 ขั้นตอน และวิธีการดำเนิน

1. ศึกษาโครงสร้างพื้นฐานของหม้อแปลง
2. ศึกษาการทดสอบการเกิดเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และการดิสชาร์จบางส่วนของน้ำมัน รวมทั้งการทดสอบการเกิดเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสเซอร์ที่ถูกรวมเพรกดเนตในน้ำมัน จากมาตรฐาน IEC 60156, IEC 60897, IEC 60243-1 และ IEC 60243-3
4. ศึกษาการเก็บตัวอย่างน้ำมันจากมาตรฐาน IEC 60475 และ ASTM D3612
5. ศึกษาหลักการเบื้องต้นของการเกิดแก๊ส และการแปลผลค่าแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมัน ตามมาตรฐาน IEC 60599 และ IEEE C57.104
6. ออกแบบการทดสอบ และทำการทดสอบ เพื่อเก็บตัวอย่างน้ำมันแล้วนำไปวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน
7. ทำการวิเคราะห์และแปลผลแก๊ส
8. จัดทำปฏิญานินพนธ์

## 1.5 แผนการดำเนินงาน

### ตารางที่ 1.1 วิธีการดำเนินงาน

วิธีการดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2561									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาโครงสร้าง และ ส่วนประกอบของหม้อแปลง	←-----→									
2. สร้างแบบจำลอง โครงสร้างภายนอกและ ภายในของหม้อแปลง โดยใช้โปรแกรม SolidWorks และ SketchUp		←-----→								
3. ศึกษามาตรฐานการ ทดสอบฉนวนกระดาษ และ ฉนวนน้ำมันของหม้อแปลง ด้วยแรงดันกระแสสลับและ แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า		←-----→								
4. ศึกษาวิธีการและการ แปลผลค่าแก๊สที่ละลายใน น้ำมัน			←-----→							
5. ออกแบบการทดสอบ ฉนวนเหลวทั้ง 3 ชนิด คือ น้ำมันแร่ น้ำมัน FR3 และ น้ำมันปาล์ม และอิมเพรก เนตเพรสบอร์ด				←-----→						
6. ทำการทดสอบน้ำมันด้วย การเบรกดาว์นจากแรงดัน ไฟฟ้ากระแสสลับและ แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และทำการทดสอบการ ดิสชาร์จบางส่วนด้วย แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบ					←-----→					

### ตารางที่ 1.1 วิธีการดำเนินงาน (ต่อ)

7. ทำการสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของอิมเพรกเนตเพรสเซอร์ด							←-----→	←-----→		
8. ทำการแยกแก๊สที่ละลายในน้ำมัน						←-----→	←-----→	←-----→		
9. ทำการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน						←-----→	←-----→	←-----→	←-----→	
10. ทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบและสรุปผล							←-----→	←-----→	←-----→	
11. จัดทำปริญญานิพนธ์							←-----→	←-----→	←-----→	←-----→

โดยที่

- ←-----→ : ระยะเวลาที่วางแผนงานไว้  
 ←-----→ : ระยะเวลาที่ดำเนินงานจริง

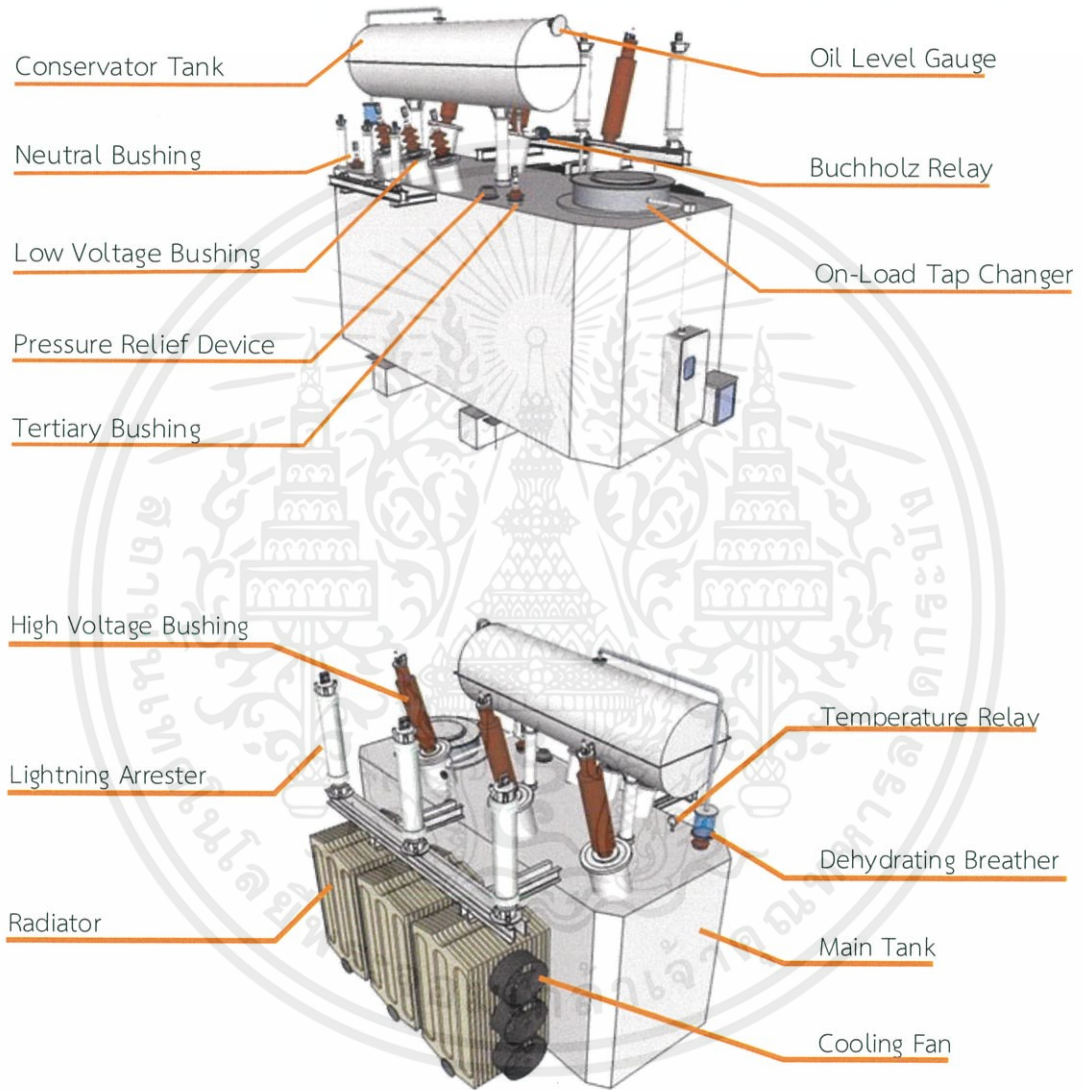
### 1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจโครงสร้างพื้นฐานของหม้อแปลงและฉนวนเหลวทางเลือก
2. ทราบผลการวิเคราะห์แนวโน้มการแปรผลด้วยแต่ละวิธีการ ว่าวิธีการใดมีความแม่นยำมากกว่ากัน
3. ทราบแนวโน้มของปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นในความผิดปกติชนิดต่าง ๆ เพื่อเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ชนิดของความผิดปกติ เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษา และพัฒนาในการป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายกับหม้อแปลงต่อไป
4. เข้าใจ และสามารถแปลผลจากค่าแต่ละวิธีได้
5. ทราบถึงมาตรฐาน ขั้นตอน และวิธีการแปลผลของวิธี Doernenburg Ratio, วิธี Rogers Ratio, วิธี Keys Gas, วิธี IEC Ratio, วิธี Duval Triangle และวิธี Duval Pentagon
6. ได้รู้ข้อดีข้อเสียของการแปรผลปริมาณความเข้มข้นแก๊สแต่ละวิธี

## บทที่ 2 ทฤษฎีบทที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ส่วนประกอบภายนอกของหม้อแปลง [1-4]

ส่วนประกอบภายนอกของหม้อแปลงแสดงดังรูป 2.1



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบภายนอกของหม้อแปลง

### 2.1.1 ถังเก็บน้ำมันสำรอง (Conservator Tank)

ถังเก็บน้ำมันสำรอง มีหน้าที่เก็บน้ำมัน รองรับการหดตัว ขยายตัวของน้ำมันภายในหม้อแปลง และจ่ายน้ำมันชดเชย เมื่อน้ำมันภายในหม้อแปลงมีการรั่วซึม โดยถังเก็บน้ำมันสำรองถูกติดตั้งอยู่สูงกว่าตัวถังหลัก และภายในมีถุงลม (Rubber Bag) ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อากาศภายนอกสัมผัสกับน้ำมันหม้อแปลงภายในโดยตรง โดยมี Rupture Detecting เป็นอุปกรณ์แจ้งเตือนหากมีการรั่วของน้ำมันหม้อแปลง และ Oil Level Gauge วัดระดับน้ำมันในถังเก็บน้ำมันสำรอง



รูปที่ 2.2 ถังเก็บน้ำมันสำรอง (Conservator tank) [5]

### 2.1.2 ชุดกรองความชื้น (Dehydrating Breather)

ชุดกรองความชื้น ทำหน้าที่ดักความชื้นระหว่างอากาศภายนอก และอากาศภายในถังเก็บน้ำมันสำรอง โดยบรรจุเจลซิลิกาสีน้ำเงิน และเมื่อดูดความชื้นสีจะเปลี่ยนไปจากเดิมเป็นสีน้ำตาลแดง



(ก) ก่อนดูดความชื้น



(ข) หลังดูดความชื้น

รูปที่ 2.3 ชุดกรองความชื้น (Dehydrating Breather) [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3 อุปกรณ์ระบายความดัน (Pressure Relief Device)

อุปกรณ์ระบายความดัน ทำหน้าที่ลดความดันภายในตัวถังหม้อแปลงที่มีสาเหตุมาจากการขยายตัวของน้ำมัน และจากการเกิดความผิดปกติภายในที่ทำให้เกิดความดันสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เพื่อไม่ให้ความดันกระทำต่อถังหม้อแปลงจนเกิดการบวมจนระเบิดได้ ในปัจจุบันใช้แบบสปริง ถ้าความดันมากพอเอาชนะแรงสปริงได้ ฝาจะถูกเปิดออกให้น้ำมันไหลออกมาจนความดันน้อยกว่าแรงสปริง ฝาก็ถูกปิดลง



รูปที่ 2.4 อุปกรณ์ระบายความดัน (Pressure Relief Device) [7]

### 2.1.4 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิน้ำมัน และขดลวด (Oil and Winding Temperature Device)

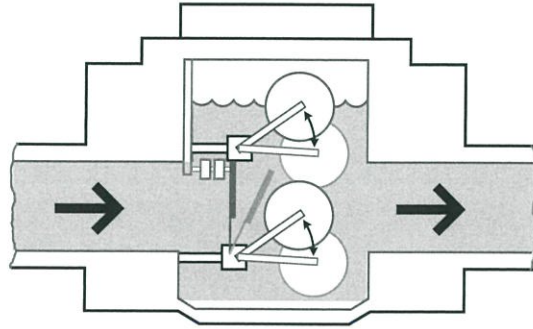
ใช้บอกอุณหภูมิของหม้อแปลง เช่น อุณหภูมิส่วนบนของน้ำมันหม้อแปลง และอุณหภูมิของขดลวด โดยตัวรับความร้อนจะติดไว้ในบริเวณที่อุณหภูมิสูงที่สุด ที่ตัวหน้าปิดจะมีสเกลไว้ตั้งค่า



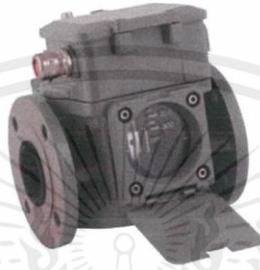
รูปที่ 2.5 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิน้ำมัน และขดลวด (Oil and Winding Temperature Device) [8]

### 2.1.5 บุชโฮล์ทรีเลย์ (Buchholz Relay)

บุชโฮล์ทรีเลย์ ถูกติดตั้งอยู่ระหว่างหม้อแปลงกับถังเก็บน้ำมันสำรอง ทำหน้าที่ตรวจจับแก๊สที่เกิดขึ้นอย่างผิดปกติในหม้อแปลง เมื่อเกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดที่มีค่ากระแสลัดวงจรต่ำ หรือเกิดการดิสชาร์จบางส่วน ซึ่งเป็นความผิดปกติที่ไม่รุนแรง เกิดแก๊สในปริมาณที่น้อย แก๊สจะลอยตัวสู่ด้านบน และไปสะสมที่ตัวบุชโฮล์ทรีเลย์ เมื่อเกิดขึ้นหลายครั้งปริมาณแก๊สที่สะสมมีมากจนทำให้ลูกลอยด้านบนของบุชโฮล์ทรีเลย์ เลื่อนต่ำลงไปกดแผ่นหน้าสัมผัส แล้วส่งสัญญาณเตือนไปยังห้องควบคุม แต่ถ้าเกิดความผิดปกติที่รุนแรง เช่น การอาร์ค จะเกิดแก๊สในปริมาณที่มากในทันทีทันใด ส่งผลให้น้ำมันมีความดันสูงขึ้น และพุ่งขึ้นสู่ถังเก็บน้ำมันสำรอง ซึ่งน้ำมันที่มีความดันสูงจะไหลผ่านบุชโฮล์ทรีเลย์ไปชนแผ่นหน้าสัมผัส และกดลูกลอยด้านล่าง แล้วส่งสัญญาณไปยังห้องควบคุม



รูปที่ 2.6 หลักการทำงานของบุชโฮล์ทรีเลย์ [9]



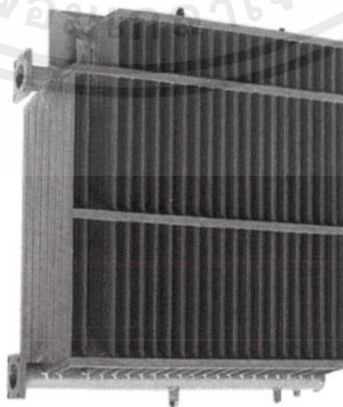
รูปที่ 2.7 บุชโฮล์ทรีเลย์ (Buchholz Relay) [10]

#### 2.1.6 ถังหม้อแปลง (Tank)

ถังหม้อแปลง หน้าที่หลัก คือ บรรจุน้ำมัน ท่อหุ้มส่วนประกอบหม้อแปลงภายใน เช่น ขดลวด แกนเหล็ก เป็นต้น และรองรับอุปกรณ์ชนิดต่าง ๆ เช่น บุชชิ่ง และตู้ควบคุม โดยจะต้องทนแรงดันที่จะเกิดขึ้นจากความผิดปกติขณะทำงานให้ได้ ซึ่งขนาด และความทนต่อแรงดันขึ้นกับการออกแบบ

#### 2.1.7 ครีระบายความร้อน (Radiators)

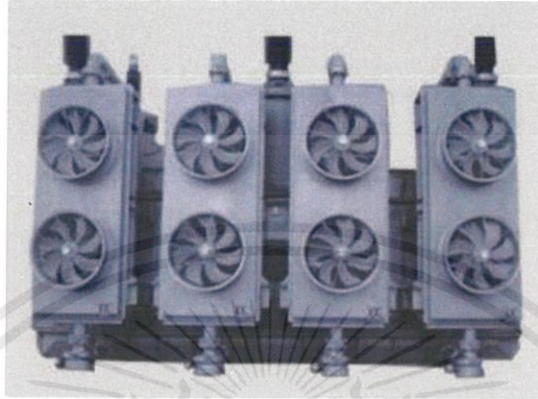
ครีระบายความร้อน สามารถยืดหยุ่นได้ และมีความแข็งแรง ซึ่งช่วยเพิ่มพื้นที่การระบายความร้อนของน้ำมัน นิยมติดตั้งกับหม้อแปลงกำลังโดยจะมีท่อด้านบนให้น้ำมันอุณหภูมิสูงไหลเข้า และท่อด้านล่างให้น้ำมันอุณหภูมิต่ำไหลกลับสู่หม้อแปลง



รูปที่ 2.8 ครีระบายความร้อน (Radiators) [11]

### 2.1.8 พัฒนาระบายความร้อน (Cooling Fans)

พัดลม ทำหน้าที่เพิ่มการระบายความร้อนให้ดีขึ้น โดยเป่าลมไปที่ครีระบายความร้อนทำให้อากาศถ่ายเทเร็วกว่าใช้การถ่ายเทตามธรรมชาติ จากการวิจัยการใช้พัดลมช่วยระบายความร้อนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพถึง 25% พัดลมเองต้องได้รับการออกแบบที่ดีเนื่องจากจะเกิดเสียงขึ้นทำให้เกิดเสียงรบกวนร่วมกับตัวหม้อแปลงเอง นิยมใช้มอเตอร์แบบกรงกระรอก

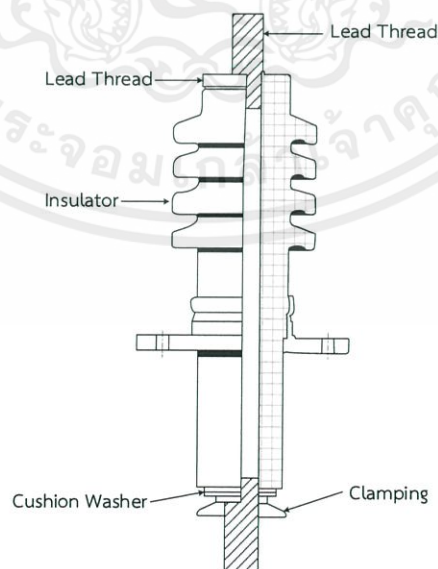


รูปที่ 2.9 พัฒนาระบายความร้อน (Cooling Fans) [12]

### 2.1.9 บุชชิ่ง (Bushings)

บุชชิ่ง ทำหน้าที่เป็นฉนวนกันระหว่างขั้วตัวนำกับตัวถัง ได้แก่ บุชชิ่งแรงสูง บุชชิ่งแรงต่ำ และบุชชิ่งนิวทรัล โครงสร้างของบุชชิ่งจะประกอบไปด้วยแผ่นพอยล์ และกระดาษ ซึ่งเรียงตัวเป็นชั้น ๆ ตามระดับแรงดันไฟฟ้า โดยแต่ละชั้นจะรองรับแรงดันไฟฟ้าตามการออกแบบของโรงงาน แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

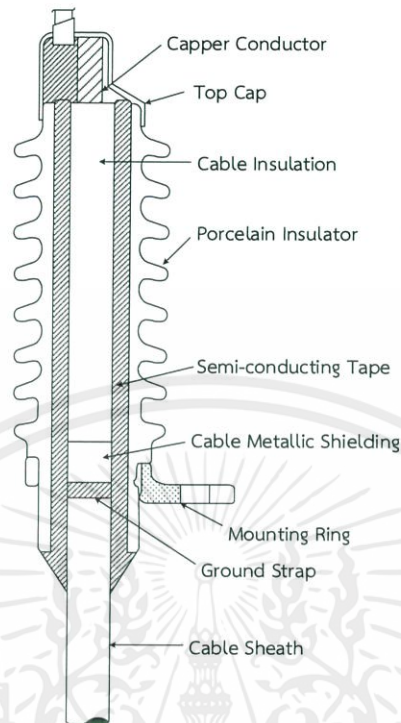
1. บุชชิ่งชนิดกระเบื้องตัน (Solid Porcelain Bushing) ใช้กับหม้อแปลงที่มีแรงดันไม่สูงมาก มีโครงสร้างง่าย ๆ ไม่ซับซ้อน



รูปที่ 2.10 บุชชิ่งชนิดกระเบื้องตัน (Solid Porcelain Bushing) [13]

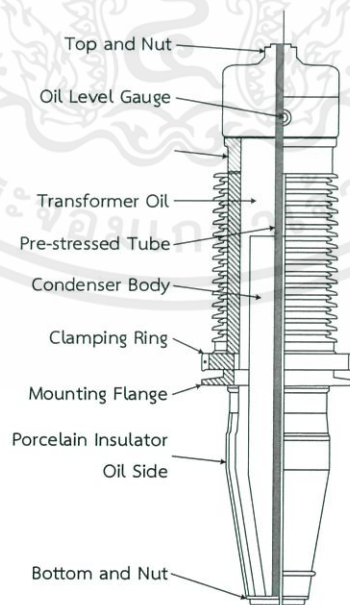
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. บุชชิงชนิดหัวสายเคเบิล (Cable Terminator หรือ Pothead) ใช้กับหม้อแปลงที่มีแรงดันไม่สูงมาก สายตัวนำที่ยื่นออกจากหม้อแปลงถูกหุ้มด้วยเคเบิล



รูปที่ 2.11 บุชชิงชนิดหัวสายเคเบิล (Cable Terminator หรือ Pothead) [1]

3. บุชชิงชนิดคอนเดนเซอร์ (Condenser Bushing) นิยมใช้กับหม้อแปลงแรงดันสูง ประกอบด้วยกระดาศกับพอยล์อิมเพกเนตด้วยน้ำมัน โดยพอยล์ทำหน้าที่เกลี่ยสนามไฟฟ้า

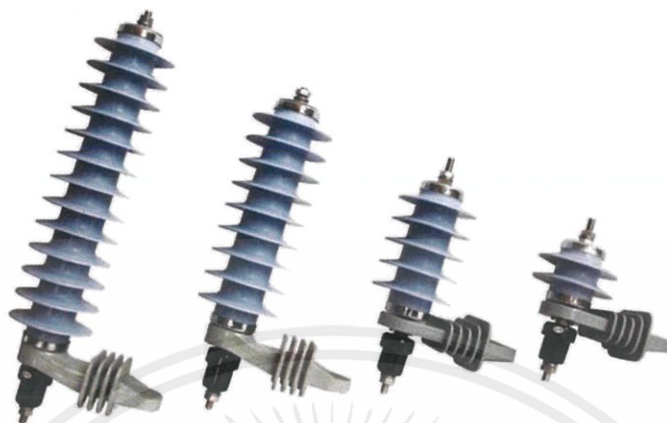


รูปที่ 2.12 บุชชิงชนิดคอนเดนเซอร์ (Condenser Bushing) [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.10 กั๊บดักล่อฟ้า (Lightning Arresters)

กั๊บดักล่อฟ้า ทำหน้าที่ป้องกันอุปกรณ์ ระบบ หรือสายส่ง ไม่ให้ได้รับความเสียหายจากภาวะแรงดันเกิน (Over Voltage) ที่เกิดจากฟ้าผ่า หรือการปลดสับสวิตช์



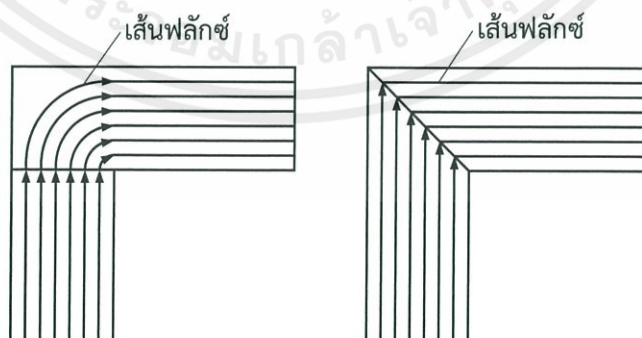
รูปที่ 2.13 กั๊บดักล่อฟ้า (Lightning Arresters) [14]

## 2.2 ส่วนประกอบภายในของหม้อแปลง [1,4]

### 2.2.1 แกนเหล็ก (Cores)

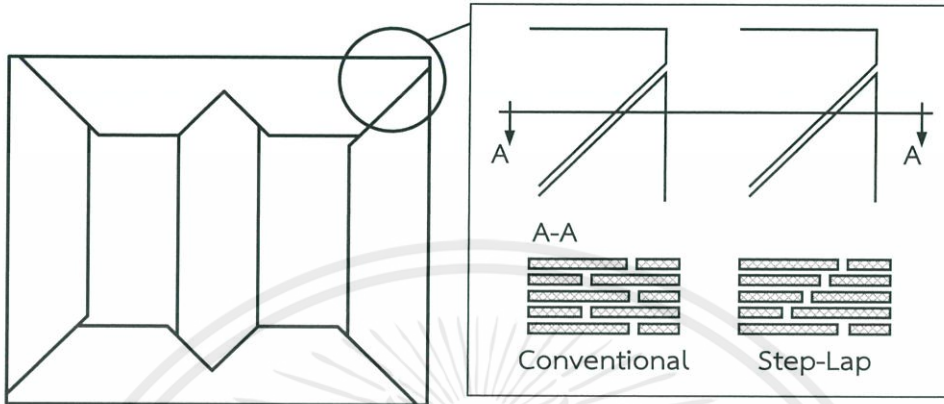
แกนเหล็ก ผลิตจากแผ่นเหล็กผ่านการรีดเย็น เคลือบฉนวน เพื่อลดความสูญเสียทางไฟฟ้าเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy Current Loss) โดยแกนเหล็กต้องมีคาร์บอนน้อยกว่า 0.1% หากมีปริมาณคาร์บอนมากจะส่งผลให้เกิดความสูญเสียเนื่องจากฮีสเทอรีซิส (Hysteresis Loss) และอายุการใช้งานสั้นลง แกนเหล็กที่ทำมาจากอัลลอยกับซิลิคอน โดยซิลิคอนช่วยเพิ่มความต้านทานในแกนเหล็ก ทำให้ค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าเนื่องจากกระแสไหลวนลดลง แต่การเพิ่มปริมาณซิลิคอนมากเกินไป ส่งผลให้แกนเหล็กเปราะจึงถูกควบคุมไม่ให้เกิน 3%

การตัดมุม 45 องศา เพื่อทำให้การไหลของเส้นแรงแม่เหล็กสะดวกขึ้น ลดการสูญเสียในแกนเหล็ก และลดค่ากระแสสร้างแม่เหล็ก



รูปที่ 2.14 แกนเหล็กตัดที่มุม 45 องศา [4]

นำมาประกอบเป็นแกนเหล็กแบบ Conventional Joint หรือ Step-Lap Joint เพื่อให้เกิดช่องว่างอากาศระหว่างแผ่นเหล็กบริเวณรอยต่ออย่างน้อยที่สุดก่อให้เกิดการเหนียวนำแม่เหล็ก และการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ไม่ก่อให้เกิดการเหนียวนำแม่เหล็กจนเกิดการอิ่มตัว เป็นการลดกระแสฮาร์มอนิกไม่มีโหลด ลดการสูญเสียขณะไม่มีโหลด และลดระดับความดังของเสียงรบกวนของหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 2.15 การประกอบแกนเหล็ก [4]

แกนเหล็กหม้อแปลงมีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลม เมื่อเกิดกระแสไหลรุนแรงในขดลวดจะเกิดแรงกระทำที่ขดลวดเท่ากันทุกตำแหน่งโดยขดลวดไม่เสียหาย แต่ถ้าเป็นหม้อแปลงขนาดเล็กที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ หรือหม้อแปลงขนาดเล็กที่มีการใช้ไฟฟ้าไม่มาก แกนเหล็กอาจมีพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยม เนื่องจากแรงที่เกิดจากการลัดวงจรดังกล่าวตามที่กล่าวข้างต้นมีค่าไม่สูงมาก

### 2.2.2 แคลมป์ยึดแกนเหล็ก (Core Clamping)

แคลมป์ยึดแกนเหล็ก มีหน้าที่ช่วยกดแกนเหล็กเพื่อไม่ให้มีจุดที่ไม่สัมผัสกัน ส่งผลทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน และเกิดการอาร์ค อีกทั้งยังช่วยป้องกันการเสียหายจากการได้รับแรงทางกล



รูปที่ 2.16 แคลมป์ยึดแกนเหล็ก (Core Clamping) [15]

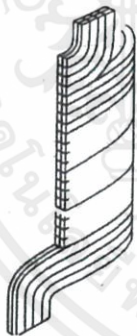
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3 ขดลวด (Windings)

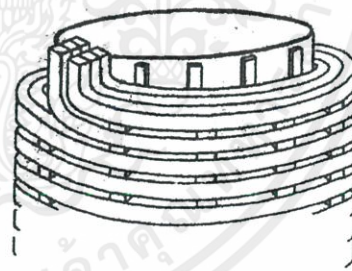
ขดลวดในห้องแปลง ที่สำคัญมี 2 ชนิด คือ ขดลวดแรงต่ำ และขดลวดแรงสูง ในหม้อแปลง บางตัวมีการออกแบบให้มีขดลวดตติยภูมิ และขดลวดเปลี่ยนแท็ปด้วย โดยขดลวดแรงต่ำจะที่อยู่ด้านในสุด ถัดมาเป็นขดลวดแรงสูง ขดลวดตติยภูมิ และขดลวดเปลี่ยนแท็ป ตามลำดับ

ขดลวดตัวนำที่นิยมใช้ในหม้อแปลง คือ ตัวนำทรงเหลี่ยม เนื่องจากใช้พื้นที่ได้มีประสิทธิภาพสูงสุด แม้ในหม้อแปลงจำหน่ายที่มีการใช้ตัวนำทรงกลมก็จะการทำให้ทั้งสองด้านมีรัศมีความโค้งน้อยกว่าปกติ และลักษณะการพันขดลวดจะใช้จำนวนรอบของขดลวดและกระแส เป็นตัวกำหนดลักษณะของการพันขดลวด ซึ่งมีหลัก ๆ 4 ชนิด ดังนี้

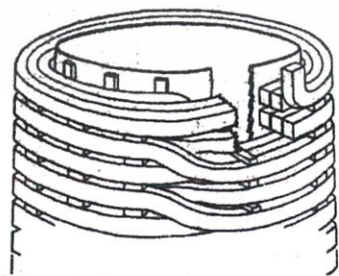
1. Layer Windings จำนวนรอบในการพันเรียงต่อเนื่องกันขึ้นจนถึงด้านบน นิยมใช้ในหม้อแปลงขนาดเล็ก กลาง และในหม้อแปลงขนาดใหญ่ นิยมใช้พันขดลวดเปลี่ยนแท็ป
2. Helical Windings ในแต่ละรอบจะมี Spacer คั่น ช่วยระบายความร้อน และช่วยรับแรงทางกล นิยมใช้กับขดลวดที่มีกระแสไหลเยอะ และต้องการความแข็งแรงเชิงกล
3. Disc Windings การพันแต่ละรอบจะต่อเนื่องกันไป นิยมใช้กับขดลวดที่มีความต้องการจำนวนรอบจำนวนมาก แต่กระแสต่ำ โดยความแข็งแรงเชิงกลมีความใกล้เคียงกับ Helical Windings โดย Disc Windings มีการพันแยกออกมาสองชนิด คือ Conventional และ Interleaved โดยแบบแรก Conventional คือ การพันขดลวดต่อกันเป็นอนุกรมกันในแต่ละชั้น ส่วนแบบที่สอง Interleaved จะสลับรอบขดลวดไม่ให้ชิดติดกัน
4. Foil Winding ใช้ทองแดง หรืออลูมิเนียมชนิดแผ่นในการพันเป็นขดลวด ซึ่งสามารถลดแรงทางกลแนวตั้งได้ และลดเวลาในการพันขดลวด นิยมใช้ในขดลวดแรงต่ำของหม้อแปลงจำหน่าย



ก) Layer Winding



ข) Helical Winding



ค) Disc Winding



ง) Foil Winding

รูปที่ 2.17 ลักษณะการพันขดลวด [4,16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 น้ำมันหม้อแปลง

หม้อแปลงไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์สำหรับส่งกระแสไฟฟ้าจากวงจรกระแสสลับไปสู่อีกวงจรหนึ่ง โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดจะทำให้เกิดความร้อนเกิดขึ้น หรืออาจเกิดความผิดปกติทางไฟฟ้าภายในหม้อแปลง ซึ่งจำเป็นต้องมีฉนวนไฟฟ้า และการระบายความร้อน ฉนวนเหลวจึงเป็นสิ่งสำคัญของหม้อแปลง ซึ่งต้องมีคุณสมบัติหลัก ๆ ดังนี้

- มีค่าความคงทนของฉนวนทางไฟฟ้าสูง เพื่อทนความเครียดทางไฟฟ้าในระหว่างที่ใช้งานได้
- มีค่าความหนืดต่ำ สามารถหมุนเวียนภายในหม้อแปลงได้อย่างอิสระ ระบายความร้อนได้ดี
- มีคุณสมบัติอุณหภูมิที่ต่ำที่เหมาะสม เพื่อให้หม้อแปลงสามารถเริ่มทำงานในที่ที่มีอุณหภูมิที่ต่ำ
- มีความคงทนต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เพื่อให้อายุการใช้งานยาวนานขึ้น

ปัจจุบันมีการใช้ฉนวนอย่างกว้างขวางและหลากหลายชนิดในหม้อแปลงชนิดต่างไม่ว่าจะเป็นหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power Transformers) หม้อแปลงเรียงกระแสไฟฟ้า (Traction Transformers) หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย (Distribution Transformers) และหม้อแปลงเครื่องมือวัด (Instrument Transformers)

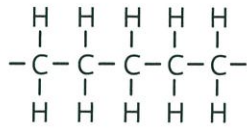
ตารางที่ 2.1 ชนิดของฉนวนเหลวจึงใช้ในหม้อแปลงและหม้อแปลงเครื่องมือวัด [19]

	น้ำมันแร่	น้ำมันซิลิโคน	น้ำมันเอสเทอร์สังเคราะห์	น้ำมันพีช (เอสเทอร์ธรรมชาติ)
หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	A	X	B	B
หม้อแปลงเรียงกระแสไฟฟ้า	A	A	A	X
หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย	A	A	A	A
หม้อแปลงเครื่องมือวัด	A	X	X	X

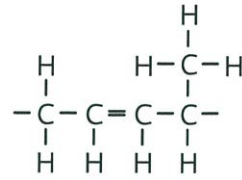
หมายเหตุ: A = มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย B = มีการใช้งาน แต่น้อย และ X = ไม่มีการใช้งาน

### 2.3.1 น้ำมันแร่ (Mineral Oil) [2]

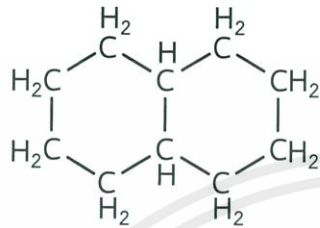
น้ำมันแร่ประกอบด้วยสารระกอบไฮโดรคาร์บอนที่ผลิตจากการกลั่นน้ำมันดิบ มีการใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง มีคุณสมบัติที่เหมาะสม ราคาไม่แพง ทำให้มีการใช้น้ำมันแร่มากที่สุด ในอุตสาหกรรม หม้อแปลง น้ำมันแร่เป็นของเหลวโปร่งใส ไม่มีสี มีส่วนประกอบโครงสร้างโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนได้ดังนี้



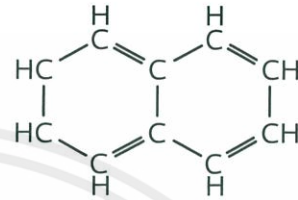
รูปที่ 2.18 พาราฟินแบบลูกโซ่ [2]



รูปที่ 2.19 พาราฟินแบบกิ่ง [2]



รูปที่ 2.20 แนพทีน [2]



รูปที่ 2.21 อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน [2]

โดยอาจแยกประเภทของน้ำมันหม้อแปลงตามกระบวนการกลั่นได้ 2 ชนิด ดังนี้

#### 1. น้ำมันพาราฟิน

เกิดจากน้ำมันดิบที่ประกอบด้วย n-paraffins ในปริมาณมาก โดยมีจุดไหลเหสูง และต้องการสารเติมแต่งเพื่อทำให้จุดไหลเหต่ำลง

#### 2. น้ำมันแนพทีน

เกิดจากน้ำมันดิบที่ประกอบด้วย n-paraffins ในปริมาณน้อยมาก โดยมีจุดไหลเหต่ำ และไม่ต้องการสารเติมแต่ง สำหรับจุดไหลเหมีคุณลักษณะของความหนืดที่ดี และมีอายุการใช้งานนานกว่าที่ได้คาดหวังไว้ นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติเชิงขั้วที่ดีกว่าน้ำมันพาราฟิน

### 2.3.2 น้ำมันเอสเทอร์ธรรมชาติ (Natural Ester Oil) [17,19]

น้ำมันเอสเทอร์ธรรมชาติเป็นผลผลิตจากน้ำมันพืช โดยกลุ่มของกรดไขมันจะต่างกันจากชนิดของพืชนั้น ๆ น้ำมันเอสเทอร์มีคุณสมบัติที่ดีคือมีจุดติดไฟสูง และย่อยสลายตามธรรมชาติง่าย แต่ไม่คงทนต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของน้ำมันพืช ปริมาณองค์ประกอบของกรดไขมัน และจำนวนพันธะคู่ [17]

น้ำมันพืช	พันธะคู่ <sup>a</sup>	ปริมาณของ ไอโอดีน <sup>b</sup> (mg per 100 g)	กรดไขมัน (%)				
			Palmitic	Stearic	Oleic	Linoleic	Linolenic
ปาล์ม	1.7	44-58	42.8	4.2	40.5	10.1	-
มะกอก	2.8	75-94	13.7	2.5	71.1	10.0	0.6
ถั่วลิสง	3.4	80-106	11.4	2.4	48.3	31.9	-
คาโนรา	3.8	94-120	4.0	2.0	56.0	26.0	10.0
งา	3.9	103-116	9.0	6.0	41.0	43.0	1.0
เมล็ดฝ้าย	3.9	90-119	21.6	2.6	18.6	54.4	0.7
ข้าวโพด	4.5	102-130	10.9	2.0	25.4	59.6	1.2
ถั่วเหลือง	4.6	117-143	11.0	4.0	23.4	53.3	7.8
ดอกทานตะวัน	4.7	110-143	5.2	2.7	37.2	53.8	1.0
เมล็ดต้นแฟลคซ์	6.6	168-204	5.5	3.5	19.1	15.3	56.6

หมายเหตุ: a = จำนวนพันธะคู่เฉลี่ย, b = ปริมาณของไอโอดีน (mg) ที่กระทำกับพันธะคู่ใน 100 mg ของน้ำมันจากพืช

#### โครงสร้างโมเลกุลของกรดไขมัน

##### 1. Palmitic Acid

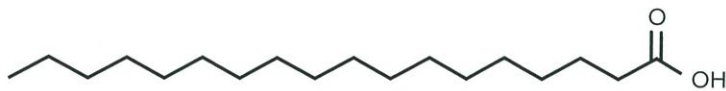
Palmitic Acid หรือ Hexadecanoic Acid คือ กรดไขมันอิ่มตัวที่พบได้โดยทั่วไปในสัตว์ พืช และสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก โดยมีสูตรทางเคมีคือ  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$  และมี C:D คือ 16:0 ซึ่ง Palmitic Acid เป็นส่วนประกอบหลักของน้ำมันปาล์ม นอกจากนี้ยังพบได้ในผลิตภัณฑ์จากสัตว์เช่น เนื้อ นม และชีส



รูปที่ 2.22 โครงสร้างโมเลกุลของ Palmitic Acid [18]

##### 2. Stearic Acid

Stearic Acid หรือ Octadecanoic Acid คือ กรดไขมันอิ่มตัวที่มี 18 โഴ่พันธะคาร์บอนมีลักษณะเป็นไขที่แข็งตัวโดยมีสูตรทางเคมีคือ  $\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{CO}_2\text{H}$  ซึ่ง Stearic Acid เป็นหนึ่งในกรดไขมันที่พบได้ทั่วไป ในธรรมชาติเช่นเดียวกับ Palmitic Acid



รูปที่ 2.23 โครงสร้างโมเลกุลของ Stearic Acid [18]

### 3. Oleic Acid

Oleic Acid คือ กรดไขมันที่ปรากฏในธรรมชาติอย่างมากมายทั้งในสัตว์และพืช โดยเป็นสารที่ไม่มีกลิ่น และไม่มีสี ในทางการค้าจะเติมสีเหลืองเพื่อให้สามารถมองเห็นได้ง่าย ในทางเคมี Oleic Acid ได้ถูกจำแนกอยู่ในกลุ่มกรด Monounsaturated Omega-9 Fatty Acid ซึ่งมีสูตรทางเคมีคือ  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$



รูปที่ 2.24 โครงสร้างโมเลกุลของ Oleic Acid [18]

### 4. Linoleic Acid

Linoleic Acid หรือ Carboxylic Acid คือ Polyunsaturated Omega-6 Fatty Acid ที่มี 18 โซ่พันธะคาร์บอน ที่มีสองพันธะคู่ในรูปของซิส ย่อได้ว่า 18:2 (n-6) หรือ 18:2 cis-9,12 โดยทั่วไปปรากฏในธรรมชาติในรูป Triglyceride Ester โดยมักไม่ค่อยพบรูปทั่วไปในอาหาร อีกทั้งยังสามารถละลายได้ใน Acetone, Benzene, Diethyl Ether และ Ethanol ซึ่ง Linoleic Acid เป็นหนึ่งในกรดไขมันที่จำเป็นที่มนุษย์ไม่สามารถสังเคราะห์ได้โดยต้องได้จากภายนอกเท่านั้น

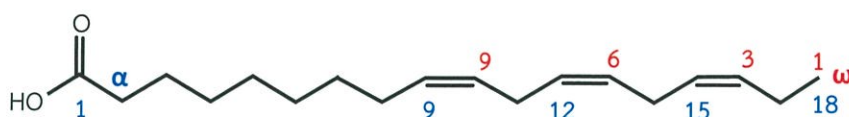


รูปที่ 2.25 โครงสร้างโมเลกุลของ Linoleic Acid [18]

### 5. $\alpha$ -Linolenic Acid

$\alpha$ -Linolenic Acid (ALA) คือ n-3 Fatty Acid เป็นกรดไขมันจำเป็นอีกตัว โดย Linoleic Acid เป็น Omega-3 Fatty Acid ที่พบได้ในเมล็ดพืช (Chia, Flaxseed, Hemp) และถั่ว (Notably Walnuts) ซึ่งในเชิงของโครงสร้างมีอีกชื่อคือ All-cis-9,12,15-Octadecatrienoic Acid

$\alpha$ -Linolenic Acid เป็น Carboxylic Acid ที่มี 18 โซ่พันธะคาร์บอน และสามพันธะคู่ที่เป็นซิส โดยพันธะคู่อันดับแรกอยู่ที่คาร์บอนตัวที่สามนับจาก Methyl ใน Fatty Acid Chain



รูปที่ 2.26 โครงสร้างโมเลกุลของ  $\alpha$ -Linolenic Acid [18]

## 6. Gamma-Linolenic Acid

Gamma-Linolenic Acid หรือ GLA ( $\gamma$ -Linolenic Acid) หรือ Gamolenic Acid คือ กรดไขมันที่พบได้แค่น้ำมันจากพืช GLA ถูกจัดอยู่ในกรดไขมันประเภท n-6 ( $\omega$ -6 หรือ Omega-6) ซึ่งหมายความว่า พันธะคู่ตัวแรกนับจาก methyl (ดูจาก n หรือ  $\omega$ ) อยู่ตรงคาร์บอนตัวที่ 6. GLA ถูกกำหนดเป็น 18:3 (n-6) โดย GLA เป็น Carboxylic Acid มี 18 โซ่พันธะคาร์บอน และสามพันธะคู่ที่เป็นซิส ซึ่งเป็น Isomer กับ  $\alpha$ -Linolenic Acid ที่เป็น Polyunsaturated n-3 (Omega-3) Fatty Acid



รูปที่ 2.27 โครงสร้างโมเลกุลของ Gamma-Linolenic Acid [18]

### 2.4.2.1 น้ำมันถั่วเหลือง (Soybean Oil) [17]

น้ำมันถั่วเหลืองโดยส่วนมากประกอบขึ้นจากกรดไขมันไม่อิ่มตัว คล้ายกับน้ำมันดอกทานตะวัน โดยกรดไขมันไม่อิ่มตัวในน้ำมันถั่วเหลือง คือ Polyunsaturated  $\alpha$ -Linolenic Acid (7–10%), Linoleic Acid (51%) และ Monounsaturated Oleic Acid (23%) และประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัว Stearic Acid (4%) และ Palmitic Acid (10%)

### ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของน้ำมันถั่วเหลืองเทียบกับน้ำมันแร่ [17]

คุณสมบัติ	น้ำมันแร่	น้ำมันถั่วเหลือง
ความคงทนของฉนวนทางไฟฟ้า (kV)	60	39
ความชื้นในน้ำมัน (mg/kg)	1.5	1.9
จุดไหลเท °C	-40	-1
จุดวาบไฟ °C	154	242
ความหนาแน่น (g/cc) ที่อุณหภูมิ 15 °C	0.895	1.462
ความหนืด (mPa/s) ที่อุณหภูมิ 100 °C	1.3	29.2

ในธรรมชาติน้ำมันถั่วเหลืองมีความไม่เสถียรต่อการออกซิเดชัน หากนำไปใช้ในหม้อแปลง จะเป็นการเพิ่มความหนืดเสียมากกว่า ในกรณีที่เลวร้ายหากมีการคงเหลือในระบบส่วนที่คงค้างจะเสียดสภาพ และเพิ่มความหนืดขึ้นไปอีก การปรับปรุงทางเคมีให้กับน้ำมันถั่วเหลืองด้วยสารต้านอนุมูลอิสระแสดงให้เห็นว่าความหนืดมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันคาโนลา ความพยายามในการปรับปรุงทางเคมีของน้ำมันถั่วเหลือง คือ การเพิ่มความต้านทานต่อการออกซิเดชัน โดยมีบางส่วนถูกเติมไฮโดรเจน เมื่อนำมารวมเข้ากับสารต้านอนุมูลอิสระสองชนิด คือ Citric Acid (10–1000 ppm) และ Tertiary Butyl Hydroquinone (200–1000 ppm) จะมีความเสถียรเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และยังมีฤทธิ์พร้อมไว้ใช้ในที่มีอุณหภูมิต่ำโดยการพัฒนาค่าจุดไหลเทให้อยู่ในอุณหภูมิต่ำ เมื่อเทียบกับน้ำมันถั่วเหลืองที่ยังไม่ได้ปรับปรุง ซึ่งน้ำมันถั่วเหลืองที่ปรับปรุงแล้วมีความหนืดดีขึ้นประมาณ 50% และเมื่อเทียบกับน้ำมันแร่ น้ำมันถั่วเหลืองมีคุณสมบัติดีกว่าอย่างมากในทุกด้าน ด้วยเหตุนี้ น้ำมันถั่วเหลืองสามารถนำไปใช้ได้กับหม้อแปลงที่มีพิกัดต่ำ เมื่อมีการผลิตและปรับปรุงคุณภาพอย่างดีแล้ว

#### 2.4.2.2 น้ำมันปาล์ม (Palm Oil) [17]

น้ำมันปาล์ม มีกรดไขมันอิ่มตัวประกอบอยู่มาก ทำให้มีสถานะกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิห้อง โดยมีองค์ประกอบหลัก คือ Triacylglycerol (TG) 95% น้ำมันปาล์มเป็นสารประกอบ กลีเซอรอลกับกรดไขมัน ในสภาวะปกติจะมีความหนืดสูง โดยจัดให้อยู่ในประเภทน้ำมันที่มีเสถียรภาพสูง เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีมีกรดไขมันอิ่มตัวจะอยู่มาก

ถ้าปาล์มถูกนำไปใช้ในการอิมเพรกเนต สำหรับฉนวนกระดาษในหม้อแปลง น้ำมันปาล์มมีค่าคงตัวไดอิเล็กทริกที่ดีกว่า และมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ต่ำกว่า โดยคุณสมบัติทางฉนวนของน้ำมันปาล์มสามารถปรับปรุงโดยการ ออกซิไดซ์กรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวและคาร์บอน ในสภาวะแวดล้อมที่เสถียร และมีจุดวาบไฟสูง มีความคงทนของฉนวนทางไฟฟ้าที่สูงกว่า ความเป็นฉนวน และคุณสมบัติต่อการดิสชาร์จ การย่อยสลายตามธรรมชาติที่ดี และไม่เป็นพิษต่อธรรมชาติ

#### ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของน้ำมันปาล์มเทียบกับน้ำมันแร่ [17]

คุณสมบัติ	น้ำมันแร่	น้ำมันปาล์ม
ความคงทนของฉนวนทางไฟฟ้า (kV)	70-75	81
ค่าความเป็นกลาง (mg of KOH/g)	<0.01	0.005
จุดไหลเท (°C)	-45	-32.5
จุดวาบไฟ (°C)	152	186
ความหนาแน่น (g/cc) ที่อุณหภูมิ 15 °C	0.88	0.86
ความหนืด ที่อุณหภูมิ 40 °C	8.13	5.06
ค่าเปอร์มิตติวิตี ( $\epsilon_r$ )	2.2	2.95

## 2.4 ฉนวนแข็งในหม้อแปลง [2,20,21]

ฉนวนแข็ง ทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้า และยังสามารถทำหน้าที่ยึด หรือรับแรงกลที่เกิดจากน้ำหนักของโครงสร้าง หรือแรงกลไดนามิกส์ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าอีกด้วย โดยฉนวนแข็งที่ใช้ในหม้อแปลงส่วนมาก คือ กระดาษ

โดยฉนวนแข็งสามารถแบ่งตามอุณหภูมิใช้งานสูงสุด (Temperature Classes of Electrical Insulators) ได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ประเภทของฉนวนไฟฟ้าที่แบ่งตามอุณหภูมิใช้งานสูงสุด [2]

คลาสของฉนวนแข็ง	อุณหภูมิใช้งานสูงสุด (°C)
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
C	มากกว่า 180

โดยที่

Class Y : ฉนวนที่มีความคงทนต่ออุณหภูมิไม่เกิน 90°C ได้แก่ กระดาษ ผ้าฝ้าย เส้นใยธรรมชาติที่ไม่มีการชุบน้ำมันวานิชหรือเรซิน ยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ และเทอร์โมพลาสติกจำพวก PE, XLPE หรือ PVC

Class A : ฉนวนที่มีความคงทนต่ออุณหภูมิไม่เกิน 105°C ได้แก่ วัสดุจาก Class Y แต่มีการชุบน้ำมันวานิชหรือเรซิน

Class E : ฉนวนที่มีความคงทนต่ออุณหภูมิไม่เกิน 105°C ได้แก่ วัสดุประเภทลามิเนตพลาสติกหรือเทอร์โมพลาสติกใช้ร่วมกับไฟเบอร์ เทอร์โมเซตติ้ง อีพ็อกซี อีนาเมลหรือวานิช เช่น Phenolformaldehyde, Melamine-Formaldehyde และ Polyethylene Terephthalate Fibers

Class B : ฉนวนที่มีความคงทนต่ออุณหภูมิไม่เกิน 130°C ได้แก่ ไฟเบอร์ประเภทอินทรีย์ และวัสดุที่มีความยืดหยุ่น เช่น ไม้ก้ำ แก้วใยหิน

Class F : ฉนวนที่มีความคงทนต่ออุณหภูมิไม่เกิน 155°C ได้แก่ วัสดุ Class B ผสมกับเรซิน เช่น อีพ็อกซี และ Silicone Alkyd

Class H : ฉนวนที่มีความคงทนต่ออุณหภูมิไม่เกิน 180°C ได้แก่ วัสดุ Class B ผสมกับเรซินชนิดอินทรีย์ เช่น ซิลิโคน เรซิน และยางซิลิโคน

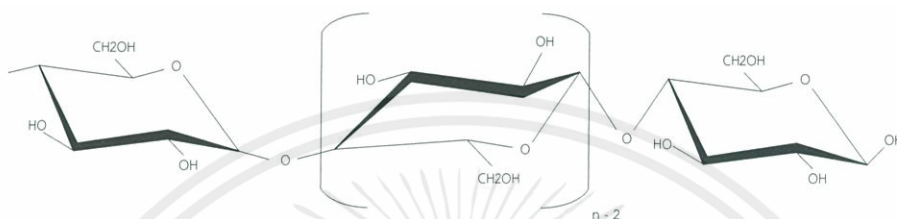
Class C : ฉนวนที่มีความคงทนต่ออุณหภูมิสูงกว่า 180°C ได้แก่ วัสดุประเภทอินทรีย์ เช่น ไม้ก้ำ เซรามิกส์ อาจจะผสมกับสารอื่นหรือไม่ผสมกับสารอื่นก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระดาษที่ใช้ในหม้อแปลง

ฉนวนหม้อแปลงได้มีการพัฒนาไปพร้อม ๆ กับการพัฒนาหม้อแปลง แต่กว่าที่การใช้ฉนวนผสมระหว่างกระดาษและน้ำมันจะถูกลอยอมรับและมีความน่าเชื่อถือ ก็ใช้เวลาสองถึงสามทศวรรษมีการพัฒนาการใช้เซลลูโลส และน้ำมันเป็นฉนวนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าตั้งแต่ ค.ศ. 1920

ส่วนประกอบหลักในฉนวนกระดาษ คือ เซลลูโลส โดยเซลลูโลสประกอบไปด้วยกลุ่มของโมเลกุลที่มีความยาวไม่เท่ากันอยู่ในตำแหน่งข้าง ๆ กัน ยึดติดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน และทำการเชื่อมต่อกันโดยพันธะไกลโคไซด์ที่แสดงในรูปที่ 2.28 โดย  $n = \text{Degree of Polymerization}$

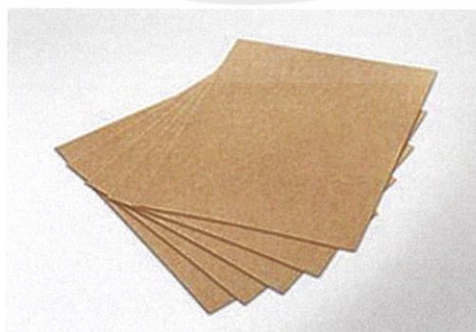


รูปที่ 2.28 โครงสร้างโมเลกุลของฉนวนกระดาษ [22]

#### 1. กระดาษกราฟและกระดาษอัดแรง (Kraft Paper and Pressboard)

กระดาษกราฟถูกใช้เป็นไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุและฉนวนของเคเบิลก่อนที่จะนำมาใช้เป็นฉนวนในหม้อแปลง โดยใช้เป็นฉนวนกั้นระหว่างชั้น (Layer) ของขดลวดหรือกั้นระหว่างขดลวดแรงต่ำและขดลวดแรงสูงของหม้อแปลง โดยมีการใช้กระดาษกับเรซินในหม้อแปลงก่อนการใช้กระดาษอีพอกไซด์ด้วยน้ำมัน ซึ่งการใช้กระดาษกับเรซินยังไม่สามารถทนต่อความเครียดสูงได้เช่นบริเวณมุม จึงมีการคิดค้นกระดาษอัดแรงโดย Weidman ซึ่งสามารถทนความเครียดสูงและแรงทางกลได้ดี โดยมีการใช้กระดาษอัดแรงในหม้อแปลงดังนี้

- ใช้เป็นฉนวนปิดหัวและท้ายของขดลวด
- เป็นลิมในการรองรับระหว่างขดลวดและโครงสร้าง
- ใช้ในการม้วนขึ้นรูปสำหรับพื้นขดลวดแรงต่ำหรือขดลวดแรงสูง
- ใช้ทำเป็นลูกฟูกหรือกระดาษรองน้ำมัน เพื่อการหมุนเวียนของน้ำมันภายในหม้อแปลง และช่วยในการระบายความร้อน



รูปที่ 2.29 กระดาษอัดแรง (Pressboard) [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. กระดาษเครป (Crepe Paper)

กระดาษเครป ถูกใช้สำหรับพันตัวนำ เนื่องจากมีความยืดหยุ่นสูง สามารถยืดตัวได้มากถึง 20% นอกจากนี้ยังใช้ในหลายรูปแบบที่ต่างกัน เช่น เทอโมอ็อปเกรด โลว์พาวเวอร์แพคเตอร์



รูปที่ 2.30 กระดาษเครป (Crepe Paper) [23]

รูปที่ 2.31 กระดาษเครปพันตัวนำ [23]

## 3. กระดาษเทอโมอ็อปเกรด

เนื่องจากการใช้หม้อแปลงที่พิกัดสูงขึ้น และบางครั้งมีการใช้ในสภาวะโหลดเกิน จึงมีความกังวลถึงอายุการใช้งานของหม้อแปลงรวมทั้งอายุของกระดาษ จึงมีการพัฒนาและการใช้กระดาษเทอโมอ็อปเกรด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อยืดอายุการใช้งานของหม้อแปลง โดยพบว่ากระดาษเทอโมอ็อปเกรดมีอายุการใช้งานมากกว่าฉนวนกระดาษทั่วไปหลายเท่า (10 เท่า ที่ค่าความหนาแน่น 60%)

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนผสม (กระดาษและน้ำมัน) [2]

กระดาษ	น้ำมันที่ใช้ Impregnated	ความเครียด สนามไฟฟ้า เฉลี่ย (kV/cm)	Tan $\delta$ ที่อุณหภูมิ ห้อง	Tan $\delta$ ที่อุณหภูมิ ใช้งาน
กระดาษคราฟท์	น้ำมันแร่	180	$3.8 \times 10^{-3}$ ที่ 23°C	$5.7 \times 10^{-3}$ ที่ 23°C
กระดาษคราฟท์	น้ำมันซิลิโคน	180	$2.7 \times 10^{-3}$ ที่ 23°C	$3.1 \times 10^{-3}$ ที่ 85°C
กระดาษคราฟท์	Polybutene	180	$2.0 \times 10^{-3}$ ที่ 25°C	$2.0 \times 10^{-3}$ ที่ 85°C

ตารางที่ 2.7 ค่าเปอร์มิตติวิตีของกระดาษที่ถูกอิมเพรเกนต ที่ 20 °C ( $\epsilon_{res}$ ) [2]

ฉนวนเหลวที่ใช้อิมเพรเกนต	ค่าเปอร์มิตติวิตี ( $\epsilon_{res}$ )		
	0.8 g/cm <sup>3</sup>	1 g/cm <sup>3</sup>	1.2 g/cm <sup>3</sup>
Trichlorophenyl ( $\epsilon_r = 1$ )	6.28	6.3	6.4
Pentachlorodiphenyl	5.71	5.88	6.06
น้ำมันแร่	3.26	3.72	4.3

## 2.5 การเกิดแก๊สในฉนวนน้ำมัน

### 2.5.1 การสลายตัวของเซลลูโลส [26]

พอลิเมอร์ของฉนวนเซลลูโลส (กระดาษ) ประกอบด้วยวงแหวนแอนไฮโดรกลูโคสจำนวนมาก และมีพันธะโมเลกุล C – O และพันธะกลูโคซิติกที่แข็งแรง แต่เสถียรน้อยกว่าพันธะไฮโดรคาร์บอน ในน้ำมัน เมื่ออุณหภูมิมากกว่า 105°C จะทำให้โซ่ของพันธะพอลิเมอร์ถูกตัด และก่อเป็นคาร์บอน และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 300°C จะมีแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น

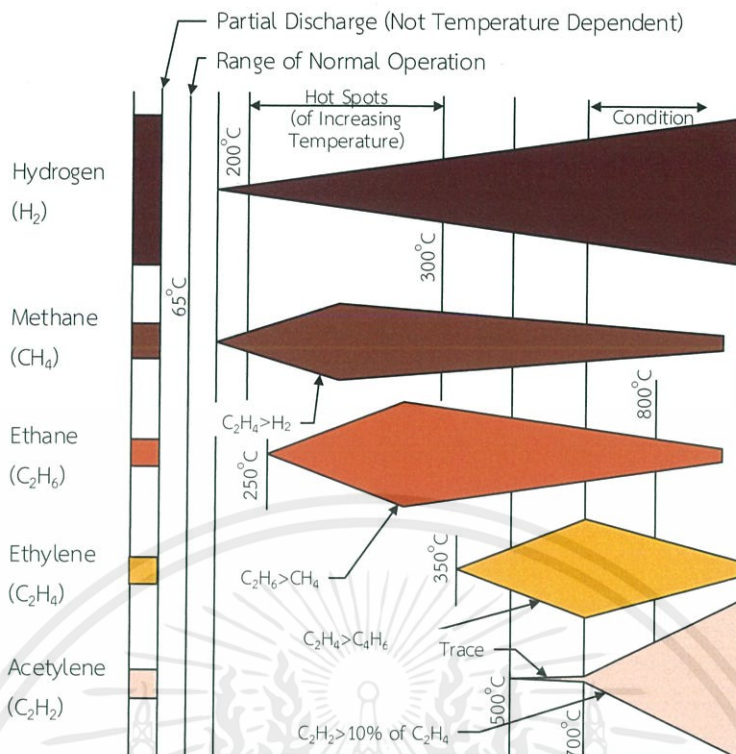
### 2.5.2 การสลายตัวของน้ำมัน [26]

น้ำมันแร่ ประกอบด้วยโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนหลากหลายโมเลกุลที่แตกต่างกัน ได้แก่ CH<sub>3</sub>, CH<sub>2</sub> และ CH เชื่อมต่อกันโดยพันธะเคมี การสลายพันธะของ C–H และ C–C เกิดขึ้นอาจเนื่องมาจากความผิดปกติทางไฟฟ้าและความผิดปกติทางความร้อน ทำให้เกิดไอออนิกที่ไม่สมบูรณ์ เช่น H<sup>+</sup>, CH<sub>3</sub><sup>+</sup>, CH<sub>2</sub><sup>+</sup>, CH<sup>+</sup> หรือ C<sup>+</sup> ในหลายรูปแบบซึ่งมีความซับซ้อน เมื่อการรวมตัวกันใหม่อย่างรวดเร็วผ่านปฏิกิริยาที่ซับซ้อน ก่อให้เกิดโมเลกุลของแก๊สเช่น ไฮโดรเจน (H–H) มีเทน (CH<sub>3</sub>–H) อีเทน (CH<sub>3</sub>–CH<sub>3</sub>) เอทิลีน (CH<sub>2</sub>=CH<sub>2</sub>) หรือ อะเซทิลีน (CH ≡ CH) รวมถึงอนุภาคของแข็งของคาร์บอน (C<sub>3</sub> หรือ C<sub>4</sub>) และโพลิเมอร์ไฮโดรคาร์บอน (X-wax)

การดิสซาร์จพลังงานต่ำเช่น การดิสซาร์จบางส่วนประเภทโคโรนาดิสซาร์จ ทำให้พันธะ C–H (338 kJ / mol) สลายตัวผ่านปฏิกิริยาไอออน และมีส่วนเป็นแก๊สไฮโดรเจน เมื่อพลังงานสูงขึ้น และอุณหภูมิที่สูงขึ้นมากพอ จะทำให้พันธะ C–C สลายตัว และการรวมตัวใหม่เป็นก๊าซพันธะเดี่ยว C–C (607 kJ / mol) พันธะคู่ C=C (720 kJ / mol) หรือพันธะสาม C ≡ C (960 kJ / mol)

เอทิลีนมีนัยยะมากกว่าอีเทนและมีเทนที่อุณหภูมิสูงกว่า 500°C ส่วนอะเซทิลีนจะเกิดที่อุณหภูมิอย่างน้อย 800°C ถึง 1200°C การปรากฏของอะเซทิลีนสื่อถึงการเกิดอาร์คขึ้นที่ตัวนำที่มีอุณหภูมิรอบ ๆ หลายพันองศาเซลเซียส

ในบางครั้งน้ำมันจะออกซิไดซ์ทำให้เกิด CO และ CO<sub>2</sub> ในปริมาณน้อย แต่อาจมีปริมาณที่มากขึ้นเมื่อมีการสะสมเนื่องจากการใช้น้ำมันเป็นเวลานาน



รูปที่ 2.32 การเกิดแก๊สเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ [25]

### 2.5.3 Stray Gassing [26]

Stray gassing เช่น ไฮโดรเจน ( $H_2$ ) มีเทน ( $CH_4$ ) และ อีเทน ( $C_2H_6$ ) เป็นแก๊สที่เกิดขึ้นในน้ำมันที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $200^\circ C$  หรือเกิดการออกซิเดชัน ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะทางเคมีของน้ำมัน โดย Stray Gassing ไม่ถือว่าเป็นปัญหาที่อันตราย

### 2.5.4 แก๊สที่เกิดขึ้นในฉนวนน้ำมันและฉนวนกระดาษ [27]

หม้อแปลงทุกชนิดในสภาวะการทำงานปกติ จะมีแก๊สเกิดขึ้นในระดับหนึ่ง แต่บางครั้งที่มีสภาวะผิดปกติ แก๊สก็เกิดขึ้นได้เช่น ปัญหาการเกิดความร้อนเกินในฉนวน ความผิดปกติต่าง ๆ เรียกว่า ฟอลต์ ในส่วนของความผิดปกติเนื่องจากความร้อน การดิสชาร์จบางส่วน และการอาร์ค การเกิดฟอลต์ภายในน้ำมันจะผลิตแก๊สไฮโดรเจน ( $H_2$ ) แก๊สมีเทน ( $CH_4$ ) อะเซทิลีน ( $C_2H_2$ ) เอทิลีน ( $C_2H_4$ ) และอีเทน ( $C_2H_6$ ) หากมีเซลลูโลสเข้ามาเกี่ยวข้อง ความผิดปกติจะผลิตมีเทน ( $CH_4$ ) ไฮโดรเจน ( $H_2$ ) คาร์บอนมอนอกไซด์ ( $CO$ ) และคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ผลรวมแก๊สที่ติดไฟได้อาจบ่งบอกถึงการดำรงอยู่ของความผิดปกติเนื่องจากความร้อน ความผิดปกติเนื่องจากไฟฟ้า หรือการดิสชาร์จบางส่วน อย่างไรก็ตามหนึ่งหรือหลายอย่าง การรวมตัวกันของแก๊สหาได้โดยการโครมาโตกราฟี โดยจะไม่ซ้ำกันของฟอลต์ในอุณหภูมิต่าง ๆ นอกจากนี้อัตราส่วนของแก๊สเป็นข้อบ่งชี้ถึงประเภทของฟอลต์ การตีความโดยแก๊สแต่ละชนิดจะเป็นได้ยากหากมีฟอลต์มากกว่าหนึ่งฟอลต์ หรือเมื่อฟอลต์ประเภทหนึ่งดำเนินไปเป็นประเภทอื่นเช่น ความผิดปกติเนื่องจากไฟฟ้าที่เกิดจากความร้อน

ความพยายามที่จะตีความหมายของแก๊สที่มากกว่าการอธิบายกลไกตามธรรมชาติของการสร้างและการวัด อาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดขั้นต้นในการตีความ ในความเป็นจริงเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า หม้อแปลงบางตัวยังคงใช้งานได้เป็นเวลาหลายปีทั้ง ๆ ที่มีอัตราการเกิดแก๊สมากกว่าปกติ

## 2.6 การแปลผลแก๊ส

### 2.6.1 การแปลผลแก๊สตามมาตรฐาน IEEE [27]

#### 2.6.1.1 ความผิดปกติเนื่องจากความร้อน

การสลายตัวของน้ำมันแร่ตั้งแต่ 150°C ถึง 500°C จะสร้างแก๊สน้ำหนักโมเลกุลต่ำในปริมาณมาก เช่น ไฮโดรเจน ( $H_2$ ) และมีเทน ( $CH_4$ ) และสร้างแก๊สน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า คือ แก๊สเอทิลีน ( $C_2H_4$ ) และ อีเทน ( $C_2H_6$ ) ในปริมาณน้อย อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะมาพร้อมกับแก๊สน้ำหนักโมเลกุลสูงในปริมาณที่เพิ่มขึ้นนั่นคือ อีเทน ( $C_2H_6$ ) ตามมาด้วยเอทิลีน ( $C_2H_4$ ) ในตอนท้ายของช่วงความผิดปกติเนื่องจากความร้อน แก๊สไฮโดรเจนจะมีการเพิ่มปริมาณมากขึ้น และมีการผลิตอะเซทิลีน ( $C_2H_2$ ) เล็กน้อย ในทางตรงกันกับการสลายตัวด้วยความร้อนของน้ำมัน การสลายตัวด้วยความร้อนของเซลลูโลสและฉนวนแข็งอื่น ๆ ทำให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $CO$ ) คาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) และไอน้ำ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าการสลายตัวของน้ำมัน เนื่องจากกระดาษเริ่มเสื่อมที่อุณหภูมิต่ำกว่าน้ำมัน

#### 2.6.1.2 ความผิดปกติเนื่องจากไฟฟ้า—การดิสชาร์จพลังงานต่ำ

การดิสชาร์จพลังงานต่ำ เช่นการดิสชาร์จบางส่วน และการเกิดอาร์คเป็นระยะในระดับต่ำมาก จะผลิตไฮโดรเจนเป็นส่วนใหญ่ พร้อมกับมีปริมาณลดลงของแก๊สมีเทนและเกิดอะเซทิลีนเล็กน้อย เมื่อความรุนแรงของการดิสชาร์จเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของอะเซทิลีนและเอทิลีนจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

#### 2.6.1.3 ความผิดปกติเนื่องจากไฟฟ้า—การดิสชาร์จพลังงานสูง

เนื่องจากความรุนแรงของความผิดปกติเนื่องจากไฟฟ้าถึงจุดอาร์ค หรือการดิสชาร์จอย่างต่อเนื่องตามลำดับ ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 700°C ถึง 1800°C โดยปริมาณของอะเซทิลีน ( $C_2H_2$ ) จะเด่นชัด

### 2.6.2 การแปลผลแก๊สตามมาตรฐาน IEC [26]

#### 2.6.2.1 การดิสชาร์จบางส่วน

การดิสชาร์จบางส่วนชนิดโคโรนาเป็นผลจากการสะสมของ X-wax ที่เกาะบนฉนวนกระดาษ

#### 2.6.2.2 การดิสชาร์จพลังงานต่ำ

การดิสชาร์จพลังงานต่ำในน้ำมันหรือกระดาษ เป็นผลจากการก่อตัวของคาร์บอนที่เจาะทะลุกระดาษ (Punctures) รอยไหม้บริเวณผิวกระดาษ (Tracking) หรือมีอนุภาคคาร์บอนในน้ำมัน

### 2.6.2.3 การดิสซาร์จพลังงานสูง

การดิสซาร์จพลังงานสูงมีความรุนแรงกว่า เนื่องจากกระดาศและน้ำมันถูกทำลาย ทำให้เกิดคาร์บอนในกระดาศ มีการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านน้ำมันและกระดาศ ทำให้เกิดคาร์บอนสูงในน้ำมัน

### 2.6.2.4 ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300°C

หากเกิดความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300°C กระดาศจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล

### 2.6.2.5 ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 300°C ถึง 700°C

หากเกิดความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 300°C จะมีคาร์บอนเกิดขึ้น

### 2.6.2.6 ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 700°C

ที่อุณหภูมิสูงกว่า 700°C มีการสร้างคาร์บอนในน้ำมัน หากอุณหภูมิสูงกว่า 1000°C จะมีการหลอมละลายของโลหะ

## 2.7 การตรวจสอบและวิเคราะห์แก๊สที่ติดไฟได้ละลายอยู่ในน้ำมัน [27]

จากการปฏิบัติงานการกำหนดลำดับความสำคัญดังต่อไปนี้

1. การตรวจจับ ทำการตรวจหาการแก๊สใด ๆ ที่เกิดขึ้นในปริมาณมากกว่าปกติ และนำไปใช้ประโยชน์ในแนวทางที่เหมาะสม ซึ่งการพบความผิดปกติได้เร็ว จะลดความเสียหายหรือหลีกเลี่ยงความเสียหายได้
2. การประเมิน ทำการประเมินผลกระทบของความผิดปกติต่อการใช้งานได้ของหม้อแปลง โดยใช้ชุดแนวทาง
3. การดำเนินการ ทำการดำเนินการตามคำแนะนำ โดยเริ่มจากการเฝ้าระวัง และการยืนยันให้มากขึ้นหรือการวิเคราะห์เพิ่มเติม โดยการลดโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าหรือการถอดอุปกรณ์ออก

### 2.7.1 อัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมัน

เนื่องจากการวัดค่าปริมาณของแก๊สเพียงอย่างเดียว อาจไม่สามารถนำไปวิเคราะห์ความผิดปกติ และวางแผนดูแลหม้อแปลงได้ จึงต้องคำนวณอัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊ส

การคำนวณอัตราอัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊สโดยใช้ผลรวมของความเข้มข้น (ppm) ของแก๊สที่ติดไฟได้ทั้งหมด (ทุกแก๊สยกเว้น CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> และ N<sub>2</sub>) ตามสมการ 2.1 ดังนี้

$$R = \frac{(S_T - S_0) \times V \times 10^{-6}}{T} \quad (2.1)$$

โดยที่ R คือ อัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊ส (ลิตร/วัน)

S<sub>0</sub> คือ ตัวอย่างน้ำมันตัวที่หนึ่ง (ไมโครลิตร/ลิตร)

S<sub>T</sub> คือ ตัวอย่างน้ำมันตัวที่สอง (ไมโครลิตร/ลิตร)

V คือ ปริมาตรแท่งน้ำมัน (ลิตร)

T คือ เวลา (วัน)

## 2.7.2 ปริมาตรของแก๊สที่ติดไฟได้ที่ละลายอยู่ในน้ำมัน

วิธีการหนึ่งที่ยอมรับได้ในการติดตามการเสื่อมสภาพของวัสดุฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าคือการคำนวณปริมาตรรวมของแก๊ส สามารถคำนวณปริมาตรรวมของแก๊สในสมการ 2.2

$$TDCG_v = \frac{FG(V)}{1000000} \quad (2.2)$$

โดยที่ FG คือ ผลรวมของ H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> และ CO [ไมโครลิตร/ลิตร (ppm)]

V คือ ปริมาตรน้ำมันในหม้อแปลงไฟฟ้า [ลิตร (แกลลอน)]

TDCG<sub>v</sub> คือ ปริมาตรแก๊สที่ติดไฟได้ที่ทั้งหมด [ลิตร (แกลลอน)]

## 2.7.3 การประเมินสภาพหม้อแปลงโดยใช้ความเข้มข้นของแก๊สแต่ละชนิด และ TDCG

การตรวจสอบว่าหม้อแปลงสามารถทำงานได้ตามปกติจะเป็นไปได้ยาก หากไม่มีข้อมูลการละลายของแก๊สมาก่อนหน้านี้ มีการพัฒนาเกณฑ์มาตรฐานสี่ระดับ เพื่อแบ่งความเสี่ยงให้กับหม้อแปลงเมื่อไม่มีข้อมูลการละลายของแก๊สมาก่อนหน้านี้ได้ ดังตารางที่ 2.8 โดยที่ TDCG คือ ปริมาตรของแก๊สที่ติดไฟได้ที่ละลายอยู่ในน้ำมัน

- เงื่อนไข 1 ค่า TDCG ที่ต่ำกว่าระดับนี้บ่งชี้ว่าหม้อแปลงมีการทำงานปกติ หากพิจารณาค่าแก๊สที่ติดไฟได้ ตัวใดก็ตามที่เกินกว่าระดับที่กำหนดควรมีการตรวจสอบหม้อแปลงเพิ่มเติม

- เงื่อนไข 2 ค่า TDCG ที่อยู่ในช่วงนี้บ่งชี้ว่ามีระดับแก๊สที่ติดไฟได้มากกว่าปกติ หากพิจารณาค่าแก๊สที่ติดไฟได้ ตัวใดก็ตามที่เกินกว่าระดับที่กำหนด ควรมีการตรวจสอบหม้อแปลงเพิ่มเติม และควรมีการเก็บตัวอย่างน้ำมันเพื่อดูแนวโน้มหรืออัตราการเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีความเป็นไปได้ที่จะพบปัญหาในหม้อแปลง โดยดำเนินการตามข้อแนะนำในตารางที่ 2.9

- เงื่อนไข 3 ค่า TDCG ที่อยู่ในช่วงนี้แสดงถึงการสลายตัวในระดับสูง หากพิจารณาค่าแก๊สที่ติดไฟได้ ตัวใดก็ตามที่เกินกว่าระดับที่กำหนด ควรมีการตรวจสอบหม้อแปลงเพิ่มเติม และควรมีการเก็บตัวอย่างน้ำมันเพื่อดูแนวโน้มหรืออัตราการเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีความเป็นไปได้ที่จะพบปัญหาในหม้อแปลง โดยดำเนินการตามข้อแนะนำในตารางที่ 2.9

- เงื่อนไข 4 ค่า TDCG ที่เกินกว่าค่านี้แสดงถึงการสลายตัวที่มากเกินไป หากใช้งานต่อไป อาจทำให้หม้อแปลงเสียหายได้ ให้คำนวณค่าอัตราการเพิ่มขึ้น จากนั้นดำเนินการตามข้อแนะนำในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.8 การประเมินสภาพหม้อแปลงโดยใช้ความเข้มข้นของแก๊สแต่ละชนิด และTDCG [27]

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

หมายเหตุ: \* ค่า TDCG ในตารางจะไม่รวม CO<sub>2</sub> ซึ่งไม่ใช่แก๊สที่ติดไฟได้

ตารางที่ 2.8 แสดงความเข้มข้นของแก๊สที่ละลายชนิดต่าง ๆ TDCG สำหรับเงื่อนไขที่ 1 ถึงเงื่อนไข 4 ตารางนี้ใช้ในการประเมินเงื่อนไขของแก๊สสำหรับหม้อแปลงใหม่ หรือเพิ่งถูกซ่อม หรือใช้สำหรับหม้อแปลงที่ไม่เคยทดสอบการละลายของแก๊สมาก่อนหรือไม่มีข้อมูลการทดสอบล่าสุด

#### 2.7.4 การกำหนดขั้นตอนการปฏิบัติงานและความถี่ในการเก็บตัวอย่างน้ำมันจากระดับ TDCG และอัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊ส

ตารางที่ 2.9 ระบุความถี่ในการสุ่มตัวอย่างน้ำมันและขั้นตอนการปฏิบัติงานสำหรับปริมาณ TDCG ในระดับต่าง ๆ (ppm) และอัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊ส โดยค่าทั้งสองนี้บ่งชี้ถึงปัญหาความรุนแรงที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงแนะนำให้ใช้ความถี่ในการเก็บตัวอย่างน้ำมันบ่อยขึ้น

ตารางที่ 2.9 ขั้นตอนการปฏิบัติงานและความถี่ในการเก็บตัวอย่างน้ำมันจากระดับค่า TDCG และ อัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊ส [27]

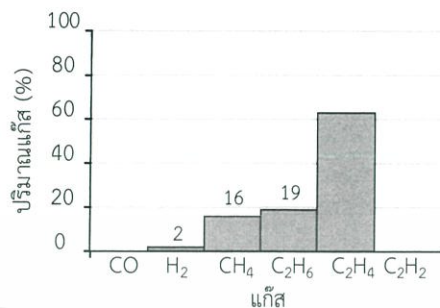
สถานะ	TDCG (ppm)	อัตราการเพิ่มขึ้น (ppm/วัน)	ข้อปฏิบัติงาน และความถี่ในการเก็บตัวอย่าง	
			ความถี่ในการเก็บตัวอย่างน้ำมัน	ขั้นตอนการปฏิบัติ
เงื่อนไข 4	> 4630	> 30	ทุกวัน	-พิจารณาการหยุดใช้งาน
		10 ถึง 30	ทุกวัน	-ปฏิบัติตามคำแนะนำของผู้ผลิต
		< 10	ทุกสัปดาห์	-ควรใช้งานด้วยความระมัดระวังเป็นพิเศษ -วิเคราะห์ค่าของแก๊สแต่ละชนิด -วางแผนหยุดใช้งาน -ปฏิบัติตามคำแนะนำของผู้ผลิต
เงื่อนไข 3	1921 ถึง 4630	> 30	ทุกสัปดาห์	-ควรใช้งานด้วยความระมัดระวังเป็นพิเศษ
		10 ถึง 30	ทุกสัปดาห์	-วิเคราะห์ค่าของแก๊สแต่ละชนิด
		< 10	ทุกเดือน	-วางแผนหยุดการใช้งาน -ปฏิบัติตามคำแนะนำของผู้ผลิต
เงื่อนไข 2	721 ถึง 1920	> 30	ทุกเดือน	-ควรใช้งานด้วยความระมัดระวัง
		10 ถึง 30	ทุกเดือน	-วิเคราะห์ค่าของแก๊สแต่ละชนิด
		< 10	ทุก 4 เดือน	-ตรวจสอบโดยพิจารณาจากโพลด
เงื่อนไข 1	≤ 720	> 30	ทุกเดือน	-ควรใช้งานอย่างระมัดระวัง -พิจารณาค่าของแก๊สแต่ละชนิด
		10 ถึง 30	ทุก 4 เดือน	-ตรวจสอบโดยพิจารณาจากโพลด
		< 10	ทุกปี	-ใช้งานได้อย่างปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7.5 การประเมินความผิดปกติโดยใช้วิธีคีย์แก๊ส

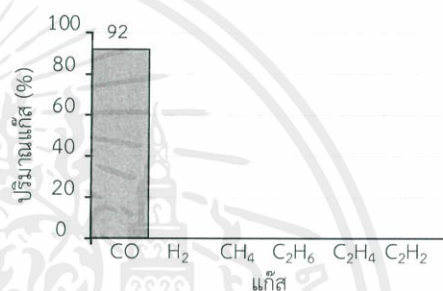
อุณหภูมิของน้ำมันและการย่อยสลายเซลล์ลูโลส เป็นพื้นฐานสำหรับการกำหนดประเภทของความผิดปกติต่าง ๆ จากแก๊สที่สำคัญที่ถูกนำมาพิจารณา แก๊สเหล่านี้เรียกว่า คีย์แก๊ส

1. เกิดความร้อนในน้ำมัน : มีการสลายตัวของเอทิลีน ( $C_2H_4$ ) มีเทน ( $CH_4$ ) อีเทน ( $C_2H_6$ ) และไฮโดรเจน ( $H_2$ ) เล็กน้อย โดยอะเซทิลีน ( $C_2H_2$ ) จะเกิดขึ้นเมื่อฟอลต์มีความรุนแรง  
คีย์แก๊ส: เอทิลีน



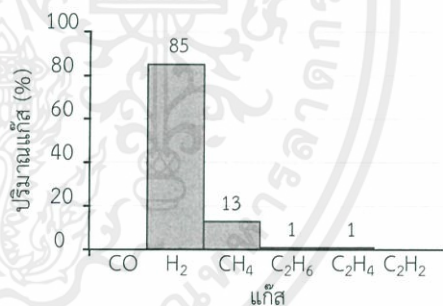
ปริมาณแก๊สแต่ละชนิดจากการเกิดความร้อนในน้ำมัน

2. เกิดความร้อนในเซลล์ลูโลส : ปริมาณที่มากของคาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ เนื่องจากเกิดความร้อนเกินขึ้นที่เซลล์ลูโลส แก๊สไฮโดรคาร์บอนด์ เช่น เอทิลีน ( $C_2H_4$ ) มีเทน ( $CH_4$ ) จะเกิดจากความผิดปกติในโครงสร้างที่ถูกอิมเพกเนตในน้ำมัน  
คีย์แก๊ส: คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)



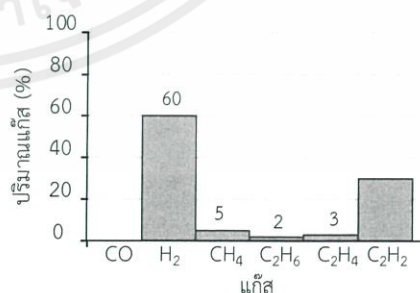
ปริมาณแก๊สแต่ละชนิดจากการเกิดความร้อนในเซลล์ลูโลส

3. เกิดการดิสซาร์จบางส่วน : เกิดการดิสซาร์จบางส่วนที่พลังงานต่ำ จะปล่อยแก๊สไฮโดรเจน ( $H_2$ ) มีเทน ( $CH_4$ ) อีเทน ( $C_2H_6$ ) เล็กน้อย และเอทิลีน ( $C_2H_4$ )  
คีย์แก๊ส: ไฮโดรเจน ( $H_2$ )



ปริมาณแก๊สแต่ละชนิดจากการเกิดการดิสซาร์จบางส่วน

4. เกิดการอาร์ค: มีการผลิตไฮโดรเจน ( $H_2$ ) และอะเซทิลีน ( $C_2H_2$ ) ในปริมาณมาก มีเทน ( $CH_4$ ) และเอทิลีน ( $C_2H_6$ ) เป็นส่วนน้อย คาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) จะเกิดขึ้นหากเป็นความผิดปกติจากเซลล์ลูโลส  
คีย์แก๊ส: อะเซทิลีน



ปริมาณแก๊สแต่ละชนิดจากการเกิดการอาร์ค

รูปที่ 2.33 คีย์แก๊สที่สัมพันธ์กับความผิดปกติ 4 ประเภท [27]

## 2.7.6 การประเมินความผิดปกติโดยวิธีวิเคราะห์อัตราส่วนแก๊สที่ติดไฟได้

กระบวนการนี้เป็นวิธีของ Doernenburg และตามด้วย Rogers โดยอัตราส่วนทั้งห้านี้คือ

$$\text{Ratio 1 (R1)} = \frac{\text{CH}_4}{\text{H}_2}$$

$$\text{Ratio 2 (R2)} = \frac{\text{C}_2\text{H}_2}{\text{C}_2\text{H}_4}$$

$$\text{Ratio 3 (R3)} = \frac{\text{C}_2\text{H}_2}{\text{CH}_4}$$

$$\text{Ratio 4 (R4)} = \frac{\text{C}_2\text{H}_6}{\text{C}_2\text{H}_2}$$

$$\text{Ratio 5 (R5)} = \frac{\text{C}_2\text{H}_4}{\text{C}_2\text{H}_6}$$

โดยวิธี Doernenburg จะใช้อัตราส่วน R1, R2, R3 และ R4 และวิธี Rogers จะใช้อัตราส่วน R1, R2 และ R5

### 2.7.6.1 การประเมินความผิดปกติโดยใช้วิธีการอัตราส่วน Doernenburg

วิธี Doernenburg เป็นวิธีที่แสดงให้เห็นถึงการเกิดความผิดปกติทั่ว ๆ ไปสามประเภทที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลง ตามที่กล่าวไว้ในข้อ 2.5 วิธีนี้ใช้ความเข้มข้นของแก๊สที่คำนวณได้จากอัตราส่วน R1, R2, R3 และ R4 โดยแก๊สจะต้องเป็นแก๊สที่ถูกแยกออกมาจากน้ำมันหม้อแปลงเท่านั้น

ค่าของแก๊สเหล่านี้ชั้นแรกจะเปรียบเทียบกับความเข้มข้น L1 ในตารางที่ 2.10 เพื่อให้แน่ใจว่ามีความผิดปกติหรือไม่ และให้แน่ใจว่าแก๊สแต่ละชนิดเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์อัตราส่วนที่จะใช้ จากนั้นนำอัตราส่วน R1, R2, R3 และ R4 เปรียบเทียบกับค่าในตารางที่ 2.11 เพื่อประเมินความผิดปกติ

โดยการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

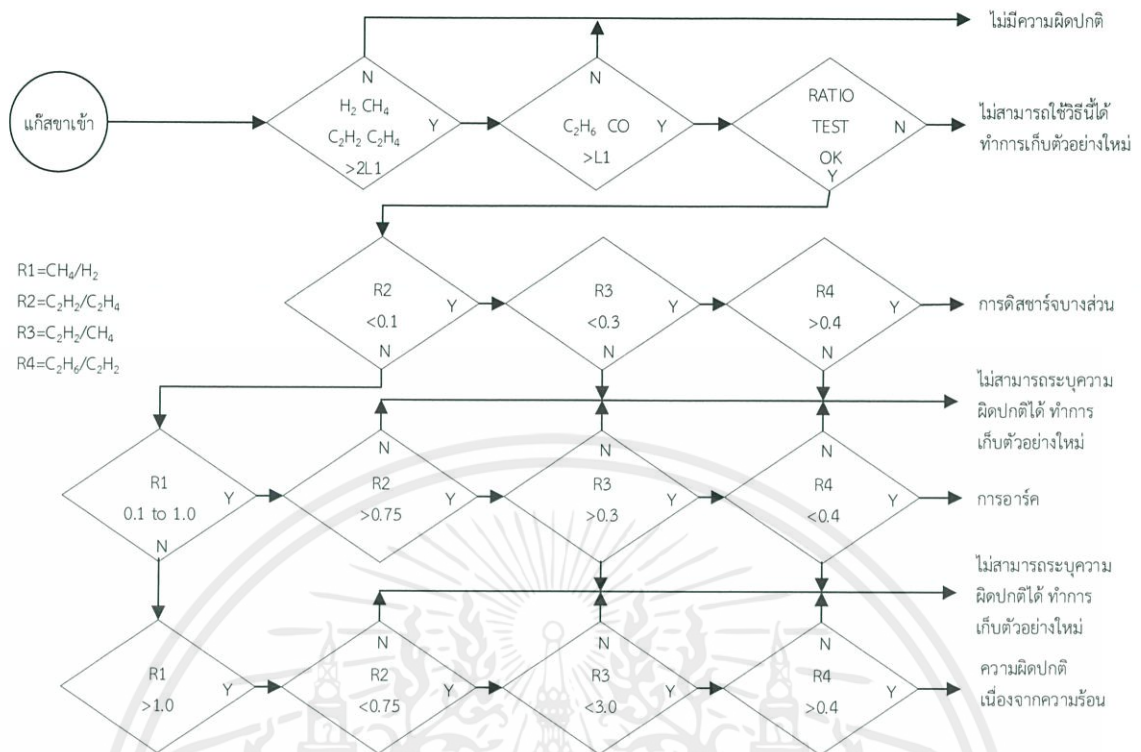
ขั้นตอนที่ 1 วัดความเข้มข้นของแก๊สและแยกแก๊สออกมาโดยวิธีโครมาโตกราฟี

ขั้นตอนที่ 2 หากความเข้มข้นของแก๊ส (ppm) อย่างน้อยหนึ่งอย่างใน  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$  และ  $\text{C}_2\text{H}_4$  สูงกว่าค่า L1 สองเท่า (ดูตารางที่ 2.10) และแก๊สชนิดใดชนิดหนึ่งใน  $\text{CH}_6$ ,  $\text{CO}$  มีค่าเกิน L1 ถือว่ามีความผิดปกติ ดำเนินการขั้นตอนที่ 3 เพื่อพิจารณาความสมเหตุสมผลอัตราส่วน

ขั้นตอนที่ 3 พิจารณาความสมเหตุสมผลของอัตราส่วน ถ้าอัตราส่วนอย่างน้อยหนึ่งอย่างใน R1, R2, R3 และ R4 มากกว่าค่า L1 ถือว่าสมเหตุสมผล หากไม่ใช่อัตราส่วนจะไม่มีนัยสำคัญและควรเก็บตัวอย่างใหม่หรือใช้การตรวจสอบวิธีอื่น

ขั้นตอนที่ 4 เป็นที่เข้าใจว่าอัตราส่วนนั้นสมเหตุสมผลแล้ว อัตราส่วน R1, R2, R3 และ R4 จะถูกเปรียบเทียบกับค่าในตารางที่ 2.11

ขั้นตอนที่ 5 หากมีการดำเนินงานอย่างถูกต้อง จะสามารถระบุความผิดปกติในโดยตารางที่ 2.11 ได้อย่างถูกต้อง



หมายเหตุ: N คือ ไม่ใช่ และ Y คือ ใช่

รูปที่ 2.34 โพลซาร์จของวิธีการอัตราส่วน Doernenburg [27]

ตารางที่ 2.10 ปริมาณแก๊สอ้างอิง (L1) [27]

คีย์แก๊ส	ความเข้มข้น (ppm)
H <sub>2</sub>	100
CH <sub>4</sub>	120
CO	350
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	50
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.11 การประเมินความผิดปกติโดยใช้วิธีการอัตราส่วน Doernenburg [27]

ความผิดปกติ	อัตราส่วน R1 CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>		อัตราส่วน R2 C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>		อัตราส่วน R3 C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub>		อัตราส่วน R4 C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	
	น้ำมัน	Gas space	น้ำมัน	Gas space	น้ำมัน	Gas space	น้ำมัน	Gas space
1.การสลายตัวจากความร้อน	> 1.0	> 0.1	< 0.75	< 1.0	< 0.3	< 0.1	> 0.4	> 0.2
2.การดิสซาร์จบางส่วน	< 0.1	< 0.01	-		< 0.3	< 0.1	> 0.4	> 0.2
3.การอาร์ค	0.1 ถึง 1.0	0.01 ถึง 0.1	> 0.75	> 1.0	> 0.3	> 0.1	< 0.4	< 0.2

### 2.7.6.2 การประเมินความผิดปกติโดยใช้วิธีอัตราส่วน Rogers

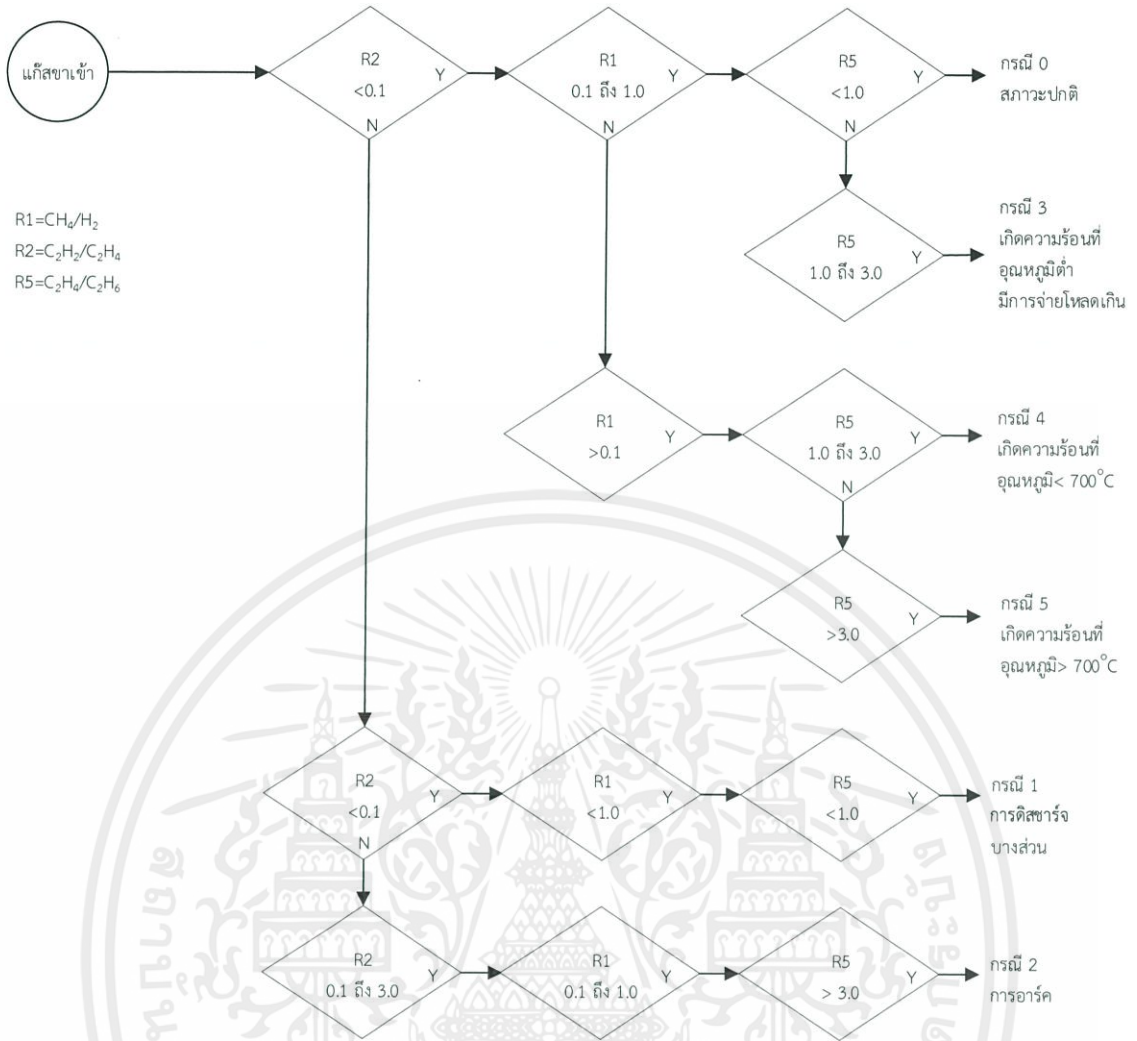
วิธีอัตราส่วน Rogers ใช้เพียงสามอัตราส่วนคือ อัตราส่วน R1, R2 และ R5 ความถูกต้องของวิธีนี้ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของผลลัพธ์ที่แสดงว่ามีความผิดปกติเกิดขึ้น ในลักษณะเดียวกับวิธี Doernenburg ซึ่งอัตราส่วน Rogers อาจมีเงื่อนไขที่ไม่ตรงกับตาราง ดังนั้นควรพิจารณาวิธีความเข้มข้นของแก๊สแต่ละชนิด และ TDCG และวิธีคีย์แก๊ส ร่วมด้วย

โดยการวิเคราะห์หมีดังต่อไปนี้

อัตราส่วน R1, R2 และ R5 จะถูกเปรียบเทียบกับค่าในตารางที่ 2.12 หากมีการดำเนินงานอย่างถูกต้อง จะสามารถระบุความผิดปกติในโดยตารางที่ 2.12 ได้อย่างถูกต้อง

ตารางที่ 2.12 การประเมินความผิดปกติโดยใช้วิธีอัตราส่วน Rogers [27]

กรณี	อัตราส่วน R2 C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	อัตราส่วน R1 CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>	อัตราส่วน R5 C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	การประเมินความผิดปกติ
0	< 0.1	0.1 – 1.0	< 0.1	สภาวะปกติ
1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	การดิสซาร์จ บางส่วน
2	0.1 – 3.0	0.1 - 1.0	> 3.0	การอาร์ค
3	< 0.1	0.1 – 1.0	1.0 ถึง 3.0	เกิดความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ
4	< 0.1	> 1.0	1.0 ถึง 3.0	เกิดความร้อนที่อุณหภูมิ < 700°C
5	< 0.1	> 1.0	> 3.0	เกิดความร้อนที่อุณหภูมิ > 700°C



R1=CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>  
 R2=C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>  
 R5=C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>

หมายเหตุ: N คือ ไม่ใช่ และ Y คือ ใช่

รูปที่ 2.35 โพลซาร์จของวิธีการอัตราส่วน Rogers [27]

### 2.7.7 การประเมินความผิดปกติโดยวิธี IEC Ratio [26]

วิธี IEC ratio ใช้อัตราส่วนในการประเมินดังนี้  $CH_4/H_2$ ,  $C_2H_4/C_2H_6$  และ  $C_2H_2/C_2H_4$  ซึ่งวิธี IEC ratio พัฒนามาจากวิธี Roger Ratio โดยสามารถวินิจฉัยความผิดปกติที่ทำให้ आयुณวนลดลง ได้แก่ ดิสชาร์จบางส่วนที่พลังงานต่ำและสูง ความผิดปกติเนื่องจากไฟฟ้าและความร้อน แต่วิธีนี้ไม่ได้จำแนก ความผิดปกติเนื่องจากไฟฟ้าและความร้อนออกเป็นช่วงย่อย โดยมีมาตรฐานอ้างอิงคือ IEC 60599

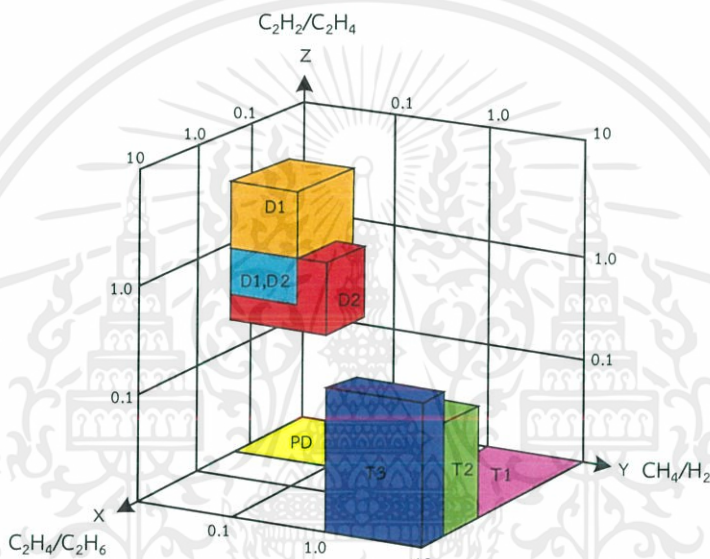
#### ตารางที่ 2.13 การประเมินความผิดปกติโดยวิธี IEC Ratio [26]

กรณี	ชนิดของ fault	$C_2H_2/C_2H_4$	$CH_4/H_2$	$C_2H_4/C_2H_6$
PD	ดิสชาร์จบางส่วน (หมายเหตุ 3 และ 4 )	NS <sup>1)</sup>	<0.1	<0.2
D1	ดิสชาร์จพลังงานต่ำ	>1	0.1 - 0.5	>1
D2	ดิสชาร์จพลังงานสูง	0.6 - 2.5	0.1 - 1	>2
T1	ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ น้อยกว่า 300°C	NS <sup>1)</sup>	>1 แต่ NS <sup>1)</sup>	<1
T2	ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ ระหว่าง 300°C ถึง 700°C	<0.1	>1	1 - 4
T3	ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ สูงกว่า 700°C	<0.2 <sup>2)</sup>	>1	>4
<p>หมายเหตุ 1: ในบางประเทศอัตราส่วน <math>C_2H_2/C_2H_6</math> มากกว่าอัตราส่วน <math>CH_4/H_2</math></p> <p>หมายเหตุ 2: ถ้ามีแก๊สตัวใดตัวหนึ่งมีค่าสูงผิดปกติให้คำนวณเฉพาะเจาะจงเป็นพิเศษ</p> <p>หมายเหตุ 3: อัตราส่วน <math>CH_4/H_2 &lt; 0.2</math> สำหรับดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเครื่องมือวัด และอัตราส่วน <math>CH_4 / H_2 &lt; 0.07</math> สำหรับดิสชาร์จบางส่วนในบุชชิ่ง</p> <p>หมายเหตุ 4: รูปแบบการสลายตัวของแก๊สมีความคล้ายคลึงกับการดิสชาร์จบางส่วนมีผลมาจากการสลายตัวของฟิล์มน้ำมันบาง ๆ เหนือแกนเหล็กที่อุณหภูมิ 140°C</p>				
<p>1) NS = ไม่มีนัยสำคัญ</p> <p>2) การเพิ่มขึ้นของค่า <math>C_2H_2</math> เป็นตัวบ่งบอกถึงจุดร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,000°C</p>				

ตารางที่ 2.14 การประเมินความผิดปกติโดยวิธี IEC Ratio อย่างง่าย [26]

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

วิธี IEC Ratio นอกจากตารางข้างต้นยังสามารถวินิจฉัยความผิดปกติได้ด้วยกราฟ ดังรูปที่ 2.36 โดยทำการดูตำแหน่งที่ได้บนกราฟ 3 มิติ ถ้าตำแหน่งที่กำหนดไม่อยู่ในช่วงที่มีให้ ให้หาระยะทางที่สั้นที่สุดจากจุดที่กำหนดค่าไปยังพื้นที่แล้วให้ผลลัพธ์เป็นไปตามพื้นที่นั้น



รูปที่ 2.36 กราฟอัตราส่วนแก๊สตามมาตรฐาน IEC [26]

## 2.7.8 การประเมินความผิดปกติโดยวิธี Duval Triangle [26,28]

Duval Triangle เป็นวิธีการวินิจฉัยฉนวนน้ำมันของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยเฉพาะหม้อแปลง ที่มีการพัฒนาจาก Michel Duval ที่ใช้แก๊สไฮโดรคาร์บอน 3 ชนิด ในการวินิจฉัย คือ มีเทน ( $\text{CH}_4$ ) เอทิลีน ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) และอะเซทิลีน ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) โดยที่แก๊สทั้ง 3 แก๊ส มีความสอดคล้องกับระดับพลังงานของแก๊สที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง โดยวิธี Duval Triangle ได้รับการพิสูจน์ถึงความถูกต้องและน่าเชื่อถือ ได้ถูกใช้งานเป็นเวลาหลายปี และในปัจจุบันยังเป็นที่นิยม ซึ่งข้อดี คือ เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดน้อย

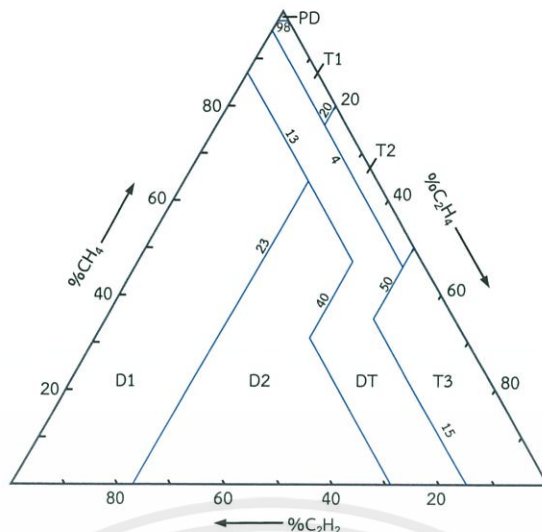
โดยทั่วไปแล้ว Duval Triangle สามารถวินิจฉัยความผิดปกติได้ 3 ประเภท คือ การดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) การดิสชาร์จพลังงานสูงและพลังงานต่ำ (Discharge of High and Low Energy) หรือความผิดปกติเนื่องจากไฟฟ้า (Electrical Fault) และจุดร้อนที่ช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ (Hot Spots) หรือความผิดปกติเนื่องจากความร้อน (Thermal Fault) ซึ่งแรกเริ่ม Duval Triangle ถูกใช้วินิจฉัยความผิดปกติภายในหม้อแปลงชนิดฉนวนน้ำมันแร่เท่านั้น ไม่สามารถใช้วินิจฉัยโพลด์แท็ปเชนเจอร์ชนิดน้ำมัน (Load Tap Changers; LTCs) และน้ำมันหม้อแปลงชนิดอื่นที่ไม่ใช่ฉนวนน้ำมันแร่ เช่น น้ำมันเอสเทอร์ธรรมชาติ (Natural Ester Oil) น้ำมันเอสเทอร์สังเคราะห์ (Synthetic Ester Oil) และน้ำมันซิลิโคน (Silicone Oil) โดยในปัจจุบัน Duval Triangle ได้มีการนำเสนอไว้ทั้งหมด 7 รูปแบบ เพื่อใช้อธิบาย และวินิจฉัยฉนวนน้ำมันได้ครอบคลุมมากขึ้น แต่มีเพียง Duval Triangle 1 และ Duval Triangle 2 เท่านั้นที่อยู่ในมาตรฐาน IEC 60599

### 2.7.8.1 Duval Triangle 1

Duval Triangle 1 ใช้ในการวินิจฉัยความผิดปกติจากน้ำมันแร่ (Mineral Oil; MO) ที่เป็นฉนวนน้ำมันภายในหม้อแปลง โดยแบ่งความผิดปกติออกเป็น 7 โซน ดังตารางที่ 2.15

ตารางที่ 2.15 ระบุโซนความผิดปกติของ Duval Triangle 1 [28]

โซน	ความผิดปกติ
PD	การดิสชาร์จบางส่วน
D1	การดิสชาร์จพลังงานต่ำ
D2	การดิสชาร์จพลังงานสูง
T1	ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า $300^{\circ}\text{C}$
T2	ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง $300^{\circ}\text{C}$ ถึง $700^{\circ}\text{C}$
T3	ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า $700^{\circ}\text{C}$
DT	ผสมระหว่างความผิดปกติเนื่องจากความร้อนและความผิดปกติทางไฟฟ้า



รูปที่ 2.37 Duval Triangle 1 [28]

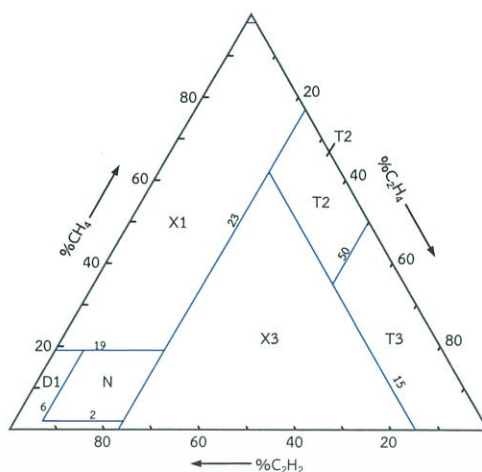
### 2.7.8.2 Duval Triangle 2

Duval Triangle 2 ใช้ในการวินิจฉัยความผิดปกติจากน้ำมันแร่ (Mineral Oil; MO) ที่เป็นฉนวนน้ำมันของโหลดแท็ปเซนเจอร์ (Load Tap Changers; LTCs) โดยโหลดแท็ปเซนเจอร์ในสภาวะการทำงานจะมีการอาร์คเป็นปกติ ในการวินิจฉัยความผิดปกติที่เกิดขึ้นในโหลดแท็ปเซนเจอร์จึงให้ความสำคัญกับการเกิดอาร์คภายในโหลดแท็ปเซนเจอร์ โดยแบ่งโซนออกเป็น 6 โซน ดังตารางที่ 2.16

ตารางที่ 2.16 ตารางระบุโซนความผิดปกติของ Duval Triangle 2 [28]

โซน	ความผิดปกติ
N	สภาวะทำงานปกติ
T3	ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 700°C
T2	ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 300°C ถึง 700°C
X3	ความผิดปกติเนื่องจากเกิดกระบวนการ Coking (T3 หรือ T2) หรือการดิสชาร์จพลังงานสูง (D2)
D1	การดิสชาร์จพลังงานต่ำ
X1	การเกิดดิสชาร์จพลังงานต่ำ (D1) หรือความผิดปกติเนื่องจากความร้อน

หมายเหตุ: เพื่อแยกความผิดปกติโซน D2 จากโซน T3 ให้ทำการล้างและเปลี่ยนน้ำมันภายในโหลดแท็ปเซนเจอร์ แล้วทำการใช้งานโหลดแท็ปเซนเจอร์ประมาณ 100 ครั้ง จากนั้นใช้ DGA เพื่อแยกแก๊ส และหาจุดบน Duval Triangle 2 ถ้าตำแหน่งยังคงเดิมเหมือนก่อนการเปลี่ยนน้ำมัน แสดงว่าเกิดความผิดปกติโซน D2 แต่ถ้าตำแหน่งถูกเลื่อนไปทางซ้าย แสดงว่าเกิดความผิดปกติโซน T3 มากขึ้น



รูปที่ 2.38 Duval Triangle 2 [28]

สำหรับโซน N ครอบคลุมทุกประเภทของโพลีเอทีพีเซนเจอร์ชนิดน้ำมัน แต่บางประเภทหรือยี่ห้อสามารถลดขอบเขตโซน N ให้เล็กลงได้ โดยขอบเขตของโซนสามารถกำหนดได้โดยใช้ผลของ DGA ขณะที่นำโพลีเอทีพีเซนเจอร์มาติดตั้งใหม่ หรือเมื่อทำการตรวจสอบการทำงานของโพลีเอทีพีเซนเจอร์

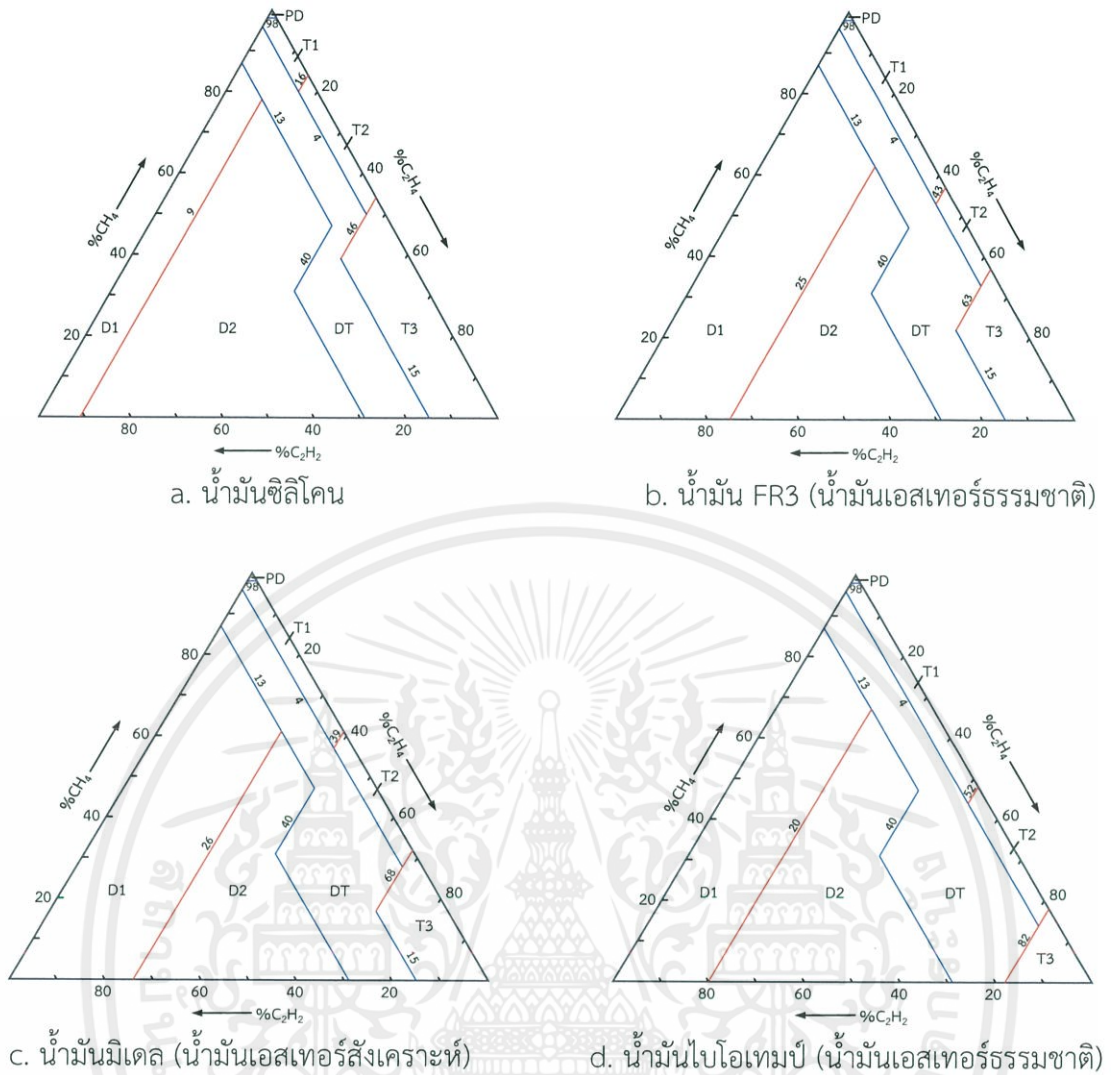
ถ้าแก๊ส C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> และ C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> มีปริมาณที่น้อยกว่า 10 ppm จะนำข้อมูลมาวินิจฉัยความผิดปกติเนื่องจากปริมาณแก๊สน้อย ซึ่งผลแก๊สที่ได้ อาจเกิดการปนเปื้อนของน้ำมันเก่า และอาจเกิดจากความผิดพลาดจากอุปกรณ์แยกแก๊ส

### 2.7.8.3 Duval Triangle 3

Duval Triangle 3 ใช้ในการวินิจฉัยความผิดปกติจากน้ำมันที่ไม่ใช่น้ำมันแร่ (Non-Mineral Oil) ที่เป็นฉนวนน้ำมันภายในหม้อแปลง

น้ำมันแร่ (Mineral Oil) เป็นฉนวนน้ำมันที่ใช้กันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีต แต่ในปัจจุบันฉนวนน้ำมันชนิดอื่นก็ถูกนำมาใช้งานมากขึ้น เนื่องจากมีความไวไฟต่ำกว่า หรือมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า จึงมีการจัดทำวิธีการวินิจฉัยความผิดปกติขึ้นมาใหม่ เพื่อรองรับฉนวนน้ำมันชนิดนั้น ๆ

การตรวจสอบความผิดปกติของหม้อแปลงที่ใช้ฉนวนน้ำมันที่ไม่ใช่น้ำมันแร่ มีวิธีการตรวจสอบที่ไม่มากนัก เนื่องจากเพิ่งเริ่มมีการใช้งาน และยังไม่ใช้อย่างแพร่หลาย เพื่อวินิจฉัยความผิดปกติของหม้อแปลงจากแก๊สที่เกิดขึ้นในฉนวนน้ำมัน จึงใช้การทดสอบโดยการจำลองความผิดปกติในห้องปฏิบัติ การในฉนวนน้ำมันชนิดอื่น ๆ ควบคู่กับน้ำมันแร่ ได้รูปแบบ Duval Triangle ดังรูปที่ 2.39



รูปที่ 2.39 Duval Triangle 3 [28]

2.7.8.4 Duval Triangles 4 และ 5

Duval Triangle 1 ได้รับการพิสูจน์แล้วว่ามีประสิทธิภาพอย่างมากในการระบุถึงสาเหตุของความผิดปกติที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง โดยใช้แก๊ส  $CH_4$ ,  $C_2H_4$  และ  $C_2H_2$  แต่เมื่อผลของ DGA อยู่ใกล้โซน PD และ T1 ทำให้ระบุชนิดความผิดปกติได้ยาก จึงได้สร้าง Duval Triangle ที่ใช้แก๊สที่เกิดขึ้นเกิดที่อุณหภูมิต่ำ (80-200°C) ซึ่งเรียกแก๊สเหล่านี้ว่า Stray Gas โดยเรียก Duval Triangle แบบใหม่นี้ว่า Duval Triangles 4 และ Duval Triangles 5

การใช้ Duval Triangles 4 and 5 ในวินิจฉัยความผิดปกติที่เกิดที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อยืนยันการวินิจฉัยความผิดปกติจากการเกิด PD, T1 หรือ T2 จาก Duval Triangles 1 เท่านั้น

ตารางที่ 2.17 ตารางระบุโซนความผิดปกติของ Duval Triangle 4 และ Duval Triangle 5 [28]

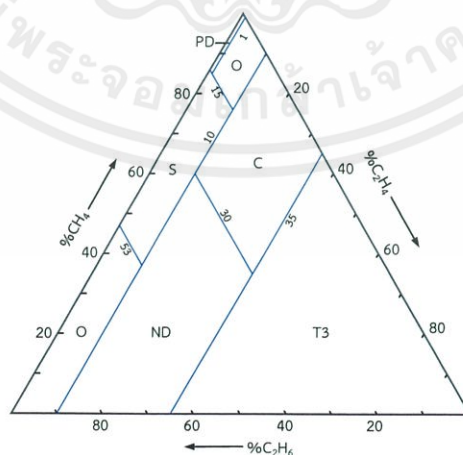
โซน	ความผิดปกติ
PD	การดิสซาร์จบางส่วนชนิดโคโรนา
S	Stray Gassing
C	ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนเกิดร่วมกับปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชันในกระดาษ (อุณหภูมิ>300°C)
O	ความร้อนเกิน (อุณหภูมิ<250°C)
ND	ไม่มีการระบุ

Duval Triangles 4 จะใช้แก๊ส 3 แก๊ส ที่เป็นแก๊สพลังงานต่ำ (Low-Energy Gas) ได้แก่  $H_2$ ,  $CH_4$  และ  $C_2H_6$



รูปที่ 2.40 Duval Triangle 4 [28]

Duval Triangles 5 ใช้ยืนยันความถูกต้องความผิดปกติที่ยังไม่แน่นอนจากการใช้ Duval Triangle 4 โดยใช้แก๊ส 3 แก๊ส ที่เรียกว่า Temperature Gases ได้แก่  $C_2H_4$ ,  $CH_4$  และ  $C_2H_6$



รูปที่ 2.41 Duval Triangle 5 [28]

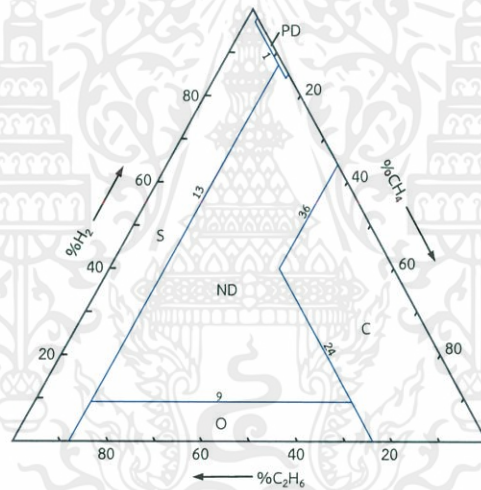
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.8.5 Duval Triangle 6

Duval Triangle 6 มีความคล้ายคลึงกับ Duval Triangle 4 ใช้ในการวินิจฉัยความผิดปกติจากน้ำมัน FR3 เมื่อ Duval Triangle 3 สำหรับน้ำมัน FR3 ไม่สามารถระบุได้ว่าเกิดความผิดปกติ PD, T1 หรือ T2 โดยใช้การวิเคราะห์จากแก๊ส  $H_2$ ,  $CH_4$  และ  $C_2H_6$

ตารางที่ 2.18 ตารางระบุโซนความผิดปกติของ Duval Triangle 6 [28]

โซน	ความผิดปกติ
PD	การดิสซาร์จบางส่วนชนิดโคโรนา
S	Stray Gassing
C	ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนเกิดร่วมกับปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชันในกระดาด (อุณหภูมิ > 300°C)
O	ความร้อนเกิน (อุณหภูมิ < 250°C)
ND	ไม่มีการระบุ



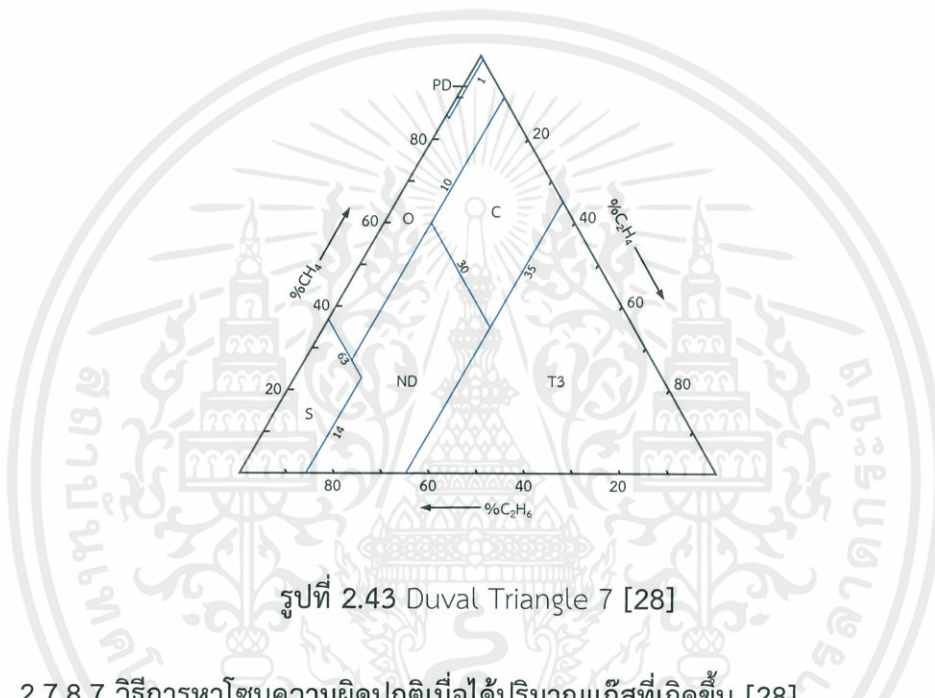
รูปที่ 2.42 Duval Triangle 6 [28]

### 2.7.8.6 Duval Triangle 7

Duval Triangle 7 มีความคล้ายคลึงกับ Duval Triangle 5 ใช้ในการวินิจฉัยฉนวนน้ำมัน FR3 เมื่อ Triangle 3 สำหรับน้ำมัน FR3 ไม่สามารถระบุได้ว่าเกิดความผิดปกติ PD, T1 หรือ T2 โดยใช้การวิเคราะห์จากแก๊ส  $CH_4$ ,  $C_2H_4$  และ  $C_2H_6$

ตารางที่ 2.19 ตารางระบุโซนความผิดปกติของ Duval Triangle 7 [28]

โซน	ความผิดปกติ
PD	การดีสซาร์จบางส่วน
S	Stray Gassing
C	ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนเกิดร่วมกับปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชันในกระดาศ (อุณหภูมิ>300°C)
O	ความร้อนเกิน (อุณหภูมิ<250°C)
T3	ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 700°C
ND	ไม่มีการระบุ



รูปที่ 2.43 Duval Triangle 7 [28]

### 2.7.8.7 วิธีการหาโซนความผิดปกติเมื่อได้ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น [28]

จากทั้งสามด้านของสามเหลี่ยมจะแสดงค่าพิกัดที่บ่งบอกถึงสัดส่วนของแก๊ส  $C_2H_2$ ,  $C_2H_4$  และ  $CH_4$  ในแต่ละด้าน ตั้งแต่ 0 ถึง 100%

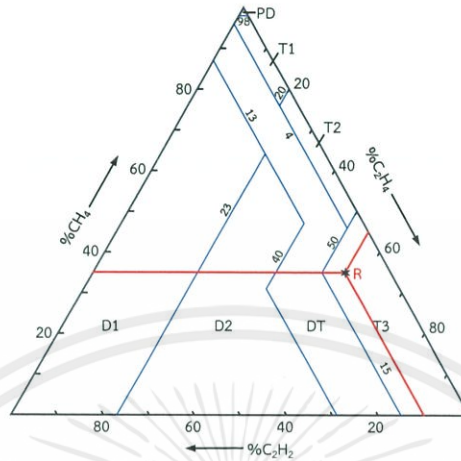
เมื่อการทำการแยกแก๊สจากน้ำมัน จะได้แก๊ส ในหน่วย ppm โดยที่  $C_2H_2 = x$ ,  $C_2H_4 = y$  และ  $CH_4 = z$  แล้วทำการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปพิกัดด้านสามเหลี่ยมก่อนทำการพล็อตลงบนรูปสามเหลี่ยม โดยทำการรวมค่าปริมาณแก๊สทั้งสามแก๊ส  $x + y + z$  จากนั้นทำการคำนวณเปอร์เซ็นต์ของแก๊สทั้งสามแก๊ส จะได้ดังนี้

$$\%C_2H_2 = \frac{100x}{x+y+z}$$

$$\%C_2H_4 = \frac{100y}{x+y+z}$$

$$\%CH_4 = \frac{100z}{x+y+z}$$

ตัวอย่าง ถ้าผลของการแยกแก๊สได้  $x = 20$  ppm,  $y = 110$  ppm และ  $z = 70$  ppm จะได้  $C_2H_2 = 10\%$ ,  $C_2H_4 = 55\%$  และ  $CH_4 = 35\%$  นำไปพล็อตในรูปสามเหลี่ยม ซึ่งจะจุด R ได้ดังรูป และได้ผลการวินิจฉัยอยู่ในโซน T3 ซึ่งเกิดความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า  $700^\circ C$



รูปที่ 2.44 ตัวอย่างของจุดที่แสดงบน Duval Triangle 1 [28]

### 2.7.9 การประเมินความผิดปกติโดยวิธี Duval Pentagon [29]

Duval Pentagon เป็นหนึ่งในวิธีการแปลความหมายของการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน (DGA) สำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีน้ำมันเป็นฉนวน โดยใช้อัตราส่วนที่ 40% ของแก๊สไฮโดรคาร์บอน 5 ชนิด คือ แก๊สไฮโดรเจน ( $H_2$ ) อะเซทิลีน ( $C_2H_2$ ) เอทิลีน ( $C_2H_4$ ) มีเทน ( $CH_4$ ) และอีเทน ( $C_2H_6$ ) เรียงตามเข็มนาฬิกา การใช้งานที่อัตราส่วนที่ 40% ของแก๊สไฮโดรคาร์บอน เนื่องจากเมื่อหาจุดศูนย์กลางของห้าเหลี่ยมของแก๊ส พบว่าจะอยู่ที่ตำแหน่งไม่เกิน 40% บนแกนแก๊ส

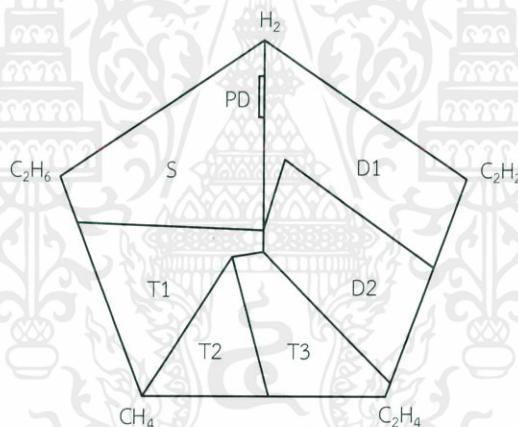
มีการใช้งาน Duval Pentagon ดังนี้ Duval Pentagon 1 และ Duval Pentagon 2 สำหรับน้ำมันแร่ และ Duval Pentagon 3 สำหรับน้ำมันเอสเทอร์ ประกอบด้วย น้ำมันเรพซีด (Rapeseed) น้ำมัน FR3 (Soybean) น้ำมันดอกทานตะวัน (Sun flower) น้ำมันมิเดล (Midel)

### 2.7.9.1 Duval Pentagon 1

Duval Pentagon 1 ใช้ในการวินิจฉัยสำหรับน้ำมันแร่ ซึ่งประกอบด้วยความผิดปกติพื้นฐาน 6 ชนิด คือ ความผิดปกติจากความร้อน และความผิดปกติจากไฟฟ้า

ตารางที่ 2.20 ระบุโซนความผิดปกติของ Duval Pentagon 1 [29]

โซน	ความผิดปกติ
PD	การดิสชาร์จบางส่วน (โคโรนา)
D1	การดิสชาร์จพลังงานต่ำ (รวมถึงการสปาร์ก)
D2	การดิสชาร์จพลังงานสูง
T3	ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 700°C
T2	ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 300°C ถึง 700°C
T1	ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300°C
S-120 และ S-200	Stray Gassing ในน้ำมันที่อุณหภูมิ 120°C และ 200°C



รูปที่ 2.45 Duval Pentagon 1 [29]

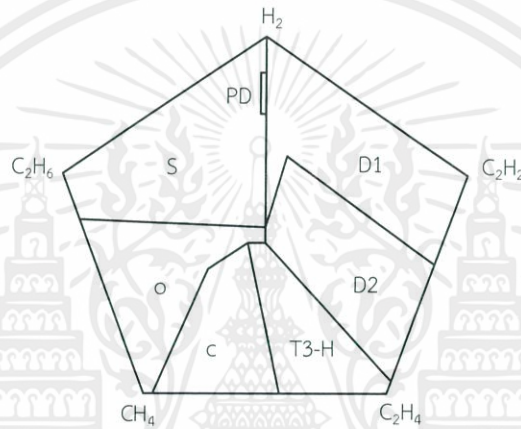
### 2.7.9.2 Duval Pentagon 2

Duval Pentagon 2 ประกอบไปด้วยความผิดปกติจากไฟฟ้าพื้นฐาน 3 โซน คือ PD, D1 และ D2 และเพิ่มโซนที่ระบุถึงปัญหาอย่างแม่นยำ 4 โซน ประกอบด้วย

- T3-H: ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นเฉพาะในน้ำมัน
- C: การเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชันในกระดาษ
- O: ความร้อนเกิน (อุณหภูมิต่ำกว่า 250°C)
- S: Stray Gassing ในน้ำมันที่อุณหภูมิ 120°C และ 200°C ที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ (Laboratory)

ตารางที่ 2.21 ระบุโซนความผิดปกติของ Duval Pentagon 2 [29]

โซน	ความผิดปกติ
PD	การดิสซาร์จบางส่วน (โคโรนา)
D1	การดิสซาร์จพลังงานต่ำ (รวมถึงการสปาร์ก)
D2	การดิสซาร์จพลังงานสูง
S-120 และ S-200	Stray Gassing ในน้ำมันที่อุณหภูมิ 120°C และ 200°C
O	ความร้อนเกิน (อุณหภูมิต่ำกว่า 250°C )
T3-H	ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นเฉพาะในน้ำมัน
C	การเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนในเซชันในกระดาษ

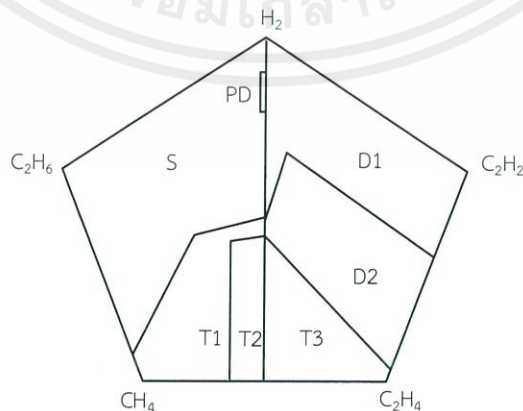


รูปที่ 2.46 Duval Pentagon 2 [29]

### 2.7.9.3 Duval Pentagon 3

Duval Pentagon 3 ใช้วินิจฉัยสำหรับน้ำมันเอสเทอร์ ดังต่อไปนี้

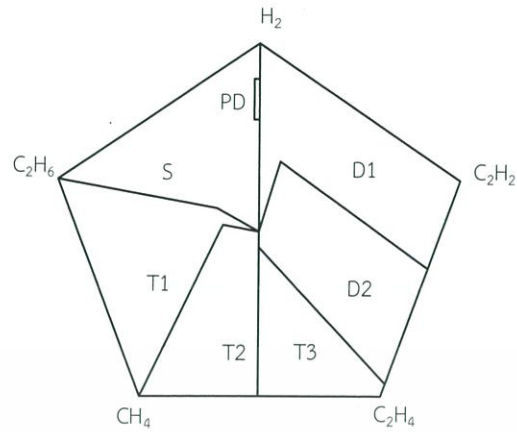
1. Duval Pentagon 3 สำหรับน้ำมันดอกทานตะวัน



รูปที่ 2.47 Duval Pentagon 3 สำหรับน้ำมันดอกทานตะวัน [29]

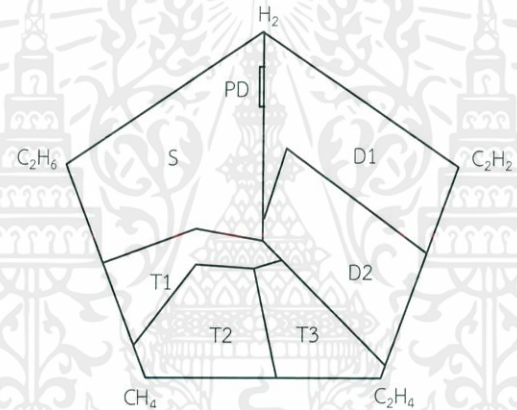
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. Duval Pentagon 3 สำหรับน้ำมันเรพซีด (Rapeseed)



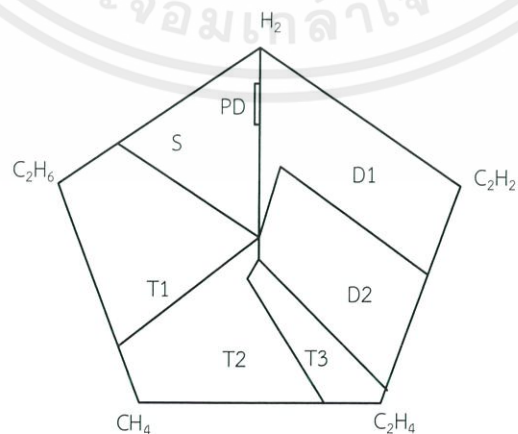
รูปที่ 2.48 Duval Pentagon 3 สำหรับน้ำมันเรพซีด (Rapeseed) [29]

## 3. Duval Pentagon 3 สำหรับน้ำมันมิเดล (Midel)



รูปที่ 2.49 Duval Pentagon 3 สำหรับน้ำมันมิเดล (Midel) [29]

## 4. Duval Pentagon 3 สำหรับน้ำมัน FR3



รูปที่ 2.50 Duval Pentagon 3 สำหรับน้ำมัน FR3 [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.7.9.4 วิธีการหาโซนความผิดปกติใน Duval Pentagon [30]

การหาโซนความผิดปกติใน Duval Pentagon จะนำเปอร์เซ็นต์ของแก๊สไฮโดรเจน ( $H_2$ ) มีเทน ( $CH_4$ ) อีเทน ( $C_2H_6$ ) เอทิลีน ( $C_2H_4$ ) และอะเซทิลีน ( $C_2H_2$ ) มาพิจารณา เพื่อหาความผิดปกติที่เกิดขึ้น โดยสามารถหาเปอร์เซ็นต์ของแก๊สได้จาก ปริมาณแก๊ส (ppm) ต่อปริมาณแก๊สทั้งหมดทั้งหมดที่ได้นี้

$$\%H_2 = \frac{H_2 \text{ (ppm)}}{H_2 + CH_4 + C_2H_6 + C_2H_4 + C_2H_2 \text{ (ppm)}}$$

$$\%CH_4 = \frac{CH_4 \text{ (ppm)}}{H_2 + CH_4 + C_2H_6 + C_2H_4 + C_2H_2 \text{ (ppm)}}$$

$$\%C_2H_6 = \frac{C_2H_6 \text{ (ppm)}}{H_2 + CH_4 + C_2H_6 + C_2H_4 + C_2H_2 \text{ (ppm)}}$$

$$\%C_2H_4 = \frac{C_2H_4 \text{ (ppm)}}{H_2 + CH_4 + C_2H_6 + C_2H_4 + C_2H_2 \text{ (ppm)}}$$

$$\%C_2H_2 = \frac{C_2H_2 \text{ (ppm)}}{H_2 + CH_4 + C_2H_6 + C_2H_4 + C_2H_2 \text{ (ppm)}}$$

โดยเปอร์เซ็นต์ของแก๊สแต่ละชนิดจะนำไปพล็อตระหว่างจุดศูนย์กลางของห้าเหลี่ยม (0%) และมุมของห้าเหลี่ยม (100%) จากนั้นหาจุดศูนย์กลางของแก๊สทั้งห้าจุดที่เป็นรูปห้าเหลี่ยมด้านไม่เท่า ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ โดยสร้างแกน X-Y ที่จุดมีกำเนิดอยู่ที่จุดศูนย์กลางของห้าเหลี่ยมด้านเท่า มีขั้นตอนดังนี้

1. หาพิกัด ( $x_i, y_i$ ) ของแก๊สแต่ละจุด ดังนี้

$x_i = (\% \text{ แก๊ส}) \times \cos \alpha$  และ  $y_i = (\% \text{ แก๊ส}) \times \cos(90^\circ - \alpha)$  ซึ่ง  $\alpha =$  มุมของแกนแก๊สเทียบกับแกน X

2. หลังจากได้พิกัด ( $X_i, Y_i$ ) ของแก๊สทั้งห้าจุด สามารถคำนวณหาจุดศูนย์กลางของแก๊สได้ดังนี้

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

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

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

โดยที่ ( $X_i, Y_i$ ) คือ พิกัดของแก๊สแต่ละจุด

( $C_x, C_y$ ) คือ พิกัดของจุดศูนย์กลางห้าเหลี่ยมด้านไม่เท่า

A คือ ขนาดพื้นที่ของห้าเหลี่ยมด้านไม่เท่า

3. นำจุดศูนย์กลางของแก๊ส ( $C_x, C_y$ ) ที่ได้จากข้อ 2 เทียบกับรูปแบบ Duval Pentagon ที่ต้องการพิจารณา

## 2.8 รูปแบบมาตรฐานสำหรับแรงดันกระแสสลับเพื่อการทดสอบ [3,31]

ค่าแรงดันกระแสสลับที่ใช้ทดสอบต้องมีความใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ โดยถูกกำหนดโดยค่าสูงสุด เนื่องจากเป็นค่าที่มีความเครียดสูงสุดที่ส่งผลกับกระบวนการเบรกดาวน เมื่อเทียบกับค่า rms ค่าแรงดันทดสอบถูกนิยามโดย

$$V_T = \frac{V_{\text{peak}}}{\sqrt{2}} = \frac{V_{\text{peak}+} + |V_{\text{peak}-}|}{2\sqrt{2}} \quad (2.3)$$

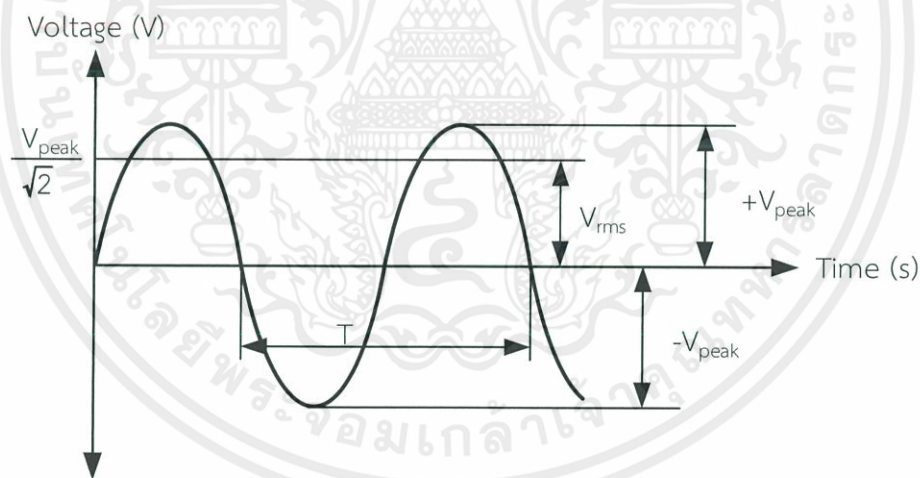
ถ้าค่าสูงสุดที่ทั้งสองขั้วมีค่าต่างกัน ค่าเฉลี่ยของค่าทั้งสองจะถูกนำไปใช้เป็นค่าสูงสุดแทน ในบางกรณีของการทดสอบ อาจใช้ค่า rms แทน เช่น การหาอิทธิพลของความร้อนต่อการเบรกดาวน

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt} \quad (2.4)$$

เมื่อ T คือ ช่วงเวลาหนึ่งคาบ โดยลูกคลื่นทางขั้วบวกและขั้วลบ ควรมีความสมมาตรกัน ซึ่งมีความต่างไม่เกิน 2% โดยช่วงความถี่ยอมรับได้ของแรงดันทดสอบอยู่ที่ 45-65 Hz ( $\pm 5\text{Hz}$ ) ตามมาตรฐาน IEC 60060-1: 2010

$$|\Delta v| = \left| \frac{V_{\text{peak}+} + |V_{\text{peak}-}|}{V_{\text{peak}+}} \right| < 0.02 \quad (2.5)$$

ตัวแปรต่าง ๆ ของการทดสอบแรงดันกระแสสลับ



รูปที่ 2.51 รูปคลื่นมาตรฐานสำหรับแรงดันกระแสสลับ [31]

เนื่องจากรูปคลื่นมีความหลากหลายได้หลายรูปแบบจึงกำหนดรูปของรูปคลื่นของแรงดันทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60060-1: 2010 ที่นิยามค่าประกอบของค่าสูงสุดว่าเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูงสุดกับค่า rms ควรมีค่าเท่ากับ  $\sqrt{2}$  โดยอยู่ในช่วง  $\pm 5\%$  ซึ่งหมายความว่าดังนี้

$$1.344 \leq \left| \frac{V_{\text{peak}}}{V_{\text{rms}}} \right| \leq 1.485 \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการนิยามดังสมการ 2.17 ครอบคลุมถึงเพียงค่าสูงสุดเพียงเท่านั้นโดยไม่ได้พิจารณาถึงรูปคลื่นของแรงดันทดสอบ ซึ่งอาจเพียงพอต่อการทดสอบความทนทานต่อแรงดัน หรือการทดสอบเบรกดาว์น แต่จะไม่ครอบคลุมถึงการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนที่ได้รับผลจากการทดสอบแรงดันด้วย

ซึ่งรูปคลื่นที่ได้จะมีฮาร์โมนิก จึงนำค่า Total Harmonic Distortion (THD) มาพิจารณา โดยคำนวณจากค่าสูงสุดของแต่ละฮาร์โมนิก ( $V_{n,peak}$ ) ที่ปรากฏบนคลื่นความถี่หลัก (ค่าสูงสุดคือ  $V_{1,peak}$ )

$$THD = \frac{1}{V_{1,peak}} \sqrt{\sum_{n=2}^m V_{n,peak}^2} \quad (2.7)$$

ในมติการประชุมทางเทคนิคของ IEC ครั้งที่ 42 ได้มีการหารือที่จะนำค่าที่ยอมรับได้มากที่สุดที่ 5% ของค่า THD แต่ IEC 60060-1 แต่ยังไม่ถูกตีพิมพ์ในการแก้ไขครั้งล่าสุดในปี 2010 โดยการดิสชาร์จบางส่วน ยังส่งผลให้เกิดพัลส์กระแสสูงใหญ่ที่ส่งผลให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะ ( $\Delta V$ ) โดยใน IEC 60060-1: 2010 ยอมให้  $\Delta V/V_t < 20\%$  โดยที่มาตรฐานไม่ได้ระบุช่วงเวลาที่ยอมให้เกิดแรงดันตกไว้อย่างชัดเจน

สำหรับเวลาที่ใช้ในการทดสอบ  $T_t$  ที่น้อยกว่า 1 นาที ให้มีความผิดพลาดได้  $\pm 1\%$  สำหรับ  $T_t$  ที่มากกว่า 1 นาที ให้ได้ที่  $\pm 3\%$  โดยยังมีคาบเวลามากในการทดสอบจำเป็นจะต้องมีความผิดพลาดได้มากกว่าเนื่องจากใช้เวลาในการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่จ่ายให้ใช้เวลาดำเนินมากเช่นกันนั่นเอง

## 2.9 ทฤษฎีการสร้าง และการวัดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า [3,31]

แรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันที่มีรูปคลื่นเลียนแบบมาจากแรงดันเกินเสิร์จทรานเซียนต์ที่เกิดจากเหตุภายนอก ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ฟ้าผ่าเรียกว่า แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า และที่เกิดขึ้นจากสาเหตุภายในระบบส่งจ่ายเอง คือ เกิดจากการทำงานของสวิตช์ หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ เมื่อมีความผิดพลาดเกิดขึ้นในระบบเรียกว่า แรงดันอิมพัลส์สวิตชิง

### 2.9.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน

แรงดันอิมพัลส์มาตรฐานอาจกำหนดด้วยข้อกำหนดต่อไปนี้

- ขนาดของแรงดัน โดยปกติจะหมายถึงค่ายอดของรูปคลื่นแรงดัน ในกรณีที่มีระลอกซ้อนที่ เกิดจากออสซิลเลชันใกล้ๆยอดรูปคลื่น ให้ถือเอาค่าเฉลี่ยจากค่ายอดรูปคลื่นระลอก

- ขั้วของแรงดันอาจเป็นขั้วบวกหรือลบ เมื่อเทียบกับดิน

- เวลาช่วงหน้าคลื่น  $T_1$  หมายถึงช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากค่าศูนย์จนถึงค่ายอด

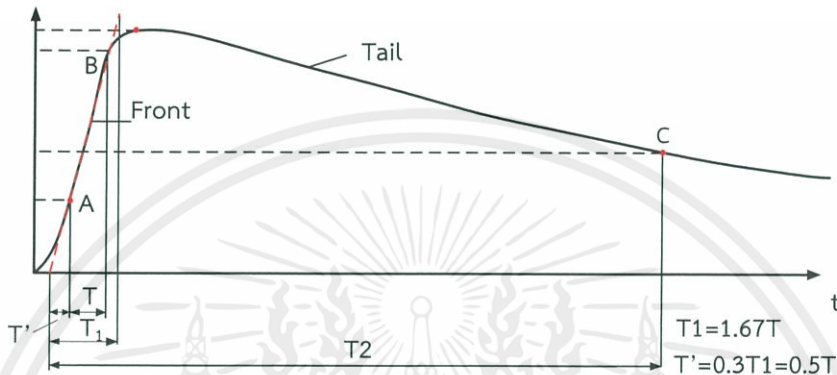
- เวลาช่วงหางคลื่น  $T_2$  หมายถึงช่วงเวลาตั้งแต่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านค่ายอด

จนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด

รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์อาจแบ่งได้เป็น

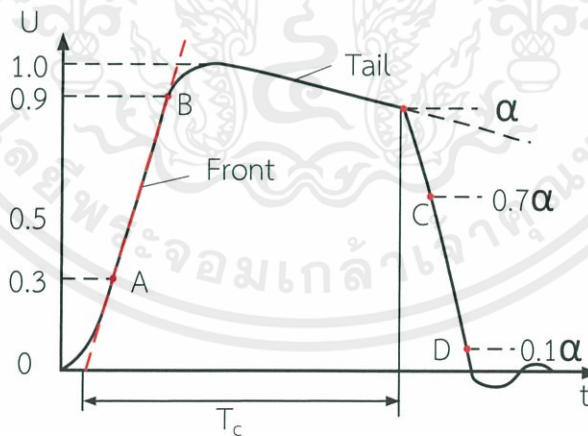
1) รูปคลื่นเต็ม (Full Wave) ซึ่งหมายถึงรูปคลื่นที่มีขนาดเพิ่มขึ้นถึงค่ายอด แล้วค่อย ๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเป็นศูนย์

2) รูปคลื่นตัด (Chopped Wave) ซึ่งเกิดจากการบ่อนแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มเข้าไปที่วัสดุทดสอบ และการฉนวนของวัสดุทดสอบนั้นทนต่อแรงดันที่บ่อนเข้าไปไม่ได้ จึงเกิดการสปาร์กผ่าน เกิดวาบไฟตามผิว หรือเกิดเบรกดาวนจ์กะทันหัน ทำให้เกิดการลัดวงจร ณ จุดนั้น โดยคลื่นตัดสามารถเกิดขึ้นทั้งส่วนหางคลื่น หรือส่วนหน้าคลื่น

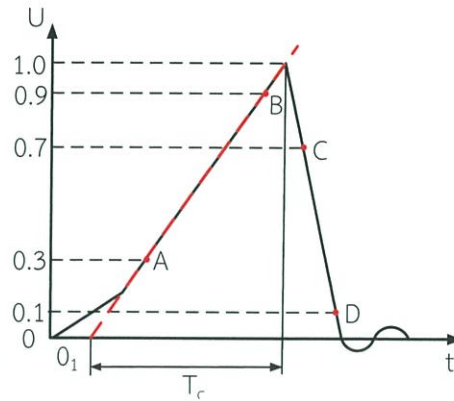


รูปที่ 2.52 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม [31]

รูปคลื่นตัดมีส่วนกำหนดที่สำคัญ คือ เวลาช่วงคลื่นตัด (Chopped Time,  $T_c$ ) ถ้ารูปคลื่นตัดที่หางคลื่น ขนาดของแรงดัน คือ ค่ายอด (Peak) แต่ถ้ารูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่นขนาดของแรงดันคือค่าที่ได้ ณ จุดตัด ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของรูปคลื่นที่เหลือ



รูปที่ 2.53 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตัดหน้าคลื่น [31]



รูปที่ 2.54 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตัดหน้าคลื่น [31]

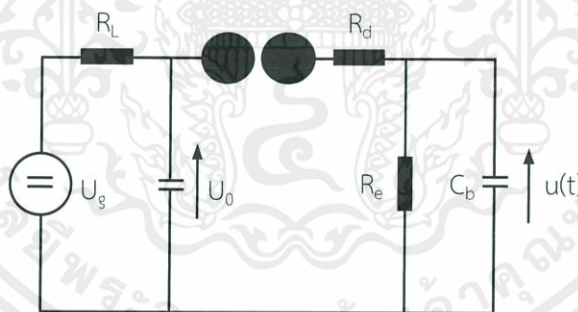
แรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐาน สามารถสร้างได้โดยหาค่า  $T_1$ ,  $T_2$  หรือ  $T_c$  โดยวิธีที่แสดงในรูปให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดต่อไปนี้

- เวลาช่วงหน้าคลื่น  $T_1 = 1.2 \mu\text{s} \pm 30\%$  คือ จะต้องอยู่ในช่วง  $0.84 - 1.56 \mu\text{s}$
- เวลาช่วงหลังคลื่น  $T_2 = 50 \mu\text{s} \pm 20\%$  คือ จะต้องอยู่ในช่วง  $40 - 60 \mu\text{s}$
- ค่ายอดแรงดัน  $U_m$  ยอมให้ผิดพลาดได้  $\pm 3\%$  ของค่าที่ระบุรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

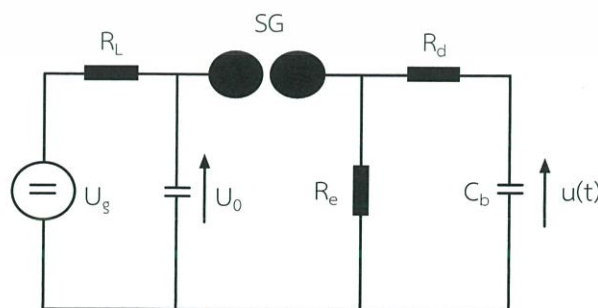
### 2.9.2 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

วงจรพื้นฐานที่ใช้สร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ามี 2 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.55 และรูปที่

2.56



รูปที่ 2.55 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดอิมพัลส์ วงจร A [31]



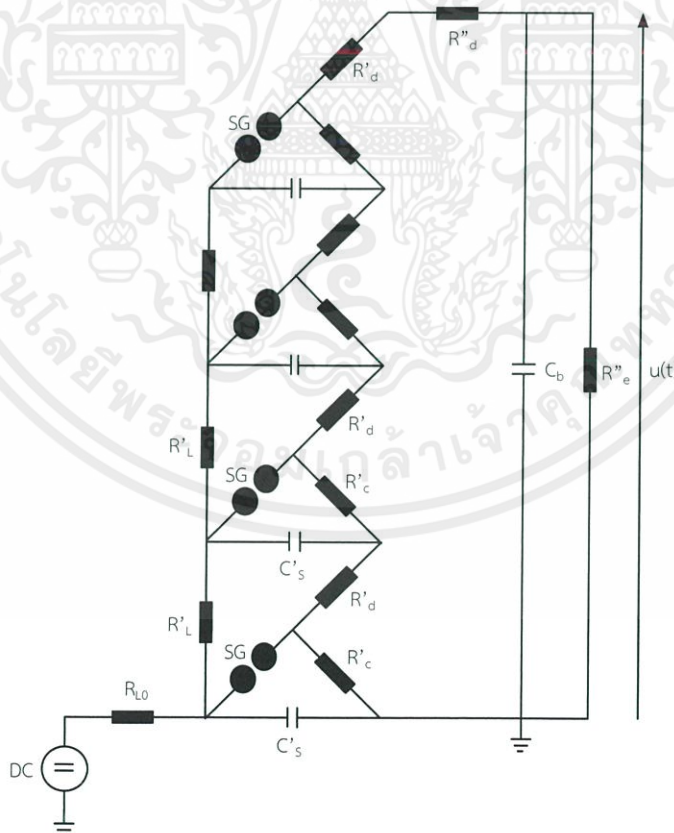
รูปที่ 2.56 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดอิมพัลส์ วงจร B [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดยที่  $U_g$  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

### 2.9.3 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าหลายชั้น

จากวงจรพื้นฐานของการสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ปกติจะออกแบบให้สร้างแรงดันได้ถึง 200 kV ซึ่งไม่เพียงพอสำหรับการทดสอบ BIL ของอุปกรณ์ที่ใช้กับแรงดันระบบ 52 kV หรือสูงกว่าค่าแรงดันอิมพัลส์สูง ๆ อาจสร้างได้ด้วยเครื่องกำเนิดอิมพัลส์แบบหลายชั้น โดยใช้วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ ตามหลักการของมาร์กซ์ (Marx's Circuit) ดังรูปที่ 2.57 ความหมายของสัญลักษณ์ในวงจร จะเหมือนกับวงจรชั้นพื้นฐาน (เครื่องหมาย ' แสดงถึงเป็นค่าต่อชั้น และเครื่องหมาย " แสดงถึงองค์ประกอบภายนอกที่เพิ่มขึ้นเพื่อปรับรูปคลื่น)



รูปที่ 2.57 วงจรเครื่องกำเนิดอิมพัลส์แบบหลายชั้นตามวงจรมาร์กซ์ [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าองค์ประกอบในวงจร

$C'_s$  : ค่าเก็บประจุอิมพัลส์ต่อชั้น

$C_B$  : ค่าเก็บประจุโหลด

$R'_d$  : ความต้านทานปรับหน้าคลื่นต่อชั้น

$R''_d$  : ความต้านทานปรับหน้าคลื่นภายนอก

$R'_e$  : ความต้านทานปรับหางคลื่นต่อชั้น

$R''_e$  : ความต้านทานปรับหางคลื่นภายนอก

เมื่อเกิดสปาร์กวงจรจะต่อกันแบบอนุกรมจะได้ค่ารวมเป็น

$$U_0 = nU'_0$$

$$C_S = C'_s/n$$

$$R_d = nR'_d$$

$$R_e = nR'_e$$

## 2.10 การเก็บตัวอย่างน้ำมัน [32]

### 2.10.1 ภาชนะเก็บตัวอย่าง

ตารางที่ 2.22 ภาชนะเก็บตัวอย่างสำหรับการทดสอบน้ำมัน [32]

ชนิดการทดสอบ \ ภาชนะเก็บตัวอย่าง	ไซรินจ์แก้ว	ขวดแก้ว	ขวดพลาสติก	ปริมาณน้ำมัน (ml)
DGA	ได้	ได้		25-100
น้ำ	ได้	ได้		20
ความแข็งแรงของฉนวน	ได้	ได้	ได้	200
อนุภาค	ได้	ได้	ได้	100
การเบรกดาวน		ได้		500-1000
การทดสอบอื่น ๆ ทางฟิสิกส์ และเคมี		ได้	ได้	250

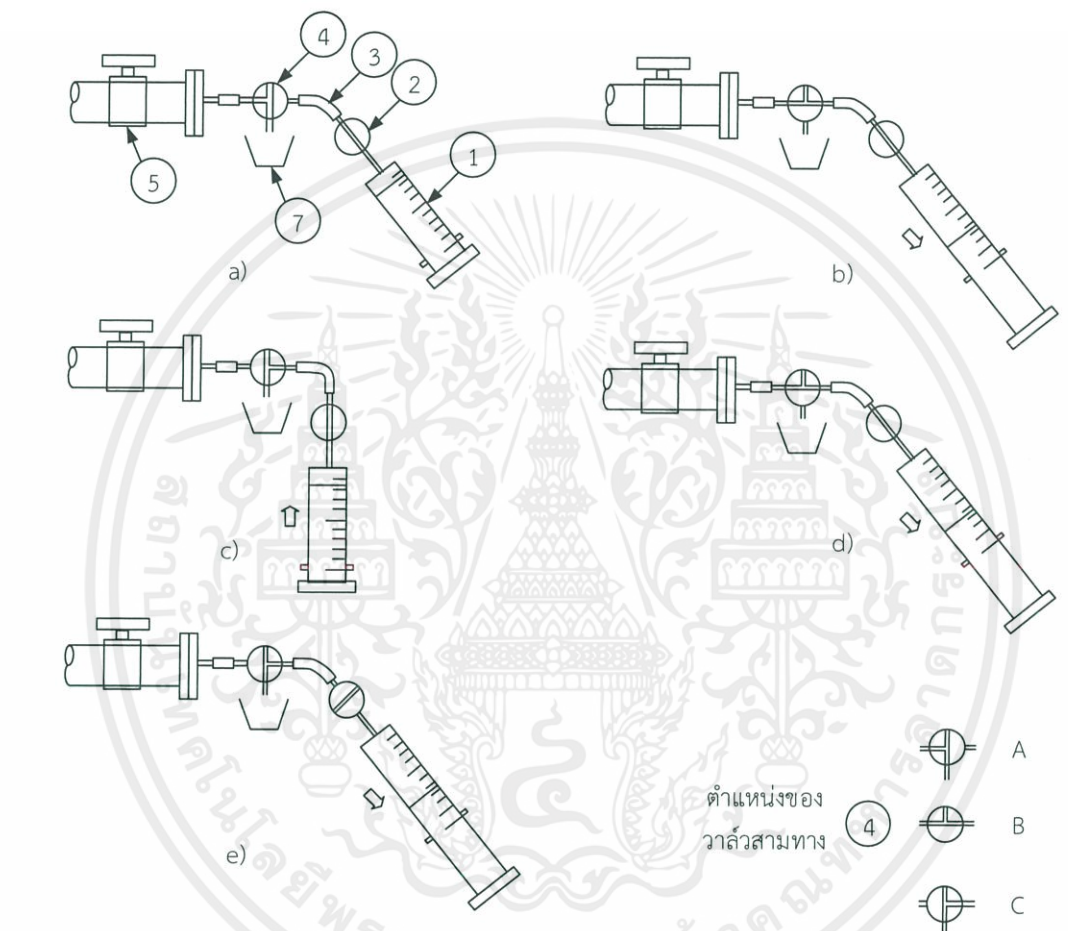
หมายเหตุ: สำหรับการทดสอบ DGA ต้องทำให้น้ำมันสัมผัสกับอากาศน้อยที่สุด และห้ามใช้ขวดพลาสติก

การทดสอบทางฟิสิกส์และเคมีอื่น ๆ คือ การทดสอบฟลูแรน ความหนืด ความหนาแน่น และความเป็นกรด เป็นต้น

### 2.10.2 การทำความสะอาดตำแหน่งเก็บตัวอย่าง

การทำความสะอาดอุปกรณ์เก็บตัวอย่าง และตำแหน่งเก็บตัวอย่าง เป็นการป้องกันการปนเปื้อนของตัวอย่างน้ำมัน สำหรับวาล์วต้องมีการปล่อยน้ำมัน (โดยทั่วไปสองถึงห้าลิตร) ให้ไหลอย่างรวดเร็วเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อน (น้ำและอนุภาค) ที่อาจสะสมในวาล์ว และใช้ถุงมือที่ทำจากยางไนไตรต์ ต้องมีการทำความสะอาดตำแหน่งเก็บตัวอย่างทุกครั้งที่มีการเก็บตัวอย่างใหม่

### 2.10.3 การเก็บตัวอย่างน้ำมันด้วยไซรินจ์



รูปที่ 2.58 การเก็บตัวอย่างน้ำมันด้วยไซรินจ์ [32]

- |                      |                           |
|----------------------|---------------------------|
| (1) คือ ไซรินจ์      | (4) คือ วาล์วสามทาง       |
| (2) คือ วาล์วเปิดปิด | (5) คือ วาล์วเก็บตัวอย่าง |
| (3) คือ ท่อต่อ       | (7) คือ ถังทิ้ง           |

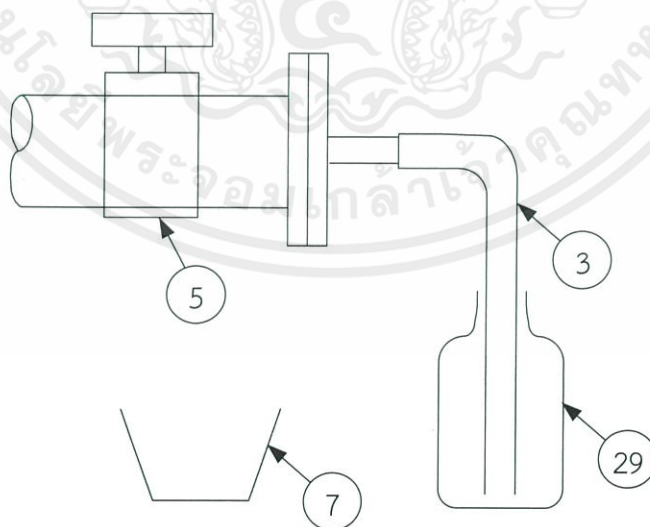
การเก็บตัวอย่างน้ำมันด้วยไซรินจ์มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) เชื่อมต่ออุปกรณ์ตามรูปที่ 2.58 a) โดยที่วาล์วเก็บตัวอย่างเปิดอยู่
- 2) ปรับวาล์วสามทางไปที่ตำแหน่ง A เพื่อปล่อยน้ำมันทั้ง 1 ถึง 2 ลิตร ลงในถัง
- 3) ปรับวาล์วสามทางไปที่ตำแหน่ง B เพื่อให้ไขมันไหลเข้าไซรินจ์ช้า ๆ (รูปที่ 2.58 b)) โดยไม่ควรถอดก้านสูบออก เพียงเคลื่อนก้านสูบตามแรงดันของน้ำมัน
- 4) ปรับวาล์วสามทางไปที่ตำแหน่ง C เพื่อปล่อยน้ำมันลงถังทั้ง และกีดก้านสูบไล่อากาศออกจากไซรินจ์ โดยที่ไซรินจ์ควรอยู่ในแนวตั้งให้หัวของไซรินจ์อยู่ด้านบน (รูปที่ 2.58 c)) โดยต้องมั่นใจว่าน้ำมันอยู่ในไซรินจ์จนเต็ม
- 5) ทำขั้นตอนที่ 3 และขั้นตอนที่ 4 ซ้ำจนกว่าน้ำมันไม่มีฟองอากาศ จากนั้นปรับวาล์วสามทางไปที่ตำแหน่ง B เพื่อให้ไขมันเต็มไซรินจ์ (รูปที่ 2.58 d))
- 6) จากนั้นปิดวาล์วเก็บตัวอย่าง และวาล์วเปิดปิด
- 7) ปรับวาล์วสามทางไปที่ตำแหน่ง C แล้วปลดไซรินจ์ออก
- 8) การเก็บตัวอย่างน้ำมันสำหรับการทดสอบ DGA หากน้ำมันได้จากอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ร้อน เก็บไซรินจ์ลงในแนวตั้งให้หัวของไซรินจ์อยู่ด้านบนจนกว่าน้ำมันจะเย็นตัวลงอย่างช้า ๆ จากนั้นจัดไซรินจ์เข้ากล่อง แล้วขนส่งออกไป โดยนี่เป็นวิธีเพื่อไม่ให้เกิดฟองอากาศในน้ำมัน

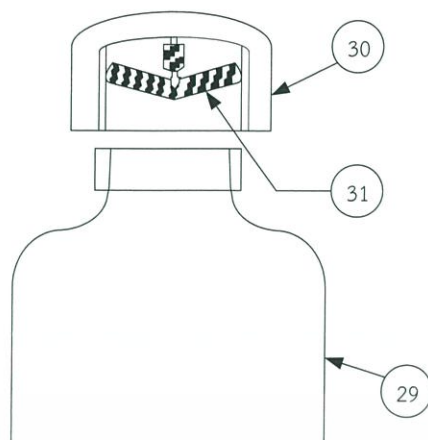
#### 2.10.4 การเก็บตัวอย่างน้ำมันด้วยขวดแก้วหรือขวดโลหะ

กรณีเป็นขวดแก้วใสควรเก็บให้พ้นจากแสงแดด ดังนั้นจึงแนะนำขวดทึบมากกว่า ยิ่งไปกว่านั้นหากเป็นการเก็บน้ำมันสำหรับการทดสอบ DGA ต้องมีการป้องกันจากแดดให้มากเป็นพิเศษ สำหรับการขนส่ง และการจัดเก็บ

การเก็บตัวอย่างน้ำมัน ควรเหล็กระดับน้ำมันไว้ไม่กี่เซนติเมตรจากขอบบนขวด เพื่อการขยายตัวของอากาศหรือการขยายตัวของน้ำมันเนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.59 การเก็บตัวอย่างน้ำมันด้วยขวด [32]



รูปที่ 2.60 การเก็บตัวอย่างน้ำมันด้วยขวด – การปิดฝาขวด [32]

- |                           |                        |
|---------------------------|------------------------|
| (3) คือ ท่อต่อ            | (29) คือ ขวด           |
| (5) คือ วาล์วเก็บตัวอย่าง | (30) คือ ฝาปิด         |
| (7) คือ ท่อทิ้ง           | (31) คือ จุกซีลพลาสติก |

การเก็บตัวอย่างน้ำมันด้วยขวดแก้วหรือขวดโลหะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) ค่อย ๆ เปิดวาล์วเก็บตัวอย่างให้น้ำมันไหลไปที่ถังทิ้งหนึ่งถึงสองลิตรผ่านท่อต่อ ต้องมั่นใจว่าฟองแก๊สถูกกำจัดออกก่อนที่ตัวอย่างน้ำมันจะถูกเก็บ

2) ใส่ปลายท่อต่อไปที่ก้นขวดเก็บตัวอย่างในขณะที่น้ำมันยังไหลอยู่และให้น้ำมันเติมจากล่างขึ้นไปบนขวด ล้างขวดด้วยน้ำมันหนึ่งในสามของขวด จากนั้นเทน้ำมันลงถังทิ้ง

การเก็บตัวอย่างน้ำมันสำหรับการทดสอบ DGA ต้องเติมให้น้ำมันไหลอย่างต่อเนื่อง ไม่มีการไหลที่รุนแรง เมื่อน้ำมันไหลไปในขวดต้องไม่ให้เกิดฟองแก๊ส การเติมควรช้าพอที่จะให้น้ำมันไหลได้พอดี และไวพอไม่ให้เกิดการเสียแก๊สหรือแก๊สเกิดการปนเปื้อนกับอากาศ หากใช้เวลาในการเติมหลายนาทีเกินไป ควรเก็บตัวอย่างใหม่

3) จากนั้นถอดท่อต่อออกจากขวดอย่างช้า ๆ ขณะที่น้ำมันยังไหลอยู่ จับขวดเก็บตัวอย่างที่มีน้ำมันอยู่เบา ๆ จากนั้นปิดด้วยฝา

4) ปิดวาล์วเก็บตัวอย่าง และถอดท่อต่อออก ตัดฉลากน้ำมัน หมุนฝาปิดให้แน่นอีกครั้ง หลังจากให้น้ำมันเย็นตัวลงแล้ว

## 2.11 การแยกแก๊สด้วยวิธี Headspace [33]

### 2.11.1 คำนิยาม

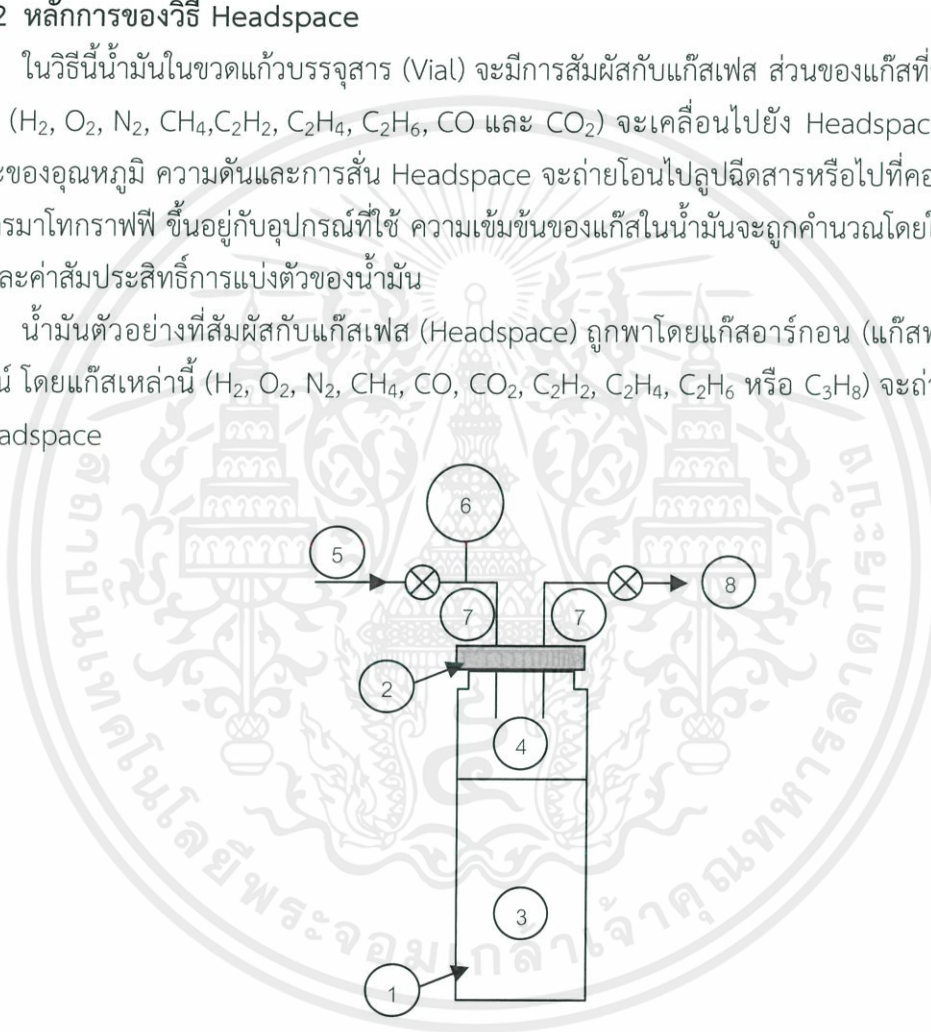
Headspace: แก๊สที่สัมผัสกับน้ำมันในภาชนะปิด ภาชนะปิดในที่นี้คือขวดแก้วบรรจุสารมีความจุ 20 มิลลิลิตร

แก๊สพา (Carrier Gas): แก๊สที่ทำหน้าที่เป็นตัวพาสารตัวอย่างที่ถูกทำให้เป็นแก๊ส ณ อุณหภูมิสารเข้าสู่คอลัมน์ ในวิธีนี้ใช้แก๊สอาร์กอน

### 2.11.2 หลักการของวิธี Headspace

ในวิธีนี้น้ำมันในขวดแก้วบรรจุสาร (Vial) จะมีการสัมผัสกับแก๊สเฟส ส่วนของแก๊สที่ละลายในน้ำมัน ( $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $CO$  และ  $CO_2$ ) จะเคลื่อนไปยัง Headspace ภายใต้สถานะของอุณหภูมิ ความดันและการสั่น Headspace จะถ่ายโอนไปสู่อุปกรณ์หรือไปที่คอลัมน์ของแก๊สโครมาโทกราฟี ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ที่ใช้ ความเข้มข้นของแก๊สในน้ำมันจะถูกคำนวณโดยใช้กฎของเฮนรีและค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งตัวของน้ำมัน

น้ำมันตัวอย่างที่สัมผัสกับแก๊สเฟส (Headspace) ถูกพาโดยแก๊สอาร์กอน (แก๊สพา) เข้าสู่คอลัมน์ โดยแก๊สเหล่านี้ ( $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $C_2H_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$  หรือ  $C_3H_8$ ) จะถ่ายโอนไปยัง Headspace



รูปที่ 2.61 การแยกแก๊สด้วยวิธี Headspace [33]

- |                               |                               |
|-------------------------------|-------------------------------|
| โดยที่ 1 คือ ขวดแก้วบรรจุสาร  | 5 คือ แก๊สพา                  |
| 2 คือ แผ่นยางปิดผนึก (Septum) | 6 คือ มาตรวัดความดัน          |
| 3 คือ ตัวอย่างน้ำมัน          | 7 คือ ตัวเก็บตัวอย่าง         |
| 4 คือ แก๊สเฟส                 | 8 คือ ดีเทคเตอร์หรือลูบฉีดสาร |

ความเข้มข้นของแก๊สตัวอย่างคำนวณโดยกฎของเฮนรี่ ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งตัวของน้ำมัน K และอัตราส่วนของปริมาตร

$$C_L = K \cdot C_G \quad (2.8)$$

เมื่อ  $C_L$  คือ ความเข้มข้นของแก๊สในตัวอย่างน้ำมัน

$C_G$  คือ ความเข้มข้นของ Headspace

K คือ สัมประสิทธิ์การแบ่งตัวของน้ำมัน

ตารางที่ 2.23 สัมประสิทธิ์การแบ่งตัวของน้ำมันแร่ที่อุณหภูมิ 70°C [33]

แก๊ส	สัมประสิทธิ์การแบ่งตัวของน้ำมัน(K)
H <sub>2</sub>	0.074
O <sub>2</sub>	0.17
N <sub>2</sub>	0.11
CH <sub>4</sub>	0.44
CO	0.12
CO <sub>2</sub>	1.02
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0.93
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1.47
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2.09
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	5.04
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	5.37
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	10.10

## 2.12 การแยกแก๊สโดยวิธีการแก๊สโครมาโทกราฟี [34]

ตัวอย่างแก๊สที่ได้นำออกมาจากตัวอย่างน้ำมัน มีการแยกแก๊สด้วยวิธีการแก๊สโครมาโทกราฟี แก๊สดังกล่าวที่วิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

- แก๊สไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>)
- แก๊สออกซิเจน (O<sub>2</sub>)
- แก๊สไนโตรเจน (N<sub>2</sub>)
- แก๊สมีเทน (CH<sub>4</sub>)
- แก๊สอีเทน (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)
- แก๊สเอทิลีน (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)
- แก๊สอะเซทิลีน (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)
- แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)
- แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>)

### 2.12.1 แก๊สโครมาโทกราฟี

แก๊สตัวอย่างจะถูกถ่ายเทและฉีดเข้าไปในเครื่องโครมาโทกราฟี กรณีการสกัดแก๊สด้วยวิธี Stripping มีการใช้วาล์วเก็บตัวอย่างและ Stripper ต่อผ่าน Cold Trap เข้าเครื่องโครมาโทกราฟี กรณีการสกัดแก๊สด้วยวิธี Headspace มีการใช้วาล์วบายพาสและ Zero-Dead Volume Adapter ต่อเข้ากับคอลัมน์เพื่อฉีดแก๊ส โดยแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบด้วย

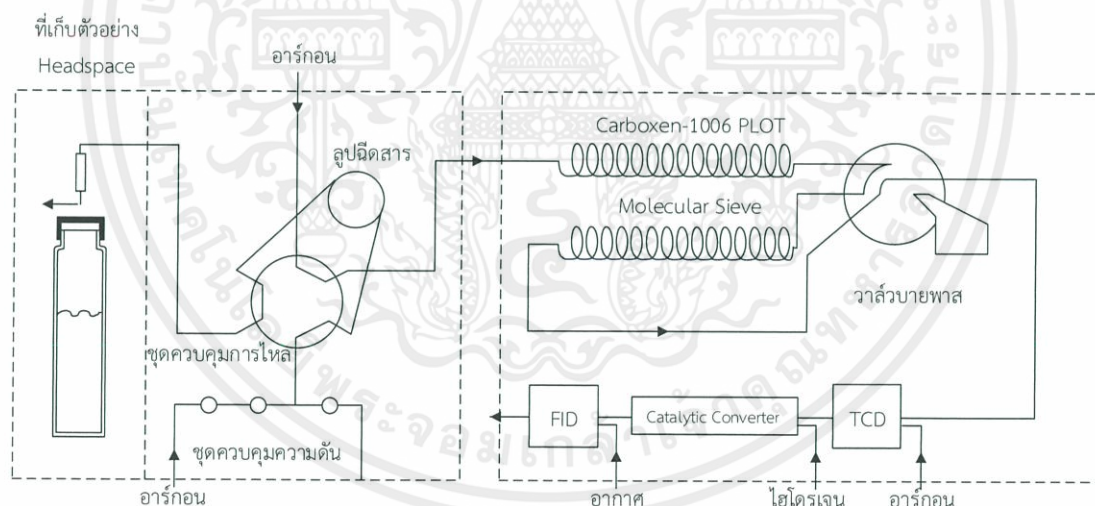
1. Thermal Conductivity Detector (TCD) เพื่อตรวจจับแก๊สถาวร ( $H_2$ ,  $O_2$  และ  $N_2$ ) ภายในมีแก๊สไฮโดรเจนทำหน้าที่เป็นแก๊สนำความร้อน (Thermal Conductivity)

2. Flame Ionization Detector (FID) ใช้สำหรับตรวจจับไฮโดรคาร์บอนและคาร์บอนออกไซด์ภายใน FID มีอากาศและไฮโดรเจนไอออน ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเพื่อทำให้เป็นสัญญาณตรวจจับ

3. Catalytic Converter ใช้สำหรับแปลง CO และ  $CO_2$  เป็นสัญญาณตรวจจับ เพื่อการตรวจจับแก๊สใน Flame Ionization Detector

### 2.12.2 คอลัมน์ (Column)

คอลัมน์ภายในประกอบด้วยสองส่วนคือ Molecular Sieve Column เพื่อการแยกแก๊สที่เบากว่า ( $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CH_4$  และ  $CO$ ) และ Carboxen-1006 PLOT Column เพื่อการแยกแก๊สอื่น ๆ ( $CO_2$ ,  $C_2H_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$  และ  $C_3H_8$ )



รูปที่ 2.62 ไดอะแกรมของเครื่องมือในการแยกแก๊ส [34]

## บทที่ 3

### การออกแบบการทดลอง

#### 3.1 เตรียมการทดลอง

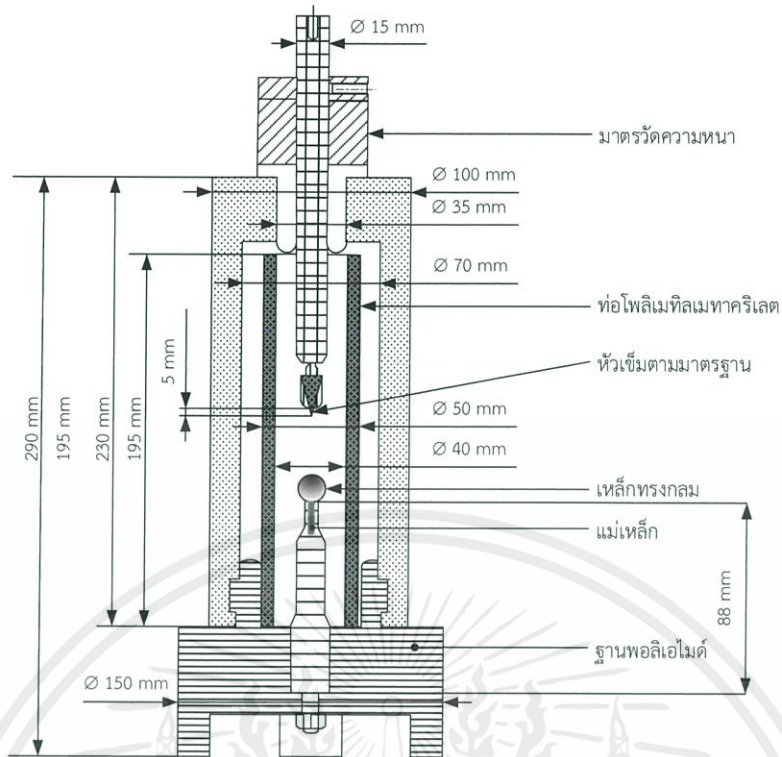
##### 3.1.1 อุปกรณ์

###### 1. ชุดทดสอบ (Test cell)

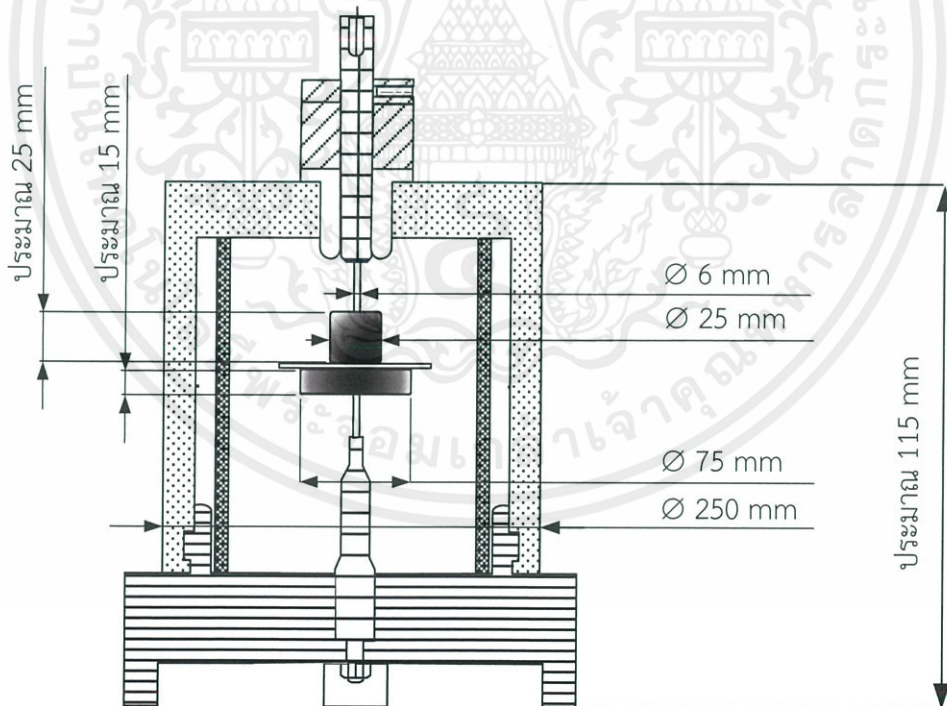
ชุดทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน โดยการทดสอบมีทั้งหมด 4 เงื่อนไข คือ การทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของน้ำมัน การทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสเซอร์ที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันที่บรรจุอยู่ในชุดทดสอบที่ใส่น้ำมัน การทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้าอิมพัลส์ฟ้ผ่าของน้ำมัน และการทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้าอิมพัลส์ฟ้ผ่าของเพรสเซอร์ที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันที่บรรจุอยู่ในชุดทดสอบที่ใส่น้ำมัน ตามมาตรฐาน IEC 60156, IEC 60243-1, IEC60897 และ IEC60243-3 ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 ชุดทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของน้ำมัน [35]



รูปที่ 3.2 ชุดทดสอบการเบรกความหนืดด้วยแรงดันไฟฟ้าอิมพัลส์ฟ้าผ่าของน้ำมัน [36]



รูปที่ 3.3 ชุดทดสอบการเบรกความหนืดของเพอร์สอร์ดที่ถูกอิมเพกเนตในน้ำมัน [37,38]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. อิเล็กโทรดแบบเข็ม

ขนาดปลายเข็มที่ใช้ในการทดสอบประมาณ 50 ไมโครเมตร ดังรูป

รูปที่ 3.4 อิเล็กโทรดแบบเข็ม

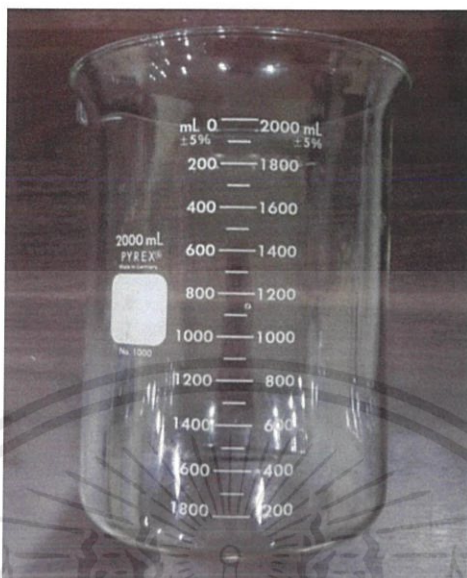
## 3. เครื่องทดสอบการเบรกดาวนผ่านน้ำมันด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของน้ำมัน

#### 4. ปีกเกอร์

ปีกเกอร์ใช้สำหรับบรรจุน้ำมันเพื่ออบภายในตู้อบสุญญากาศ



รูปที่ 3.6 ปีกเกอร์ขนาด 2,000 มิลลิลิตร

#### 5. ตู้อบสุญญากาศ



รูปที่ 3.7 ตู้อบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 ฉนวนเหลว

1. น้ำมันแร่
2. น้ำมัน FR3
3. น้ำมันปาล์ม

### 3.1.3 ขั้นตอนการเตรียมฉนวนเหลว

1. ตวงฉนวนเหลวที่ต้องการทดสอบลงบีกเกอร์



รูปที่ 3.8 น้ำมันแร่ (ซ้าย) น้ำมันปาล์ม (กลาง) น้ำมัน FR3 (ขวา)

2. นำบีกเกอร์ที่บรรจุฉนวนเหลวมาอบที่เครื่องอบ ที่อุณหภูมิ 60°C ความดัน 200 mbar ระยะเวลา 12 ชั่วโมง

### 3.1.4 กระดาษ

ฉนวนกระดาษที่ใช้ คือ เพอร์สบอร์ด ขนาด 5×5×1.6 mm และขนาด 5×5×3.2 mm (ก×ข×ส)



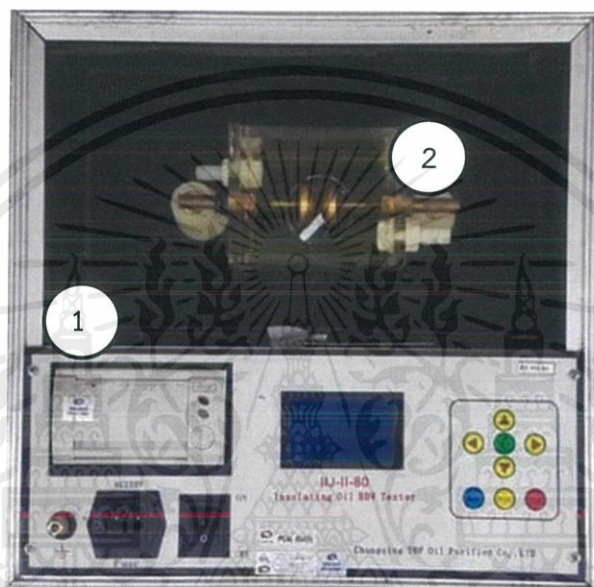
รูปที่ 3.9 เพอร์สบอร์ด

### 3.1.5 ขั้นตอนการเตรียมฉนวนกระดาษ

1. ทำการอบเพอร์สบอร์ด ที่อุณหภูมิ 80°C ความดัน 200 mbar เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
2. นำเพอร์สบอร์ดทำการอบแล้ว มาอิมเพรกเนตในน้ำมันแต่ละชนิด พร้อมกับอบที่อุณหภูมิ 60°C ความดัน 200 mbar เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

## 3.2 การทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของน้ำมัน

### 3.2.1 วงจรทดสอบ



รูปที่ 3.10 ชุดทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของน้ำมัน โดย 1.เครื่องทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 2.ชุดทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60156 [35]

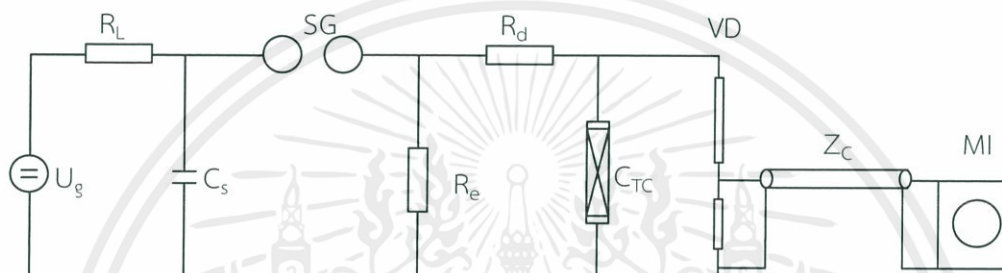
### 3.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. ปรับระยะแกประหว่างอิเล็กโตรด 1.0 mm
2. บรรจุน้ำมันแร่ที่ผ่านการอบลงในชุดทดสอบ ด้วยปริมาณ 500 mL
3. ตรวจสอบน้ำมันแร่ที่อยู่ในชุดทดสอบว่ามีฟองอากาศหรือไม่ ถ้ามีฟองอากาศให้พักไว้จนฟองอากาศหายไป
4. นำชุดทดสอบใส่ในเครื่องทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ แล้วเปิดใช้งานเครื่องทดสอบ โดยทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60156
5. ทำการทดสอบให้เกิดเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสะสมในน้ำมันแร่จำนวน 5 ครั้ง แล้วบันทึกค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบ และเก็บตัวอย่างน้ำมันไว้ในขวดแก้วสีชาปริมาณ 250 mL

6. ทำความสะอาดชุดทดสอบ และทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 4 แต่ทำการทดสอบให้เกิดเบรกดาวนั้สะสมในน้ำมันแร่จำนวน 10 และ 15 ครั้ง ตามลำดับ
7. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 6 แต่เปลี่ยนระยะแกประหว่งอิเล็กโตรดเป็น 1.5 และ 2.0 mm ตามลำดับ
8. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 7 แต่เปลี่ยนเป็นน้ำมัน FR3 และน้ำมันปาล์มตามลำดับ
9. นำตัวอย่างน้ำมันที่ผ่านการเกิดเบรกดาวนั้ไปทำการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน

### 3.3 การทดสอบการเบรกดาวนั้ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของน้ำมัน

#### 3.3.1 วงจรทดสอบ



รูปที่ 3.11 วงจรทดสอบการเบรกดาวนั้ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของน้ำมัน

โดยที่  $U_g$  คือ ตัวจ่ายแรงดันกระแสตรง

$R_L$  คือ ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ

$C_s$  คือ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์

SG คือ สปาร์กแกป

$R_e$  คือ ความต้านทานปล่อยประจุ

$R_d$  คือ ความต้านทานหน่วง

VD คือ โวลต์เตจดีไวเดอร์

$Z_C$  คือ สายเคเบิล

MI คือ เครื่องมือวัด

$C_{TC}$  คือ ชุดทดสอบการเบรกดาวนั้ด้วยแรงดันไฟฟ้าอิมพัลส์ฟ้าผ่าของน้ำมัน

#### 3.3.2 ขั้นตอนการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว

1. ต่อวงจรดังรูปที่ 3.11
2. ติดตั้งขั้วไดโอดไว้ที่ขั้วบวก และปรับระยะแกประหว่งอิเล็กโตรด 10 mm
3. บรรจุน้ำมันแร่ที่ผ่านการอบลงในชุดทดสอบ ด้วยปริมาณ 300 mL
4. ตรวจสอบน้ำมันแร่ที่อยู่ในชุดทดสอบว่ามีฟองอากาศหรือไม่ ถ้ามีฟองอากาศให้พักไว้จน

ฟองอากาศหายไป

5. นำชุดทดสอบต่อในวงจรทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว แล้วทำการขึ้นแรงดันโดยให้เริ่มต้นที่ 50 kV ด้วยอัตราการเพิ่มแรงดันคงที่ครั้งละ 5 kV จนกระทั่งเกิดการเบรกดาวน โดยทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60897

6. ทำการทดสอบให้เกิดเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวในน้ำมันแร่จำนวน 5 ครั้ง แล้วบันทึกค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบ และเก็บตัวอย่างน้ำมันไว้ในขวดแก้วสีชาปริมาณ 250 mL

7. ทำความสะอาดชุดทดสอบ และทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 6 แต่ทำการทดสอบให้เกิดเบรกดาวนสะสมในน้ำมันแร่จำนวน 10 และ 15 ครั้ง ตามลำดับ

8. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 7 แต่เปลี่ยนระยะแกประหว่งอเล็กโตรดเป็น 15 และ 20 mm ตามลำดับ

9. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 8 แต่เปลี่ยนเป็นน้ำมัน FR3 และน้ำมันปาล์มตามลำดับ

10. นำตัวอย่างน้ำมันที่ผ่านการเกิดเบรกดาวนไปทำการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน

### 3.3.3 ขั้นตอนการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว

1. ต่อวงจรดังรูปที่ 3.11

2. ติดตั้งหัวไดโอดไว้ที่หัวลบ และปรับระยะแกประหว่งอเล็กโตรด 10 mm

3. บรรจุน้ำมันแร่ที่ผ่านการอบลงในชุดทดสอบ ด้วยปริมาณ 300 ml

4. ตรวจสอบน้ำมันแร่ที่อยู่ในชุดทดสอบว่ามีฟองอากาศหรือไม่ ถ้ามีฟองอากาศให้พักไว้จนฟองอากาศหายไป

5. นำชุดทดสอบต่อในวงจรทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว แล้วทำการขึ้นแรงดันโดยให้เริ่มต้นที่ 70 kV ด้วยอัตราการเพิ่มแรงดันคงที่ครั้งละ 5 kV จนกระทั่งเกิดการเบรกดาวน โดยทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60897

6. ทำการทดสอบให้เกิดเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวในน้ำมันแร่จำนวน 5 ครั้ง แล้วบันทึกค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบ และเก็บตัวอย่างน้ำมันไว้ในขวดแก้วสีชาปริมาณ 250 mL

7. ทำความสะอาดชุดทดสอบ และทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 6 แต่ทำการทดสอบให้เกิดเบรกดาวนสะสมในน้ำมันแร่จำนวน 10 และ 15 ครั้ง ตามลำดับ

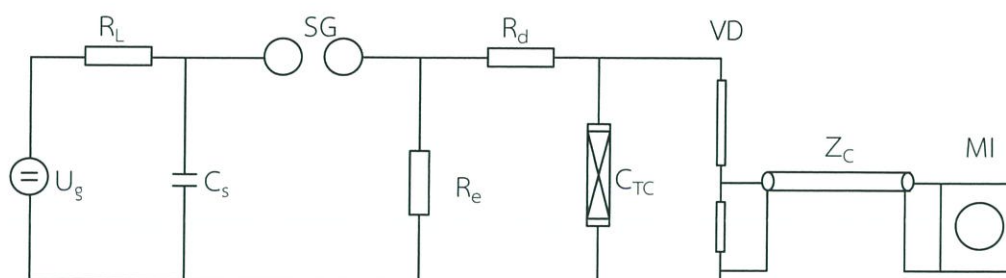
8. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 7 แต่เปลี่ยนระยะแกประหว่งอเล็กโตรดเป็น 15 และ 20 mm ตามลำดับ

9. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 8 แต่เปลี่ยนเป็นน้ำมัน FR3 และน้ำมันปาล์มตามลำดับ

10. นำตัวอย่างน้ำมันที่ผ่านการเกิดเบรกดาวนไปทำการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน

### 3.4 การทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจำลองของน้ำมัน

#### 3.4.1 วงจรทดสอบ



รูปที่ 3.12 วงจรทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจำลองของน้ำมัน

โดยที่  $U_g$  คือ ตัวจ่ายแรงดันกระแสตรง

$R_L$  คือ ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ

$C_s$  คือ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์

SG คือ สปาร์กแกป

$R_e$  คือ ความต้านทานปล่อยประจุ

$R_d$  คือ ความต้านทานหน่วง

VD คือ โวลต์เจตติวเดออร์

$Z_C$  คือ สายเคเบิล

MI คือ เครื่องมือวัด

$C_{TC}$  คือ ชุดทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนด้วยแรงดันไฟฟ้าอิมพัลส์ฟ้าผ่าจำลองของน้ำมัน

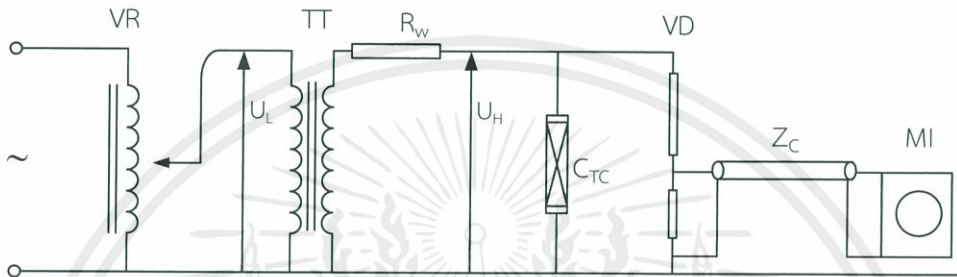
#### 3.4.2 ขั้นตอนการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจำลอง

1. ต่อวงจรดังรูปที่ 3.12
2. ติดตั้งขั้วไดโอดไว้ที่ขั้วลบ และปรับระยะแกประหว่างอิเล็กโทรด 10 mm
3. บรรจุน้ำมันแร่ที่ผ่านการอบลงในชุดทดสอบ ด้วยปริมาณ 300 ml
4. ตรวจสอบน้ำมันแร่ที่อยู่ในชุดทดสอบว่ามีฟองอากาศหรือไม่ ถ้ามีฟองอากาศให้พักไว้จนฟองอากาศหายไป
5. นำชุดทดสอบต่อในวงจรทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าจำลอง แล้วทำการขึ้นแรงดัน 60% ของค่าแรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์จำลอง
6. ทำการทดสอบในขั้นตอนที่ 5 จำนวน 5 ครั้ง แล้วเก็บตัวอย่างน้ำมันไว้ในขวดแก้วสีชา ปริมาณ 250 mL
7. ทำความสะอาดชุดทดสอบ และทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 6 แต่ทำการทดสอบให้เกิดการดิสชาร์จสะสมในน้ำมันแร่จำนวน 10 และ 15 ครั้ง ตามลำดับ
8. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 7 แต่เปลี่ยนระยะแกประหว่างอิเล็กโทรดเป็น 15 และ 20 mm ตามลำดับ

9. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 8 แต่เปลี่ยนเป็นน้ำมัน FR3 และน้ำมันปาล์มตามลำดับ
10. นำตัวอย่างน้ำมันที่ผ่านการดิสชาร์จบางส่วนไปทำการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน

### 3.5 การทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันที่บรรจุอยู่ในชุดทดสอบที่ใส่ฉนวนน้ำมัน กรณีเบรกดาวน์ซ้ำจุดเดิม

#### 3.5.1 วงจรทดสอบ



รูปที่ 3.13 วงจรทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน กรณีเบรกดาวน์ซ้ำจุดเดิม

- โดยที่ VR คือ ตัวปรับแรงดัน  
 TT คือ หม้อแปลงทดสอบแรงสูง  
 $R_w$  คือ ความต้านทานน้ำ  
 VD คือ โวลต์เจตติไวเดอร์  
 $Z_C$  คือ สายเคเบิล  
 MI คือ เครื่องมือวัด  
 $C_{TC}$  คือ ชุดทดสอบการเบรกดาวน์ของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน

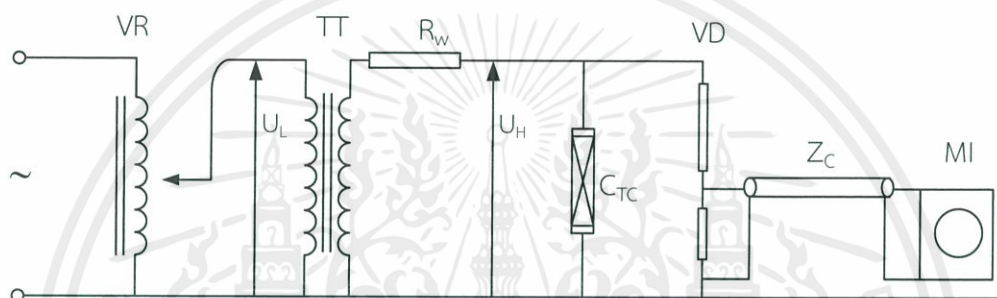
#### 3.5.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. ต่อวงจรทดสอบตามรูปที่ 3.13
2. นำเพรสบอร์ดขนาด 3.2 mm ที่ถูกอิมเพรกเนตแล้ว ใส่ในชุดทดสอบ และเทน้ำมันแร่ลงในชุดทดสอบด้วยปริมาณ 3500 mL
3. ตรวจสอบน้ำมันแร่ที่ถูกเทในชุดทดสอบว่ามีฟองอากาศอยู่หรือไม่ ถ้ามีฟองอากาศให้พักไว้จนฟองอากาศหายไป
4. ทำการขึ้นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยอัตราการเพิ่มแรงดันคงที่ 2 kV/s จนกระทั่งเกิดการเบรกดาวน์ซ้ำจุดเดิมจำนวน 5 ครั้ง
5. บันทึกความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับที่อ่านได้จากมิเตอร์วัดแรงดัน
6. เก็บตัวอย่างน้ำมันแร่ในขวดแก้วสีชาปริมาณ 250 mL

7. ทำความสะอาดชุดทดสอบ และทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 2 ถึง 6 แต่ทำการทดสอบให้เกิดเบรกดาวน์สะสมจำนวน 10 และ 15 ครั้ง ตามลำดับ
8. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 2 ถึง 7 แต่เปลี่ยนเป็นน้ำมัน FR3 และน้ำมันปาล์มตามลำดับ
9. นำตัวอย่างน้ำมันที่ผ่านการเกิดเบรกดาวน์ไปทำการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน

### 3.6 การทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันที่บรรจุอยู่ในชุดทดสอบที่ใส่น้ำมัน กรณีเบรกดาวน์ไม่ซ้ำจุดเดิม

#### 3.6.1 วงจรทดสอบ



รูปที่ 3.14 วงจรทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน กรณีเบรกดาวน์ไม่ซ้ำจุดเดิม

โดยที่ VR คือ ตัวปรับแรงดัน

TT คือ หม้อแปลงทดสอบแรงสูง

$R_w$  คือ ความต้านทานน้ำ

VD คือ โวลต์จดีไวเดอร์

$Z_C$  คือ สายเคเบิล

MI คือ เครื่องมือวัด

$C_{TC}$  คือ ชุดทดสอบการเบรกดาวน์ของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน

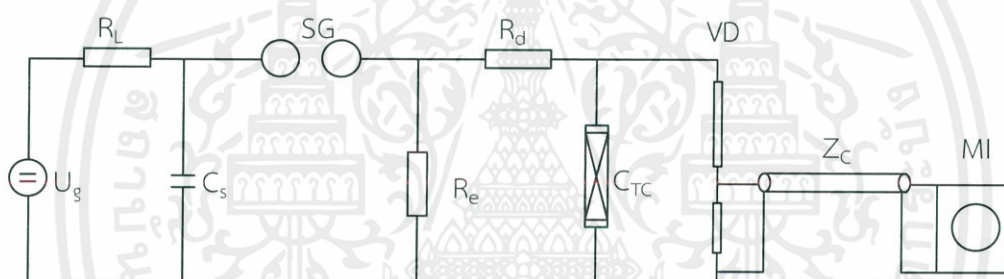
#### 3.6.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. ต้องวงจรทดสอบตามรูปที่ 3.14
2. นำเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่ถูกอิมเพรกเนตแล้ว ใส่ในชุดทดสอบ และเติมน้ำมันแร่ลงในชุดทดสอบด้วยปริมาณ 3500 mL
3. ตรวจสอบน้ำมันแร่ที่ถูกเทในชุดทดสอบว่ามีฟองอากาศอยู่หรือไม่ ถ้ามีฟองอากาศให้พักไว้จนฟองอากาศหายไป
4. ทำการขึ้นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยอัตราการเพิ่มแรงดันคงที่ 2 kV/s จนกระทั่งเกิดการเบรกดาวน์ โดยทำการเปลี่ยนเพรสบอร์ดจำนวน 5 ครั้ง

5. บันทึกความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับที่อ่านได้จากมิเตอร์วัดแรงดัน
6. เก็บตัวอย่างน้ำมันแรงในขวดแก้วสีชาปริมาณ 250 mL
7. ทำความสะอาดชุดทดสอบ และทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 2 ถึง 6 แต่ทำการทดสอบให้เกิดเบรกดาวน์สะสมในน้ำมันแรงจำนวน 10 และ 15 ครั้ง ตามลำดับ โดยทุกครั้งที่เกิดเบรกดาวน์ต้องเปลี่ยนเพรสบอร์ดใหม่ทุกครั้ง
8. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 7 แต่เปลี่ยนขนาดเพรสบอร์ดเป็น 3.2 mm
9. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 2 ถึง 8 แต่เปลี่ยนเป็นน้ำมัน FR3 และน้ำมันปาล์มตามลำดับ
10. นำตัวอย่างน้ำมันที่ผ่านการเกิดเบรกดาวน์ไปทำการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน

### 3.7 การทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพกต์ในน้ำมันที่บรรจุอยู่ในชุดทดสอบที่ใส่น้ำมัน กรณีเบรกดาวน์ซ้ำจุดเดิม

#### 3.7.1 วงจรทดสอบ



รูปที่ 3.15 วงจรทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพกต์ในน้ำมัน กรณีเบรกดาวน์ซ้ำจุดเดิม

โดยที่  $U_g$  คือ ตัวจ่ายแรงดันกระแสตรง

$R_L$  คือ ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ

$C_s$  คือ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์

$SG$  คือ สปาร์กแกป

$R_e$  คือ ความต้านทานปล่อยประจุ

$R_d$  คือ ความต้านทานหน่วง

$VD$  คือ โวลเตจดีไวเดอร์

$Z_c$  คือ สายเคเบิล

$MI$  คือ เครื่องมือวัด

$C_{TC}$  คือ ชุดทดสอบการเบรกดาวน์ของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพกต์ในน้ำมัน

### 3.7.2 ขั้นตอนการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว กรณีเบรกดาวนซ์้าจุดเดิม

1. ต่อดังรูปที่ 3.15
2. ติดตั้งขั้วไดโอดไว้ที่ชั่วคราว
3. นำเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่ถูกอิมเพกต์แล้ว ใส่ในชุดทดสอบ และเติมน้ำมันแร่ลงในชุดทดสอบด้วยปริมาณ 3500 mL
4. ตรวจสอบน้ำมันแร่ที่อยู่ในชุดทดสอบว่ามีฟองอากาศหรือไม่ ถ้ามีฟองอากาศให้พักไว้จนฟองอากาศหายไป
5. นำชุดทดสอบต่อในวงจรทดสอบการเบรกดาวนซ์้าด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว แล้วทำการขึ้นแรงดันโดยให้เริ่มต้นที่ 100 kV ด้วยอัตราการเพิ่มแรงดันคงที่ครั้งละ 5 kV จนกระทั่งเกิดการเบรกดาวนซ์้า โดยทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60897
6. ทำการทดสอบให้เกิดเบรกดาวนซ์้าจุดเดิมด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวจำนวน 5 ครั้ง แล้วบันทึกค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบ และเก็บตัวอย่างน้ำมันไว้ในขวดแก้วสีชาขนาด 250 mL
7. ทำความสะอาดชุดทดสอบ และทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 6 แต่ทำการทดสอบให้เกิดเบรกดาวนซ์้าผสมในน้ำมันแร่จำนวน 10 และ 15 ครั้ง ตามลำดับ
8. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 7 แต่เปลี่ยนขนาดเพรสบอร์ดเป็น 3.2 mm
9. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 8 แต่เปลี่ยนเป็นน้ำมัน FR3 และน้ำมันปาล์มตามลำดับ
10. นำตัวอย่างน้ำมันที่ผ่านการเกิดเบรกดาวนซ์้าไปทำการวิเคราะห์ที่แก๊สที่ละลายในน้ำมัน

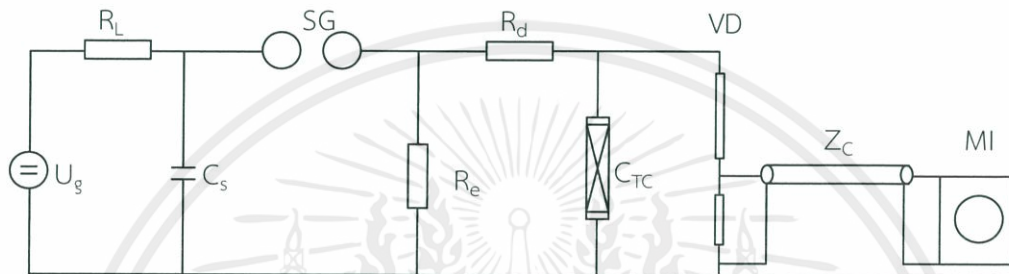
### 3.7.3 ขั้นตอนการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว กรณีเบรกดาวนซ์้าจุดเดิม

1. ต่อดังรูปที่ 3.15
2. ติดตั้งขั้วไดโอดไว้ที่ชั่วคราว
3. นำเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่ถูกอิมเพกต์แล้ว ใส่ในชุดทดสอบ และเติมน้ำมันแร่ลงในชุดทดสอบด้วยปริมาณ 3500 mL
4. ตรวจสอบน้ำมันแร่ที่อยู่ในชุดทดสอบว่ามีฟองอากาศหรือไม่ ถ้ามีฟองอากาศให้พักไว้จนฟองอากาศหายไป
5. นำชุดทดสอบต่อในวงจรทดสอบการเบรกดาวนซ์้าด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว แล้วทำการขึ้นแรงดันโดยให้เริ่มต้นที่ 200 kV ด้วยอัตราการเพิ่มแรงดันคงที่ครั้งละ 5 kV จนกระทั่งเกิดการเบรกดาวนซ์้า โดยทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60897
6. ทำการทดสอบให้เกิดเบรกดาวนซ์้าจุดเดิมด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวจำนวน 5 ครั้ง แล้วบันทึกค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบ และเก็บตัวอย่างน้ำมันไว้ในขวดแก้วสีชาขนาด 250 mL
7. ทำความสะอาดชุดทดสอบ และทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 6 แต่ทำการทดสอบให้เกิดเบรกดาวนซ์้าผสมในน้ำมันแร่จำนวน 10 และ 15 ครั้ง ตามลำดับ
8. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 7 แต่เปลี่ยนขนาดเพรสบอร์ดเป็น 3.2 mm

9. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 8 แต่เปลี่ยนเป็นน้ำมัน FR3 และน้ำมันปาล์มตามลำดับ
10. นำตัวอย่างน้ำมันที่ผ่านการเกิดเบรกดาวน์ไปทำการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน

### 3.8 การทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันที่บรรจุอยู่ในชุดทดสอบที่ใส่น้ำมัน กรณีเบรกดาวน์ไม่ซ้ำจุดเดิม

#### 3.8.1 วงจรทดสอบ



รูปที่ 3.16 วงจรทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน กรณีเบรกดาวน์ไม่ซ้ำจุดเดิม

โดยที่  $U_g$  คือ ตัวจ่ายแรงดันกระแสตรง

$R_L$  คือ ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ

$C_s$  คือ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์

$SG$  คือ สปาร์กแกป

$R_e$  คือ ความต้านทานปล่อยประจุ

$R_d$  คือ ความต้านทานหน่วง

$VD$  คือ โวลต์เตจดีไวเดอร์

$Z_C$  คือ สายเคเบิล

$MI$  คือ เครื่องมือวัด

$C_{TC}$  คือ ชุดทดสอบการเบรกดาวน์ของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน

#### 3.8.2 ขั้นตอนการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว กรณีเบรกดาวน์ไม่ซ้ำจุดเดิม

1. ต่อวงจรดังรูปที่ 3.16
2. ติดตั้งขั้วไดโอดไว้ที่ขั้วบวก
3. นำเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่ถูกอิมเพรกเนตแล้ว ใส่ในชุดทดสอบ และเทน้ำมันแรงลงในชุดทดสอบด้วยปริมาณ 3500 mL
4. ตรวจสอบน้ำมันแรงที่อยู่ในชุดทดสอบว่ามีฟองอากาศหรือไม่ ถ้ามีฟองอากาศให้พักไว้จนฟองอากาศหายไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำชุดทดสอบต่อในวงจรทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว แล้วทำการขึ้นแรงดันโดยให้เริ่มต้นที่ 100 kV ด้วยอัตราการเพิ่มแรงดันคงที่ครั้งละ 5 kV จนกระทั่งเกิดการเบรกดาวน โดยทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60897

6. ทำการทดสอบให้เกิดเบรกดาวนไม่ซ้ำจุดเดิม ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว โดยทำการเปลี่ยนเพรสบอร์ดจำนวน 5 ครั้ง แล้วบันทึกค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบ และเก็บตัวอย่างน้ำมันไว้ในขวดแก้วสีชาขนาด 250 mL

7. ทำความสะอาดชุดทดสอบ และทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 6 แต่ทำการทดสอบให้เกิดเบรกดาวนสะสมจำนวน 10 และ 15 ครั้ง ตามลำดับ โดยทุกครั้งที่เกิดเบรกดาวนต้องเปลี่ยนเพรสบอร์ดใหม่ทุกครั้ง

8. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 7 แต่เปลี่ยนขนาดเพรสบอร์ดเป็น 3.2 mm

9. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 8 แต่เปลี่ยนเป็นน้ำมัน FR3 และน้ำมันปาล์มตามลำดับ

10. นำตัวอย่างน้ำมันที่ผ่านการเกิดเบรกดาวนไปทำการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน

### 3.8.3 ขั้นตอนการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว กรณีเบรกดาวนไม่ซ้ำจุดเดิม

1. ต่ วงจรดังรูปที่ 3.16

2. ติดตั้งหัวไดโอดไว้ที่ชั่วคราว

3. นำเพรสบอร์ดขนาด 1.6 mm ที่ถูกอิมเพรกเนตแล้ว ใส่ในชุดทดสอบ และเติมน้ำมันแรงลงในชุดทดสอบด้วยปริมาณ 3500 mL

4. ตรวจสอบน้ำมันแรงที่อยู่ในชุดทดสอบว่ามีฟองอากาศหรือไม่ ถ้ามีฟองอากาศให้พักไว้จนฟองอากาศหายไป

5. นำชุดทดสอบต่อในวงจรทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว แล้วทำการขึ้นแรงดันโดยให้เริ่มต้นที่ 200 kV ด้วยอัตราการเพิ่มแรงดันคงที่ครั้งละ 5 kV จนกระทั่งเกิดการเบรกดาวน โดยทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60897

6. ทำการทดสอบให้เกิดเบรกดาวนไม่ซ้ำจุดเดิม ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว โดยทำการเปลี่ยนเพรสบอร์ดจำนวน 5 ครั้ง แล้วบันทึกค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบ และเก็บตัวอย่างน้ำมันไว้ในขวดแก้วสีชาขนาด 250 mL

7. ทำความสะอาดชุดทดสอบ และทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 6 แต่ทำการทดสอบให้เกิดเบรกดาวนสะสมในน้ำมันแรงจำนวน 10 และ 15 ครั้ง ตามลำดับ โดยทุกครั้งที่เกิดเบรกดาวนต้องเปลี่ยนเพรสบอร์ดใหม่ทุกครั้ง

8. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 7 แต่เปลี่ยนขนาดเพรสบอร์ดเป็น 3.2 mm

9. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 8 แต่เปลี่ยนเป็นน้ำมัน FR3 และน้ำมันปาล์มตามลำดับ

10. นำตัวอย่างน้ำมันที่ผ่านการเกิดเบรกดาวนไปทำการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน

### 3.9 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมัน

#### 3.9.1 การประเมินความผิดปกติตามมาตรฐาน IEEE C57.104

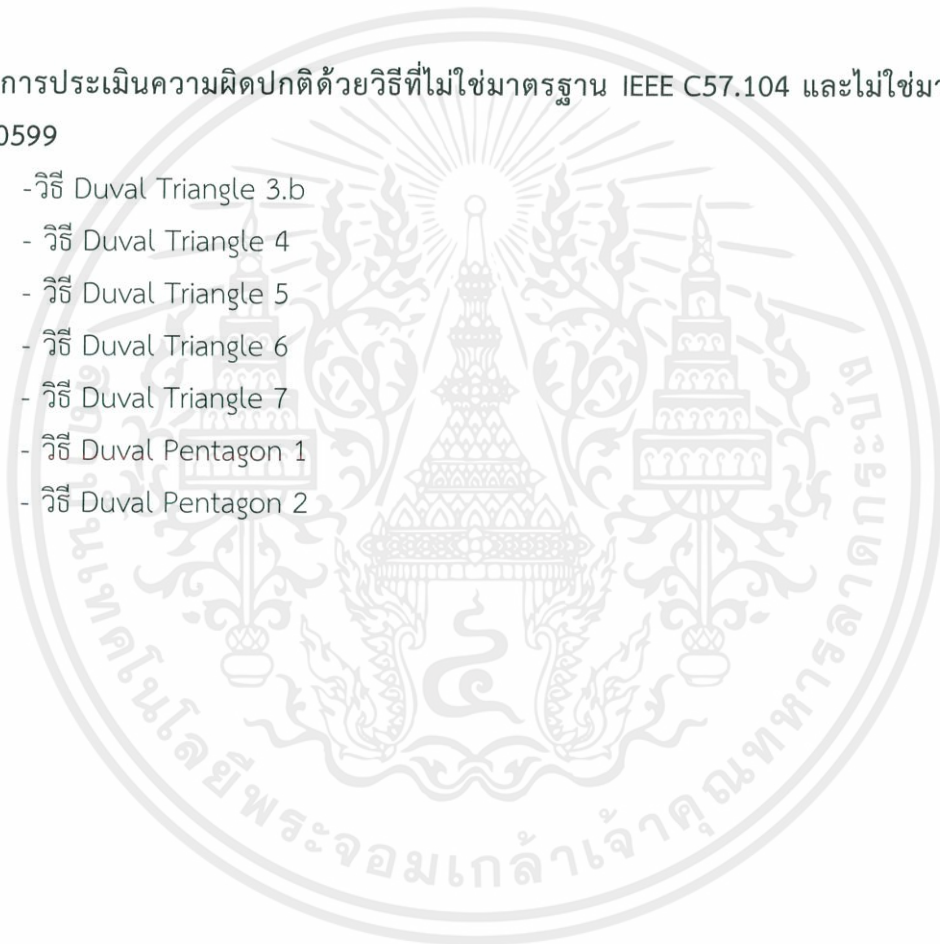
- วิธี Roger Ratio
- วิธี Doernenburg Ratio
- วิธี คีย์แก๊ส

#### 3.9.2 การประเมินความผิดปกติตามมาตรฐาน IEC 60599

- วิธี IEC Ratio
- วิธี Duval Triangle 1

#### 3.9.3 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธีที่ไม่ใช่มาตรฐาน IEEE C57.104 และไม่ใช่มาตรฐาน IEC 60599

- วิธี Duval Triangle 3.b
- วิธี Duval Triangle 4
- วิธี Duval Triangle 5
- วิธี Duval Triangle 6
- วิธี Duval Triangle 7
- วิธี Duval Pentagon 1
- วิธี Duval Pentagon 2



## บทที่ 4

### ผลการทดสอบและการแปลผล

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน (DGA)

หมายเหตุ: XX#base<sup>n</sup> คือ น้ำมันที่ยังไม่ผ่านการทดสอบ

AA\_BB\_G#N<sup>n</sup> หรือ AA\_P\_NC\_G#N<sup>n</sup> หรือ AA\_P\_C\_G#N<sup>n</sup>

- AA ได้แก่ AC คือ การทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ  
           Im+ คือ การทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วบวก  
           Im- คือ การทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบ  
           PD- คือ การทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบ
- BB ได้แก่ MO คือ น้ำมันแร่  
           FR3 คือ น้ำมัน FR3  
           PO คือ น้ำมันปาล์ม
- P\_NC\_ คือ เพอร์สบอร์ดที่ถูกอิมเพกต์ในน้ำมัน กรณีการทดสอบเบรกดาวน์
- P\_C\_ คือ เพอร์สบอร์ดที่ถูกอิมเพกต์ในน้ำมัน กรณีการทดสอบการเบรกดาวน์
- G คือ ระยะแกป
- N คือ จำนวนครั้งการเบรกดาวน์สะสม
- <sup>n</sup> แสดงการทดสอบด้วยน้ำมันที่ถูกเตรียมในวันเดียวกัน

เช่น AC\_MO\_1.5#5<sup>1</sup> คือ การทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของน้ำมันแร่ ที่ระยะแกป 1.5 mm และทำการทดสอบให้เกิดเบรกดาวน์สะสม 5 ครั้ง โดยน้ำมันแร่ถูกเตรียมพร้อมทั้งน้ำมันแร่ที่ยังไม่ผ่านการทดสอบ MO#base<sup>1</sup>

#### 4.1.1 การทดสอบน้ำมันแร่

##### 4.1.1.1 ผลการวิเคราะห์ที่ละลายในน้ำมันแร่ (DGA)

#### ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ที่ละลายในน้ำมันแร่

ลำดับ	รหัส	ชนิดของแรงดันไฟฟ้า	ฉนวนเหลว	ระยะเก็บ (mm)	การبردตามวิธีการดีสชาร์จ (ครั้ง)	ความเข้มข้นแก๊ส (ppm)							
						CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	H <sub>2</sub>	
1	MO#base <sup>1</sup>	-	น้ำมันแร่	-	-	344.330	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	MO#base <sup>2</sup>	-	น้ำมันแร่	-	-	448.349	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	MO#base <sup>3</sup>	-	น้ำมันแร่	-	-	274.590	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	AC_MO_1.0#5 <sup>2</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันแร่	1	5	413.159	0.954	4.010	0.000	0.000	0.000	0.000	2.276
5	AC_MO_1.0#10 <sup>2</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันแร่	1	10	736.835	2.294	10.276	0.000	0.000	0.000	0.000	3.634
6	AC_MO_1.0#15 <sup>2</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันแร่	1	15	664.904	2.641	12.641	0.000	0.000	0.000	0.000	3.657
7	AC_MO_1.5#5 <sup>1</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันแร่	1.5	5	467.153	1.494	5.923	0.000	0.000	0.000	0.000	2.939
8	AC_MO_1.5#10 <sup>1</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันแร่	1.5	10	437.250	2.295	11.584	0.000	0.000	0.000	0.000	4.351
9	AC_MO_1.5#15 <sup>1</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันแร่	1.5	15	635.400	2.732	15.110	0.000	0.000	0.000	0.000	5.220
10	AC_MO_2.0#5 <sup>1</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันแร่	2	5	612.014	1.604	7.958	0.000	0.000	0.000	0.000	2.729
11	AC_MO_2.0#10 <sup>1</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันแร่	2	10	535.387	2.865	15.819	0.000	0.000	0.000	0.000	3.156
12	AC_MO_2.0#15 <sup>1</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันแร่	2	15	648.236	4.529	25.246	0.000	0.169	0.000	0.000	4.101

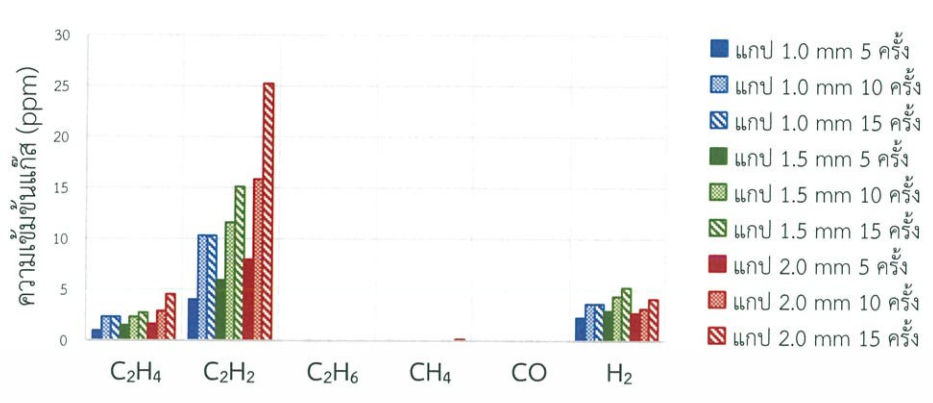
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมันแร่ (ต่อ)

ลำดับ	รหัส	ชนิดของแรงดันไฟฟ้า	จำนวนหลอด	ระยะแกป (mm)	การเบรกดาวน์/การดีชาร์จ (ครั้ง)	ความเข้มข้นแก๊ส (ppm)						
						CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	H <sub>2</sub>
13	lm+_MO_10#5 <sup>2</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันแร่	10	5	373.344	580.749	2149.883	21.886	276.174	9.765	1080.799
14	lm+_MO_10#10 <sup>2</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันแร่	10	10	285.651	1132.585	3940.942	43.710	483.654	6.511	1818.545
15	lm+_MO_10#15 <sup>2</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันแร่	10	15	319.848	1786.242	6185.282	68.900	731.142	16.099	2673.416
16	lm+_MO_15#5 <sup>2</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันแร่	15	5	401.711	946.780	3347.283	37.871	424.105	6.093	1761.527
17	lm+_MO_15#10 <sup>2</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันแร่	15	10	310.391	1783.667	5948.266	72.778	803.215	14.454	3089.954
18	lm+_MO_15#15 <sup>2</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันแร่	15	15	313.489	2639.129	8894.973	104.244	1194.048	15.914	4532.337
19	lm+_MO_20#5 <sup>2</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันแร่	20	5	308.775	1146.845	3714.018	47.706	516.517	3.758	1977.084
20	lm+_MO_20#10 <sup>2</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันแร่	20	10	349.160	2469.770	8022.155	98.539	1123.965	10.023	3584.814
21	lm+_MO_20#15 <sup>2</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันแร่	20	15	366.356	3260.956	10778.400	131.381	1276.164	16.072	2467.116
22	lm-_MO_10#5 <sup>3</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมันแร่	10	5	332.462	235.982	846.070	24.428	112.688	0.059	456.400
23	lm-_MO_10#10 <sup>3</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมันแร่	10	10	382.899	614.317	2492.849	24.452	326.347	9.623	1286.724
24	lm-_MO_10#15 <sup>3</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมันแร่	10	15	411.351	1056.426	4386.733	39.293	502.113	6.642	1959.718
25	lm-_MO_15#5 <sup>3</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมันแร่	15	5	391.334	572.021	2194.011	25.089	279.851	2.857	1041.979
26	lm-_MO_15#10 <sup>3</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมันแร่	15	10	432.537	1117.443	4428.143	43.853	543.350	10.757	1562.180
27	lm-_MO_15#15 <sup>3</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมันแร่	15	15	364.380	1709.804	6893.059	66.779	803.296	11.983	2500.363

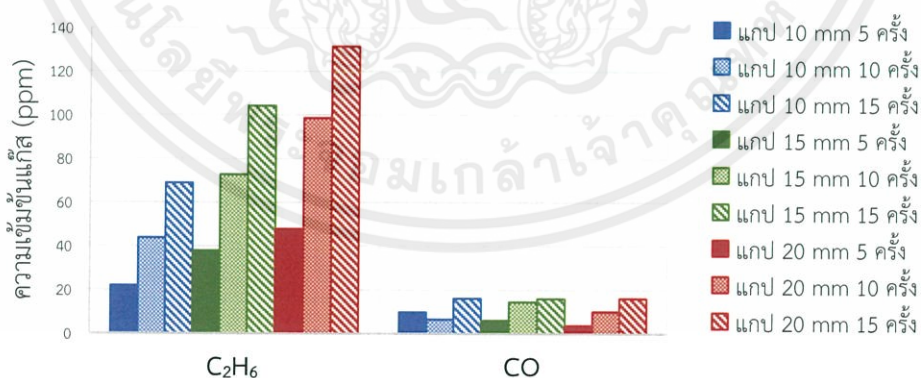
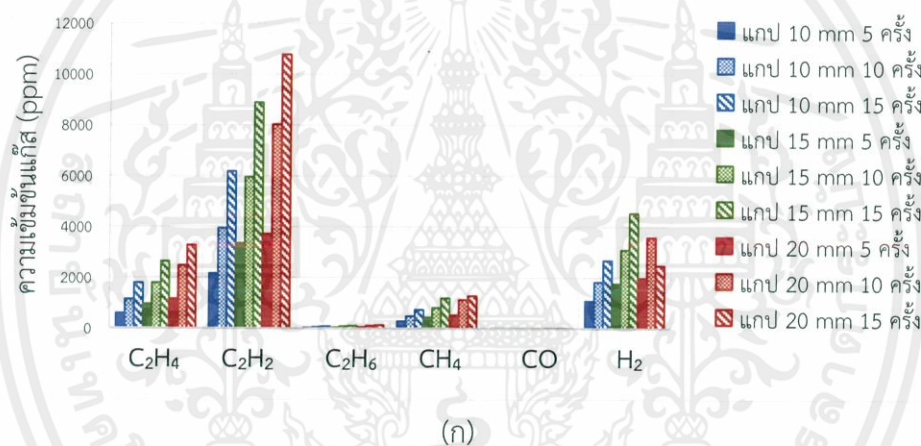
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ที่แก๊สที่ละลายในน้ำมันแร่ (ต่อ)

ลำดับ	รหัส	ชนิดของแรงดันไฟฟ้า	ฉนวนเหลว	ระยะแกป (mm)	การเบรกดาว/การดีชาร์จ (ครั้ง)	ความเข้มข้นแก๊ส (ppm)							
						CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	H <sub>2</sub>	
28	Im_MO_20#5 <sup>3</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมันแร่	20	5	346.727	529.843	1894.744	87.469	262.738	0.506	749.180	
29	Im_MO_20#10 <sup>3</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมันแร่	20	10	521.416	1382.240	5455.746	53.422	611.540	16.095	1557.698	
30	Im_MO_20#15 <sup>3</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมันแร่	20	15	507.135	2299.897	9082.174	87.831	875.199	8.850	1464.558	
31	PD_MO_10#5 <sup>3</sup>	PD-	น้ำมันแร่	10	5	397.410	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	8.912	
32	PD_MO_10#10 <sup>3</sup>	PD-	น้ำมันแร่	10	10	350.693	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.921	
33	PD_MO_10#15 <sup>3</sup>	PD-	น้ำมันแร่	10	15	372.272	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.901	
34	PD_MO_15#5 <sup>3</sup>	PD-	น้ำมันแร่	15	5	370.279	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.580	
35	PD_MO_15#10 <sup>3</sup>	PD-	น้ำมันแร่	15	10	404.984	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.699	
36	PD_MO_15#15 <sup>3</sup>	PD-	น้ำมันแร่	15	15	399.998	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.959	
37	PD_MO_20#5 <sup>3</sup>	PD-	น้ำมันแร่	20	5	447.412	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.970	
38	PD_MO_20#10 <sup>3</sup>	PD-	น้ำมันแร่	20	10	512.575	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.461	
39	PD_MO_20#15 <sup>3</sup>	PD-	น้ำมันแร่	20	15	496.291	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.171	

#### 4.1.1.2 การวิเคราะห์ผลแก๊สที่ละลายในน้ำมันแร่

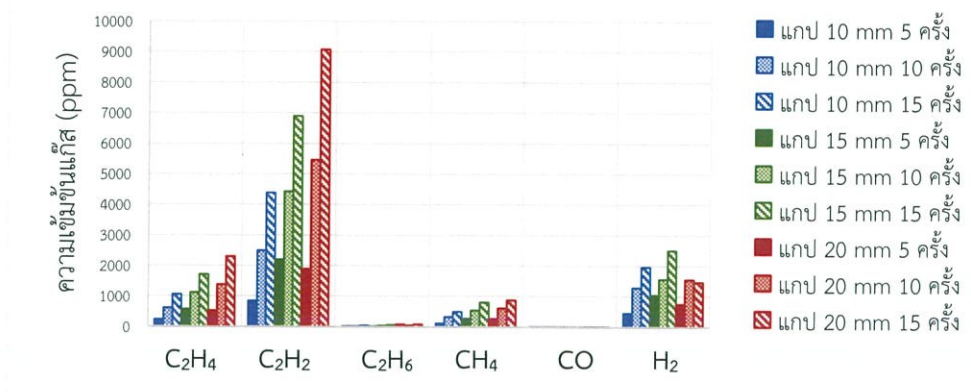


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส ( $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $C_2H_6$ ,  $CH_4$ ,  $CO$  และ  $H_2$ ) ที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวนในการทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของน้ำมันแร่

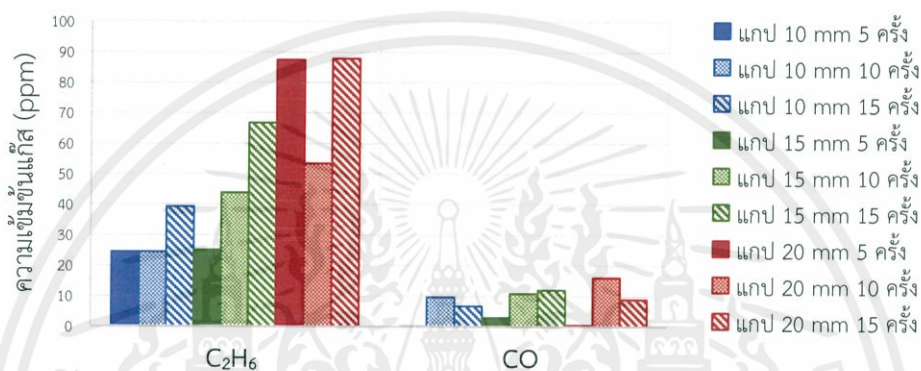


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส ( $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $C_2H_6$ ,  $CH_4$ ,  $CO$  และ  $H_2$ ) ที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวนในการทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าชั่วคราวของน้ำมันแร่ โดย (ก) ปริมาณแก๊ส  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $C_2H_6$ ,  $CH_4$ ,  $CO$  และ  $H_2$   
(ข) ภาพขยายของปริมาณแก๊ส  $C_2H_6$  และแก๊ส  $CO$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

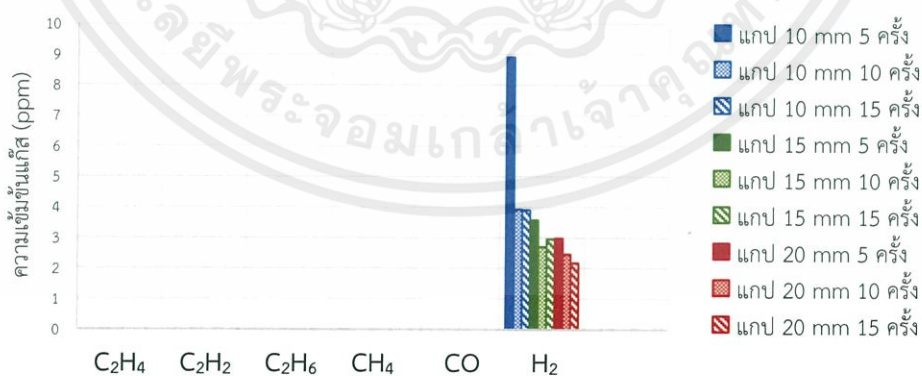


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub>) ที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกตาวนในการทดสอบการเบรกตาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่วพลของน้ำมันแร่ โดย (ก) ปริมาณแก๊ส C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub> (ข) ภาพขยายของปริมาณแก๊ส C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> และแก๊ส CO



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub>) ที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการดีสชาร์จในการทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่วพลของน้ำมันแร่

จากกราฟรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.3 พบว่า การเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของน้ำมันแร่จะปรากฏแก๊สเอทิลีน แก๊สอะเซทิลีน แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทน ในขณะที่การเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวและชั่วคราว จะปรากฏแก๊สทุกชนิดที่ทำการสังเกตการณ์ คือ แก๊สเอทิลีน แก๊สอะเซทิลีน แก๊สอีเทน แก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน จากทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันทั้งสามชนิดพบว่า ความเข้มข้นแก๊สไฮโดรคาร์บอน และแก๊สไฮโดรเจน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนครั้งการเบรกดาวน์เพิ่มขึ้น และเมื่อระยะเวลาแกปเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนครั้งการเบรกดาวน์มากขึ้น เท่านั้น โดยความเข้มข้นแก๊สที่มากที่สุด คือ แก๊สอะเซทิลีน ตามด้วยแก๊สไฮโดรเจน แก๊สเอทิลีน แก๊สมีเทน แก๊สอีเทน และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.4 พบว่า การดิสชาร์จบางส่วนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของน้ำมันแร่จะปรากฏเพียงแก๊สไฮโดรเจน โดยความเข้มข้นแก๊สมีแนวโน้มลดลงเมื่อจำนวนครั้งการดิสชาร์จเพิ่มขึ้น และเมื่อระยะเวลาแกปเพิ่มขึ้น



#### 4.1.2 การทดสอบน้ำมัน FR3

##### 4.1.2.1 ผลการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน FR3 (DGA)

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน FR3

ลำดับ	รหัส	ชนิดของแรงดันไฟฟ้า	ฉนวนเหลว	ระยะแคบ (mm)	การเบรกดาวน์/การดิสชาร์จ (ครั้ง)	ความเข้มข้นแก๊ส (ppm)						
						CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	H <sub>2</sub>
1	FR3#base <sup>1</sup>	-	น้ำมัน FR3	-	-	357.931	0.000	0.000	6.340	0.000	5.063	23.743
2	FR3#base <sup>2</sup>	-	น้ำมัน FR3	-	-	357.204	0.000	0.000	8.835	0.000	5.670	26.005
3	AC_FR3_1.0#5 <sup>1</sup>	กระแสสลับ	น้ำมัน FR3	1.0	5	262.872	0.000	2.765	11.167	0.000	4.964	8.793
4	AC_FR3_1.0#10 <sup>1</sup>	กระแสสลับ	น้ำมัน FR3	1.0	10	308.694	0.766	4.197	13.328	0.000	6.766	10.911
5	AC_FR3_1.0#15 <sup>1</sup>	กระแสสลับ	น้ำมัน FR3	1.0	15	280.675	0.914	5.209	14.337	0.000	8.554	12.683
6	AC_FR3_1.5#5 <sup>2</sup>	กระแสสลับ	น้ำมัน FR3	1.5	5	516.460	0.883	4.853	11.129	0.000	10.701	48.391
7	AC_FR3_1.5#10 <sup>2</sup>	กระแสสลับ	น้ำมัน FR3	1.5	10	466.761	1.203	6.730	9.658	0.000	10.404	35.452
8	AC_FR3_1.5#15 <sup>2</sup>	กระแสสลับ	น้ำมัน FR3	1.5	15	509.610	1.512	11.307	8.489	0.000	8.758	28.083
9	AC_FR3_2.0#5 <sup>2</sup>	กระแสสลับ	น้ำมัน FR3	2	5	414.017	1.052	5.632	7.289	0.000	6.966	25.251
10	AC_FR3_2.0#10 <sup>2</sup>	กระแสสลับ	น้ำมัน FR3	2	10	487.537	1.491	8.781	8.888	0.000	10.112	32.173
11	AC_FR3_2.0#15 <sup>2</sup>	กระแสสลับ	น้ำมัน FR3	2	15	528.929	1.859	11.486	11.724	0.000	13.008	40.832

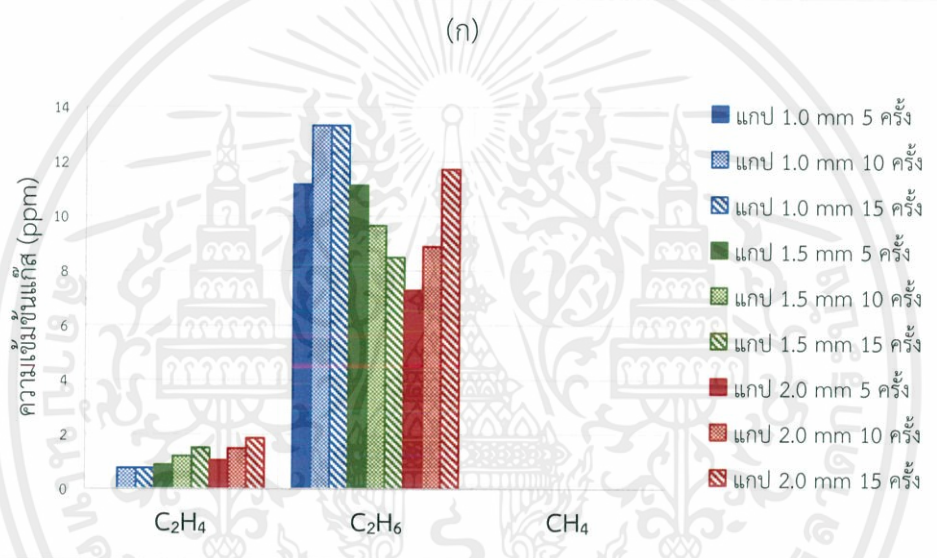
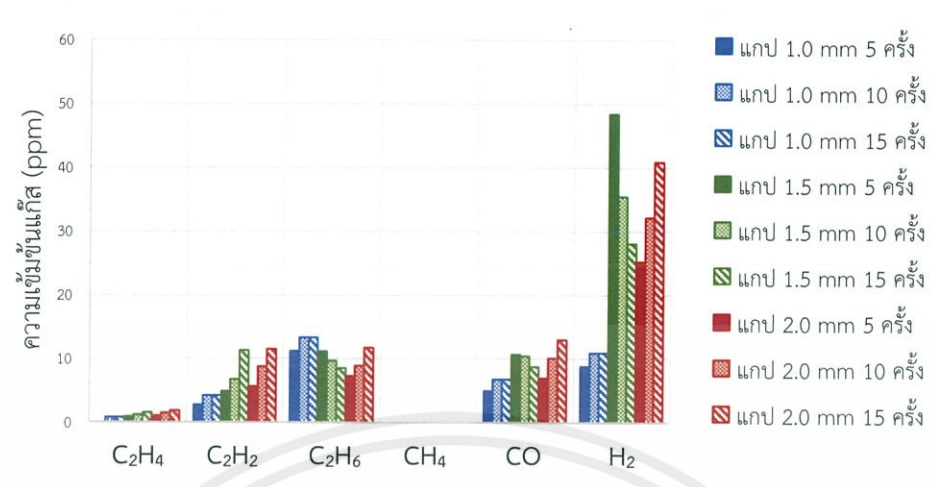
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน FR3 (ต่อ)

ลำดับ	รหัส	ชนิดของแรงดันไฟฟ้า	ฉนวนเหลว	ระยะแกป (mm)	การเบรคความ/การดิสชาร์จ (ครั้ง)	ความเข้มข้นแก๊ส (ppm)						
						CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	H <sub>2</sub>
12	lm+_FR3_10#5 <sup>1</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมัน FR3	10	5	236.658	4.296	69.134	16.518	0.409	18.542	54.052
13	lm+_FR3_10#10 <sup>1</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมัน FR3	10	10	325.220	17.851	240.590	18.888	5.399	54.672	144.970
14	lm+_FR3_10#15 <sup>1</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมัน FR3	10	15	317.195	21.527	294.532	32.914	5.962	56.697	142.825
15	lm+_FR3_15#5 <sup>1</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมัน FR3	15	5	290.325	20.465	201.143	15.134	6.699	51.357	155.820
16	lm+_FR3_15#10 <sup>1</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมัน FR3	15	10	375.601	53.111	489.626	23.671	17.755	108.015	310.906
17	lm+_FR3_15#15 <sup>1</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมัน FR3	15	15	365.997	72.892	660.955	24.471	20.841	103.387	259.570
18	lm+_FR3_20#5 <sup>1</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมัน FR3	20	5	412.024	46.215	334.576	19.931	13.219	61.144	149.444
19	lm+_FR3_20#10 <sup>1</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมัน FR3	20	10	452.681	105.863	760.604	26.085	30.474	125.805	337.641
20	lm+_FR3_20#15 <sup>1</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมัน FR3	20	15	505.858	194.513	1375.815	41.987	68.686	291.266	780.695
21	lm-_FR3_10#5 <sup>1</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมัน FR3	10	5	434.376	29.782	266.402	18.435	9.536	51.123	121.795
22	lm-_FR3_10#10 <sup>1</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมัน FR3	10	10	492.600	39.672	438.126	20.311	13.632	82.615	210.667
23	lm-_FR3_10#15 <sup>1</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมัน FR3	10	15	485.110	76.949	727.121	26.541	28.176	138.015	385.993
24	lm-_FR3_15#5 <sup>1</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมัน FR3	15	5	449.017	103.384	531.408	26.766	32.806	97.746	244.626
25	lm-_FR3_15#10 <sup>1</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมัน FR3	15	10	503.214	206.193	1126.823	44.039	73.882	219.818	610.355
26	lm-_FR3_15#15 <sup>1</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมัน FR3	15	15	502.305	261.722	1458.714	52.691	88.232	222.820	597.113

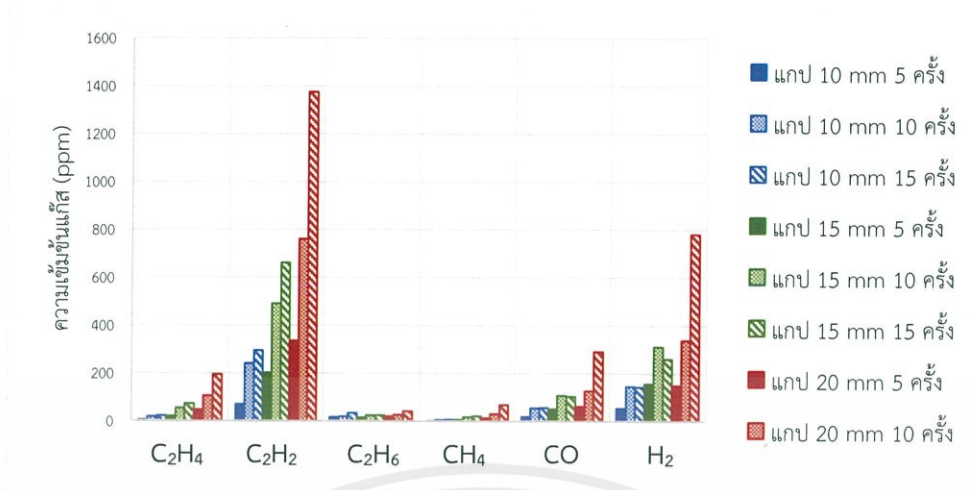
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน FR3 (ต่อ)

ลำดับ	รหัส	ชนิดของแรงดันไฟฟ้า	ฉนวนเหลว	ระยะแก๊ป (mm)	การเบรกดาวน์/การดิสชาร์จ (ครั้ง)	ความเข้มข้นแก๊ส (ppm)						
						CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	H <sub>2</sub>
27	Im_FR3_20#5 <sup>1</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมัน FR3	20	5	461.817	174.632	709.688	31.408	52.451	121.074	291.226
28	Im_FR3_20#10 <sup>1</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมัน FR3	20	10	552.895	516.925	2053.066	23.190	188.418	392.545	1188.578
29	Im_FR3_20#15 <sup>1</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมัน FR3	20	15	548.280	549.012	2520.053	25.786	196.244	461.805	1599.133
30	PD_FR3_10#5 <sup>1</sup>	PD-	น้ำมัน FR3	10	5	606.778	0.000	0.000	7.854	0.000	16.486	47.458
31	PD_FR3_10#10 <sup>1</sup>	PD-	น้ำมัน FR3	10	10	339.579	0.000	0.000	5.275	0.000	9.301	27.652
32	PD_FR3_10#15 <sup>1</sup>	PD-	น้ำมัน FR3	10	15	466.228	0.000	0.000	6.277	0.000	11.745	33.418
33	PD_FR3_15#5 <sup>1</sup>	PD-	น้ำมัน FR3	15	5	436.612	0.000	0.000	6.278	0.000	11.489	35.117
34	PD_FR3_15#10 <sup>1</sup>	PD-	น้ำมัน FR3	15	10	547.397	0.000	0.000	6.889	0.000	12.029	35.337
35	PD_FR3_15#15 <sup>1</sup>	PD-	น้ำมัน FR3	15	15	376.326	0.000	0.000	5.919	0.000	9.374	30.725
36	PD_FR3_20#5 <sup>1</sup>	PD-	น้ำมัน FR3	20	5	573.331	0.000	0.000	8.194	0.000	15.584	52.639
37	PD_FR3_20#10 <sup>1</sup>	PD-	น้ำมัน FR3	20	10	425.968	0.000	0.000	6.822	0.000	10.493	38.880
38	PD_FR3_20#15 <sup>1</sup>	PD-	น้ำมัน FR3	20	15	551.109	0.000	0.000	8.049	0.000	14.610	45.695

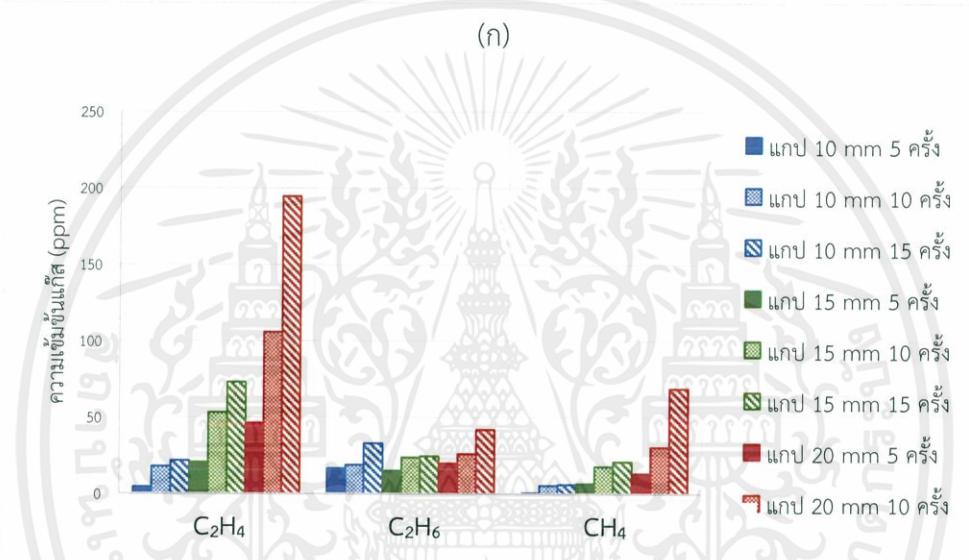
#### 4.1.2.2 การวิเคราะห์ผลแก๊สที่ละลายในน้ำมัน FR3



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub>) ที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกควานี่ในการทดสอบการเบรกควานี่ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของน้ำมัน FR3 โดย (ก) ปริมาณแก๊ส C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub>  
(ข) ภาพขยายของปริมาณแก๊ส C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> แก๊ส C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> และแก๊ส CH<sub>4</sub>

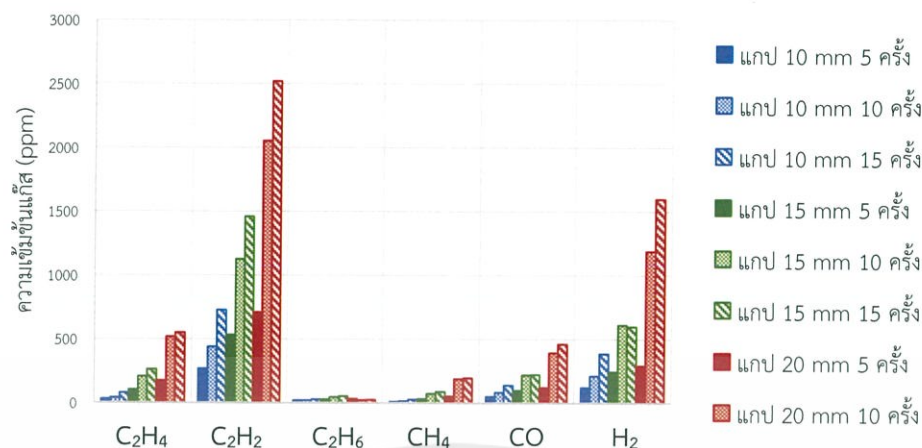


(ก)

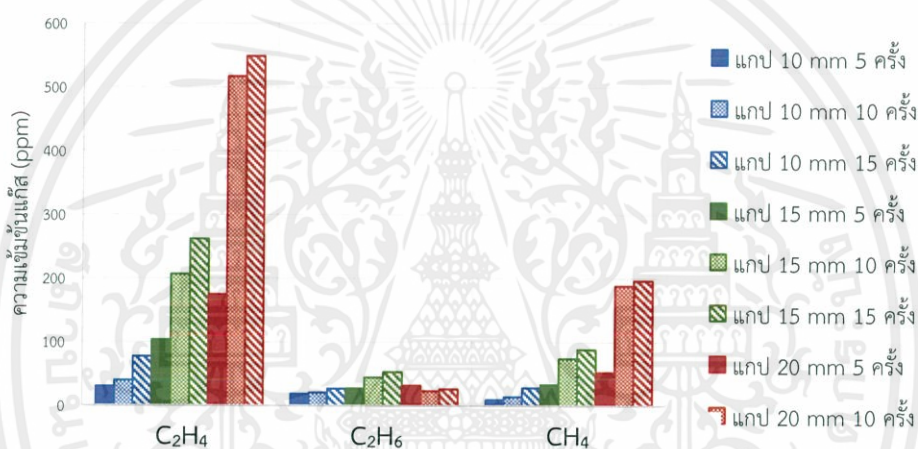


(ข)

รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub>) ที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวนในการทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่ววอกของน้ำมัน FR3 โดย (ก) ปริมาณแก๊ส C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub> (ข) ภาพขยายของปริมาณแก๊ส C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> แก๊ส C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> และแก๊ส CH<sub>4</sub>

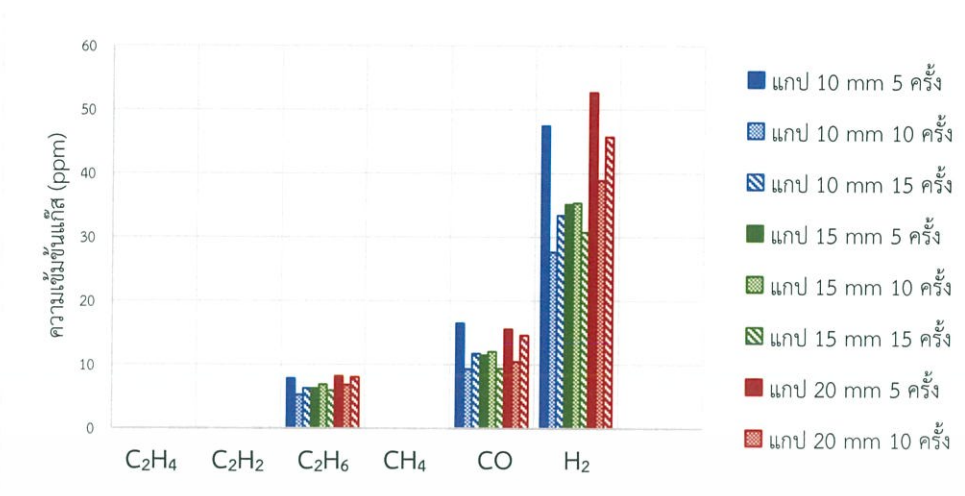


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub>) ที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวนในการทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของน้ำมัน FR3 โดย (ก) ปริมาณแก๊ส C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub>  
(ข) ภาพขยายของปริมาณแก๊ส C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> แก๊ส C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> และแก๊ส CH<sub>4</sub>



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub>) ที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการดีสชาร์จในการทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนด้วย แรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่วพลของน้ำมัน FR3

จากรูปที่ 4.5 ถึงรูปที่ 4.8 พบว่า การเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของน้ำมัน FR3 จะปรากฏแก๊สเอทิลีน แก๊สอะเซทิลีน แก๊สฮีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน ในขณะที่การเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่ววอกและชั่วพล จะปรากฏแก๊สทุกชนิดที่ทำการสังเกตการณ์ คือ แก๊สเอทิลีน แก๊สอะเซทิลีน แก๊สฮีเทน แก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน

จากการทดสอบเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ พบว่า ความเข้มข้นของแก๊สเอทิลีน แก๊สอะเซทิลีน แก๊สฮีเทน แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ส่วนใหญ่แล้วมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนครั้งการเบรกดาวน์เพิ่มขึ้นและเมื่อระยะแกปมากขึ้น ซึ่งค่าความเข้มข้นของแก๊สเหล่านี้จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อจำนวนครั้งการเบรกดาวน์มากขึ้นที่ระยะแกป 1.5 mm โดยความเข้มข้นแก๊สที่มากที่สุด คือ แก๊สไฮโดรเจน ตามด้วยแก๊สอะเซทิลีน แก๊สฮีเทน และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในปริมาณใกล้เคียงกัน และแก๊สเอทิลีนในปริมาณต่ำที่สุด

จากการทดสอบเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้าชั่ววอกและชั่วพล พบว่า ความเข้มข้นแก๊สที่ทำการสังเกตการณ์มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน คือ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนครั้งการเบรกดาวน์เพิ่มขึ้นและเมื่อระยะแกปเพิ่มขึ้น โดยแรงดันไฟฟ้าชั่ววอกมีปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นมากที่สุด คือ แก๊สอะเซทิลีน ตามด้วยแก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สเอทิลีน แก๊สฮีเทน และแก๊สมีเทนตามลำดับ ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าชั่วพลมีความเข้มข้นแก๊สที่มากที่สุด คือ แก๊สอะเซทิลีน ตามด้วยแก๊สไฮโดรเจน ตามด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สเอทิลีนในปริมาณเท่า ๆ กัน ตามด้วยแก๊สมีเทน และแก๊สฮีเทน ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.8 พบว่า การดีสชาร์จบางส่วนด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่วพลของน้ำมัน FR3 จะปรากฏแก๊สฮีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน โดยค่าความเข้มข้นของแก๊สเหล่านี้ค่อนข้างกว้าง โดยความเข้มข้นแก๊สที่มากที่สุด คือ แก๊สไฮโดรเจน ตามด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สฮีเทน ตามลำดับ

### 4.1.3 การทดสอบน้ำมันปาล์ม

#### 4.1.3.1 ผลการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมันปาล์ม (DGA)

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมันปาล์ม

ลำดับ	รหัส	ชนิดของแรงดันไฟฟ้า	ฉนวนเหลว	ระยะแกป (mm)	การเบรกดาวน์/การดิสชาร์จ (ครั้ง)	ความเข้มข้นแก๊ส (ppm)						
						CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	H <sub>2</sub>
1	PO#base <sup>1</sup>	-	น้ำมันปาล์ม	-	-	379.710	0.853	0.000	0.000	0.109	19.694	0.000
2	PO#base <sup>2</sup>	-	น้ำมันปาล์ม	-	-	477.287	0.990	0.000	0.000	0.629	17.311	0.000
3	PO#base <sup>3</sup>	-	น้ำมันปาล์ม	-	-	496.486	0.473	0.000	0.000	1.508	18.029	3.292
4	AC_PO_1.0#5 <sup>1</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันปาล์ม	1.0	5	416.133	0.760	2.274	0.000	1.364	7.465	2.469
5	AC_PO_1.0#10 <sup>1</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันปาล์ม	1.0	10	447.086	1.028	4.194	0.000	1.666	8.521	2.979
6	AC_PO_1.0#15 <sup>1</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันปาล์ม	1.0	15	432.440	1.088	5.456	0.000	1.583	8.066	3.325
7	AC_PO_1.5#5 <sup>2</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันปาล์ม	1.5	5	606.660	1.591	3.634	0.000	1.397	21.532	2.381
8	AC_PO_1.5#10 <sup>2</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันปาล์ม	1.5	10	695.383	1.920	6.653	0.000	1.581	22.136	3.658
9	AC_PO_1.5#15 <sup>2</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันปาล์ม	1.5	15	569.816	1.753	8.342	0.000	0.947	18.089	4.048
10	AC_PO_2.0#5 <sup>2</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันปาล์ม	2	5	491.288	1.394	4.663	0.000	0.446	14.357	3.424
11	AC_PO_2.0#10 <sup>2</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันปาล์ม	2	10	687.341	2.298	8.856	0.000	1.902	25.642	4.991
12	AC_PO_2.0#15 <sup>2</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันปาล์ม	2	15	438.816	1.683	7.683	0.000	0.348	13.928	2.888

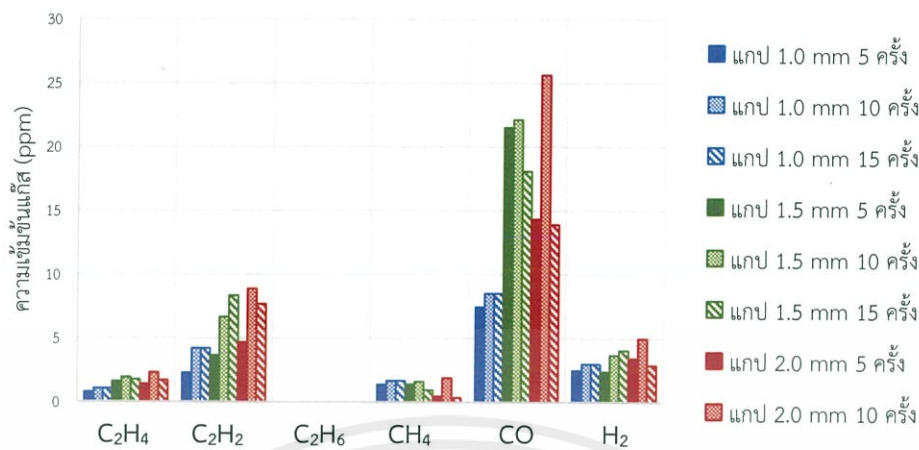
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมันปาล์ม (ต่อ)

ลำดับ	รหัส	ชนิดของแรงดันไฟฟ้า	ฉนวนเหลว	ระยะแคป (mm)	การเบรกดาวน/ การดิสชาร์จ (ครึ่ง)	ความเข้มข้นแก๊ส (ppm)						
						CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	H <sub>2</sub>
13	lm+_PO_10#5 <sup>1</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันปาล์ม	10	5	352.211	5.850	74.064	0.000	1.242	22.540	32.876
14	lm+_PO_10#10 <sup>1</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันปาล์ม	10	10	481.522	9.520	130.430	0.000	3.757	43.308	73.037
15	lm+_PO_10#15 <sup>1</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันปาล์ม	10	15	431.917	18.029	238.493	0.000	5.943	55.407	110.925
16	lm+_PO_15#5 <sup>1</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันปาล์ม	15	5	382.400	19.385	162.406	0.000	5.944	30.910	63.003
17	lm+_PO_15#10 <sup>1</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันปาล์ม	15	10	362.895	35.055	289.190	4.195	11.654	55.833	160.577
18	lm+_PO_15#15 <sup>1</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันปาล์ม	15	15	369.942	58.596	475.535	6.075	19.737	85.722	250.453
19	lm+_PO_20#5 <sup>1</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันปาล์ม	20	5	378.109	39.390	259.184	3.833	12.272	41.669	102.294
20	lm+_PO_20#10 <sup>1</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันปาล์ม	20	10	450.452	93.668	521.501	7.396	32.567	121.754	384.942
21	lm+_PO_20#15 <sup>1</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันปาล์ม	20	15	408.680	113.003	711.305	9.669	33.468	110.545	306.379
22	lm-_PO_1.0#5 <sup>1</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมันปาล์ม	10	5	401.441	18.399	168.675	0.000	8.021	38.907	100.514
23	lm-_PO_1.0#10 <sup>1</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมันปาล์ม	10	10	407.809	50.686	385.691	5.171	18.003	70.539	206.526
24	lm-_PO_1.0#15 <sup>1</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมันปาล์ม	10	15	405.220	57.534	498.655	6.047	20.417	86.796	226.462
25	lm-_PO_1.5#5 <sup>1</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมันปาล์ม	15	5	428.895	69.149	359.111	5.855	23.670	63.452	180.747
26	lm-_PO_1.5#10 <sup>1</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมันปาล์ม	15	10	456.822	163.246	736.712	12.232	54.702	138.455	388.179
27	lm-_PO_1.5#15 <sup>1</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมันปาล์ม	15	15	416.760	144.884	817.782	12.111	50.812	147.782	402.689
28	lm-_PO_2.0#5 <sup>1</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมันปาล์ม	20	5	478.962	146.608	590.131	10.150	48.239	100.268	277.890

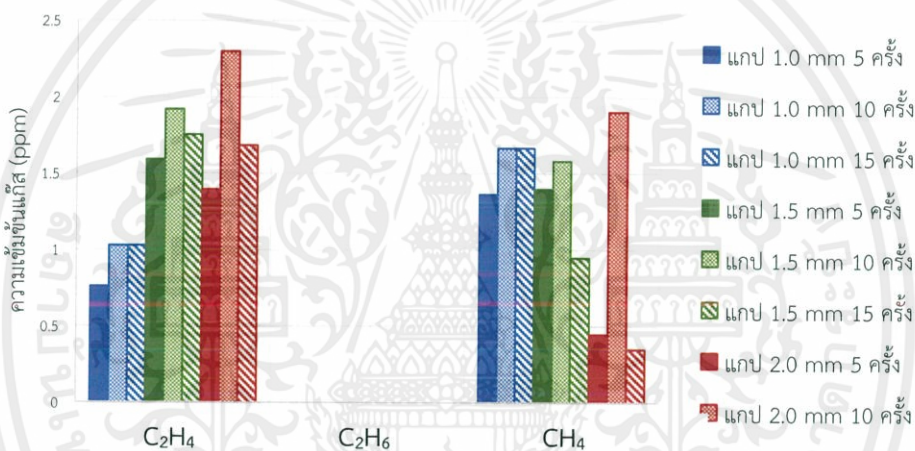
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมันปาล์ม (ต่อ)

ลำดับ	รหัส	ชนิดของ แรงดันไฟฟ้า	ฉนวนเหลว	ระยะแกป (mm)	การเบรกดาวน/ การดิสชาร์จ (ครั้ง)	ความเข้มข้นแก๊ส (ppm)						
						CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	H <sub>2</sub>
29	Im-PO_2.0#10 <sup>1</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมันปาล์ม	20	10	465.225	315.082	1238.851	22.810	97.818	217.464	637.898
30	Im-PO_2.0#15 <sup>1</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมันปาล์ม	20	15	533.167	444.715	1847.557	53.779	125.625	253.343	587.778
31	PD-PO_1.0#5 <sup>3</sup>	PD-	น้ำมันปาล์ม	10	5	556.419	0.445	0.000	0.000	1.496	13.654	3.493
32	PD-PO_1.0#10 <sup>3</sup>	PD-	น้ำมันปาล์ม	10	10	530.766	0.229	0.000	0.000	1.463	9.698	3.091
33	PD-PO_1.0#15 <sup>3</sup>	PD-	น้ำมันปาล์ม	10	15	513.511	0.244	0.000	0.000	1.472	9.027	3.412
34	PD-PO_1.5#5 <sup>3</sup>	PD-	น้ำมันปาล์ม	15	5	485.257	0.764	0.000	0.000	3.666	14.749	2.378
35	PD-PO_1.5#10 <sup>3</sup>	PD-	น้ำมันปาล์ม	15	10	425.687	0.000	0.000	0.000	3.045	12.925	2.470
36	PD-PO_1.5#15 <sup>3</sup>	PD-	น้ำมันปาล์ม	15	15	425.332	0.000	0.000	0.000	2.621	11.516	0.000
37	PD-PO_2.0#5 <sup>3</sup>	PD-	น้ำมันปาล์ม	20	5	463.953	1.164	0.000	0.000	0.284	21.239	0.000
38	PD-PO_2.0#10 <sup>3</sup>	PD-	น้ำมันปาล์ม	20	10	497.079	1.108	0.000	0.000	0.254	20.035	2.583
39	PD-PO_2.0#15 <sup>3</sup>	PD-	น้ำมันปาล์ม	20	15	448.223	0.858	0.000	0.000	1.693	14.957	2.120

#### 4.1.3.2 การวิเคราะห์ผลแก๊สที่ละลายในน้ำมันปาล์ม

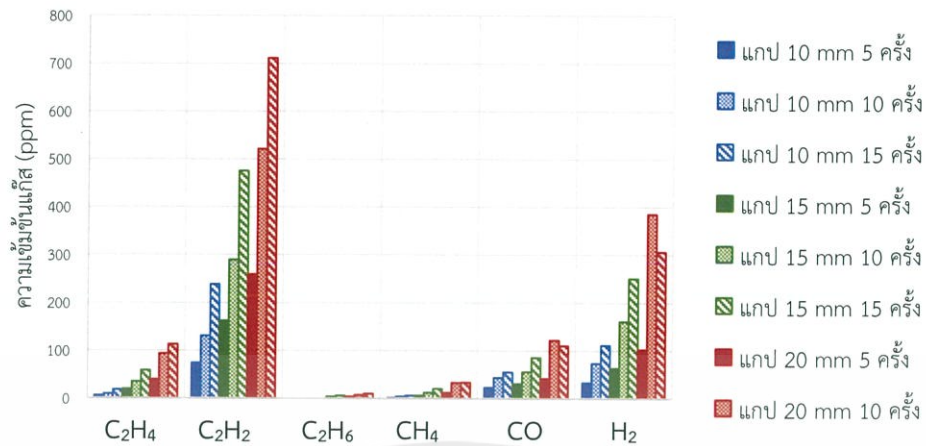


(ก)

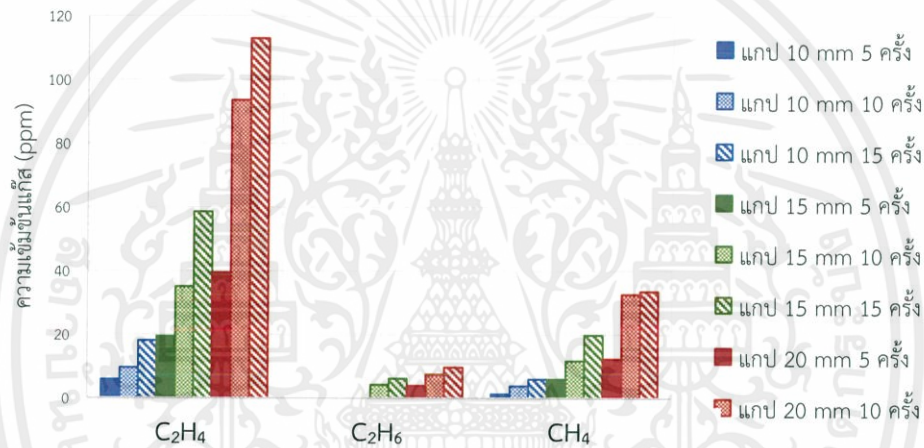


(ข)

รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub>) ที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวนในการทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของน้ำมันปาล์ม โดย (ก) ปริมาณแก๊ส C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub>  
(ข) ภาพขยายของปริมาณแก๊ส C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> แก๊ส C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> และแก๊ส CH<sub>4</sub>

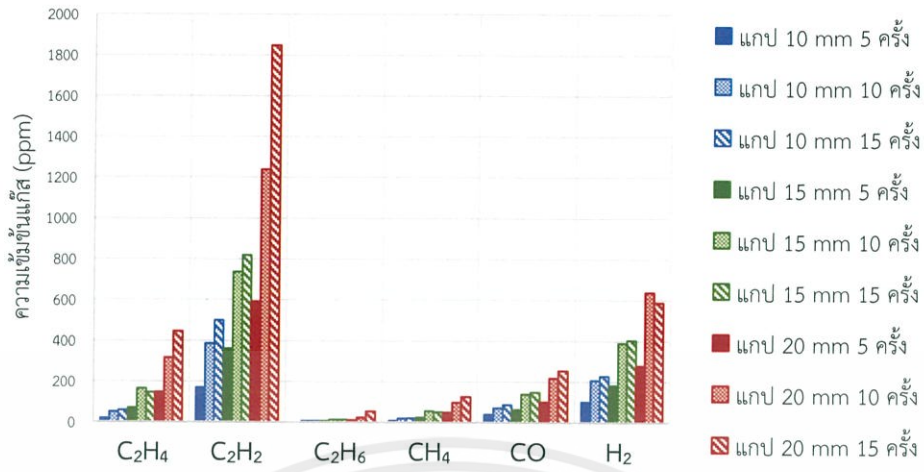


(ก)

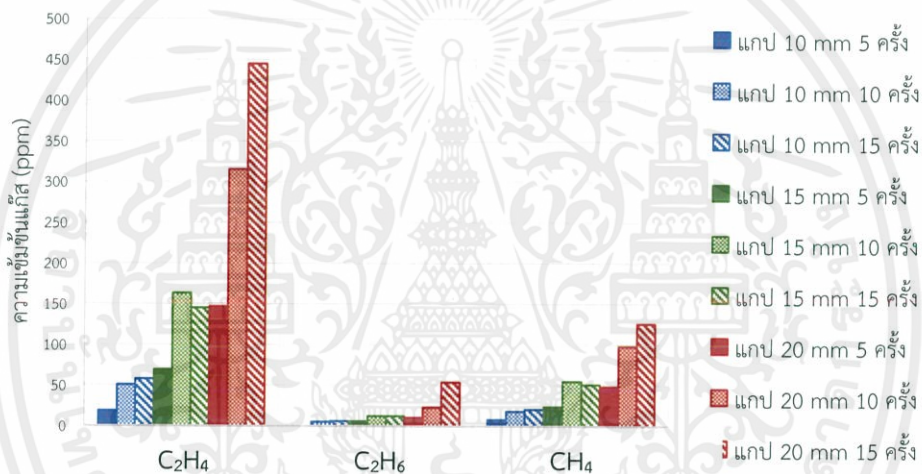


(ข)

รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub>) ที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวนในการทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่วคราวของน้ำมันปาล์ม โดย (ก) ปริมาณแก๊ส C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub>  
(ข) ภาพขยายของปริมาณแก๊ส C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> แก๊ส C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> และแก๊ส CH<sub>4</sub>



(ก)

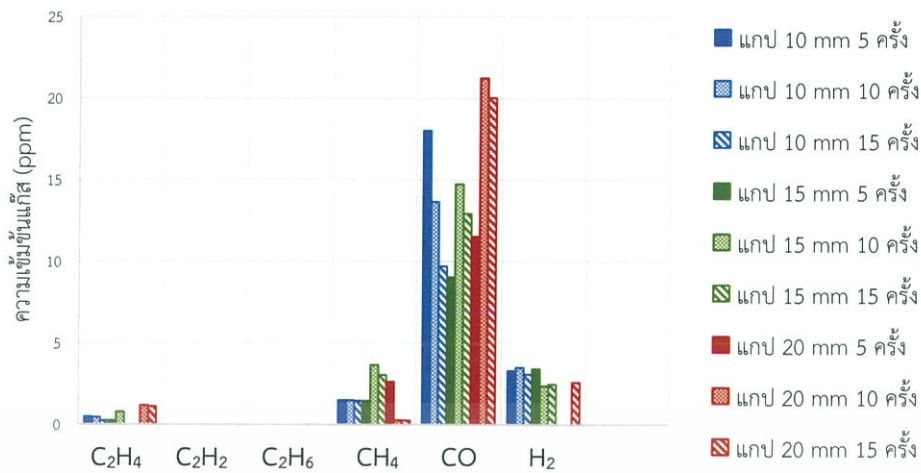


(ข)

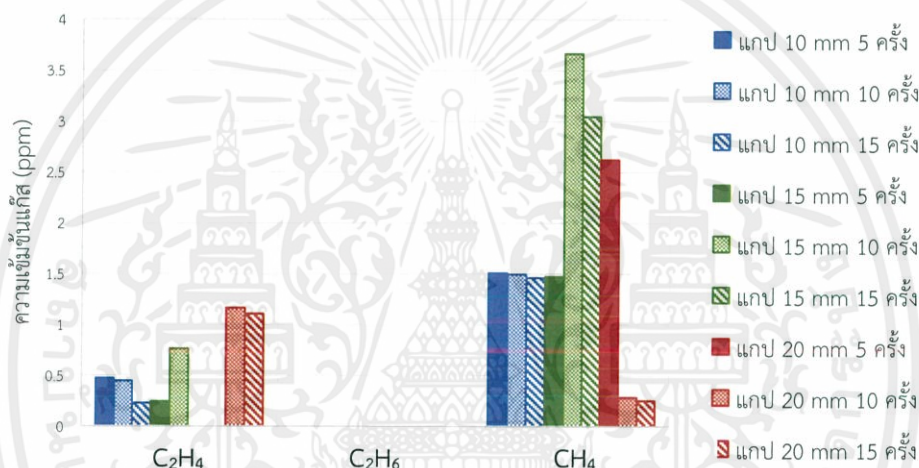
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub>) ที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกตาวนในการทดสอบการเบรกตาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าขั้วลบ

ของน้ำมันปาล์ม โดย (ก) ปริมาณแก๊ส C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub>

(ข) ภาพขยายของปริมาณแก๊ส C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> แก๊ส C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> และแก๊ส CH<sub>4</sub>



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub>) ที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการดีสชาร์จในการทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ขั้วลบของน้ำมันปาล์ม โดย (ก) ปริมาณแก๊ส C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub>  
(ข) ภาพขยายของปริมาณแก๊ส C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> แก๊ส C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> และแก๊ส CH<sub>4</sub>

จากกราฟรูปที่ 4.9 ถึงรูปที่ 4.11 พบว่า การเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของน้ำมันปาล์มจะปรากฏแก๊สเอทิลีน แก๊สอะเซทิลีน แก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน และ ในขณะที่การเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าขั้วบวกและขั้วลบ จะปรากฏแก๊สทุกชนิดที่ทำการสังเกตการณ์ คือ แก๊สเอทิลีน แก๊สอะเซทิลีน แก๊สอีเทน แก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน

จากการทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ พบว่า ความเข้มข้นของแก๊สอะเซทิลีน และแก๊สไฮโดรเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนครั้งการเบรกดาวน์มากขึ้น และเมื่อระยะแกปมากขึ้น ในขณะที่ความเข้มข้นของแก๊สชนิดอื่นจะค่อนข้างกว้าง โดยความเข้มข้นแก๊สที่มาก

ที่สุด คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ตามด้วยแก๊สอะเซทิลีน แก๊สไฮโดรเจน และความเข้มข้นที่เท่ากันของแก๊สเอทิลีน และแก๊สมีเทน

จากการทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวและชั่วลบ พบว่า ความเข้มข้นแก๊สทุกชนิดที่ทำการสังเกตการณ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนครั้งการเบรกดาวน์เพิ่มขึ้น และเมื่อระยะแกบเพิ่มขึ้น โดยความเข้มข้นแก๊สที่มากที่สุด คือ แก๊สอะเซทิลีนตามด้วยแก๊สไฮโดรเจน ตามด้วยปริมาณที่เท่ากันของแก๊สเอทิลีน และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ตามด้วยแก๊สมีเทน และแก๊สอีเทน ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.12 พบว่า การดิสชาร์จบางส่วนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบของน้ำมันปาล์ม จะปรากฏแก๊สเอทิลีน แก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน โดยค่าความเข้มข้นของแก๊สเหล่านี้จะค่อนข้างกว้าง โดยความเข้มข้นแก๊สที่มากที่สุด คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ตามด้วยแก๊สไฮโดรเจน แก๊สมีเทน และแก๊สเอทิลีน ตามลำดับ



#### 4.1.4 การทดสอบเพรสบอร์คที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันแร่

##### 4.1.4.1 ผลการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมันแร่ จากการทดสอบเพรสบอร์คที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันแร่

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมันแร่

ลำดับ	รหัส	ชนิดของแรงดันไฟฟ้า	ฉนวนเหลว	เปลี่ยนกระดาษ	ระยะแกป (mm)	การเบรกคาวน (ครั้ง)	ความเข้มข้นแก๊ส (ppm)						
							CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	H <sub>2</sub>
1	P_MO#base <sup>1</sup>	-	น้ำมันแร่	-	-	-	334.785	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.572
2	P_MO#base <sup>2</sup>	-	น้ำมันแร่	-	-	-	339.958	0.000	0.000	0.000	0.000	193.894	0
3	P_MO#base <sup>3</sup>	-	น้ำมันแร่	-	-	-	301.561	0.000	0.000	0.000	0.000	2.014	0
4	AC_P_NC_MO_32#5 <sup>1</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันแร่	ไม่เปลี่ยน	3.2	5	243.792	4.657	14.986	2.000	1.277	5.098	18.188
5	AC_P_NC_MO_32#10 <sup>1</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันแร่	ไม่เปลี่ยน	3.2	10	294.439	64.704	244.509	10.797	26.696	51.891	148.852
6	AC_P_NC_MO_32#15 <sup>1</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันแร่	ไม่เปลี่ยน	3.2	15	237.591	98.679	359.078	14.141	36.891	64.370	179.598
7	AC_P_C_MO_16#5 <sup>2</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันแร่	เปลี่ยน	1.6	5	467.357	83.260	365.841	12.822	30.484	64.383	212.741
8	AC_P_C_MO_16#10 <sup>2</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันแร่	เปลี่ยน	1.6	10	586.475	329.127	1181.117	58.420	115.766	205.223	659.328
9	AC_P_C_MO_16#15 <sup>2</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันแร่	เปลี่ยน	1.6	15	616.223	692.775	2158.185	58.505	210.137	244.903	809.259
10	AC_P_C_MO_32#5 <sup>1</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันแร่	เปลี่ยน	3.2	5	282.797	381.036	2533.439	39.004	228.121	486.019	1955.025
11	AC_P_C_MO_32#10 <sup>1</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันแร่	เปลี่ยน	3.2	10	415.736	1170.259	7907.893	120.115	778.334	1884.732	7421.527
12	AC_P_C_MO_32#15 <sup>1</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันแร่	เปลี่ยน	3.2	15	433.231	1785.299	11405.400	192.233	1006.648	1908.414	7573.217

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมันแร่ (ต่อ)

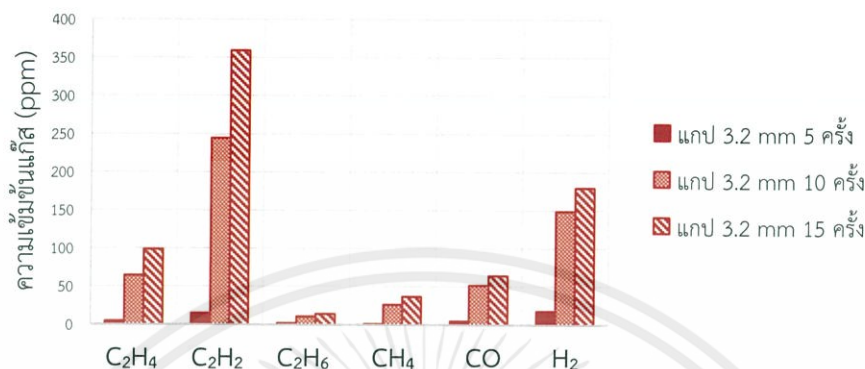
ลำดับ	รหัส	ชนิดของแรงดันไฟฟ้า	ฉนวนเหลว	เปลี่ยนกระดาษ	ระยะแกป (mm)	การเบรกตาวาน์ (ครั้ง)	ความเข้มข้นแก๊ส (ppm)						
							CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	H <sub>2</sub>
12	lm+_P_NC_MO_16#5 <sup>2</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันแร่	ไม่เปลี่ยน	1.6	5	456.619	0.967	1.727	0.000	0.000	1.685	2.386
13	lm+_P_NC_MO_16#10 <sup>2</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันแร่	ไม่เปลี่ยน	1.6	10	434.263	2.684	2.903	0.000	0.632	2.571	3.002
14	lm+_P_NC_MO_16#15 <sup>2</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันแร่	ไม่เปลี่ยน	1.6	15	498.287	5.534	5.271	1.831	2.841	4.244	5.903
15	lm+_P_NC_MO_32#5 <sup>1</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันแร่	ไม่เปลี่ยน	3.2	5	303.170	16.230	16.598	3.114	16.624	32.556	25.61
16	lm+_P_NC_MO_32#10 <sup>1</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันแร่	ไม่เปลี่ยน	3.2	10	288.449	39.919	47.655	5.265	46.301	93.302	82.471
17	lm+_P_NC_MO_32#15 <sup>1</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันแร่	ไม่เปลี่ยน	3.2	15	298.138	77.900	97.584	9.447	80.531	139.536	126.068
18	lm+_P_C_MO_16#5 <sup>3</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันแร่	เปลี่ยน	1.6	5	369.585	10.089	6.865	1.249	8.648	13.202	14.041
19	lm+_P_C_MO_16#10 <sup>3</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันแร่	เปลี่ยน	1.6	10	317.504	33.449	19.302	5.657	33.157	32.616	47.644
20	lm+_P_C_MO_16#15 <sup>3</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันแร่	เปลี่ยน	1.6	15	408.111	48.422	29.928	7.856	47.325	43.134	69.246
21	lm+_P_C_MO_32#5 <sup>2</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันแร่	เปลี่ยน	3.2	5	369.469	27.394	19.911	5.207	30.478	48.872	30.765
22	lm+_P_C_MO_32#10 <sup>2</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันแร่	เปลี่ยน	3.2	10	413.954	90.806	73.219	14.632	91.607	104.043	87.402
23	lm+_P_C_MO_32#15 <sup>2</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันแร่	เปลี่ยน	3.2	15	336.561	131.453	118.766	19.334	126.944	133.932	123.812

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมันแร่ (ต่อ)

ลำดับ	รหัส	ชนิดของแรงดันไฟฟ้า	ฉนวนเหลว	เปลี่ยนกระดาษ	ระยะแกป (mm)	การเบรกดาวน์ (ครั้ง)	ความเข้มข้นแก๊ส (ppm)						
							CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	H <sub>2</sub>
24	lm_P_NC_MO_16#5 <sup>2</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมันแร่	ไม่เปลี่ยน	1.6	5	405.925	0.000	0.000	0.000	0.000	0.796	0
25	lm_P_NC_MO_16#10 <sup>2</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมันแร่	ไม่เปลี่ยน	1.6	10	464.592	0.000	0.000	0.000	0.000	1.316	0
26	lm_P_NC_MO_16#15 <sup>2</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมันแร่	ไม่เปลี่ยน	1.6	15	414.070	2.229	2.482	0.000	0.041	1.373	2.559
27	lm_P_NC_MO_32#5 <sup>1</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมันแร่	ไม่เปลี่ยน	3.2	5	300.891	68.413	62.864	9.016	58.795	12.659	69.68
28	lm_P_NC_MO_32#10 <sup>1</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมันแร่	ไม่เปลี่ยน	3.2	10	349.080	195.627	197.282	22.525	195.013	42.849	253.222
29	lm_P_NC_MO_32#15 <sup>1</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมันแร่	ไม่เปลี่ยน	3.2	15	245.989	241.515	268.682	27.220	199.887	40.276	218.903
30	lm_P_C_MO_16#5 <sup>3</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมันแร่	เปลี่ยน	1.6	5	446.592	17.528	24.968	1.918	12.951	19.862	20.755
31	lm_P_C_MO_16#10 <sup>3</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมันแร่	เปลี่ยน	1.6	10	520.615	41.828	51.236	4.994	31.756	41.281	75.876
32	lm_P_C_MO_16#15 <sup>3</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมันแร่	เปลี่ยน	1.6	15	560.966	58.647	60.506	7.455	41.581	44.342	41.051
33	lm_P_C_MO_32#5 <sup>2</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมันแร่	เปลี่ยน	3.2	5	397.667	56.083	72.963	#VALUE!	45.317	60.584	57.761
34	lm_P_C_MO_32#10 <sup>2</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมันแร่	เปลี่ยน	3.2	10	531.165	158.758	195.311	18.964	146.840	187.381	202.895
35	lm_P_C_MO_32#15 <sup>2</sup>	อิมพัลส์ลบ	น้ำมันแร่	เปลี่ยน	3.2	15	420.427	197.900	242.688	23.437	177.613	214.361	237.623

#### 4.1.4.2 การวิเคราะห์ผลแก๊สที่ละลายในน้ำมันแร่ จากการทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันแร่

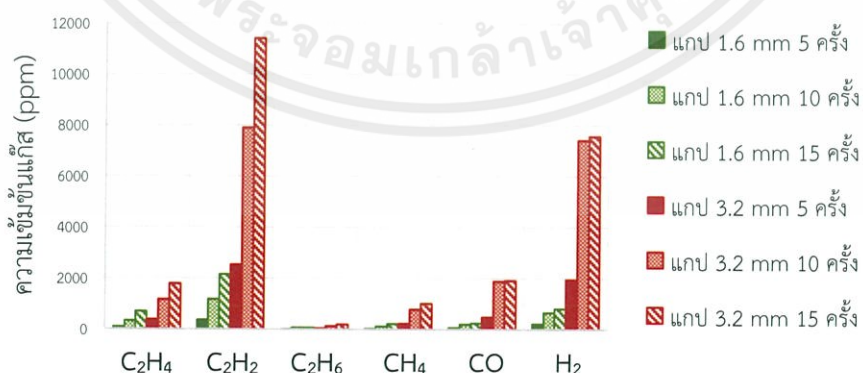
1. การทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันแร่ กรณีเบรกดาวน์ซ้ำจุดเดิม (AC\_P\_NC\_MO)



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub>) ที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวน์ในการทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันแร่ กรณีเบรกดาวน์ซ้ำจุดเดิม

พบว่า จะปรากฏแก๊สทุกชนิดที่ทำการสังเกตการณ์ คือ แก๊สเอทิลีน แก๊สอะเซทิลีน แก๊สฮีเทน แก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน โดยความเข้มข้นแก๊สเหล่านี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนครั้งการเบรกดาวน์เพิ่มขึ้น โดยความเข้มข้นแก๊สที่มากที่สุด คือ แก๊สอะเซทิลีน ตามด้วยแก๊สไฮโดรเจน แก๊สเอทิลีน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สมีเทน และแก๊สฮีเทน ตามลำดับ

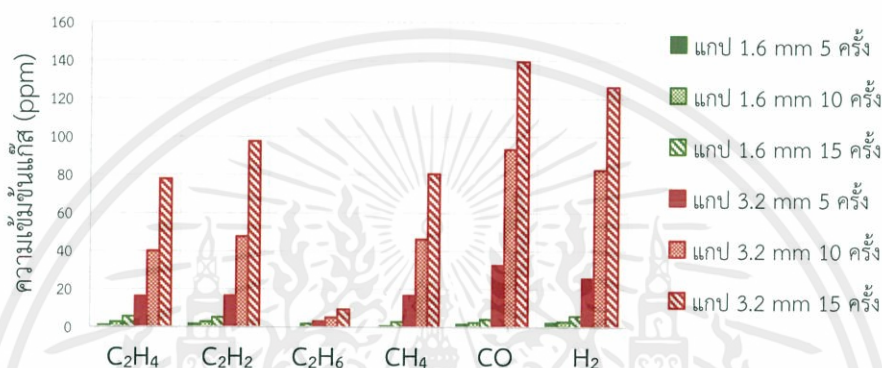
2. การทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันแร่ กรณีเบรกดาวน์ไม่ซ้ำจุดเดิม (AC\_P\_C\_MO)



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub>) ที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวน์ในการทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันแร่ กรณีเบรกดาวน์ไม่ซ้ำจุดเดิม

พบว่า จะปรากฏแก๊สทุกชนิดที่ทำการสังเกตการณ์ คือ แก๊สเอทิลีน แก๊สอะเซทิลีน แก๊สอีเทน แก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน โดยความเข้มข้นแก๊สเหล่านี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนครั้งการเบรกดาวน์เพิ่มขึ้น และเมื่อระยะแกปเพิ่มขึ้น โดยความเข้มข้นแก๊สที่มากที่สุด คือ แก๊สอะเซทิลีน ตามด้วยแก๊สไฮโดรเจน แก๊สเอทิลีน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สมีเทน และแก๊สอีเทน ตามลำดับ

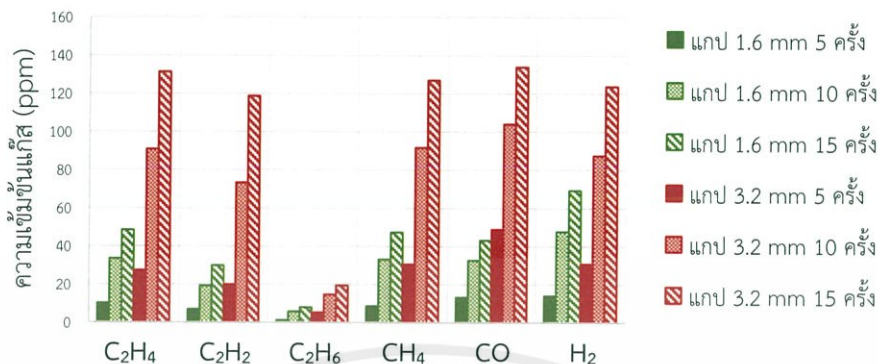
3. การทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันแร่ กรณีเบรกดาวน์ซ้ำจุดเดิม (Im+ \_P \_NC \_MO)



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub>) ที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวน์ในการทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันแร่ กรณีเบรกดาวน์ซ้ำจุดเดิม

พบว่า จะปรากฏแก๊สทุกชนิดที่ทำการสังเกตการณ์ คือ แก๊สเอทิลีน แก๊สอะเซทิลีน แก๊สอีเทน แก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน โดยความเข้มข้นแก๊สเหล่านี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนครั้งการเบรกดาวน์เพิ่มขึ้น และเมื่อระยะแกปเพิ่มขึ้น โดยความเข้มข้นแก๊สที่มากที่สุด คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ตามด้วยแก๊สไฮโดรเจน แก๊สอะเซทิลีน แก๊สมีเทน แก๊สเอทิลีน และแก๊สอีเทน ตามลำดับ

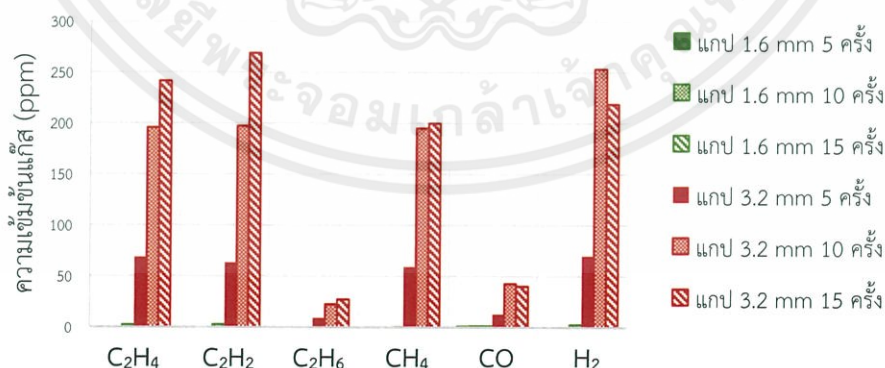
4. การทดสอบการเบรกตาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันแร่ กรณีเบรกตาวนซ้ำไม่จุดเดิม (Im+ \_P\_C\_MO)



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub>) ที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกตาวนในการทดสอบการเบรกตาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันแร่ กรณีเบรกตาวนไม่ซ้ำจุดเดิม

พบว่า จะปรากฏแก๊สทุกชนิดที่ทำการสังเกตการณ์ คือ แก๊สเอทิลีน แก๊สอะเซทิลีน แก๊สอีเทน แก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน โดยความเข้มข้นแก๊สเหล่านี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนครั้งการเบรกตาวนเพิ่มขึ้น และเมื่อระยะแกปเพิ่มขึ้น โดยความเข้มข้นแก๊สที่มากที่สุด คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ตามด้วยแก๊สไฮโดรเจน แก๊สเอทิลีน แก๊สมีเทน แก๊สอะเซทิลีน และแก๊สอีเทน ตามลำดับ

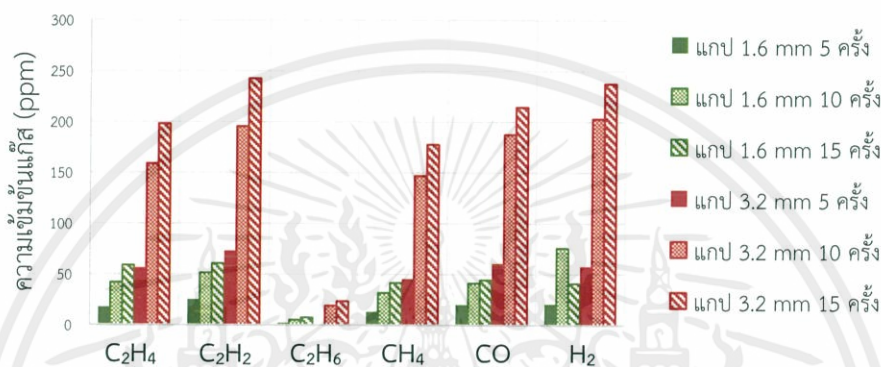
5. การทดสอบการเบรกตาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่วลบของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันแร่ กรณีเบรกตาวนซ้ำจุดเดิม (Im- \_P\_NC\_MO)



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub>) ที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกตาวนในการทดสอบการเบรกตาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่วลบของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันแร่ กรณีเบรกตาวนซ้ำจุดเดิม

พบว่า จะปรากฏแก๊สทุกชนิดที่ทำการสังเกตการณ์ คือ แก๊สเอทิลีน แก๊สอะเซทิลีน แก๊สอีเทน แก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน โดยความเข้มข้นแก๊สเหล่านี้จะมีค่าต่ำมากที่ระยะแก๊ป 1.6 mm ในขณะที่ความเข้มข้นแก๊สเหล่านี้ที่ระยะแก๊ป 3.2 mm มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนครั้งการเบรกดาวน์เพิ่มขึ้น โดยความเข้มข้นแก๊สที่มากที่สุด คือ แก๊สอะเซทิลีน ตามด้วยแก๊สไฮโดรเจน แก๊สเอทิลีน แก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สอีเทน ตามลำดับ

6. การทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันแร่ กรณีเบรกดาวน์ซ้ำไม่จุดเดิม (Im\_P\_C\_MO)



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub>) ที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวน์ในการทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันแร่ กรณีเบรกดาวน์ไม่ซ้ำจุดเดิม

พบว่า จะปรากฏแก๊สทุกชนิดที่ทำการสังเกตการณ์ คือ แก๊สเอทิลีน แก๊สอะเซทิลีน แก๊สอีเทน แก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน โดยความเข้มข้นแก๊สเหล่านี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนครั้งการเบรกดาวน์เพิ่มขึ้น และเมื่อระยะแก๊ปเพิ่มขึ้น โดยความเข้มข้นแก๊สที่มากที่สุด คือ แก๊สอะเซทิลีน ตามด้วยแก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สเอทิลีน แก๊สมีเทน และแก๊สอีเทน ตามลำดับ

#### 4.1.5 การทดสอบเพรสบอร์คที่ถูกอิมเพรเกนตในน้ำมัน FR3

##### 4.1.5.1 ผลการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน FR3 จากการทดสอบเพรสบอร์คที่ถูกอิมเพรเกนตในน้ำมัน FR3

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน FR3

ลำดับ	รหัส	ชนิดของแรงดันไฟฟ้า	ฉนวน	เปลี่ยนกระดาษ	ระยะแกป (mm)	การเบรกดาวน (ครั้ง)	ความเข้มข้นแก๊ส (ppm)						
							CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	H <sub>2</sub>
1	P_FR3#base <sup>1</sup>	-	FR3	-	-	-	418.092	0.000	0.000	8.211	0.000	4.790	11.139
2	P_FR3#base <sup>2</sup>	-	FR3	-	-	-	651.791	0.000	0.000	11.238	0.000	7.866	22.055
3	P_FR3#base <sup>3</sup>	-	FR3	-	-	-	590.171	0.000	0.000	5.918	1.396	7.854	28.078
4	P_FR3#base <sup>4</sup>	-	FR3	-	-	-	773.453	0.440	0.264	6.524	1.679	12.739	35.097
5	AC_P_NC_FR3_32#5 <sup>1</sup>	กระแสสลับ	FR3	ไม่เปลี่ยน	3.2	5	422.304	23.909	182.036	11.856	9.669	137.470	171.216
6	AC_P_NC_FR3_32#10 <sup>1</sup>	กระแสสลับ	FR3	ไม่เปลี่ยน	3.2	10	384.753	43.169	328.533	14.658	16.334	187.468	232.088
7	AC_P_NC_FR3_32#15 <sup>1</sup>	กระแสสลับ	FR3	ไม่เปลี่ยน	3.2	15	507.886	60.575	469.197	20.841	22.695	229.720	251.557
8	AC_P_C_FR3_16#5 <sup>2</sup>	กระแสสลับ	FR3	เปลี่ยน	1.6	5	799.161	24.994	105.775	18.464	12.747	113.899	168.592
9	AC_P_C_FR3_16#10 <sup>2</sup>	กระแสสลับ	FR3	เปลี่ยน	1.6	10	810.552	75.574	323.413	26.797	41.868	298.634	412.416
10	AC_P_C_FR3_16#15 <sup>2</sup>	กระแสสลับ	FR3	เปลี่ยน	1.6	15	752.657	121.110	495.764	33.151	64.658	388.904	433.893

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน FR3 (ต่อ)

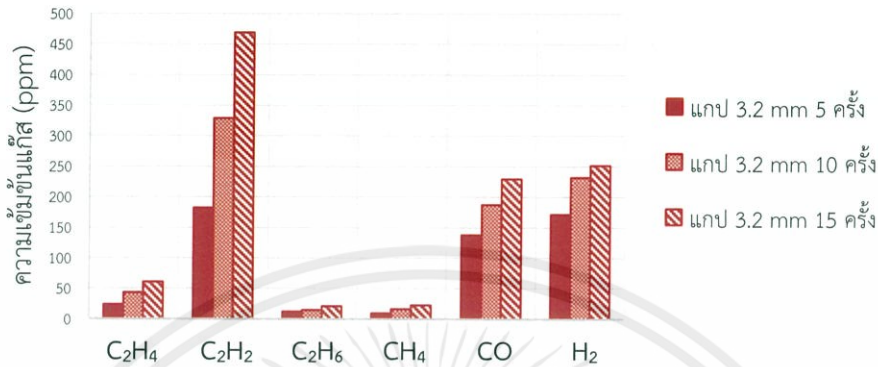
ลำดับ	รหัส	ชนิดของแรงดันไฟฟ้า	ฉนวนเหลว	เปลี่ยนกระดาษ	ระยะแกป (mm)	การเบรกดาวน (ครั้ง)	ความเข้มข้นแก๊ส (ppm)						
							CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	H <sub>2</sub>
11	AC_P_C_FR3_32#5 <sup>1</sup>	กระแสสลับ	FR3	เปลี่ยน	3.2	5	491.272	206.528	1278.200	40.470	99.228	1112.751	1375.503
12	AC_P_C_FR3_32#10 <sup>1</sup>	กระแสสลับ	FR3	เปลี่ยน	3.2	10	503.138	373.457	2567.765	37.177	180.472	1879.247	2205.762
13	AC_P_C_FR3_32#15 <sup>1</sup>	กระแสสลับ	FR3	เปลี่ยน	3.2	15	750.611	726.341	5046.932	75.195	339.355	3337.358	2949.581
14	Im+_P_NC_FR3_16#5 <sup>2</sup>	อิมพัลส์บวก	FR3	ไม่เปลี่ยน	1.6	5	797.771	0.000	0.000	12.149	0.000	11.215	27.751
15	Im+_P_NC_FR3_16#10 <sup>2</sup>	อิมพัลส์บวก	FR3	ไม่เปลี่ยน	1.6	10	544.734	0.000	0.000	8.608	0.000	7.783	21.780
16	Im+_P_NC_FR3_16#15 <sup>2</sup>	อิมพัลส์บวก	FR3	ไม่เปลี่ยน	1.6	15	631.396	0.000	0.000	9.647	0.000	10.401	22.562
17	Im+_P_NC_FR3_32#5 <sup>1</sup>	อิมพัลส์บวก	FR3	ไม่เปลี่ยน	3.2	5	449.016	0.885	0.000	8.762	0.000	6.614	13.513
18	Im+_P_NC_FR3_32#10 <sup>1</sup>	อิมพัลส์บวก	FR3	ไม่เปลี่ยน	3.2	10	396.950	10.153	9.392	9.156	2.952	11.032	18.014
19	Im+_P_NC_FR3_32#15 <sup>1</sup>	อิมพัลส์บวก	FR3	ไม่เปลี่ยน	3.2	15	410.517	21.296	23.259	9.830	6.632	16.914	23.571
20	Im+_P_C_FR3_16#5 <sup>3</sup>	อิมพัลส์บวก	FR3	เปลี่ยน	1.6	5	592.442	3.578	3.465	5.067	3.269	12.708	30.600
21	Im+_P_C_FR3_16#10 <sup>3</sup>	อิมพัลส์บวก	FR3	เปลี่ยน	1.6	10	650.471	14.146	12.351	7.014	10.255	25.060	50.877
22	Im+_P_C_FR3_16#15 <sup>3</sup>	อิมพัลส์บวก	FR3	เปลี่ยน	1.6	15	757.256	37.527	29.682	11.648	25.598	51.894	90.272
23	Im+_P_C_FR3_32#5 <sup>1</sup>	อิมพัลส์บวก	FR3	เปลี่ยน	3.2	5	751.263	24.973	17.930	9.918	15.765	40.884	70.464
24	Im+_P_C_FR3_32#10 <sup>1</sup>	อิมพัลส์บวก	FR3	เปลี่ยน	3.2	10	769.919	104.568	100.844	19.157	57.764	115.981	190.426
25	Im+_P_C_FR3_32#15 <sup>1</sup>	อิมพัลส์บวก	FR3	เปลี่ยน	3.2	15	756.919	144.412	128.407	24.889	83.248	154.209	231.383

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน FR3 (ต่อ)

ลำดับ	รหัส	ชนิดของแรงดันไฟฟ้า	ฉนวนเหลว	เปลี่ยนกระดาษ	ระยะแกป (mm)	การเบรกดาวน (ครั้ง)	ความเข้มข้นแก๊ส (ppm)						
							CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	H <sub>2</sub>
26	lm_P_NC_FR3_16#5 <sup>2</sup>	อิมพัลส์ลบ	FR3	ไม่เปลี่ยน	1.6	5	621.824	0.000	0.000	10.130	0.000	12.206	27.221
27	lm_P_NC_FR3_16#10 <sup>1</sup>	อิมพัลส์ลบ	FR3	ไม่เปลี่ยน	1.6	10	655.996	0.744	0.000	12.073	0.000	10.755	27.319
28	lm_P_NC_FR3_16#15 <sup>2</sup>	อิมพัลส์ลบ	FR3	ไม่เปลี่ยน	1.6	15	522.492	2.275	2.608	10.126	0.000	10.373	24.852
29	lm_P_NC_FR3_32#5 <sup>1</sup>	อิมพัลส์ลบ	FR3	ไม่เปลี่ยน	3.2	5	386.795	6.143	9.122	7.985	1.006	11.172	19.293
30	lm_P_NC_FR3_32#10 <sup>1</sup>	อิมพัลส์ลบ	FR3	ไม่เปลี่ยน	3.2	10	510.419	45.997	62.624	13.538	18.348	44.411	59.010
31	lm_P_NC_FR3_32#15 <sup>1</sup>	อิมพัลส์ลบ	FR3	ไม่เปลี่ยน	3.2	15	452.131	108.876	134.464	17.952	44.879	78.240	86.993
32	lm_P_C_FR3_16#5 <sup>2</sup>	อิมพัลส์ลบ	FR3	เปลี่ยน	1.6	5	659.067	13.034	10.097	12.579	6.249	23.895	38.267
33	lm_P_C_FR3_16#10 <sup>2</sup>	อิมพัลส์ลบ	FR3	เปลี่ยน	1.6	10	604.743	29.723	22.928	16.250	15.710	40.488	59.720
34	lm_P_C_FR3_16#15 <sup>2</sup>	อิมพัลส์ลบ	FR3	เปลี่ยน	1.6	15	726.081	61.596	56.508	18.450	38.406	88.311	101.332
35	lm_P_C_FR3_32#5 <sup>4</sup>	อิมพัลส์ลบ	FR3	เปลี่ยน	3.2	5	618.263	26.956	27.747	7.808	17.187	44.824	68.582
36	lm_P_C_FR3_32#10 <sup>4</sup>	อิมพัลส์ลบ	FR3	เปลี่ยน	3.2	10	594.889	57.640	53.966	10.981	32.026	69.429	102.965
37	lm_P_C_FR3_32#15 <sup>4</sup>	อิมพัลส์ลบ	FR3	เปลี่ยน	3.2	15	575.429	85.686	79.131	13.664	51.493	116.919	152.456

#### 4.1.5.2 การวิเคราะห์ผลแก๊สที่ละลายในน้ำมัน FR3 จากการทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน FR3

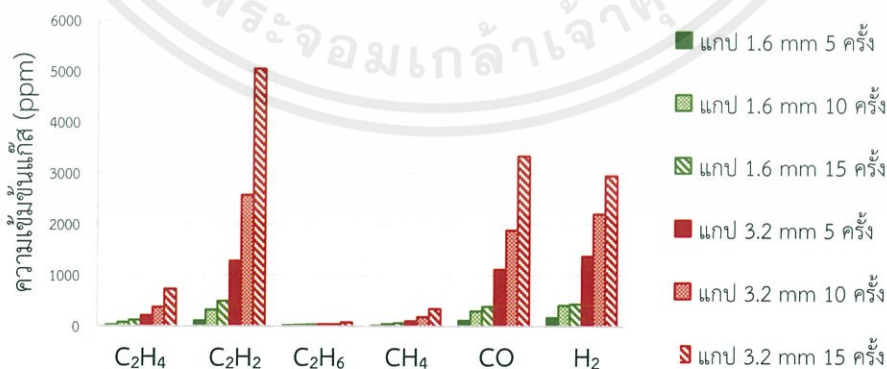
1. การทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน FR3 กรณีเบรกดาวน์ซ้ำจุดเดิม (AC\_P\_NC\_FR3)



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub>) ที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวน์ในการทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน FR3 กรณีเบรกดาวน์ซ้ำจุดเดิม

พบว่า จะปรากฏแก๊สทุกชนิดที่ทำการสังเกตการณ์ คือ แก๊สเอทิลีน แก๊สอะเซทิลีน แก๊สฮีเทน แก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน โดยความเข้มข้นแก๊สเหล่านี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนครั้งการเบรกดาวน์เพิ่มขึ้น โดยความเข้มข้นแก๊สที่มากที่สุด คือ แก๊สอะเซทิลีน ตามด้วยแก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สเอทิลีน ตามด้วยแก๊สมีเทน และแก๊สฮีเทนในปริมาณเท่า ๆ กัน ตามลำดับ

2. การทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน FR3 กรณีเบรกดาวน์ไม่ซ้ำจุดเดิม (AC\_P\_C\_FR3)

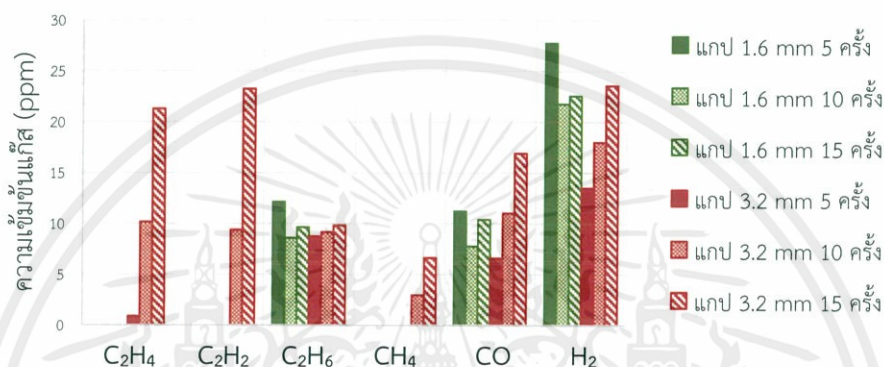


รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub>) ที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวน์ในการทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน FR3 กรณีเบรกดาวน์ไม่ซ้ำจุดเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่า จะปรากฏแก๊สทุกชนิดที่ทำการสังเกตการณ์ คือ แก๊สเอทิลีน แก๊สอะเซทิลีน แก๊สอีเทน แก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน โดยความเข้มข้นแก๊สเหล่านี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนครั้งการเบรกดาวน์เพิ่มขึ้น และเมื่อระยะแกปเพิ่มขึ้น โดยความเข้มข้นแก๊สที่มากที่สุด คือ แก๊สอะเซทิลีน ตามด้วยแก๊สไฮโดรเจน และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในปริมาณเท่า ๆ กัน ตามด้วยแก๊สเอทิลีน แก๊สมีเทน และแก๊สอีเทน ตามลำดับ

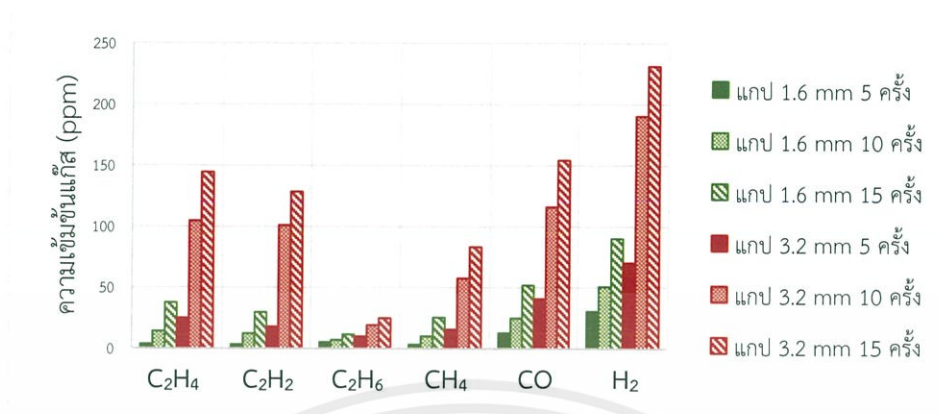
3. การทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน FR3 กรณีเบรกดาวน์ซ้ำจุดเดิม (Im+\_P\_NC\_FR3)



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub>) ที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวน์ในการทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน FR3 กรณีเบรกดาวน์ซ้ำจุดเดิม

พบว่า ความเข้มข้นแก๊สเอทิลีน แก๊สอะเซทิลีน แก๊สอีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สมีเทน และแก๊สไฮโดรเจน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนครั้งการเบรกดาวน์เพิ่มขึ้นที่ระยะแกป 3.2 mm ในขณะที่ความเข้มข้นแก๊สเหล่านี้มีการแกว่งที่ระยะแกป 1.6 mm โดยความเข้มข้นแก๊สที่มากที่สุด คือ แก๊สไฮโดรเจน

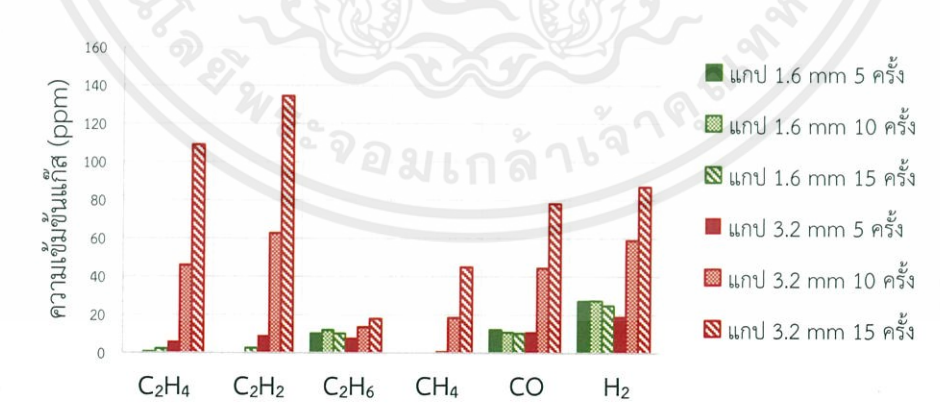
4. การทดสอบการเบรกตาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน FR3 กรณีเบรกตาวนไม่ซ้ำจุดเดิม (Im+\_P\_C\_FR3)



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub>) ที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกตาวนในการทดสอบการเบรกตาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน FR3 กรณีเบรกตาวนไม่ซ้ำจุดเดิม

พบว่า จะปรากฏแก๊สทุกชนิดที่ทำการสังเกตการณ์ คือ แก๊สเอทิลีน แก๊สอะเซทิลีน แก๊สฮีเทน แก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน โดยความเข้มข้นแก๊สเหล่านี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนครั้งการเบรกตาวนเพิ่มขึ้น และเมื่อระยะแกบเพิ่มขึ้น โดยความเข้มข้นแก๊สที่มากที่สุด คือ แก๊สไฮโดรเจน ตามด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สเอทิลีน แก๊สอะเซทิลีน แก๊สมีเทน และแก๊สฮีเทน ตามลำดับ

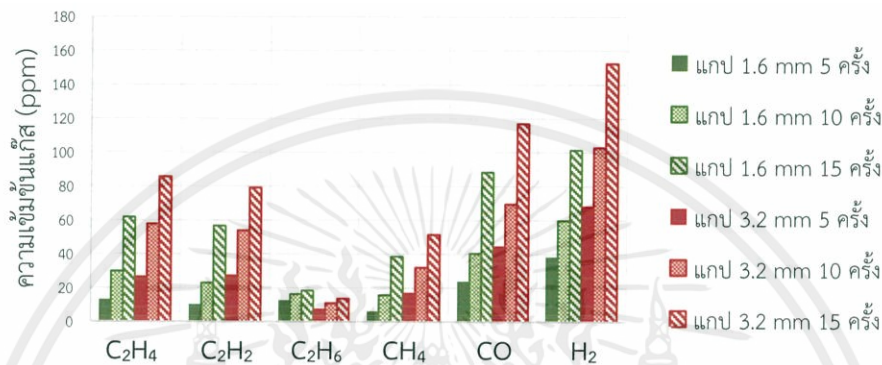
5. การทดสอบการเบรกตาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน FR3 กรณีเบรกตาวนซ้ำจุดเดิม (Im-\_P\_NC\_FR3)



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub>) ที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกตาวนในการทดสอบการเบรกตาวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน FR3 กรณีเบรกตาวนซ้ำจุดเดิม

พบว่า จะปรากฏแก๊สทุกชนิดที่ทำการสังเกตการณ์ คือ แก๊สเอทิลีน แก๊สอะเซทิลีน แก๊สอีเทน แก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน ความเข้มข้นแก๊สเหล่านี้โดยส่วนใหญ่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนครั้งการเบรกตาวานเพิ่มขึ้นที่ระยะแกป 3.2 mm ในขณะที่ความเข้มข้นแก๊สเหล่านี้มีการแกว่งที่ระยะ 1.6 mm

6. การทดสอบการเบรกตาวานด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรเกนตในน้ำมัน FR3 กรณีเบรกตาวานไม่ซ้ำจุดเดิม (Im-P\_C\_FR3)



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub>) ที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกตาวานในการทดสอบการเบรกตาวานด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรเกนตในน้ำมัน FR3 กรณีเบรกตาวานไม่ซ้ำจุดเดิม

พบว่า จะปรากฏแก๊สทุกชนิดที่ทำการสังเกตการณ์ คือ แก๊สเอทิลีน แก๊สอะเซทิลีน แก๊สอีเทน แก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน โดยความเข้มข้นแก๊สเหล่านี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนครั้งการเบรกตาวานเพิ่มขึ้น และเมื่อระยะแกปเพิ่มขึ้น โดยความเข้มข้นแก๊สที่มากที่สุด คือ แก๊สไฮโดรเจน ตามด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สเอทิลีน แก๊สอะเซทิลีน แก๊สมีเทน และแก๊สอีเทน ตามลำดับ

#### 4.1.6 การทดสอบเพรสบอร์คที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์ม

##### 4.1.6.1 ผลการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมันปาล์ม จากการทดสอบเพรสบอร์คที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์ม

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมันปาล์ม

ลำดับ	รหัส	ชนิดของแรงดันไฟฟ้า	ฉนวนเหลว	เปลี่ยนกระดาษ	ระยะแกป (mm)	การเบรกดาวน (ครั้ง)	ความเข้มข้นแก๊ส (ppm)						
							CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	H <sub>2</sub>
1	P_PO#base <sup>1</sup>	-	น้ำมันปาล์ม	-	-	-	472.881	0.000	0.000	0.000	0.000	7.231	2.892
2	P_PO#base <sup>2</sup>	-	น้ำมันปาล์ม	-	-	-	575.902	0.000	0.000	0.000	0.235	7.788	2.305
3	P_PO#base <sup>3</sup>	-	น้ำมันปาล์ม	-	-	-	522.314	0.320	0.000	0.000	1.913	9.743	3.705
4	AC_P_NC_PO_32#5 <sup>1</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันปาล์ม	ไม่เปลี่ยน	3.2	5	478.212	0.850	2.206	0.000	0.000	11.279	3.753
5	AC_P_NC_PO_32#10 <sup>1</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันปาล์ม	ไม่เปลี่ยน	3.2	10	542.275	9.516	40.035	1.989	2.082	19.385	14.115
6	AC_P_NC_PO_32#15 <sup>1</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันปาล์ม	ไม่เปลี่ยน	3.2	15	627.264	30.287	124.828	5.873	11.492	58.493	69.765
7	AC_P_C_PO_16#5 <sup>2</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันปาล์ม	เปลี่ยน	1.6	5	649.201	21.871	55.307	5.886	16.377	62.253	105.527
8	AC_P_C_PO_16#10 <sup>2</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันปาล์ม	เปลี่ยน	1.6	10	598.045	46.744	117.345	10.897	33.387	108.036	198.207
9	AC_P_C_PO_16#15 <sup>2</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันปาล์ม	เปลี่ยน	1.6	15	623.371	74.955	186.764	16.677	53.706	167.731	306.114
10	AC_P_C_PO_32#5 <sup>1</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันปาล์ม	เปลี่ยน	3.2	5	483.574	31.926	114.883	6.959	18.397	130.959	147.876
11	AC_P_C_PO_32#10 <sup>1</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันปาล์ม	เปลี่ยน	3.2	10	552.141	71.844	234.725	15.140	47.940	255.889	334.329
12	AC_P_C_PO_32#15 <sup>1</sup>	กระแสสลับ	น้ำมันปาล์ม	เปลี่ยน	3.2	15	582.935	108.819	328.245	22.790	78.103	337.150	451.743

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมันปาล์ม (ต่อ)

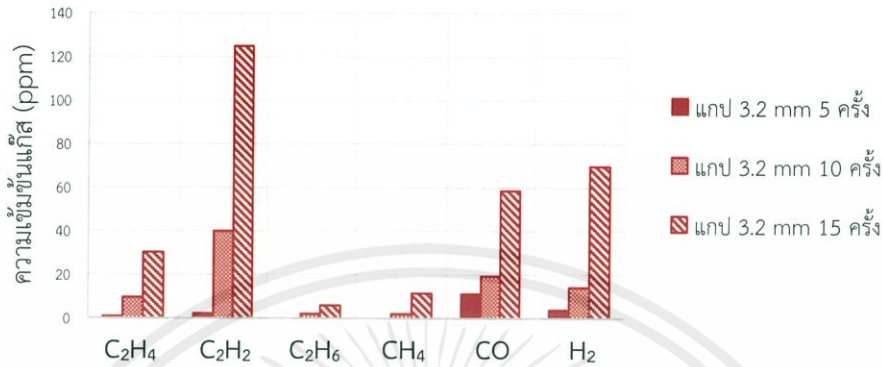
ลำดับ	รหัส	ชนิดของแรงดันไฟฟ้า	ฉนวนเหลว	เปลี่ยนกระดาษ	ระยะแกป (mm)	การเบรกคาวน (ครั้ง)	ความเข้มข้นแก๊ส (ppm)						
							CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	H <sub>2</sub>
13	lm+_P_NC_PO_16#5 <sup>2</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันปาล์ม	ไม่เปลี่ยน	1.6	5	480.943	0.000	0.000	0.000	0.000	6.951	2.377
14	lm+_P_NC_PO_16#10 <sup>2</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันปาล์ม	ไม่เปลี่ยน	1.6	10	586.001	0.000	0.000	0.000	0.295	10.199	3.593
15	lm+_P_NC_PO_16#15 <sup>2</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันปาล์ม	ไม่เปลี่ยน	1.6	15	569.972	0.741	0.000	0.000	0.107	8.478	3.175
16	lm+_P_NC_PO_32#5 <sup>1</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันปาล์ม	ไม่เปลี่ยน	3.2	5	484.268	7.216	11.227	0.000	2.029	14.672	12.844
17	lm+_P_NC_PO_32#10 <sup>1</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันปาล์ม	ไม่เปลี่ยน	3.2	10	499.807	50.280	61.748	5.829	19.325	32.738	43.650
18	lm+_P_NC_PO_32#15 <sup>1</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันปาล์ม	ไม่เปลี่ยน	3.2	15	497.312	117.685	144.580	11.101	44.302	62.734	93.220
19	lm+_P_C_PO_16#5 <sup>2</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันปาล์ม	เปลี่ยน	1.6	5	491.287	7.890	9.329	1.886	4.160	19.914	12.076
20	lm+_P_C_PO_16#10 <sup>2</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันปาล์ม	เปลี่ยน	1.6	10	565.962	27.508	28.247	3.651	14.934	39.926	32.473
21	lm+_P_C_PO_16#15 <sup>2</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันปาล์ม	เปลี่ยน	1.6	15	590.076	49.165	50.571	5.334	24.986	58.864	51.565
22	lm+_P_C_PO_32#5 <sup>3</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันปาล์ม	เปลี่ยน	3.2	5	543.012	10.886	7.480	0.858	6.499	17.858	18.012
23	lm+_P_C_PO_32#10 <sup>3</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันปาล์ม	เปลี่ยน	3.2	10	550.873	31.866	18.830	3.692	16.387	32.212	38.513
24	lm+_P_C_PO_32#15 <sup>3</sup>	อิมพัลส์บวก	น้ำมันปาล์ม	เปลี่ยน	3.2	15	591.929	66.144	50.371	7.805	31.430	56.700	78.841

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมันปาล์ม (ต่อ)

ลำดับ	รหัส	ชนิดของแรงดันไฟฟ้า	ฉนวนเหลว	เปลี่ยนกระดาษ	ระยะแกป (mm)	การเบรกดาวน (ครั้ง)	ความเข้มข้นแก๊ส (ppm)						
							CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	H <sub>2</sub>
25	lm-P_NC_PO_16#5 <sup>2</sup>	อิมพัลส์ลบบ	น้ำมันปาล์ม	ไม่เปลี่ยน	1.6	5	567.283	0.000	0.000	0.000	0.000	11.866	2.579
26	lm-P_NC_PO_16#10 <sup>2</sup>	อิมพัลส์ลบบ	น้ำมันปาล์ม	ไม่เปลี่ยน	1.6	10	578.973	0.786	0.000	0.000	0.089	10.557	5.043
27	lm-P_NC_PO_16#15 <sup>2</sup>	อิมพัลส์ลบบ	น้ำมันปาล์ม	ไม่เปลี่ยน	1.6	15	581.380	4.327	5.484	0.000	1.997	14.013	9.890
28	lm-P_NC_PO_32#5 <sup>1</sup>	อิมพัลส์ลบบ	น้ำมันปาล์ม	ไม่เปลี่ยน	3.2	5	495.103	0.804	1.738	0.000	0.000	9.038	3.610
29	lm-P_NC_PO_32#10 <sup>1</sup>	อิมพัลส์ลบบ	น้ำมันปาล์ม	ไม่เปลี่ยน	3.2	10	501.060	5.244	5.238	1.721	1.819	10.658	6.573
30	lm-P_NC_PO_32#15 <sup>1</sup>	อิมพัลส์ลบบ	น้ำมันปาล์ม	ไม่เปลี่ยน	3.2	15	561.817	38.064	32.583	4.547	13.064	17.944	17.403
31	lm-P_C_PO_16#5 <sup>2</sup>	อิมพัลส์ลบบ	น้ำมันปาล์ม	เปลี่ยน	1.6	5	506.480	7.713	6.906	1.797	3.472	19.608	9.794
32	lm-P_C_PO_16#10 <sup>2</sup>	อิมพัลส์ลบบ	น้ำมันปาล์ม	เปลี่ยน	1.6	10	599.191	27.176	20.522	3.567	14.158	34.883	25.132
33	lm-P_C_PO_16#15 <sup>2</sup>	อิมพัลส์ลบบ	น้ำมันปาล์ม	เปลี่ยน	1.6	15	500.059	35.290	27.050	4.227	17.264	38.699	28.138
34	lm-P_C_PO_32#5 <sup>3</sup>	อิมพัลส์ลบบ	น้ำมันปาล์ม	เปลี่ยน	3.2	5	582.244	16.311	14.315	1.404	10.013	27.709	30.225
35	lm-P_C_PO_32#10 <sup>3</sup>	อิมพัลส์ลบบ	น้ำมันปาล์ม	เปลี่ยน	3.2	10	572.208	40.122	33.603	4.273	19.747	41.604	54.719
36	lm-P_C_PO_32#15 <sup>3</sup>	อิมพัลส์ลบบ	น้ำมันปาล์ม	เปลี่ยน	3.2	15	739.208	93.503	71.277	10.514	44.943	87.336	89.258

#### 4.1.6.2 การวิเคราะห์ผลแก๊สที่ละลายในน้ำมันปาล์ม จากการทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์ม

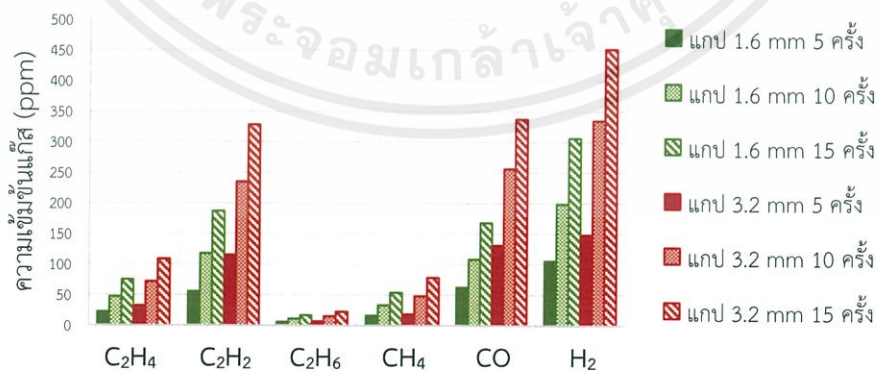
1. การทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์ม กรณีเบรกดาวน์ซ้ำจุดเดิม (AC\_P\_NC\_PO)



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub>) ที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวน์ในการทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์ม กรณีเบรกดาวน์ซ้ำจุดเดิม

พบว่า จะปรากฏแก๊สทุกชนิดที่ทำการสังเกตการณ์ คือ แก๊สเอทิลีน แก๊สอะเซทิลีน แก๊สฮีเทน แก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน โดยความเข้มข้นแก๊สเหล่านี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนครั้งการเบรกดาวน์เพิ่มขึ้น โดยความเข้มข้นแก๊สที่มากที่สุด คือ แก๊สอะเซทิลีน ตามด้วยแก๊สไฮโดรเจน และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในปริมาณเท่า ๆ กัน ตามด้วยแก๊สเอทิลีน แก๊สมีเทน และแก๊สฮีเทน ตามลำดับ

2. การทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์ม กรณีเบรกดาวน์ไม่ซ้ำจุดเดิม (AC\_P\_C\_PO)

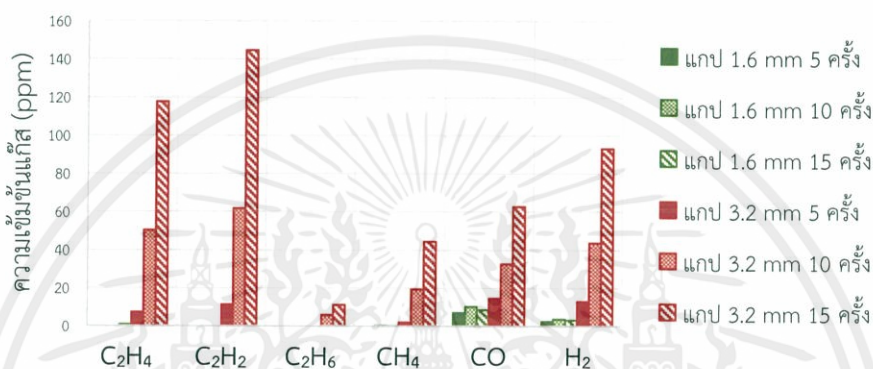


รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub>) ที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวน์ในการทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์ม กรณีเบรกดาวน์ไม่ซ้ำจุดเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่า จะปรากฏแก๊สทุกชนิดที่ทำการสังเกตการณ์ คือ แก๊สเอทิลีน แก๊สอะเซทิลีน แก๊สอีเทน แก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน โดยความเข้มข้นแก๊สเหล่านี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนครั้งการเบรกดาวน์เพิ่มขึ้น และเมื่อระยะแถบเพิ่มขึ้น โดยความเข้มข้นแก๊สที่มากที่สุด คือ แก๊สไฮโดรเจน ตามด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สอะเซทิลีน แก๊สเอทิลีน แก๊สมีเทน และแก๊สอีเทน ตามลำดับ

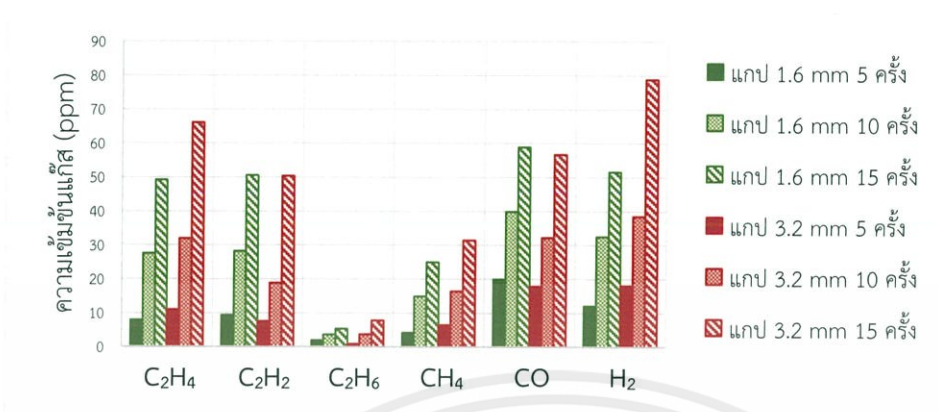
3. การทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพกเมนต์ในน้ำมันปาล์ม กรณีเบรกดาวน์ซ้ำจุดเดิม (Im+\_P\_NC\_PO)



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub>) ที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวน์ในการทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพกเมนต์ในน้ำมันปาล์ม กรณีเบรกดาวน์ซ้ำจุดเดิม

พบว่า ความเข้มข้นแก๊สเอทิลีน แก๊สอะเซทิลีน แก๊สอีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สมีเทน และแก๊สไฮโดรเจน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนครั้งการเบรกดาวน์เพิ่มขึ้นที่ระยะแถบ 3.2 mm โดยความเข้มข้นแก๊สที่มากที่สุด คือ แก๊สอะเซทิลีน ในขณะที่ความเข้มข้นแก๊สที่ระยะแถบ 1.6 mm มีค่าต่ำมาก

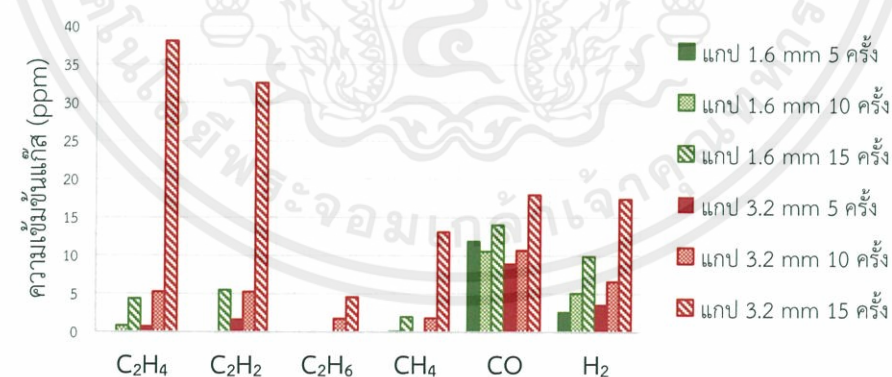
4. การทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์ม กรณีเบรกดาวน์ไม่ซ้ำจุดเดิม (Im+ \_P \_C \_PO)



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub>) ที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวน์ในการทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์ม กรณีเบรกดาวน์ไม่ซ้ำจุดเดิม

พบว่า จะปรากฏแก๊สทุกชนิดที่ทำการสังเกตการณ์ คือ แก๊สเอทิลีน แก๊สอะเซทิลีน แก๊สโอเทน แก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน โดยความเข้มข้นแก๊สเหล่านี้ ส่วนใหญ่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนครั้งการเบรกดาวน์เพิ่มขึ้น และเมื่อระยะแกปเพิ่มขึ้น

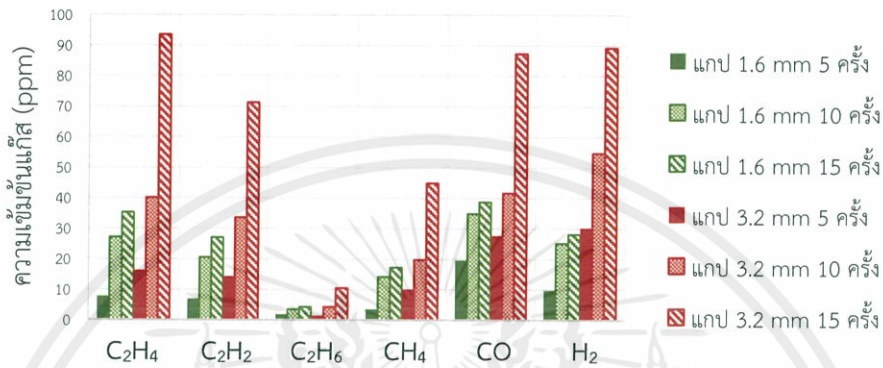
5. การทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์ม กรณีเบรกดาวน์ซ้ำจุดเดิม (Im- \_P \_NC \_PO)



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub>) ที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวน์ในการทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าชั่วคราวของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์ม กรณีเบรกดาวน์ซ้ำจุดเดิม

พบว่า ความเข้มข้นแก๊สเอทิลีน แก๊สอะเซทิลีน แก๊สอีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สมีเทน และแก๊สไฮโดรเจน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนครั้งการเบรกดาวน์เพิ่มขึ้นที่ระยะแถบ 3.2 mm ในขณะที่ความเข้มข้นแก๊สเหล่านี้มีการแกว่งที่ระยะแถบ 1.6 mm

6. การทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์ม กรณีเบรกดาวน์ไม่ซ้ำจุดเดิม (Im-P\_C\_PO)



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊ส (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, CO และ H<sub>2</sub>) ที่เกิดขึ้นกับจำนวนครั้งการเบรกดาวน์ในการทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์ม กรณีเบรกดาวน์ไม่ซ้ำจุดเดิม

พบว่า จะปรากฏแก๊สทุกชนิดที่ทำการสังเกตการณ์ คือ แก๊สเอทิลีน แก๊สอะเซทิลีน แก๊สอีเทน แก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน โดยความเข้มข้นแก๊สเหล่านี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนครั้งการเบรกดาวน์เพิ่มขึ้น และเมื่อระยะแถบเพิ่มขึ้น โดยความเข้มข้นแก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สเอทิลีนมีค่าเท่า ๆ กัน

## 4.2 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมัน

- หมายเหตุ: Tri1 คือ Duval Triangle 1  
 Tri3 คือ Duval Triangle 3  
 Pen1 คือ Duval Pentagon 1  
 Pen2 คือ Duval Pentagon 2  
 Pen3 คือ Duval Pentagon 3  
 ND คือ ไม่สามารถระบุความผิดปกติได้  
 PD คือ การดิสชาร์จบางส่วน  
 D1 คือ การดิสชาร์จพลังงานต่ำ  
 D2 คือ การดิสชาร์จพลังงานสูง  
 T1 คือ ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300°C  
 T2 คือ ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 300°C ถึง 700°C  
 T3 คือ ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 700°C  
 DT คือ ผสมระหว่างความผิดปกติเนื่องจากความร้อนและความผิดปกติทางไฟฟ้า  
 S คือ Stray Gassing ในน้ำมันที่อุณหภูมิ 120°C และ 200°C  
 O ความร้อนเกิน (อุณหภูมิต่ำกว่า 250°C)  
 T3-H ความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นเฉพาะในน้ำมัน  
 C การเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชันในกระดาษ

#### 4.2.1 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบน้ำมันแร่

ตารางที่ 4.7 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบน้ำมันแร่

ลำดับ	รหัส	Key Gas	Doernenburg	Rogers	IEC Ratio	Tri1	Pen1	Pen2
1	MO#base <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	ND	ND	-
2	MO#base <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	ND	ND	-
3	MO#base <sup>3</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	ND	ND	-
4	AC_MO_1.0#5 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	D1	-
5	AC_MO_1.0#10 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	D1	-
6	AC_MO_1.0#15 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	D1	-
7	AC_MO_1.5#5 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	D1	-
8	AC_MO_1.5#10 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	D1	-
9	AC_MO_1.5#15 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	D1	-
10	AC_MO_2.0#5 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	D1	-
11	AC_MO_2.0#10 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	D1	-
12	AC_MO_2.0#15 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	D1	-

ตารางที่ 4.7 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบน้ำมันแร่ (ต่อ)

ลำดับ	รหัส	Key Gas	Doernenburg	Rogers	IEC Ratio	Tri1	Pen1	Pen2
13	lm+_MO_10#5 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D1	D1	D1	-
14	lm+_MO_10#10 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D1	D1	D1	-
15	lm+_MO_10#15 <sup>2</sup>	ND	การอาร์ค	ND	D1	D1	D1	-
16	lm+_MO_15#5 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D1	D1	D1	-
17	lm+_MO_15#10 <sup>2</sup>	ND	การอาร์ค	ND	D1	D1	D1	-
18	lm+_MO_15#15 <sup>2</sup>	ND	การอาร์ค	ND	D1	D1	D1	-
19	lm+_MO_20#5 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D1	D1	D1	-
20	lm+_MO_20#10 <sup>2</sup>	ND	การอาร์ค	ND	D1	D1	D1	-
21	lm+_MO_20#15 <sup>2</sup>	ND	การอาร์ค	ND	D1	D1	D1	-
22	lm-_MO_10#5 <sup>3</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D1	D1	D1	-
23	lm-_MO_10#10 <sup>3</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D1	D1	D1	-
24	lm-_MO_10#15 <sup>3</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D1	D1	D1	-
25	lm-_MO_15#5 <sup>3</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D1	D1	D1	-
26	lm-_MO_15#10 <sup>3</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D1	D1	D1	-
27	lm-_MO_15#15 <sup>3</sup>	ND	การอาร์ค	ND	D1	D1	D1	-

ตารางที่ 4.7 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบน้ำมันแร่ (ต่อ)

ลำดับ	รหัส	Key Gas	Doernenburg	Rogers	IEC Ratio	Tri1	Pen1	Pen2
28	Im-_MO_20#5 <sup>3</sup>	ND	Discharge arcing	ND	D1	D1	D1	-
29	Im-_MO_20#10 <sup>3</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D1	D1	D1	-
30	Im-_MO_20#15 <sup>3</sup>	ND	Discharge arcing	ND	ND	D1	D1	-
31	PD-_MO_10#5 <sup>3</sup>	PD	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	ND	PD	-
32	PD-_MO_10#10 <sup>3</sup>	PD	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	ND	PD	-
33	PD-_MO_10#15 <sup>3</sup>	PD	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	ND	PD	-
34	PD-_MO_15#5 <sup>3</sup>	PD	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	ND	PD	-
35	PD-_MO_15#10 <sup>3</sup>	PD	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	ND	PD	-
36	PD-_MO_15#15 <sup>3</sup>	PD	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	ND	PD	-
37	PD-_MO_20#5 <sup>3</sup>	PD	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	ND	PD	-
38	PD-_MO_20#10 <sup>3</sup>	PD	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	ND	PD	-
39	PD-_MO_20#15 <sup>3</sup>	PD	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	ND	PD	-

#### 4.2.2 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบน้ำมัน FR3

ตารางที่ 4.8 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบน้ำมัน FR3

ลำดับ	รหัส	Key Gas	Doernenburg	Rogers	IEC Ratio	Tri3 FR3	Pen3 FR3
1	FR3#base <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	ND	S
2	FR3#base <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	S
3	AC_FR3_10#5 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	S
4	AC_FR3_10#10 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	PD	D1	S
5	AC_FR3_10#15 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	PD	D1	S
6	AC_FR3_15#5 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	PD	D1	S
7	AC_FR3_15#10 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	PD	D1	S
8	AC_FR3_15#15 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	PD	D1	D1
9	AC_FR3_20#5 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	PD	D1	S
10	AC_FR3_20#10 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	PD	D1	D1
11	AC_FR3_20#15 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	D1
12	IM+_FR3_10#5 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	D1
13	IM+_FR3_10#10 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	D1
14	IM+_FR3_10#15 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	D1

ตารางที่ 4.8 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบน้ำมัน FR3 (ต่อ)

ลำดับ	รหัส	Key Gas	Doernenburg	Rogers	IEC Ratio	Tri3 FR3	Pen3 FR3
15	IM+_FR3_15#5 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	D1
16	IM+_FR3_15#10 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	D1
17	IM+_FR3_15#15 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	D1
18	IM+_FR3_20#5 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	D1
19	IM+_FR3_20#10 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	D1
20	IM+_FR3_20#15 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	D1
21	IM-_FR3_10#5 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	D1
22	IM-_FR3_10#10 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	D1
23	IM-_FR3_10#15 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	D1
24	IM-_FR3_15#5 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D1	D1	D1
25	IM-_FR3_15#10 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D1	D1	D1
26	IM-_FR3_15#15 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D1	D1	D1
27	IM-_FR3_20#5 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D1	D1	D1
28	IM-_FR3_20#10 <sup>1</sup>	ND	การอาร์ค	ND	D1	D1	D1
29	IM-_FR3_20#15 <sup>1</sup>	ND	การอาร์ค	ND	D1	D1	D1

ตารางที่ 4.8 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบน้ำมัน FR3 (ต่อ)

ลำดับ	รหัส	Key Gas	Doernenburg	Rogers	IEC Ratio	Tri3 FR3	Pen3 FR3
30	PD_FR3_10#5 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	ND	S
31	PD_FR3_10#10 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	ND	S
32	PD_FR3_10#15 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	ND	S
33	PD_FR3_15#5 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	ND	S
34	PD_FR3_15#10 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	ND	S
35	PD_FR3_15#15 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	ND	S
36	PD_FR3_20#5 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	ND	S
37	PD_FR3_20#10 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	ND	S
38	PD_FR3_20#15 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	ND	S

#### 4.2.3 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบน้ำมันปาล์ม

ตารางที่ 4.9 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบน้ำมันปาล์ม

ลำดับ	รหัส	Key Gas	Doernenburg	Rogers	IEC Ratio	Tri1	Tri3 FR3	Tri3 Midel	Tri3 BioTemp	Tri3 silicone	Pen1	Pen2	Pen3 FR3	Pen3 Rapseed	Pen3 sunflower	Pen3 Midel
1	PO#base <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	T3	T2	T2	T2	T3	T3	T3-H	T2	T3	T3	T3
2	PO#base <sup>2</sup>	ความร้อนในเซลล์โลส	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	T3	T3	T3	T3	T3	T3	T3-H	T3	T3	T3	T3
3	PO#base <sup>3</sup>	PD	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	T2	T1	T1	T1	T2	S	S	S	S	S	S
4	AC_PO_10#5 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	T2	T1	T1	T1	T2	D2	-	D2	D2	D2	D2
5	AC_PO_10#10 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	T2	T1	T1	T1	T2	D2	-	D2	D2	D2	D2
6	AC_PO_10#15 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	T2	T1	T2	T1	T2	D1	-	D1	D1	D1	D1
7	AC_PO_15#5 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D2	D1	D1	D2	D2	D2	-	D2	D2	D2	D2
8	AC_PO_15#10 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	D1	D1	D1	D2	D1	-	D1	D1	D1	D1
9	AC_PO_15#15 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	D1	D1	D1	D2	D1	-	D1	D1	D1	D1
10	AC_PO_20#5 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	D1	D1	D2	D2	D1	-	D1	D1	D1	D1
11	AC_PO_20#10 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	D1	D1	D1	D2	D1	-	D1	D1	D1	D1
12	AC_PO_20#15 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	D1	D1	D1	D2	D1	-	D1	D1	D1	D1

ตารางที่ 4.9 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบน้ำมันปาล์ม (ต่อ)

ลำดับ	รหัส	Key Gas	Doernenburg	Rogers	IEC Ratio	Tri1	Tri3 FR3	Tri3 Midel	Tri3 BioTemp	Tri3 silicone	Pen1	Pen2	Pen3 FR3	Pen3 Rapseed	Pen3 sunflower	Pen3 Midel
13	lm+_PO_10#5 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	T3	T3	T3	T3	T3	D1	-	D1	D1	D1	D1
14	lm+_PO_10#10 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	T3	T3	T3	T2	T3	D1	-	D1	D1	D1	D1
15	lm+_PO_10#15 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	T3	T3	T3	T2	T3	D1	-	D1	D1	D1	D1
16	lm+_PO_15#5 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	T3	T3	T3	T2	T3	D1	-	D1	D1	D1	D1
17	lm+_PO_15#10 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	T3	T3	T3	DT	T3	D1	-	D1	D1	D1	D1
18	lm+_PO_15#15 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	T3	T3	T3	DT	T3	D1	-	D1	D1	D1	D1
19	lm+_PO_20#5 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D1	T3	T3	T3	DT	T3	D1	-	D1	D1	D1	D1
20	lm+_PO_20#10 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	T3	T3	T3	DT	T3	D1	-	D1	D1	D1	D1
21	lm+_PO_20#15 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D1	T3	T3	T3	DT	T3	D1	-	D1	D1	D1	D1
22	lm-_PO_10#5 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	T3	T3	T3	T2	T3	D1	-	D1	D1	D1	D1
23	lm-_PO_10#10 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	T3	T3	T3	DT	T3	D1	-	D1	D1	D1	D1
24	lm-_PO_10#15 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	T3	T3	T3	DT	T3	D1	-	D1	D1	D1	D1
25	lm-_PO_15#5 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D1	T3	T3	T3	DT	T3	D1	-	D1	D1	D1	D1
26	lm-_PO_15#10 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D1	T3	T3	T3	DT	T3	D1	-	D1	D1	D1	D1
27	lm-_PO_15#15 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D1	T3	T3	T3	DT	T3	D1	-	D1	D1	D1	D1

ตารางที่ 4.9 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบน้ำมันปาล์ม (ต่อ)

ลำดับ	รหัส	Key Gas	Doernenburg	Rogers	IEC Ratio	Tri1	Tri3 FR3	Tri3 Midel	Tri3 BioTemp	Tri3 silicone	Pen1	Pen2	Pen3 FR3	Pen3 Rapseed	Pen3 sunflower	Pen3 Midel
28	Im_PO_20#5 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D1	T3	T3	T3	DT	T3	D1	-	D1	D1	D1	D1
29	Im_PO_20#10 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D1	T3	T3	T3	DT	T3	D1	-	D1	D1	D1	D1
30	Im_PO_20#15 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D1	T3	T3	T3	DT	T3	D1	-	D1	D1	D1	D1
31	PD_PO_10#5 <sup>3</sup>	PD	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	T2	T1	T1	T1	T2	S	S	S	S	S	S
32	PD_PO_10#10 <sup>3</sup>	PD	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	T1	T1	T1	T1	T1	S	S	S	S	S	S
33	PD_PO_10#15 <sup>3</sup>	PD	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	T1	T1	T1	T1	T1	S	S	S	S	S	S
34	PD_PO_15#5 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	T1	T1	T1	T1	T2	T2	C	T2	T2	T1	T2
35	PD_PO_15#10 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	PD	PD	PD	PD	PD	T1	O	T1	T2	T1	S
36	PD_PO_15#15 <sup>2</sup>	ความร้อนในเซลล์โลส	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	PD	PD	PD	PD	PD	T2	C	T2	T2	T1	T2
37	PD_PO_20#5 <sup>2</sup>	ความร้อนในเซลล์โลส	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	T3	T3	T3	T2	T3	T3	T3-H	T3	T3	T3	T3
38	PD_PO_20#10 <sup>2</sup>	ความร้อนในเซลล์โลส	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	T3	T3	T3	T2	T3	D2	-	D2	D2	D2	D2
39	PD_PO_20#15 <sup>2</sup>	ความร้อนในเซลล์โลส	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	T2	T1	T1	T1	T2	T3	C	T2	T2	T2	T1

#### 4.2.4 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันแร่

ตารางที่ 4.10 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันแร่

ลำดับ	รหัส	Key Gas	Doernenburg	Rogers	IEC Ratio	Tri1	Pen1	Pen2
1	P_MO#base <sup>1</sup>	PD	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	ND	PD	-
2	P_MO#base <sup>2</sup>	ความร้อนในเซลล์โลส	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	ND	ND	-
3	P_MO#base <sup>3</sup>	ความร้อนในเซลล์โลส	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	ND	ND	-
4	AC_P_NC_MO_32#5 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	T3	D1	-
5	AC_P_NC_MO_32#10 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D1	DT	D1	-
6	AC_P_NC_MO_32#15 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D1	T3	D1	-
7	AC_P_C_MO_16#5 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D1	D1	D1	-
8	AC_P_C_MO_16#10 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D1	D1	D1	-
9	AC_P_C_MO_16#15 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D1	D1	D1	-
10	AC_P_C_MO_32#5 <sup>1</sup>	ND	การอาร์ค	ND	D1	T3	D1	-
11	AC_P_C_MO_32#10 <sup>1</sup>	ND	การอาร์ค	ND	D1	T3	D1	-
12	AC_P_C_MO_32#15 <sup>1</sup>	ND	การอาร์ค	ND	D1	T3	D1	-

ตารางที่ 4.10 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบเพรสเซอร์ที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันแร่ (ต่อ)

ลำดับ	รหัส	Key Gas	Doernburg	Rogers	IEC Ratio	Tri1	Pen1	Pen2
13	lm+_P_NC_MO_16#5 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D2	D1	-
14	lm+_P_NC_MO_16#10 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D2	D2	-
15	lm+_P_NC_MO_16#15 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D2	D2	D2	-
16	lm+_P_NC_MO_32#5 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D2	DT	D2	-
17	lm+_P_NC_MO_32#10 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D2	DT	D2	-
18	lm+_P_NC_MO_32#15 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D2	DT	D2	-
19	lm+_P_C_MO_16#5 <sup>3</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D2	D2	D2	-
20	lm+_P_C_MO_16#10 <sup>3</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	ND	D2	D2	-
21	lm+_P_C_MO_16#15 <sup>3</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D2	D2	D2	-
22	lm+_P_C_MO_32#5 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D2	D2	D2	-
23	lm+_P_C_MO_32#10 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D2	D2	-
24	lm+_P_C_MO_32#15 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D2	D2	-

ตารางที่ 4.10 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบเพรสเซอร์ดที่ถูกอิมเพกเนตในน้ำมันแร่(ต่อ)

ลำดับ	รหัส	Key Gas	Doernenburg	Rogers	IEC Ratio	Tri1	Pen1	Pen2
25	Im-P_NC_MO_16#5 <sup>2</sup>	ความร้อนในเซลล์โลส	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	ND	ND	-
26	Im-P_NC_MO_16#10 <sup>2</sup>	ความร้อนในเซลล์โลส	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	ND	ND	-
27	Im-P_NC_MO_16#15 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D2	D2	-
28	Im-P_NC_MO_32#5 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D2	DT	D2	-
29	Im-P_NC_MO_32#10 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D2	T3	D2	-
30	Im-P_NC_MO_32#15 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D2	DT	D2	-
31	Im-P_C_MO_16#5 <sup>3</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D2	D2	D2	-
32	Im-P_C_MO_16#10 <sup>3</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D1	D2	D2	-
33	Im-P_C_MO_16#15 <sup>3</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D2	D2	-
34	Im-P_C_MO_32#5 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D2	D2	-	-
35	Im-P_C_MO_32#10 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D2	D2	D2	-
36	Im-P_C_MO_32#15 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D2	D2	D2	-

#### 4.2.5 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน FR3

ตารางที่ 4.11 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน FR3

ลำดับ	รหัส	Key Gas	Doernenburg	Rogers	IEC Ratio	Tri3 FR3	Pen3 FR3
1	P_FR3#base <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	PD	ND	S
2	P_FR3#base <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	PD	ND	S
3	P_FR3#base <sup>3</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	PD	PD	S
4	P_FR3#base <sup>4</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	PD	DT	S
5	AC_P_NC_FR3_32#5 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	D1
6	AC_P_NC_FR3_32#10 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	D1
7	AC_P_NC_FR3_32#15 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	D1
8	AC_P_C_FR3_16#5 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	D1
9	AC_P_C_FR3_16#10 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D1	D1	D1
10	AC_P_C_FR3_16#15 <sup>2</sup>	ND	การอาร์ค	ND	D1	D1	D1
11	AC_P_C_FR3_32#5 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	D1
12	AC_P_C_FR3_32#10 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D1	D1
13	AC_P_C_FR3_32#15 <sup>1</sup>	ND	การอาร์ค	ND	D1	D1	D1

ตารางที่ 4.11 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพกเนตในน้ำมัน FR3 (ต่อ)

ลำดับ	รหัส	Key Gas	Doernenburg	Rogers	IEC Ratio	Tri3 FR3	Pen3 FR3
14	Im+_P_NC_FR3_16#5 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	PD	ND	S
15	Im+_P_NC_FR3_16#10 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	PD	ND	S
16	Im+_P_NC_FR3_16#15 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	PD	ND	S
17	Im+_P_NC_FR3_32#5 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	PD	T3	S
18	Im+_P_NC_FR3_32#10 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	T3	D1
19	Im+_P_NC_FR3_32#15 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D1	T3	D2
20	Im+_P_C_FR3_16#5 <sup>3</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D2	S
21	Im+_P_C_FR3_16#10 <sup>3</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D2	D2	D1
22	Im+_P_C_FR3_16#15 <sup>3</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D2	D2	D2
23	Im+_P_C_FR3_32#5 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D2	D2	D1
24	Im+_P_C_FR3_32#10 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D2	D2	D2
25	Im+_P_C_FR3_32#15 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D2	D2	D2

ตารางที่ 4.11 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบเพอร์สอร์คที่ถูกอิมเพรเกนตในน้ำมัน FR3 (ต่อ)

ลำดับ	รหัส	Key Gas	Doernenburg	Rogers	IEC Ratio	Tri3 FR3	Pen3 FR3
26	Im-P_NC_FR3_16#5 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	PD	ND	S
27	Im-P_NC_FR3_16#10 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	PD	T3	S
28	Im-P_NC_FR3_16#15 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D2	S
29	Im-P_NC_FR3_32#5 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	T3	D1
30	Im-P_NC_FR3_32#10 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D1	T3	D2
31	Im-P_NC_FR3_32#15 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D2	T3	D2
32	Im-P_C_FR3_16#5 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D2	S
33	Im-P_C_FR3_16#10 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D2	D2
34	Im-P_C_FR3_16#15 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D2	D2	D2
35	Im-P_C_FR3_32#5 <sup>4</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D1	D2	D2
36	Im-P_C_FR3_32#10 <sup>4</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D2	D2	D2
37	Im-P_C_FR3_32#15 <sup>4</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D2	D2	D2

#### 4.2.6 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์ม

ตารางที่ 4.12 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์ม

ลำดับ	รหัส	Key Gas	Doernenburg	Rogers	IEC Ratio	Tri1	Tri3 FR3	Tri3 Midel	Tri3 BioTemp	Tri3 silicone	Pen1	Pen2	Pen3 FR3	Pen3 Rapseed	Pen3 sunflower	Pen3 Midel
1	P_PO#base <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	PD	-	PD	PD	PD	PD
2	P_PO6#base <sup>2</sup>	ความร้อนใน เซลล์โลส	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	PD	PD	PD	PD	PD	S	-	S	S	S	S
3	P_PO#base <sup>3</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D2	D2	D2	D2	D2	D2	-	D2	D2	D2	D2
4	AC_P_NC_PO_32#5 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D2	D2	D2	D2	D2	D1	-	D1	D1	D1	D1
5	AC_P_NC_PO_32#10 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D1	D1	D1	D1	D1	D2	D1	-	D1	D1	D1	D1
6	AC_P_NC_PO_32#15 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D1	D1	D1	D1	D1	D2	D1	-	D1	D1	D1	D1
7	AC_P_C_PO_16#5 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D1	D2	D1	D1	D2	D2	D1	-	D1	D1	D1	D1
8	AC_P_C_PO_16#10 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D1	D2	D1	D1	D2	D2	D1	-	D1	D1	D1	D1
9	AC_P_C_PO_16#15 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D1	D2	D1	D1	D2	D2	D1	-	D1	D1	D1	D1
10	AC_P_C_PO_32#5 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D1	D1	D1	D1	D1	D2	D1	-	D1	D1	D1	D1
11	AC_P_C_PO_32#10 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D1	D1	D1	D2	D1	D2	D1	-	D1	D1	D1	D1
12	AC_P_C_PO_32#15 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	D1	D1	D1	D2	D1	D2	D1	-	D1	D1	D1	D1

ตารางที่ 4.12 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพกนตในน้ำมันปาล์ม (ต่อ)

ลำดับ	รหัส	Key Gas	Doernenburg	Rogers	IEC Ratio	Tri1	Tri3 FR3	Tri3 Midel	Tri3 BioTemp	Tri3 silicone	Pen1	Pen2	Pen3 FR3	Pen3 Rapseed	Pen3 sunflower	Pen3 Midel
13	lm+_P_NC_PO_16#5 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	PD	-	D1	PD	PD	PD
14	lm+_P_NC_PO_16#10 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	PD	PD	PD	PD	PD	PD	-	D1	PD	PD	PD
15	lm+_P_NC_PO_16#15 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	T3	T3	T3	T3	T3	D1	-	D1	D1	D1	D1
16	lm+_P_NC_PO_32#5 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D2	D2	D2	D2	D2	D2	-	D2	D2	D2	D2
17	lm+_P_NC_PO_32#10 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D1	D2	D2	D2	D2	D2	D2	-	D2	D2	D2	D2
18	lm+_P_NC_PO_32#15 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D1	D2	D2	D2	D2	D2	D2	-	D2	D2	D2	D2
19	lm+_P_C_PO_16#5 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D1	D2	D2	D2	D2	D2	D2	-	D2	D2	D2	D2
20	lm+_P_C_PO_16#10 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D1	D2	D2	D2	D2	D2	D2	-	D2	D2	D2	D2
21	lm+_P_C_PO_16#15 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D1	D2	D2	D2	D2	D2	D2	-	D2	D2	D2	D2
22	lm+_P_C_PO_32#5 <sup>3</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	-	D2	D2	D2	D2
23	lm+_P_C_PO_32#10 <sup>3</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	ND	DT	DT	DT	DT	DT	D2	-	D2	D2	D2	D2
24	lm+_P_C_PO_32#15 <sup>3</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	-	D2	D2	D2	D2

ตารางที่ 4.12 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์ม (ต่อ)

ลำดับ	รหัส	Key Gas	Doernenburg	Rogers	IEC Ratio	Tri1	Tri3 FR3	Tri3 Midel	Tri3 BioTemp	Tri3 silicone	Pen1	Pen2	Pen3 FR3	Pen3 Rapseed	Pen3 sunflower	Pen3 Midel
25	Im_P_NC_PO_16#5 <sup>2</sup>	ความร้อนใน เซลล์โลส	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	PD	-	D1	PD	PD	PD
26	Im_P_NC_PO_16#10 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	T3	T3	T3	T3	T3	D1	-	D1	D1	D1	D1
27	Im_P_NC_PO_16#15 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D2	D2	D2	D2	D2	D2	-	D2	D2	D2	D2
28	Im_P_NC_PO_32#5 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	ND	ND	D2	D2	D2	D2	D2	D1	-	D1	D1	D1	D1
29	Im_P_NC_PO_32#10 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	-	D2	D2	D2	D2
30	Im_P_NC_PO_32#15 <sup>1</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	-	D2	D2	D2	D2
31	Im_P_C_PO_16#5 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	-	D2	D2	D2	D2
32	Im_P_C_PO_16#10 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	-	D2	D2	D2	D2
33	Im_P_C_PO_16#15 <sup>2</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	-	D2	D2	D2	D2
34	Im_P_C_PO_32#5 <sup>3</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	-	D2	D2	D2	D2
35	Im_P_C_PO_32#10 <sup>3</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	-	D2	D2	D2	D2
36	Im_P_C_PO_32#15 <sup>3</sup>	ND	ไม่มีความผิดปกติ	การอาร์ค	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	-	D2	D2	D2	D2

### 4.3 การวิเคราะห์การประเมินความผิดปกติ

จากการทดสอบเพื่อเป็นการจำลองความผิดปกติชนิดต่าง ๆ ซึ่งจะได้ปริมาณความเข้มข้นแก๊สที่สามารถแปลผลถึงความผิดปกติของหม้อแปลง สามารถวิเคราะห์การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันได้ดังนี้

#### 4.3.1 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบน้ำมันแร่

โดยมีการจำลองทั้งหมด 36 กรณี ประกอบด้วยการดิสชาร์จพลังงานต่ำ 27 กรณี และการดิสชาร์จบางส่วน 9 กรณี สามารถแปลผลด้วยวิธีต่าง ๆ ดังนี้

##### 4.3.1.1 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธีคีย์แก๊ส

- มีการจำลองที่ไม่สามารถให้คำตอบได้ทั้งหมด 27 กรณี
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จบางส่วนทั้งหมด 9 กรณี ซึ่งตรงกับ ความผิดปกติตามสมมุติฐาน

##### 4.3.1.2 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Doernenburg Ratio

- มีการจำลองที่ไม่สามารถให้คำตอบได้ทั้งหมด 28 กรณี เนื่องจากไม่ผ่านเกณฑ์ของปริมาณแก๊สอ้างอิง (L1)
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จทั้งหมด 8 กรณี ซึ่งตรงกับ ความผิดปกติตามสมมุติฐาน

##### 4.3.1.3 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Roger Ratio

- มีการจำลองที่ไม่สามารถให้คำตอบได้ทั้งหมด 36 กรณี

##### 4.3.1.4 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี IEC Ratio

- มีการจำลองที่ไม่สามารถให้คำตอบได้ทั้งหมด 19 กรณี
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด 17 กรณี ซึ่งตรงกับ ความผิดปกติตามสมมุติฐาน

##### 4.3.1.5 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Duval Triangle 1

- มีการจำลองที่ไม่สามารถให้คำตอบได้ทั้งหมด 9 กรณี
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด 27 กรณี ซึ่งตรงกับ ความผิดปกติตามสมมุติฐาน

##### 4.3.1.6 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Duval Pentagon 1

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จบางส่วนทั้งหมด 9 กรณี ซึ่งตรงกับ ความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด 27 กรณี ซึ่งตรงกับ ความผิดปกติตามสมมุติฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.2 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบน้ำมัน FR3

โดยมีการจำลองทั้งหมด 36 กรณี ประกอบด้วยการดิสชาร์จพลังงานต่ำ 27 กรณี และการดิสชาร์จบางส่วน 9 กรณี สามารถแปลผลด้วยวิธีต่าง ๆ ดังนี้

##### 4.3.2.1 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี คีย์แก๊ส

- มีการจำลองที่ไม่สามารถให้คำตอบได้ทั้งหมด 36 กรณี

##### 4.3.2.2 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Doernenburg Ratio

- มีการจำลองที่ไม่สามารถให้คำตอบได้ทั้งหมด 34 กรณี เนื่องจากไม่ผ่านเกณฑ์ของปริมาณแก๊สอ้างอิง (L1)

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จทั้งหมด 2 กรณี ซึ่งตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

##### 4.3.2.3 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Roger Ratio

- มีการจำลองที่ไม่สามารถให้คำตอบได้ทั้งหมด 36 กรณี

##### 4.3.2.4 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี IEC Ratio

- มีการจำลองที่ไม่สามารถให้คำตอบได้ทั้งหมด 23 กรณี

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จบางส่วนทั้งหมด 7 กรณี ซึ่งตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด 6 กรณี ซึ่งตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

##### 4.3.2.5 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Duval Triangle 3 สำหรับน้ำมัน FR3

- มีการจำลองที่ไม่สามารถให้คำตอบได้ทั้งหมด 9 กรณี

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด 27 กรณี ซึ่งตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

##### 4.3.2.6 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Duval Pentagon 3 สำหรับน้ำมัน FR3

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด 23 กรณี ซึ่งตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

- มีการจำลองที่แปลผลเป็น Stray Gassing ทั้งหมด 13 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

#### 4.3.3 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบน้ำมันปาล์ม

โดยมีการจำลองทั้งหมด 36 กรณี ประกอบด้วยการดิสชาร์จพลังงานต่ำ 27 กรณี และการดิสชาร์จบางส่วน 9 กรณี สามารถแปลผลด้วยวิธีต่าง ๆ ดังนี้

##### 4.3.3.1 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี คีย์แก๊ส

- มีการจำลองที่ไม่สามารถให้คำตอบได้ทั้งหมด 32 กรณี
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความร้อนในเซลล์ลูลอสทั้งหมด 4 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับ ความผิดปกติตามสมมุติฐาน

##### 4.3.3.2 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Doernenburg Ratio

- มีการจำลองที่ไม่สามารถให้คำตอบได้ทั้งหมด 36 กรณี เนื่องจากไม่ผ่านเกณฑ์ของ ปริมาณแก๊สอ้างอิง (L1)

##### 4.3.3.3 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Roger Ratio

- มีการจำลองที่ไม่สามารถให้คำตอบได้ทั้งหมด 36 กรณี

##### 4.3.3.4 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี IEC Ratio

- มีการจำลองที่ไม่สามารถให้คำตอบได้ทั้งหมด 28 กรณี
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด 8 กรณี ซึ่งตรงกับ ความผิดปกติตามสมมุติฐาน

##### 4.3.3.5 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Duval Triangle 1

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จบางส่วนทั้งหมด 2 กรณี ซึ่งตรงกับ ความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด 5 กรณี ซึ่งตรงกับ ความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จพลังงานสูงทั้งหมด 1 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับ ความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300°C ทั้งหมด 3 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 300°C ถึง 700°C ทั้งหมด 5 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิมากกว่า 700°C ทั้งหมด 20 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

##### 4.3.3.6 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Duval Triangle 3 สำหรับน้ำมัน FR3

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จบางส่วนทั้งหมด 2 กรณี ซึ่งตรงกับ ความผิดปกติตามสมมุติฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด 6 กรณี ซึ่งตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300°C ทั้งหมด 8 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิมากกว่า 700°C ทั้งหมด 20 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

#### 4.3.3.7 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Duval Triangle 3 สำหรับน้ำมันมิเดล

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จบางส่วนทั้งหมด 2 กรณี ซึ่งตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด 6 กรณี ซึ่งตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300°C ทั้งหมด 7 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 300°C ถึง 700°C ทั้งหมด 1 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิมากกว่า 700°C ทั้งหมด 20 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

#### 4.3.3.8 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Duval Triangle 3 สำหรับน้ำมันไบโอเทมป์

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จบางส่วนทั้งหมด 2 กรณี ซึ่งตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด 4 กรณี ซึ่งตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จพลังงานสูงทั้งหมด 2 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300°C ทั้งหมด 8 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 300°C ถึง 700°C ทั้งหมด 6 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิมากกว่า 700°C ทั้งหมด 1 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนผสมกับความผิดปกติทางไฟฟ้า 13 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

#### 4.3.3.9 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Duval Triangle 3 สำหรับน้ำมันซิลิโคน

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จบางส่วนทั้งหมด 2 กรณี ซึ่งตรงกับ ความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จพลังงานสูงทั้งหมด 6 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับ ความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300°C ทั้งหมด 2 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 300°C ถึง 700°C ทั้งหมด 6 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิมากกว่า 700°C ทั้งหมด 20 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

#### 4.3.3.10 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Duval Pentagon 1

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด 24 กรณี ซึ่งตรงกับ ความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จพลังงานสูงทั้งหมด 4 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับ ความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300°C ทั้งหมด 1 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 300°C ถึง 700°C ทั้งหมด 2 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิมากกว่า 700°C ทั้งหมด 2 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็น Stray Gassing ทั้งหมด 3 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับ ความผิดปกติตามสมมุติฐาน

#### 4.3.3.11 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Duval Pentagon 2

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นเฉพาะใน น้ำมันทั้งหมด 1 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชันในกระดาดทั้งหมด 3 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความร้อนเกินทั้งหมด 1 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติ ตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็น Stray Gassing ทั้งหมด 3 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความ ผิดปกติตามสมมุติฐาน

#### 4.3.3.12 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Duval Pentagon 3 สำหรับน้ำมัน FR3

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด 24 กรณี ซึ่งตรงกับ ความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จพลังงานสูงทั้งหมด 4 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับ ความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300°C ทั้งหมด 1 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 300°C ถึง 700°C ทั้งหมด 3 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิมากกว่า 700°C ทั้งหมด 1 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็น Stray Gassing ทั้งหมด 3 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับ ความผิดปกติตามสมมุติฐาน

#### 4.3.3.13 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Duval Pentagon 3 สำหรับน้ำมันเรฟซีด

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด 24 กรณี ซึ่งตรงกับ ความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จพลังงานสูงทั้งหมด 4 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับ ความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 300°C ถึง 700°C ทั้งหมด 4 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิมากกว่า 700°C ทั้งหมด 1 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็น Stray Gassing ทั้งหมด 3 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับ ความผิดปกติตามสมมุติฐาน

#### 4.3.3.14 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Duval Pentagon 3 สำหรับน้ำมันดอก ทานตะวัน

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด 24 กรณี ซึ่งตรงกับ ความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จพลังงานสูงทั้งหมด 4 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับ ความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300°C ทั้งหมด 3 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 300°C ถึง 700°C ทั้งหมด 1 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิมากกว่า 700°C ทั้งหมด 1 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

- มีการจำลองที่แปลผลเป็น Stray Gassing ทั้งหมด 3 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

#### 4.3.3.15 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Duval Pentagon 3 สำหรับน้ำมันมิเคล

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด 24 กรณี ซึ่งตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จพลังงานสูงทั้งหมด 4 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300°C ทั้งหมด 1 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 300°C ถึง 700°C ทั้งหมด 2 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิมากกว่า 700°C ทั้งหมด 1 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

- มีการจำลองที่แปลผลเป็น Stray Gassing ทั้งหมด 4 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

#### 4.3.4 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบเพรสเซอร์ดที่ ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันแร่

โดยมีการจำลองทั้งหมด 33 กรณี ซึ่งเป็นการดิสชาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด สามารถแปลผลด้วยวิธีต่าง ๆ ดังนี้

##### 4.3.4.1 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี คีย์แก๊ส

- มีการจำลองที่ไม่สามารถให้คำตอบได้ทั้งหมด 31 กรณี

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความร้อนในเซลล์โลสทั้งหมด 2 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

##### 4.3.4.2 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Doernenburg Ratio

- มีการจำลองที่ไม่สามารถให้คำตอบได้ทั้งหมด 30 กรณี เนื่องจากไม่ผ่านเกณฑ์ของปริมาณแก๊สอ้างอิง (L1)

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการอาร์คทั้งหมด 3 กรณี ซึ่งตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

#### 4.3.4.3 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Roger Ratio

- มีการจำลองที่ไม่สามารถให้คำตอบได้ทั้งหมด 17 กรณี
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการอาร์คทั้งหมด 16 กรณี ซึ่งตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

#### 4.3.4.4 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี IEC Ratio

- มีการจำลองที่ไม่สามารถให้คำตอบได้ทั้งหมด 10 กรณี
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด 9 กรณี ซึ่งตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จพลังงานสูงทั้งหมด 14 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

#### 4.3.4.5 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Duval Triangle 1

- มีการจำลองที่ไม่สามารถให้คำตอบได้ทั้งหมด 2 กรณี
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด 3 กรณี ซึ่งตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จพลังงานสูงทั้งหมด 16 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 300°C ถึง 700°C ทั้งหมด 6 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนผสมกับความผิดปกติทางไฟฟ้าทั้งหมด 6 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

#### 4.3.4.6 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Duval Pentagon 1

- มีการจำลองที่ไม่สามารถให้คำตอบได้ทั้งหมด 3 กรณี
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด 10 กรณี ซึ่งตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จพลังงานสูงทั้งหมด 20 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

### 4.3.5 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบเพรสบอร์ดที่ ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน FR3

โดยมีการจำลองทั้งหมด 33 กรณี ซึ่งเป็นการดิสซาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด สามารถแปลผลด้วยวิธีต่าง ๆ ดังนี้

#### 4.3.5.1 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี คีร์แก๊ส

- มีการจำลองที่ไม่สามารถให้คำตอบได้ทั้งหมด 33 กรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.5.2 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Doernenburg Ratio

- มีการจำลองที่ไม่สามารถให้คำตอบได้ทั้งหมด 31 กรณี เนื่องจากไม่ผ่านเกณฑ์ของปริมาณแก๊สอ้างอิง (L1)
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการอาร์คทั้งหมด 2 กรณี ซึ่งตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐานทั้งหมด

#### 4.3.5.3 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Roger Ratio

- มีการจำลองที่ไม่สามารถให้คำตอบได้ทั้งหมด 24 กรณี
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการอาร์คทั้งหมด 9 กรณี ซึ่งตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐานทั้งหมด

#### 4.3.5.4 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี IEC Ratio

- มีการจำลองที่ไม่สามารถให้คำตอบได้ทั้งหมด 12 กรณี
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด 6 กรณี ซึ่งตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จบางส่วนทั้งหมด 6 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จพลังงานสูงทั้งหมด 9 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

#### 4.3.5.5 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Duval Triangle 3 สำหรับน้ำมัน FR3

- มีการจำลองที่ไม่สามารถให้คำตอบได้ทั้งหมด 4 กรณี
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด 9 กรณี ซึ่งตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จพลังงานสูงทั้งหมด 13 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิมากกว่า 700°C ทั้งหมด 7 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

#### 4.3.5.6 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Duval Pentagon 3 FR3

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด 13 กรณี ซึ่งตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จพลังงานสูงทั้งหมด 11 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็น stray gasing ทั้งหมด 9 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

#### 4.3.6 การประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันของการทดสอบเพรสบอร์ดที่ ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์ม

โดยมีการจำลองทั้งหมด 33 กรณี ซึ่งเป็นการดิสชาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด สามารถแปลผล  
ด้วยวิธีต่าง ๆ ดังนี้

##### 4.3.6.1 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี คีย์แก๊ส

- มีการจำลองที่ไม่สามารถให้คำตอบได้ทั้งหมด 32 กรณี
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความร้อนในเซลล์ลูลอสทั้งหมด 1 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความ  
ผิดปกติตามสมมุติฐานทั้งหมด

##### 4.3.6.2 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Doernenburg Ratio

- มีการจำลองที่ไม่สามารถให้คำตอบได้ทั้งหมด 33 กรณี เนื่องจากไม่ผ่านเกณฑ์ของ  
ปริมาณแก๊สอ้างอิง (L1)

##### 4.3.6.3 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Roger Ratio

- มีการจำลองที่ไม่สามารถให้คำตอบได้ทั้งหมด 14 กรณี
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการอาร์คทั้งหมด 19 กรณี ซึ่งตรงกับความผิดปกติตาม  
สมมุติฐาน

##### 4.3.6.4 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี IEC Ratio

- มีการจำลองที่ไม่สามารถให้คำตอบได้ทั้งหมด 10 กรณี
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด 13 กรณี ซึ่งตรงกับ  
ความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จพลังงานสูงทั้งหมด 10 กรณี ซึ่งตรงกับ  
ความผิดปกติตามสมมุติฐาน

##### 4.3.6.5 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Duval Triangle 1

- มีการจำลองที่ไม่สามารถให้คำตอบได้ทั้งหมด 2 กรณี
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด 5 กรณี ซึ่งตรงกับความ  
ผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จบางส่วนทั้งหมด 1 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความ  
ผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสชาร์จพลังงานสูงทั้งหมด 22 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับ  
ความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิมากกว่า  
700°C ทั้งหมด 2 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนผสมกับความผิดปกติทางไฟฟ้าทั้งหมด 1 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

#### 4.3.6.6 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Duval Triangle 3 สำหรับน้ำมัน FR3

- มีการจำลองที่ไม่สามารถให้คำตอบได้ทั้งหมด 2 กรณี
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด 8 กรณี ซึ่งตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จบางส่วนทั้งหมด 1 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จพลังงานสูงทั้งหมด 19 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิมากกว่า 700°C ทั้งหมด 2 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนผสมกับความผิดปกติทางไฟฟ้าทั้งหมด 1 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

#### 4.3.6.7 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Duval Triangle 3 สำหรับน้ำมันมิเดล

- มีการจำลองที่ไม่สามารถให้คำตอบได้ทั้งหมด 2 กรณี
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด 6 กรณี ซึ่งตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จบางส่วนทั้งหมด 1 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จพลังงานสูงทั้งหมด 21 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิมากกว่า 700°C ทั้งหมด 2 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนผสมกับความผิดปกติทางไฟฟ้าทั้งหมด 1 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

#### 4.3.6.8 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Duval Triangle 3 สำหรับน้ำมันโปโอเทมป์

- มีการจำลองที่ไม่สามารถให้คำตอบได้ทั้งหมด 2 กรณี
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด 5 กรณี ซึ่งตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จบางส่วนทั้งหมด 1 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จพลังงานสูงทั้งหมด 22 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิมากกว่า 700°C ทั้งหมด 2 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนผสมกับความผิดปกติทางไฟฟ้าทั้งหมด 1 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

#### 4.3.6.9 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Duval Triangle 3 สำหรับน้ำมันซิลิโคน

- มีการจำลองที่ไม่สามารถให้คำตอบได้ทั้งหมด 2 กรณี

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จบางส่วนทั้งหมด 1 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จพลังงานสูงทั้งหมด 27 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิมากกว่า 700°C ทั้งหมด 2 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นความผิดปกติเนื่องจากความร้อนผสมกับความผิดปกติทางไฟฟ้าทั้งหมด 1 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

#### 4.3.6.10 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Duval Pentagon 1

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด 12 กรณี ซึ่งตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จบางส่วนทั้งหมด 3 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จพลังงานสูงทั้งหมด 18 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

#### 4.3.6.11 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Duval Pentagon 3 สำหรับน้ำมัน FR3

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด 15 กรณี ซึ่งตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จพลังงานสูงทั้งหมด 18 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

#### 4.3.6.12 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Duval Pentagon 3 สำหรับน้ำมันแรฟซีด

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด 12 กรณี ซึ่งตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จบางส่วนทั้งหมด 3 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

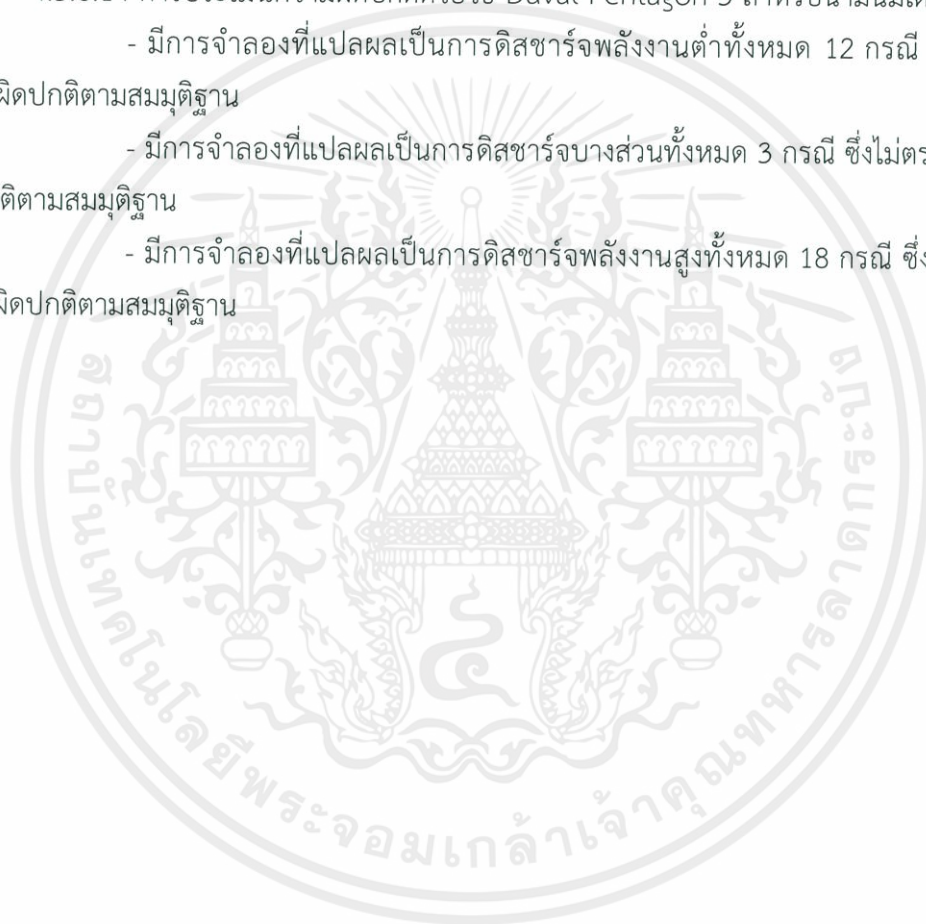
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จพลังงานสูงทั้งหมด 18 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับความผิดปกติตามสมมุติฐาน

4.3.6.13 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Duval Pentagon 3 สำหรับน้ำมันดอกทานตะวัน

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด 12 กรณี ซึ่งตรงกับ ความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จบางส่วนทั้งหมด 3 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับ ความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จพลังงานสูงทั้งหมด 18 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับ ความผิดปกติตามสมมุติฐาน

4.3.6.14 การประเมินความผิดปกติด้วยวิธี Duval Pentagon 3 สำหรับน้ำมันมิเดล

- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จพลังงานต่ำทั้งหมด 12 กรณี ซึ่งตรงกับ ความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จบางส่วนทั้งหมด 3 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับ ความผิดปกติตามสมมุติฐาน
- มีการจำลองที่แปลผลเป็นการดิสซาร์จพลังงานสูงทั้งหมด 18 กรณี ซึ่งไม่ตรงกับ ความผิดปกติตามสมมุติฐาน



### 4.3.7 เปอร์เซ็นความถูกต้องจากการประเมินความผิดปกติ

จากการประเมินความผิดปกติจากปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันด้วยวิธีต่าง ๆ ของผลการทดสอบทั้งหมด สามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องได้ดังนี้

เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง = (จำนวนกรณีที่แปลผลถูกต้อง / จำนวนกรณีการทดสอบทั้งหมด) × 100

ซึ่งเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องจากการประเมินความผิดปกติด้วยวิธีต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องจากการประเมินความผิดปกติด้วยวิธีต่าง ๆ

วิธีการประเมินความผิดปกติ	ความถูกต้องของการประเมินความผิดปกติ (%)					
	น้ำมันแร่	น้ำมัน FR3	น้ำมันปาล์ม	อิมเพรกเนตเพรสบอร์ดในน้ำมันแร่	อิมเพรกเนตเพรสบอร์ดในน้ำมัน FR3	อิมเพรกเนตเพรสบอร์ดในน้ำมันปาล์ม
Key gas	25.0	0	8.3	2.8	0	1.5
Doernenberg	22.2	5.1	0	8.3	6.1	0
Rogers	0	0	0	44.4	27.3	57.6
IEC Ratio	47.2	15.4	22.2	25.0	15.2	39.4
Duval Triangle 1	75.0	-	19.4	8.3	-	15.2
Duval Triangle 3 สำหรับน้ำมัน FR3	-	76.9	22.2	-	27.3	24.2
Duval Triangle 3 สำหรับน้ำมันมิเดล	-	-	22.2	-	-	18.2
Duval Triangle 3 สำหรับน้ำมันไบโอเทมป์	-	-	16.7	-	-	15.2
Duval Triangle 3 สำหรับน้ำมันซิลิโคน	-	-	5.6	-	-	0
Duval Pentagon 1	100	-	66.7	27.8	-	36.4
Duval Pentagon 2	-	-	0	-	-	-
Duval Pentagon 3 สำหรับน้ำมัน FR3	-	59.0	66.7	-	39.4	45.5
Duval Pentagon 3 สำหรับน้ำมันเรพสிட	-	-	66.7	-	-	36.4
Duval Pentagon 3 สำหรับน้ำมันดอกทานตะวัน	-	-	66.7	-	-	36.4
Duval Pentagon 3 สำหรับน้ำมันมิเดล	-	-	66.7	-	-	36.4

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน

จากการทดสอบเพื่อศึกษาปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมันทั้งสามชนิด ได้แก่ น้ำมันแร่ น้ำมัน FR3 และน้ำมันปาล์ม ที่เกิดจากการทดสอบน้ำมันด้วยการเบรกดาวน์จากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และจากการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบ และที่เกิดจากการทดสอบเพรสจอร์ที่ถูกอิมเพรกเน็ทในน้ำมันด้วยการเบรกดาวน์จากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า สามารถสรุปได้ดังนี้

##### 5.1.1 การทดสอบน้ำมันแร่

5.1.1.1 จากการทดสอบการเบรกดาวน์ของน้ำมันแร่ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วบวก และแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบ พบว่า

1. ความเข้มข้นแก๊สไฮโดรคาร์บอน และแก๊สไฮโดรเจน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนครั้งการเบรกดาวน์เพิ่มขึ้น และเมื่อระยะเวลาแกปเพิ่มขึ้น
2. ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนครั้งการเบรกดาวน์เพิ่มขึ้น
3. โดยความเข้มข้นแก๊สที่มากที่สุด คือ แก๊สอะเซทิลีน ตามด้วยแก๊สไฮโดรเจน แก๊สเอทิลีน แก๊สมีเทน แก๊สอีเทน และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ตามลำดับ

5.1.1.2 จากการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วน พบว่าเกิดเพียงแก๊สไฮโดรเจน ที่มีแนวโน้มความเข้มข้นลดลงเมื่อจำนวนครั้งการดิสชาร์จเพิ่มขึ้น และเมื่อระยะเวลาแกปเพิ่มขึ้น

##### 5.1.2 การทดสอบน้ำมัน FR3

5.1.2.1 จากการทดสอบการเบรกดาวน์ของน้ำมัน FR3 ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วบวก และแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบ พบว่า

1. ความเข้มข้นของแก๊สทุกชนิดที่สังเกตการณ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนครั้งการเบรกดาวน์เพิ่มขึ้น และเมื่อระยะเวลาแกปเพิ่มขึ้น

2. ลำดับความเข้มข้นของแก๊สจากมากไปน้อย มีลำดับที่แตกต่างกัน เมื่อทดสอบด้วยแรงดันทั้งสามชนิด

5.1.2.2 จากการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วน พบว่า ปรากฏชนิดของแก๊สน้อยกว่าการทดสอบการเบรกดาวน์ คือ แก๊สอีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน โดยค่าความเข้มข้นของแก๊สเหล่านี้จะค่อนข้างกว้าง ซึ่งความเข้มข้นแก๊สที่มากที่สุด คือ แก๊สไฮโดรเจน ตามด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สอีเทน ตามลำดับ

### 5.1.3 การทดสอบน้ำมันปาล์ม

5.1.3.1 จากการทดสอบการเบรกดาวน์ของน้ำมันปาล์มด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว และแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว พบว่า

1. ความเข้มข้นของแก๊สอะเซทิลีน และแก๊สไฮโดรเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนครั้งการเบรกดาวน์มากขึ้น และเมื่อระยะเวลาแกปมากขึ้น ในขณะที่ความเข้มข้นของแก๊สชนิดอื่นจะค่อนข้างกว้าง

2. ลำดับความเข้มข้นของแก๊สจากมากไปน้อย มีลำดับที่แตกต่างกัน เมื่อทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

3. เมื่อทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวและชั่วคราว มีความเข้มข้นแก๊สที่มากที่สุด คือ แก๊สอะเซทิลีน ตามด้วยแก๊สไฮโดรเจน ตามด้วยแก๊สเอทิลีน และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ในปริมาณที่เท่า ๆ กัน ตามด้วยแก๊สมีเทน และแก๊สฮีเทน ตามลำดับ

5.1.3.2 จากการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วน จะปรากฏชนิดของแก๊สน้อยกว่าการทดสอบการเบรกดาวน์ คือ แก๊สเอทิลีน แก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน โดยค่าความเข้มข้นของแก๊สเหล่านี้จะค่อนข้างกว้าง ซึ่งความเข้มข้นแก๊สที่มากที่สุด คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ตามด้วยแก๊สไฮโดรเจน แก๊สมีเทน และแก๊สเอทิลีน ตามลำดับ

### 5.1.4 การทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพกต์ในน้ำมันแร่

5.1.4.1 การทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพกต์ในน้ำมันแร่ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ พบว่า

1. ความเข้มข้นของแก๊สทุกชนิดที่สังเกตการณ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนครั้งการเบรกดาวน์เพิ่มขึ้น และเมื่อระยะเวลาแกปเพิ่มขึ้น

2. โดยความเข้มข้นแก๊สที่มากที่สุด คือ แก๊สอะเซทิลีน ตามด้วยแก๊สไฮโดรเจน แก๊สเอทิลีน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สมีเทน และแก๊สฮีเทน ตามลำดับ

5.1.4.2 การทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพกต์ในน้ำมันแร่ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว และแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว พบว่า

1. ความเข้มข้นของแก๊สทุกชนิดที่สังเกตการณ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนครั้งการเบรกดาวน์เพิ่มขึ้น และเมื่อระยะเวลาแกปเพิ่มขึ้น

2. การทดสอบในกรณีเบรกดาวน์ไม่ซ้ำจุดเดิมมีความเข้มข้นแก๊สสูงกว่ากรณีเบรกดาวน์ซ้ำจุดเดิม และลำดับความเข้มข้นของแก๊สจากมากไปน้อย มีลำดับที่แตกต่างกัน

### 5.1.5 การทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน FR3

5.1.5.1 การทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน FR3 ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับพบว่า

1. ความเข้มข้นของแก๊สทุกชนิดที่สังเกตการณ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนครั้งการเบรกดาวนเพิ่มขึ้น และเมื่อระยะแกปเพิ่มขึ้น

2. การทดสอบในกรณีเบรกดาวนไม่ซ้ำจุดเดิมมีความเข้มข้นแก๊สสูงกว่ากรณีเบรกดาวนซ้ำจุดเดิม และลำดับความเข้มข้นของแก๊สจากมากไปน้อย มีลำดับที่แตกต่างกัน

5.1.5.2 การทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน FR3 ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว และแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวพบว่า

1. กรณีการเบรกดาวนซ้ำจุดเดิม ความเข้มข้นของแก๊สทุกชนิดที่สังเกตการณ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนครั้งการเบรกดาวนเพิ่มขึ้น และเมื่อระยะแกปเพิ่มขึ้น ในขณะที่กรณีการเบรกดาวนไม่ซ้ำจุดเดิม ความเข้มข้นของแก๊สมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนครั้งการเบรกดาวนเพิ่มขึ้นที่ระยะแกป 3.2 mm เท่านั้น

2. การทดสอบในกรณีเบรกดาวนไม่ซ้ำจุดเดิมมีความเข้มข้นแก๊สสูงกว่ากรณีเบรกดาวนซ้ำจุดเดิม และลำดับความเข้มข้นของแก๊สจากมากไปน้อย มีลำดับที่แตกต่างกัน

### 5.1.6 การทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์ม

5.1.6.1 การทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์มด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับพบว่า

1. ความเข้มข้นของแก๊สทุกชนิดที่สังเกตการณ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนครั้งการเบรกดาวนเพิ่มขึ้น และเมื่อระยะแกปเพิ่มขึ้น

2. การทดสอบในกรณีเบรกดาวนไม่ซ้ำจุดเดิมมีความเข้มข้นแก๊สสูงกว่ากรณีเบรกดาวนซ้ำจุดเดิม และลำดับความเข้มข้นของแก๊สจากมากไปน้อย มีลำดับที่แตกต่างกัน

5.1.6.2 การทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์มด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว และแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราวพบว่า

1. กรณีการเบรกดาวนไม่ซ้ำจุดเดิม ความเข้มข้นของแก๊สทุกชนิดที่สังเกตการณ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนครั้งการเบรกดาวนเพิ่มขึ้น และเมื่อระยะแกปเพิ่มขึ้น ในขณะที่กรณีเบรกดาวนซ้ำจุดเดิม ความเข้มข้นของแก๊สมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนครั้งการเบรกดาวนเพิ่มขึ้นที่ระยะแกป 3.2 mm เท่านั้น

2. การทดสอบในกรณีเบรกดาวนไม่ซ้ำจุดเดิมมีความเข้มข้นแก๊สสูงกว่ากรณีเบรกดาวนซ้ำจุดเดิม และลำดับความเข้มข้นของแก๊สจากมากไปน้อย มีลำดับที่แตกต่างกัน

## 5.2 สรุปการประเมินความผิดปกติ

จากการทดสอบเพื่อเป็นการจำลองความผิดปกติชนิดต่าง ๆ ซึ่งจะได้ปริมาณความเข้มข้นแก๊สที่สามารถแปลผลถึงความผิดปกติของหม้อแปลง สามารถสรุปการประเมินความผิดปกติแต่ละวิธีได้ดังนี้

### 5.2.1 วิธี Key Gas

- เมื่อใช้วิธีนี้ในการแปลผลแก๊สที่ได้จากการทดสอบน้ำมันแร่และการทดสอบเพอร์เซอร์ดที่ ถูกอิมเพกเนตในน้ำมันแร่ จะมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการแปลผลมากที่สุด รองลงมาเป็นน้ำมัน ปาล์ม และน้ำมัน FR3 ตามลำดับ
- วิธีนี้ถูกออกแบบเพื่อการแปลผลสำหรับน้ำมันแร่เท่านั้น และเหมาะสำหรับการแปลผลเมื่อ ไม่สามารถใช้วิธีอื่นแปลผลได้เนื่องจากการประเมินความผิดปกติที่พิจารณาเพียงความเข้มข้นแก๊ส
- วิธีนี้ในบางกรณีไม่สามารถให้คำตอบได้เนื่องจากความเข้มข้นแก๊สที่เกิดขึ้นไม่เด่นชัด

### 5.2.2 วิธี Doernenberg

- เมื่อใช้วิธีนี้ในการแปลผลแก๊สที่ได้จากการทดสอบน้ำมันแร่และการทดสอบเพอร์เซอร์ดที่ ถูกอิมเพกเนตในน้ำมันแร่ จะมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการแปลผลมากที่สุด รองลงมาเป็นน้ำมัน FR3 และน้ำมันปาล์ม ตามลำดับ
- วิธีนี้ถูกออกแบบเพื่อการแปลผลสำหรับน้ำมันแร่เท่านั้น โดยมีเงื่อนไขในการทำงานมาก ทำให้บางกรณีไม่สามารถแปลผลได้
- วิธีนี้สามารถแปลผลแก๊สได้ว่าไม่มีความผิดปกติในหม้อแปลงได้

### 5.2.3 วิธี Rogers

- เมื่อใช้วิธีนี้ในการแปลผลแก๊สที่ได้จากการทดสอบเพอร์เซอร์ดที่ถูกอิมเพกเนตในน้ำมัน ปาล์ม จะให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องมากที่สุด รองลงมาเป็นน้ำมันแร่ และน้ำมัน FR3 ตามลำดับ
- เมื่อใช้วิธีนี้ในการแปลผลแก๊สที่ได้จากการทดสอบน้ำมันทั้งสามชนิด พบว่า มีเปอร์เซ็นต์ ความถูกต้องในการแปลผลเป็นศูนย์
- วิธีนี้ถูกออกแบบเพื่อการแปลผลสำหรับน้ำมันแร่เท่านั้น โดยมีเงื่อนไขในการทำงานมากทำให้บางกรณีไม่สามารถแปลผลได้
- วิธีนี้สามารถแปลผลแก๊สได้ว่าหม้อแปลงมีสถานะปกติได้

### 5.2.4 วิธี IEC Ratio

- เมื่อใช้วิธีนี้ในการแปลผลแก๊สที่ได้จากการทดสอบน้ำมันแร่ ทำให้มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการแปลผลมากที่สุด รองลงมาเป็นน้ำมันปาล์ม และน้ำมัน FR3 ตามลำดับ
- เมื่อใช้วิธีนี้ในการแปลผลแก๊สที่ได้จากการทดสอบการทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์ม จะให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องมากที่สุด รองลงมาเป็นน้ำมันแร่ และน้ำมัน FR3 ตามลำดับ
- วิธีนี้ถูกออกแบบเพื่อการแปลผลสำหรับน้ำมันแร่เท่านั้น โดยมีเงื่อนไขในการใช้งานมากทำให้มีโอกาสที่ไม่สามารถระบุถึงความผิดปกติได้สูง
- วิธีนี้มีโอกาสที่ไม่สามารถระบุความผิดปกติได้สูง

### 5.2.5 วิธี Duval Triangle 1

- เมื่อใช้วิธีนี้ในการแปลผลแก๊สที่ได้จากการทดสอบน้ำมันแร่ จะมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการแปลผลสูง
- เมื่อใช้วิธีนี้ในการแปลผลแก๊สที่ได้จากการทดสอบการทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันแร่ จะมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องต่ำ
- การแปลผลด้วยวิธีนี้ไม่มีโซนในการแปลผลว่าหม้อแปลงทำงานในสภาวะปกติ อาจนำไปสู่การวางแผนซ่อมบำรุงโดยไม่จำเป็น

### 5.2.6 วิธี Duval Triangle 3

- เมื่อใช้วิธี Duval Triangle 3 สำหรับน้ำมัน FR3 ในการแปลผลแก๊สที่ได้จากการทดสอบน้ำมัน FR3 จะมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องสูง
- เมื่อใช้วิธี Duval Triangle 3 สำหรับน้ำมัน FR3 ในการแปลผลแก๊สที่ได้จากการทดสอบการทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน FR3 จะมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องต่ำ
- เมื่อใช้วิธีเหล่านี้ในการแปลผลแก๊สที่ได้จากการทดสอบการทดสอบปาล์ม พบว่า วิธี Duval Triangle 3 สำหรับน้ำมัน FR3 และวิธี Duval Triangle สำหรับน้ำมันมิเดล ให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการแปลผลมากที่สุดรองลงมาเป็นวิธี Duval Triangle 3 สำหรับน้ำมันไบโอเทมป์ และวิธี Duval Triangle 3 สำหรับน้ำมันซิลิโคน ตามลำดับ
- เมื่อใช้วิธีเหล่านี้ในการแปลผลแก๊สที่ได้จากการทดสอบการทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์ม พบว่า วิธี Duval Triangle 3 สำหรับน้ำมัน FR3 ให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการแปลผลมากที่สุด รองลงมาเป็นวิธี Duval Triangle 3 สำหรับน้ำมันมิเดล วิธี Duval Triangle 3 สำหรับน้ำมันไบโอเทมป์ และวิธี Duval Triangle 3 สำหรับน้ำมันซิลิโคน ตามลำดับ
- การแปลผลด้วยวิธีนี้ไม่มีโซนในการแปลผลว่าหม้อแปลงทำงานในสภาวะปกติ เช่นเดียวกับวิธี Duval Triangle 1

### 5.2.7 วิธี Duval Pentagon 1

- เมื่อใช้วิธีนี้ในการแปลผลแก๊สที่ได้จากการทดสอบน้ำมันแร่ จะมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการแปลผลมากที่สุด (100%)
- เมื่อนำวิธีนี้ในการแปลผลแก๊สที่ได้จากการทดสอบน้ำมันปาล์ม พบว่า มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องค่อนข้างสูง (66.7%)
- เมื่อใช้วิธีนี้ในการแปลผลแก๊สที่ได้จากการทดสอบการทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันแร่ และน้ำมันปาล์ม จะมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องต่ำ
- วิธีนี้สามารถระบุความผิดปกติเนื่องจากความร้อนได้เฉพาะเจาะจงมากกว่าวิธีอื่น โดยการใช่วิธี Duval Pentagon 2 ในการแปลผลต่อ
- วิธีนี้ไม่มีโซนในการแปลผลว่าหม้อแปลงทำงานในสภาวะปกติ อาจนำไปสู่การวางแผนซ่อมบำรุงโดยไม่จำเป็น

### 5.2.8 วิธี Duval Pentagon 2

- วิธีนี้เป็นการระบุโซน T1 T2 และ T3 ในวิธี Duval Pentagon 1 ให้ละเอียดมากขึ้นในส่วนของความผิดปกติเนื่องจากความร้อน

### 5.2.9 วิธี Duval Pentagon 3

- เมื่อใช้วิธี Duval Pentagon 3 สำหรับน้ำมัน FR3 ในการแปลผลแก๊สที่ได้จากการทดสอบน้ำมัน FR3 และน้ำมันปาล์ม จะมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องสูง โดยน้ำมัน FR3 และน้ำมันปาล์ม มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเท่ากับ 66.7 และ 59 ตามลำดับ
- เมื่อใช้อีกสามวิธีที่เหลือในการแปลผลแก๊สที่ได้จากการทดสอบน้ำมันปาล์มได้แก่ วิธี Duval Pentagon 3 สำหรับน้ำมันมิเดล วิธี Duval Pentagon 3 สำหรับน้ำมันแรพชิต และวิธี Duval Pentagon 3 สำหรับน้ำมันดอกทานตะวัน พบว่า มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการแปลผลเท่ากัน คือ 66.7
- เมื่อใช้วิธี Duval Pentagon 3 สำหรับน้ำมัน FR3 ในการแปลผลแก๊สที่ได้จากการทดสอบการทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน FR3 และน้ำมันปาล์ม พบว่า มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเท่ากับ 39.4 และ 45.5 ตามลำดับ
- เมื่อใช้อีกสามวิธีที่เหลือในการแปลผลแก๊สที่ได้จากการทดสอบการทดสอบเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์มได้แก่ วิธี Duval Pentagon 3 สำหรับน้ำมันมิเดล วิธี Duval Pentagon 3 สำหรับน้ำมันแรพชิต และวิธี Duval Pentagon 3 สำหรับน้ำมันดอกทานตะวัน พบว่า มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการแปลผลเท่ากัน คือ 36.4
- วิธีเหล่านี้ไม่มีโซนในการแปลผลว่าหม้อแปลงทำงานในสภาวะปกติ อาจนำไปสู่การวางแผนซ่อมบำรุงโดยไม่จำเป็น เช่นเดียวกับวิธี Duval Pentagon 1

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. จากการทดสอบควรมีการทดสอบซ้ำในแต่ละแรงดัน เพื่อยืนยันผลการทดสอบที่ได้
2. เพื่อให้ได้ความเข้มข้นของแก๊สที่ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ควรเก็บตัวอย่างน้ำมันด้วยไซริง เนื่องจากการเก็บในไซริงป้องกันการหดและขยายตัวของน้ำมันได้
3. ควรมีการศึกษาและการทดสอบความผิดปกติชนิดอื่นเพิ่มเติม เช่น ความผิดปกติเนื่องจากความร้อน
4. น้ำมันปาล์มที่ใช้ในการทดสอบ เป็นน้ำมันปาล์มที่ยังไม่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติ อาจทำให้ค่าแก๊สที่เกิดขึ้นไม่ตรงกับกรณีที่ใช้ น้ำมันปาล์มที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติเพื่อใช้งานจริงกับหม้อแปลง
5. ควรออกแบบชุดทดสอบที่สามารถรองรับความดันภายในชุดทดสอบที่เกิดขึ้นขณะที่ทำการทดสอบ
6. ควรทดสอบตัวอย่างน้ำมันทันที เนื่องจากมีปัจจัยภายนอกทำให้เกิดความผิดพลาด เช่น แสงแดด การขนส่งน้ำมัน ระยะเวลาการเก็บตัวอย่างน้ำมันก่อนทดสอบ และอุณหภูมิ
7. ควรทำการทดสอบในวัน เวลาและสถานที่ใกล้เคียงกัน เพื่อลดผลของความแตกต่างของปัจจัยภายนอก เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และความดันบรรยากาศ
8. การทดลองข้างต้นให้ความเข้มข้นของแก๊ส CO และ CO<sub>2</sub> ไม่สูงมากพอที่จะระบุการเกิดความผิดปกติได้จึงไม่นำมาพิจารณาในการศึกษาครั้งนี้ หากต้องการนำมาพิจารณาอาจเพิ่มจำนวนครั้งของการเบรกดาวนหรือระยะแกปตามความเหมาะสม
9. การทดลองข้างต้นให้ความเข้มข้นของสารประกอบ 2FAL ไม่สูงมากพอที่จะระบุค่า DP ได้ จึงไม่นำมาพิจารณาในการศึกษาครั้งนี้ หากต้องการนำมาพิจารณาอาจเพิ่มจำนวนครั้งของการเบรกดาวนหรือระยะแกปตามความเหมาะสม

## บรรณานุกรม

- [1] ไสว ฐานิพานิชสกุล, หม้อแปลง, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพมหานคร: หจก.พีเอ็นพี พับบลิชซิ่ง, 2525.
- [2] นรเศรษฐ พัฒนเดช, วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า เล่ม 1: ฉนวนและวัสดุฉนวนไฟฟ้า Electrical Engineering Materials, พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพมหานคร: ห้างหุ้นส่วนจำกัด มีน เซอร์วิส ซัพพลาย, 2557.
- [3] สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์, 2549.
- [4] ABB, Transformer Handbook, 3<sup>rd</sup> Ed., Power and productivity for a better world ABB Group, 2010
- [5] Conservator Tank. สืบค้นเมื่อวันที่ 1 กันยายน 2561, จาก <https://www.indiamart.com/proddetail/transformer-conservator-tank-10911237188.html>
- [6] Silica Gel. สืบค้นเมื่อวันที่ 1 กันยายน 2561, จาก <http://www.silicagel.in/silicagel-breather.html>
- [7] Pressure Relief Device. สืบค้นเมื่อวันที่ 1 กันยายน 2561, จาก <https://www.qualitrolcorp.com/products/pressure-controls-gauges-and-relays/pressure-relief-devices/qualitrol-lprd/>
- [8] Oil and Winding Temperature. สืบค้นเมื่อวันที่ 2 กันยายน 2561, จาก [https://www.reinhausen.com/desktopdefault.aspx/tabid-1420/1739\\_read-4338/](https://www.reinhausen.com/desktopdefault.aspx/tabid-1420/1739_read-4338/)
- [9] Buchholz Relay. สืบค้นเมื่อวันที่ 2 กันยายน 2561, จาก <http://scenar.co/wiring-diagram/buchholz-relay-block-diagram.html>
- [10] Buchholz Relay. สืบค้นเมื่อวันที่ 2 กันยายน 2561, จาก <https://new.abb.com/products/transformers/transformer-components/measurement-and-safety-devices/pressure-and-flow-devices/buchholz-relay>
- [11] Radiators. สืบค้นเมื่อวันที่ 2 กันยายน 2561, จาก [http://www.reussis.com/demo/sapthagiri/radiator\\_transformer](http://www.reussis.com/demo/sapthagiri/radiator_transformer)
- [12] พัดลมหม้อแปลง. สืบค้นเมื่อวันที่ 2 กันยายน 2561, จาก <http://www.nicktransformer.com/transformer-cooler/>
- [13] Solid Porcelain Bushing. สืบค้นเมื่อวันที่ 2 กันยายน 2561, จาก <http://www.studyelectrical.com/2015/09/electrical-bushings-types-and-purpose-classification-construction>
- [14] Lightning Arresters. สืบค้นเมื่อวันที่ 4 กันยายน 2561, จาก <https://electrical-engineering-portal.com/complete-overview-of-lightning-arresters-part-3>
- [15] Core Clamping. สืบค้นเมื่อวันที่ 4 กันยายน 2561, จาก <https://www.indiamart.com/proddetail/transformer-core-frame-parts-7152570273>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] **Foil Winding.** สืบค้นเมื่อวันที่ 4 กันยายน 2561, จาก <http://www.ardantrafo.com/t/1441-oil-transformers>
- [17] Dhorali Gnanasekaran and Venkata Prasad Chavidi, **Vegetable Oil based Biolubricants and Transformer Fluids Applications in Power Plants**, Springer, 2018
- [18] **Type of Fatty Acid.** สืบค้นเมื่อวันที่ 8 พฤษภาคม 2561, จาก [https://en.wikipedia.org/wiki/Fatty\\_acid](https://en.wikipedia.org/wiki/Fatty_acid)
- [19] Russell Martin, **Experiences in Service with New Insulating Liquids**, UK, Copyright, 2010
- [20] A. Thomas Prevost and T.V. Oommen, “Cellulose Insulation in Oil-Filled Power Transformers: Part I - History and Development”, **IEEE Electrical Insulation Magazine**, Vol 22. Issue: 1, 2006, pp. 28-33
- [21] A. Thomas Prevost and T.V. Oommen, “Cellulose Insulation in Oil-Filled Power Transformers: Part II – Maintaining Insulation Integrity and Life”, **IEEE Electrical Insulation Magazine**, Vol 22. Issue: 2, 2006, pp. 5-12
- [22] L.Cheim, D.Platts, T.M. Prevost, S.Z. Xu, “Furan Analysis for Liquid Power Transformers,” **IEEE Electrical Insulation Magazine**, Vol.28, No. 2, 2012, pp.8-21.
- [23] **Weidmann insulation paper.** สืบค้นเมื่อวันที่ 4 กันยายน 2561, จาก <https://www.weidmann-electrical.com/insulation>
- [24] M.Duval and L.Lamarre, “Interpretation of Gas-In-Oil Analysis Using New IEC Publication 60599 and IEC TC 10 Databases,” **IEEE Electrical Insulation Magazine**, vol. 17, no. 2, pp.34-41, 2001
- [25] **Transformer Maintenance**, Hydroelectric research and technical services group, 2000
- [26] IEC 60599, Edition 3.0 2015-09, Mineral oil-impregnated electrical equipment in service–Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis.
- [27] IEEE C57.104-2008, Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers.
- [28] Michel Duval, “The Duval Triangle for Load Tap Changers, Non-Mineral Oils and Low Temperature Faults in Transformers,” **IEEE Electrical Insulation Magazine**, Vol 24. Issue: 6, 2008, pp.22-28.
- [29] M.Duval and L.Lamarre, “The New Duval Pentagons Available for DGA Diagnosis in Transformers Filled with Mineral and Ester Oils,” **Electrical Insulation Conference**, 2017

- [30] M.Duval and L.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, pp.9-12, 2014
- [31] Wolfgang Hauschild and Eberhard Lemke, "Requirements to AC Test Voltages and Selection of HVAC Test Systems," **High-Voltage Test and Measuring Techniques**, Berlin: Springer Heidelberg, 2014
- [32] IEC 60475, Edition 2.0-2011, Method of sampling insulating liquids.
- [33] IEC 60567, Edition 4.0-2011, Oil-filled electrical equipment – Sampling of gases and analysis of free and dissolved gases – Guidance.
- [34] ASTM D3612 – 02, Standard Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oil by Gas Chromatography1.
- [35] IEC 60156, Edition 2.0-1995, Insulating liquid determination of the breakdown voltage at power frequency – test method.
- [36] IEC 60897, Edition 1.0-1987, Methods for the determination of the lightning impulse breakdown voltage of insulating liquids.
- [37] IEC 60243-1, Edition 3.0-2013, Electric strength of insulating materials – Test methods – Part 1: Tests at power frequencies.
- [38] IEC 60243-3, Edition 3.0-2013, Electric strength of insulating materials – Test methods – Part 3: Additional requirements for 1,2/50  $\mu$ S impulse tests.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## DIAGNOSIS OF OIL IMMERSED TRANSFORMER INSULATION BY USING DISSOLVED GAS ANALYSIS



Kanchanaporn Luk-in<sup>1</sup>, Chantapapa Samerpak<sup>2</sup>, Nattakrit Chumnuan<sup>3</sup>, Nadpakul Piyapatamin<sup>4</sup>, and Norasage Pattanadech<sup>5</sup>

### Abstract

This paper represents the study of dissolved gas analysis in dielectric liquid impregnated pressboard under breakdown conditions. The pressboards were prepared with dimension of 100 x 100 x 3.2 mm (W x L x H). First of all, each liquid insulation, mineral oil, palm oil, and natural ester (FR3), was heated at 60°C with 200 mbar for 12 hours. Second, pressboards were heated at 80°C with 200 mbar for 12 hours. The heated pressboards were impregnated at 60°C with 200 mbar for 12 hours. Impregnated pressboard was tested with different types of voltage such as AC, positive impulse, and negative impulse. From the test results, the type and quantity of gases depended on the type and the number of breakdowns.

### Introduction

Recently, solid insulation deterioration is analyzed by using degree of polymerization (DP). But this method sometimes can not do because it has to cut paper in transformer and send to laboratory, so using indirect method is may convenient by analyzing the gas generated by the deterioration of the paper such as CO and CO<sub>2</sub>. Considering liquid insulation, palm oil have not been much researched but some primary electrical properties it has similar to mineral oil such as AC breakdown voltage and dielectric dissipation factor.

Hence, this paper represents the studies of gas generated in palm oil and natural ester (FR3) compared with mineral oil under alternative voltage (AC), positive and negative standard lightning impulse voltage by using dissolved gas analysis (DGA) [1].

### Methodology

Figures below present the test setup and test equipment.

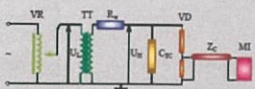


Fig. 1 AC breakdown voltage test circuit [2].

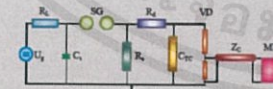


Fig. 2 Standard lightning impulse breakdown voltage test circuit [3].



Fig. 3 Test vessel.



Fig. 4 Pressboard.



Fig. 5 Tested pressboard.



Fig. 6 Vacuum oven.



Fig. 7 Agilent gas analyzer.

### Results

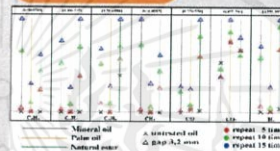


Fig. 8 DGA result caused by AC breakdown of impregnated pressboards in dielectric liquid.

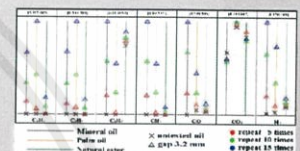


Fig. 9 DGA result caused by negative impulse breakdown of impregnated pressboards in dielectric liquid.

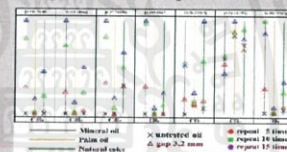


Fig. 10 DGA result caused by positive impulse breakdown of impregnated pressboards in dielectric liquid.

### Conclusion

From the test results, it was found that

- The types of generated gas were differed depending on the types of breakdown voltage.
- The generated gases were increased with an increase in the number of breakdowns.
- In case of mineral oil and natural ester, positive impulse breakdown voltage generated the gases lower than the negative standard lightning impulse breakdown voltage.
- In case of palm oil, the positive standard lightning impulse breakdown voltage generated the gases larger than the negative standard lightning impulse breakdown voltage.

### References

- [1] Dhorali Gnanasekaran and Venkata Prasad Chavidi, Vegetable Oil based Biolubricants and Transformer Fluids Applications in Power Plants, Springer, 2018
- [2] IEC 60243-3, Edition 3.0 – 2013, Electric strength of insulating materials – Test methods – Part 1: Tests at power frequencies.
- [3] IEC 60243-3, Edition 3.0 – 2013, Electric strength of insulating materials – Test methods – Part 3: Additional requirements for 1,2/50  $\mu$ s impulse tests.

### Acknowledgement

This work was supported by Meidensha Corporation, Data Entry Group Co., Ltd., Team True Service Co., Ltd., and Tesla Power Co., Ltd. as well as the staff of the High Voltage Engineering Laboratory, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL).





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Dissolved Gas Analysis of Liquid Insulation under AC and Impulse Breakdown Voltage Tests

K. Lu-kin<sup>1</sup>, Ch. Samerpak<sup>2</sup>, N. Chumninuan<sup>3</sup>, N. Piyapatamin<sup>4</sup>, and N. Pattanadech<sup>5</sup>  
Faculty of Engineering, King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang  
1 Soi Chalongsung 1 Ladkrabang Bangkok 10520 Thailand

<sup>1</sup>Sp.Kanchanaporn@gmail.com, <sup>2</sup>58010167@kmitl.ac.th, <sup>3</sup>58010360@kmitl.ac.th, <sup>4</sup>icepiyapatamin@gmail.com, and <sup>5</sup>norasage.pa@kmitl.ac.th

**Abstract**—This paper represents the study of dissolved gas analysis in mineral oil compared with natural ester (FR3) under AC and impulse breakdown voltage tests. Liquid insulation was heated at 60°C with 200 mbar for 12 hours. Liquid test samples were divided into three groups. The first group was tested with AC voltage using the spherical electrodes with the gap distance of 1.0, 1.5, and 2.0 mm. The AC test procedure was in accordant with IEC 60156. The second and the third group of liquid samples was tested with standard positive lightning impulse and standard negative lightning impulse voltage using the needle – sphere electrode with the distance of 10, 15, and 20 mm. The impulse test procedure was according to IEC 60897. Testing experiment were performed 5, 10, and 15 times consecutively for each test sample. Then dissolved gas analysis of each test sample was performed. From the test results, the type of breakdown voltage and the number of breakdowns effected on the quantity of the dissolved gas in the liquid insulation.

**Keyword**— mineral oil, natural ester, DGA, AC breakdown voltage, impulse breakdown voltage.

## I. INTRODUCTION

The most commonly used liquid insulation in transformers is mineral oil because of two main advantages. First, high breakdown strength and excellent cooling properties. However, it has disadvantages such as low flash and fire point, and susceptible to water content, as well as not being environmentally friendly.

Therefore, alternative liquid insulation becomes more interesting (especially natural ester) due to high water tolerance, high flash and high fire point, and excellent biodegradation. However, there are some disadvantages of using natural ester as liquid dielectric. It has higher viscosity and higher pour-point than mineral oil. By the way, both of liquid insulation can be analyzed fault by dissolved gases in oil but the behavior of gas generation should be different.

Thus, this paper represents the concentrations of dissolved gases in different liquid insulations i.e., mineral oil and natural ester which were tested under different types of test voltages i.e., AC breakdown

voltage, standard positive lightning impulse breakdown voltage, and standard negative lightning impulse breakdown voltage. Then, dissolved gas analysis method (DGA) was performed. DGA technique is an acceptable tool used for analyzing the fault condition in liquid insulation.

## II. THEORY

Liquid insulation in transformers is mixtures of many different hydrocarbon molecules [1]. The main roles of liquid insulation are electrical insulation, heat exchanger [2]. Moreover, it is a significant indicator to reveal the condition of the transformers. Gases are produced from the decomposition of oil when fault occurs in the transformers. The type and quantity of gases depend on the types of faults.

## III. TEST SETUP

### A. AC Breakdown Voltage Testing

Test vessel and electrodes including dielectric breakdown test device used in the experiment are shown in Fig. 1.

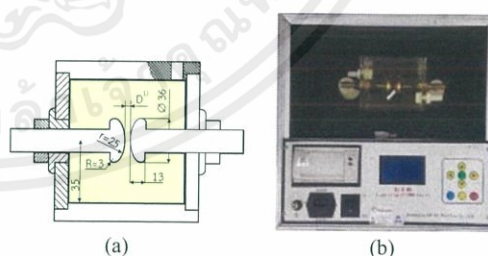


Fig. 1. AC breakdown voltage testing of liquid insulation [3]. (a) Test vessel. (b) Dielectric breakdown testing device.

### B. Lightning Impulse Breakdown Voltage Test

To investigate the amount of the dissolved gases caused by positive and negative standard impulse breakdown voltage test of mineral oil and natural ester, the electrode system was designed and constructed according to IEC 60897 [4] as shown in Fig. 2. Test circuit for impulse breakdown experiment is shown in Fig. 3.

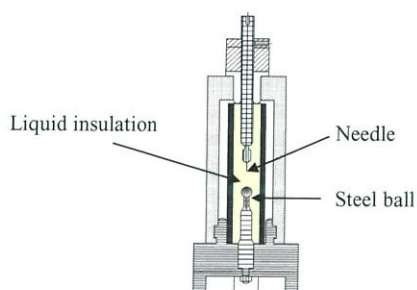


Fig. 2. Test vessel for impulse breakdown testing of liquid insulation [4].

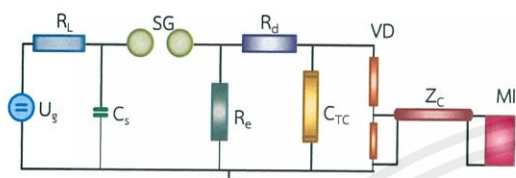


Fig. 3. Test circuit diagram for the impulse breakdown experiment of the liquid insulation.

Where  $U_g$  : Charging Voltage

$R_L$  : Charging Resistor

$C_s$  : Impulse Capacitor

$S_g$  : Spark Gap

$R_e$  : Tail Resistor

$R_d$  : Front Resistor

$V_d$  : Voltage Divider

$Z_c$  : Coaxial Cable

$M_i$  : Measurement Instrument

$C_{tc}$  : Test Vessel

### C. Gas Analyzer

Dissolved gas in the oil sample was measured following method C (Headspace), ASTM D3612-02 [5]. Gas quantity was determined by gas chromatography technique with specified gas inert. This experiment was performed by using Agilent gas analyzers as shown in Fig. 4.

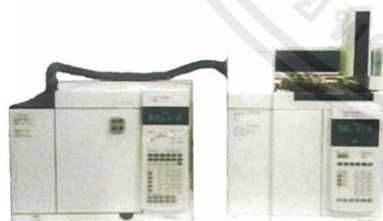


Fig. 4. Agilent Gas Analyzers.

### D. Moisture Content Analyzer

The moisture content of the oil sample was measured by using Karl Ficher moisture meter CA-21 as shown in Fig. 5.



Fig. 5. Karl Ficher moisture meter CA-21.

## IV. TEST PROCEDURE

To investigate the gases dissolved in different type of liquid insulation i.e., mineral oil and natural ester, caused by various types of breakdown voltages, the test procedure was divided into 3 cases according to the applied voltage i.e., AC voltage, positive lightning impulse voltage and negative lightning impulse voltage.

### A. Case I: AC Breakdown Voltage Test Procedure

AC breakdown voltage test procedures are as follow:

1. Preparing the test circuit as shown in Fig. 1,
2. Adjusting the gap between the electrode for 1.0 mm and filling mineral oil into the test vessel,
3. Applying AC voltage to mineral oil until breakdown occurred and then recording the breakdown voltage,
4. Repeating step 3 and sampling oil by using dark bottle after 5, 10, and 15 times of testing,
5. Following step 2-4, with changing the gap distance between the electrode to 1.5 mm and 2.0 mm respectively,
6. Following step 2-5 for natural ester as liquid insulation tested.

### B. Case II: Positive Lighting Impulse Breakdown Voltage Test Procedure

Positive lightning impulse breakdown voltage test procedures are as follow:

1. Preparing the test circuit as shown in Fig. 3. Then, diode was set to apply positive lighting impulse,
2. Adjusting the gap between the electrode for 10 mm and filling mineral oil into the test vessel,
3. Applying the positive lightning breakdown voltage to liquid sample. The positive lightning breakdown voltage was obtained from up and down test method
4. Repeating step 3 and sampling oil by using a dark bottle after 5, 10, and 15 times of testing,
5. Following step 2-4 and changing the gap distance between the electrode to 1.5 mm and 2.0 mm respectively,
6. Following step 2-5 for natural ester as liquid insulation tested.

### C. Case III: Negative Lighting Impulse Breakdown Voltage Test Procedure.

Negative lightning impulse breakdown voltage test procedures are as follow:

1. Preparing the test equipment as shown in Fig. 3,
2. Setting diode to apply negative lighting impulse,
3. Following the same procedure as used for positive lighting impulse breakdown voltage test.

V. TEST RESULT

A. Case I: DGA Result Caused by AC Breakdown of Liquid Insulation

AC breakdown voltage of mineral oil and natural ester when the gap spacing of electrode was fixed 1.0, 1.5, and 2.0 mm are summarized in table I.

TABLE I. AC BREAKDOWN VOLTAGE OF MINERAL OIL AND NATURAL ESTER

Gap Spacing (mm)	AC Breakdown Voltage (kV)	
	Mineral oil	Natural ester
1.0	43.6	42.7
1.5	44.8	54.9
2.0	50.1	60.3

The moisture contents of new sample and oil samples after experienced by AC breakdown voltages for mineral oil were 22.28 and 23.45 ppm respectively. Besides, the moisture contents of new sample and natural ester samples after experienced by AC breakdown voltages for natural ester were 162.40 and 195.54 ppm respectively.

The concentrations of gases dissolved in each of liquid insulations i.e., mineral oil and natural ester at gap spacing of 1.0, 1.5, and 2.0 mm are shown in Fig. 6 and Fig. 7 respectively.

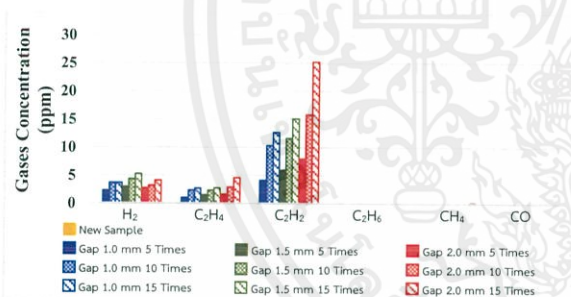


Fig. 6. DGA result caused by AC breakdown of mineral oil.

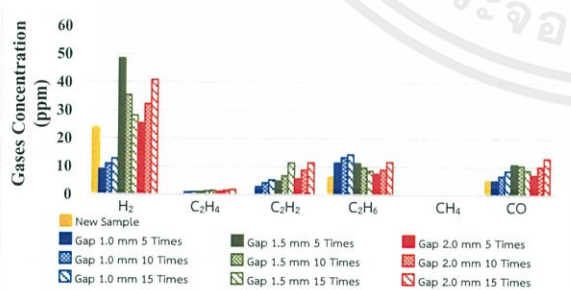


Fig. 7. DGA result caused by AC breakdown of natural ester.

B. Case II: DGA Result Caused by Positive Standard Lightning Impulse Breakdown of Liquid Insulation

Positive standard lightning impulse breakdown voltage of mineral oil and natural ester when the gap spacing of the electrodes was fixed 10, 15, and 20 mm are summarized in table II.

TABLE II. POSITIVE STANDARD LIGHTNING IMPULSE BREAKDOWN VOLTAGE OF MINERAL OIL AND NATURAL ESTER

Gap Spacing (mm)	Positive Lightning Impulse Breakdown Voltage (kV)	
	Mineral oil	Natural ester
10	81.5	47.5
15	104.6	59.4
20	112.9	75.2

The moisture contents of new sample and oil samples after experienced by the positive standard lightning impulse breakdown voltages for mineral oil were 22.28 and 26.71 ppm respectively. Moreover, the moisture contents of new sample and natural ester samples after experienced by the positive standard lightning impulse breakdown voltages for natural ester were 139.30 and 148.87 ppm respectively.

The concentrations of gases dissolved in each of liquid insulations which are mineral oil and natural ester at gap spacing of 10, 15, and 20 mm are demonstrated in Fig. 8 and Fig. 9 respectively.

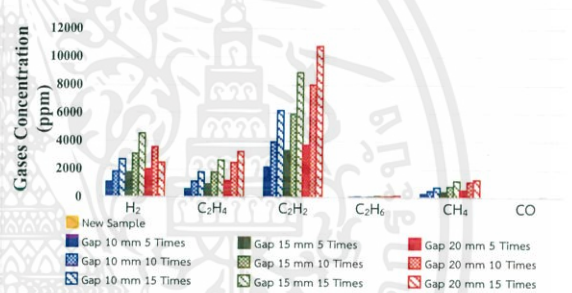


Fig. 8. DGA result caused by positive standard lightning impulse breakdown of mineral oil.

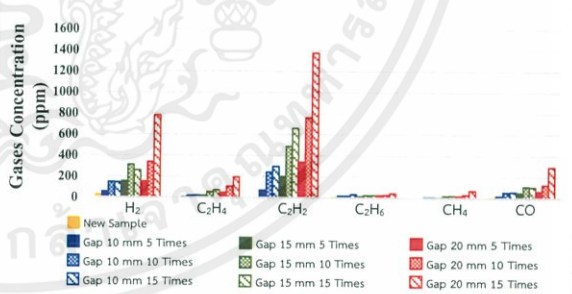


Fig. 9. DGA result caused by positive standard lightning impulse breakdown of natural ester.

C. Case III: DGA Result Caused by Negative Standard Lightning Impulse Breakdown of Liquid Insulation

Negative standard lightning impulse breakdown voltage of mineral oil and natural ester when the gap spacing of electrode was fixed at 10, 15, and 20 mm are summarized in table III.

TABLE III. NEGATIVE STANDARD LIGHTNING IMPULSE BREAKDOWN VOLTAGE OF MINERAL OIL AND NATURAL ESTER

Gap Spacing (mm)	Negative Lightning Impulse Breakdown Voltage (kV)	
	Mineral oil	Natural ester
10	229.7	71.3
15	245.5	95.0
20	261.4	126.7

The moisture contents of new sample and oil samples after experienced by the negative standard lightning impulse breakdown voltages for mineral oil were 16.66 and 37.15 ppm respectively. Furthermore, the moisture contents of new sample and natural ester samples after experienced by the negative standard lightning impulse breakdown voltages for natural ester were 156.7 and 183.55 ppm respectively.

The concentrations of gases dissolved in each of liquid insulations which are mineral oil and natural ester at gap spacing of 10, 15, and 20 mm are depicted in Fig. 10 and Fig. 11 respectively.

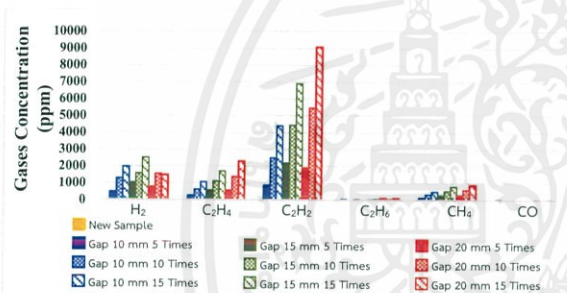


Fig. 10. DGA result caused by negative standard lightning impulse breakdown of mineral oil.

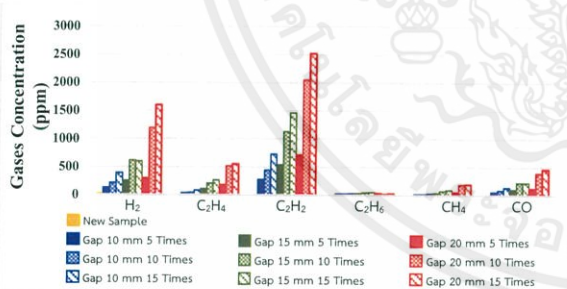


Fig. 11. DGA result caused by negative standard lightning impulse breakdown of natural ester.

## VI. DISCUSSION

According to the concentrations of gases dissolved in mineral oil and natural ester caused by breakdown voltages of AC, positive and negative standard lightning voltages for 5, 10, and 15 consecutively as shown in Fig. 6 to Fig. 11,  $C_2H_2$  showed the highest incremental concentration compared with other hydrocarbon gases for all breakdown voltage tests. The concentration of  $C_2H_2$  increased significantly with the increase in the number of breakdowns voltage test and also with the increasing of gap length between the

electrodes.  $C_2H_2$  should occurred when liquid insulation heated at temperature of  $700^{\circ}C$  to  $1800^{\circ}C$  since the intensity of the electrical discharge reaches arcing or continues discharging [1]. For  $H_2$ ,  $CH_4$ , and  $C_2H_4$ , their concentrations also increased due to the number of breakdowns increased as well.

From the test results, positive impulse breakdown voltage produced larger concentrations of  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_2$ , and  $C_2H_4$  than negative impulse breakdown voltage in the mineral oil, although the negative impulse breakdown voltage value was higher than the positive impulse breakdown voltage value for all investigated cases. However, the negative impulse breakdown voltage produces larger concentrations of these gases than the positive impulse breakdown voltage test in the natural ester.

## VII. CONCLUSION

From the test results, it was found that

- The types of generated gas were differed depending on the types of applied breakdown voltages.
- The generated gases were increased with an increase in the number of breakdowns and an increase in the length of the gap between the electrodes.
- In case of mineral oil, positive impulse breakdown voltage generated the gases larger than negative impulse breakdown voltage.
- In case of natural ester, positive impulse breakdown voltage generated the gases lower than negative impulse breakdown voltage.
- For all liquid insulations tested, the mainly produced gas was acetylene.

## ACKNOWLEDGMENT

This work is supported by Meidensha Corporation, Data Entry Group Co., Ltd., Team True Service Co., Ltd., Tesla Power Co., Ltd., and the staff of the High Voltage Engineering Laboratory, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL).

## REFERENCE

- [1] IEEE C57.104-2008, Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil Immersed Transformers.
- [2] N. Pattanadech, "Insulation," in Electrical Engineering Materials 2nd ed., vol I, Bangkok, Thailand: Mean Service Supply, 2014, (in Thailand)
- [3] IEC 60156, Edition 2.0-1995, Insulating liquid determination of the breakdown voltage at power frequency – test method.
- [4] IEC 60897, Edition 1.0-1987, Methods for the determination of the lightning impulse breakdown voltage of insulating liquids.
- [5] ASTM D3612-02, 2017, Standard Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oil by Gas Chromatography

# Dissolved Gas Analysis Caused by Electrical Breakdown of Liquid Impregnated Pressboards

K. Lu-kin<sup>1</sup>, Ch. Samerpak<sup>2</sup>, N. Chumninuan<sup>3</sup>, N. Piyapatamin<sup>4</sup>, and N. Pattanadech<sup>5</sup>

Faculty of Engineering, King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang

1 Soi Chalongkung 1 Ladkrabang Bangkok 10520 Thailand

<sup>1</sup>Sp.Kanchanaporn@gmail.com, <sup>2</sup>58010167@kmitl.ac.th, <sup>3</sup>58010360@kmitl.ac.th, <sup>4</sup>icepiyapatamin@gmail.com, and <sup>5</sup>norasage.pa@kmitl.ac.th

**Abstract**—The aim of this paper is to analyze the dissolved gases in dielectric liquid caused by electrical breakdown of liquid-impregnated pressboards. The pressboards were prepared with dimension of 100 x 100 x 3.2 mm (W x L x H). First of all, each liquid insulation, mineral oil and natural ester (FR3), was heated at 60°C with 200 mbar for 12 hours. Second, pressboards were heated at 80°C with 200 mbar for 12 hours. Then the heated pressboards were impregnated with the dielectric liquid at 60°C with 200 mbar for 12 hours. The impregnated pressboards were divided into three groups. The first group was tested with AC voltage. The second and third group was tested with positive and negative lightning impulse voltages respectively. From the test results, the type and quantity of generated gases caused by breakdown phenomena is dependent on the type and the number of breakdowns.

**Keywords**—mineral oil, natural ester, impregnated pressboard, gas generate, dissolved gas analysis

## I. INTRODUCTION

Transformer is an important equipment utilized in the power system. The major components of a transformer are coil, core, and insulation. There are two types of insulations used in the transformer, i.e., solid and liquid insulation. The purposes of solid insulation are electrical insulation and supporting mechanical force. In part of liquid insulation, it is used as electrical insulation and cooling for a transformer system [1]. Nowadays, mineral oil is most commonly used in the transformer. However, there are some limitations of mineral oil. For example, it is not good at biodegradability and it has low flash and fire point. These reasons lead to the development of liquid insulation which may replace mineral oil such as natural ester (FR3) and palm oil.

Recently, solid insulation deterioration is analyzed by consideration of degree of polymerization (DP). However, this method sometimes is not applicable because it has to cut a paper in the transformer and analyzes in a certified laboratory, so applying an indirect method is may convenient by analyzing the gas generated by the deterioration of the paper, i.e., CO and CO<sub>2</sub>. This paper represents the comparative

studies of gas generated in mineral oil and natural ester (FR3) caused by electrical breakdown of mineral oil impregnated pressboards and natural ester impregnated pressboards under alternating voltage (AC), and positive and negative lightning impulse voltage testing. Dissolved gas analysis (DGA) was applied for this study.

## II. THEORY

### A. Insulation in Transformers

Electrical insulation in the transformer can be divided into two groups. The first group is solid insulation and the second group is liquid insulation.

- Solid insulation – the main solid insulation in the transformer is cellulose. There are many types of cellulose in transformers, i.e., pressboards, craft paper, and crepe paper. Each type has different function like pressboard used for supporting mechanical force. Crepe paper is used for wrapping around conductor [2].

- Liquid insulation – the main functions of liquid insulation are electrical insulation, cooling transformer system [2], and arc quenching in the transformer.

### B. Decomposition and Formation of Gases in the Insulation

Decomposition of liquid and solid insulation generates various types of gases for example solid insulation can generate CO and CO<sub>2</sub>, if its temperature is above 300°C. For liquid insulation, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, and C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> with a different concentration may be generated due to fault occurring [3].

## III. TEST SETUP

### A. Test Vessel

To investigate the amount of the dissolved gases caused by AC breakdown voltage test and negative and positive impulse breakdown voltage test of impregnated pressboards immersed in the mineral oil and natural ester, the electrode system was designed and constructed according to IEC 60243-1 [4] as shown in Fig. 1.

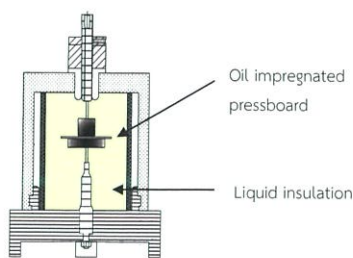


Fig. 1. Test vessel for testing impregnated pressboard breakdown [4].

### B. AC Breakdown Voltage Test Circuit

To perform the AC breakdown voltage testing of the liquid impregnated pressboards, the experiment set up is depicted in Fig. 2.

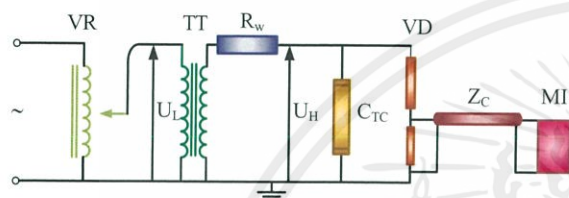


Fig. 2. Circuit diagram of AC breakdown voltage test.

Where VR : Variable Voltage Regulator  
 TT : Testing Transformer  
 R<sub>w</sub> : Current Limiting Resistor  
 VD : AC Voltage Divider  
 Z<sub>C</sub> : Coaxial Cable  
 MI : Measurement Instrument  
 C<sub>TC</sub> : Test Vessel

### C. Lighting Impulse Breakdown Voltage Test Circuit

To perform the lighting impulse breakdown voltage testing both positive and negative polarity of the liquid impregnated pressboards, the experiment set up is depicted in Fig. 3.

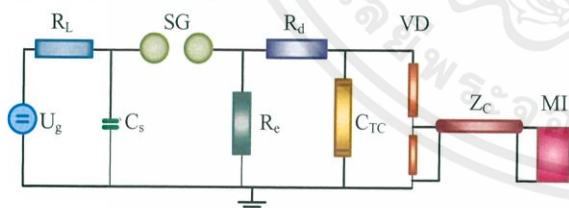


Fig. 3. Circuit diagram of lighting impulse breakdown voltage test.

Where U<sub>g</sub> : Charging Voltage  
 R<sub>L</sub> : Charging Resistor  
 C<sub>s</sub> : Impulse Capacitor  
 SG : Spark Gap  
 R<sub>e</sub> : Tail Resistor  
 R<sub>d</sub> : Front Resistor  
 VD : Voltage Divider  
 Z<sub>C</sub> : Coaxial Cable  
 MI : Measurement Instrument  
 C<sub>TC</sub> : Test Vessel

### D. Gas Analyzer

The oil samples were taken from the test cell after the pressboard samples were experienced by breakdown voltage test for 5, 10, and 15 times respectively. Dissolved gases in the oil sample were detected by applying the method C (Headspace) according to ASTM D3612- 02 [5]. Agilent Gas analyzer used in the experiment is shown in Fig. 4.

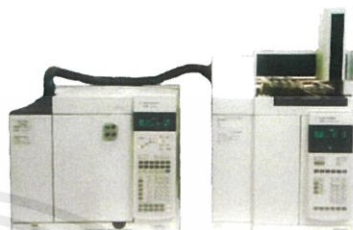


Fig. 4. Agilent gas analyzer.

### E. Water Content Analyzer

The water content of the oil sample was measured by using Karl Fischer moisture meter CA-21 as shown in Fig. 5.



Fig. 5. Karl Fischer moisture meter CA-21.

## IV. TEST PROCEDURE

Various types of gases may be generated in liquid insulation caused by faults in dielectric liquids and/or fault in liquid impregnated pressboards i.e., hydrogen (H<sub>2</sub>), carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), and hydrocarbon gas. In case of the hydrocarbon gas, it consists of methane (CH<sub>4</sub>), acetylene (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>), ethylene (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), and ethane (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>). To perform the test experiment, the test procedure was divided into 3 cases in accordant with the applied voltage i.e., AC voltage, positive lightning impulse voltage and negative lightning impulse voltage.

#### A. Case I: AC Breakdown Voltage Test Procedure

AC breakdown voltage test procedures are as follow:

1. Preparing the test circuit as shown in Fig. 2,
2. Inserting the impregnated pressboard between the electrodes and filling mineral oil into the test vessel,
3. Applying the test voltage to impregnated pressboard until breakdown,
4. Repeating step 3 and sampling oil by using a dark bottle after 5, 10, and 15 times of testing,
5. Taking oil samples to perform DGA,
6. Following step 2-5 for natural ester as liquid insulation tested.

### B. Case II: Positive Lighting Impulse Breakdown Voltage Test Procedure

Positive lightning impulse breakdown voltage test procedures are as follow:

1. Preparing the test circuit as shown in Fig. 3. Then, diode was set to apply positive lightning impulse,

2. Inserting the impregnated pressboard between the electrodes and filling mineral oil into the test vessel,

3. Applying the positive lightning breakdown voltage to impregnated pressboard. The positive lightning breakdown voltage was obtained from up and down test method

4. Repeating step 3 and sampling oil by using a dark bottle after 5, 10, and 15 times of testing

5. Taking oil samples to perform DGA,

6. Following step 2-5 for natural ester as liquid insulation tested.

### C. Case III: Negative Lighting Impulse Breakdown Voltage Test Procedure

Negative lightning impulse breakdown voltage test procedures are as follow:

1. Preparing the test equipment as shown in Fig. 3,

2. Setting diode to apply negative lightning impulse,

3. Following the same procedure as used for positive lighting impulse breakdown voltage test.

## V. TEST RESULT

### A. Case I: DGA Result Caused by AC Breakdown of Impregnated Pressboard in Dielectric Liquid.

The average AC breakdown voltage of mineral oil impregnated pressboard and natural ester impregnated press board was 33.7 kV and 33.0 kV respectively.

The water contents of new sample and oil samples after experienced by AC breakdown voltages for mineral oil impregnated pressboards were 45.87 and 49.89 ppm respectively. Besides, the water contents of new sample and natural ester samples after experienced by AC breakdown voltages for natural ester impregnated pressboards were 369.9 and 384.7 ppm respectively.

The concentrations of gases dissolved in mineral oil and natural ester are shown in Fig. 6 and Fig. 7 respectively.

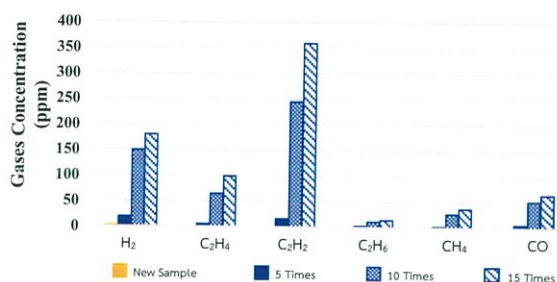


Fig. 6. DGA result caused by AC breakdown of mineral oil impregnated pressboards in mineral oil.

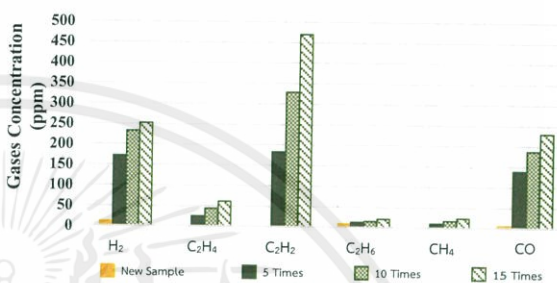


Fig. 7. DGA result caused by AC breakdown of natural ester impregnated pressboards in natural ester.

### B. Case II: DGA Result Caused by Positive Lightning Impulse Breakdown of Impregnated Pressboard in Dielectric Liquid.

The positive lightning impulse breakdown voltage of mineral oil impregnated pressboard and natural ester impregnated pressboard was 184.0 kV and 217.1 kV respectively.

The water contents of new sample and oil samples after experienced by the positive standard lightning impulse breakdown voltages for mineral oil impregnated pressboards were 45.87 and 49.17 ppm respectively. Moreover, the water contents of new sample and natural ester samples after experienced by the positive standard lightning impulse breakdown voltages for natural ester impregnated pressboards were 369.9 and 384.1 ppm respectively.

The concentrations of gases dissolved in mineral oil and natural ester are shown in Fig. 8 and Fig. 9 respectively.

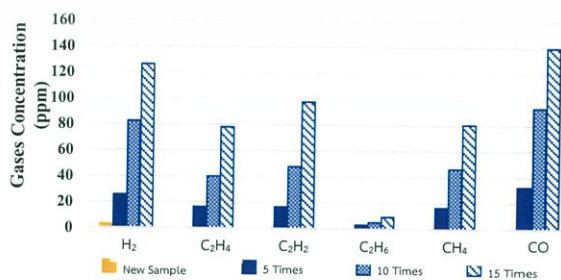


Fig. 8. DGA result caused by positive lightning impulse breakdown of mineral oil impregnated pressboards in mineral oil.

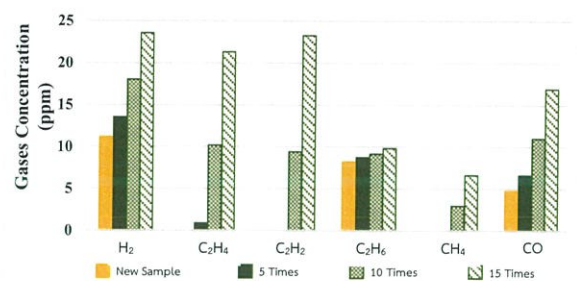


Fig. 9. DGA result caused by positive lightning impulse breakdown of natural ester impregnated pressboards in natural ester.

### C. Case III: DGA Result Caused by Negative Lightning Impulse Breakdown of Impregnated Pressboard in Dielectric Liquid

The negative lightning impulse breakdown voltage of mineral oil impregnated pressboard and natural ester impregnated pressboard was 185.8 kV and 213.9 kV respectively.

The water contents of new sample and oil samples after experienced by the negative standard lightning impulse breakdown voltages for mineral oil impregnated pressboards were 45.87 and 49.43 ppm respectively. Furthermore, the water contents of new sample and natural ester samples after experienced by the negative standard lightning impulse breakdown voltages for natural ester impregnated pressboards were 369.9 and 405.7 ppm respectively.

The concentrations of gases dissolved in mineral oil and natural ester as shown in Fig. 10 and Fig. 11 respectively.

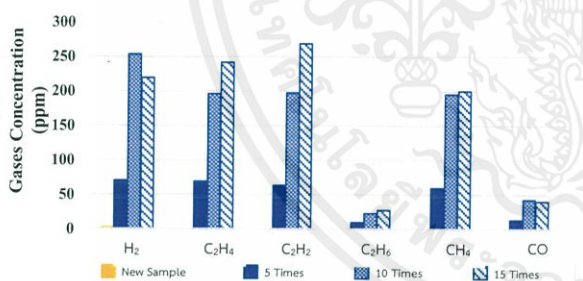


Fig. 10. DGA result caused by negative lightning impulse breakdown of mineral oil impregnated pressboards in mineral oil.

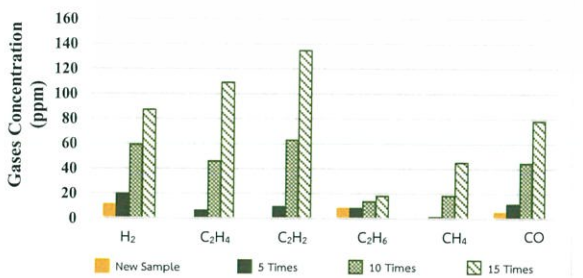


Fig. 11. DGA result caused by negative lightning impulse breakdown of natural ester impregnated pressboards in natural ester.

## VI. DISCUSSION

From the investigation, the new liquid sample may generate some kinds of dissolved gases. C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> was generated with the highest dissolved concentration compared with other hydrocarbon gases in all cases of breakdown voltage test. The concentration of C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> increased significantly with an increase of number of breakdown tests. C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> should occur when liquid insulation heated at temperature of 700°C to 1800°C since the intensity of the electrical discharge reaches arcing or continues discharging [3]. For H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, their concentrations also increase as the number of breakdowns increased. For CO, the concentration increases due to the number of breakdowns as well because the decomposition of oil-impregnated cellulose insulation produces carbon oxides. This rate is exponentially proportional to the temperature and directly proportional to the volume of material at that temperature [3]. From the test results, negative lightning impulse breakdown voltage produces larger concentrations of H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, and C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> than positive impulse breakdown voltage in the mineral oil and the natural ester.

## VII. CONCLUSION

From the test results, it was found that

- The types of generated gas were differed depending on the types of applied breakdown voltages.
- The generated gases were increased with an increase in the number of breakdowns.
- In case of mineral oil and natural ester, the positive impulse breakdown voltage generated the gases lower than negative impulse breakdown voltage.

## ACKNOWLEDGMENT

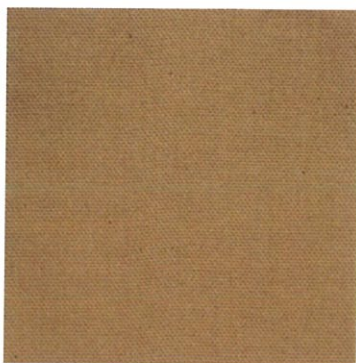
This work is supported by Meidensha Corporation, Data Entry Group Co., Ltd., Team True Service Co., Ltd., and Tesla Power Co., Ltd. as well as the staff of the High Voltage Engineering Laboratory, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMIL).

## REFERENCE

- [1] ABB, Transformer Handbook, 3rd Ed., Power and productivity for a better world ABB Group, 2010.
- [2] N. Pattanadech, Electrical Engineering Materials, 3rd Ed., Bangkok, 2014, (In Thai).
- [3] IEEE C57.104-2008, Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers.
- [4] IEC 60243-1, Edition 3.0 – 2013, Electric strength of insulating materials – Test methods – Part 1: Tests at power frequencies, pp. 46.
- [5] ASTM D3612-02, 2017, standard test method for analysis of gases dissolved in electrical insulating oil by gas chromatography.



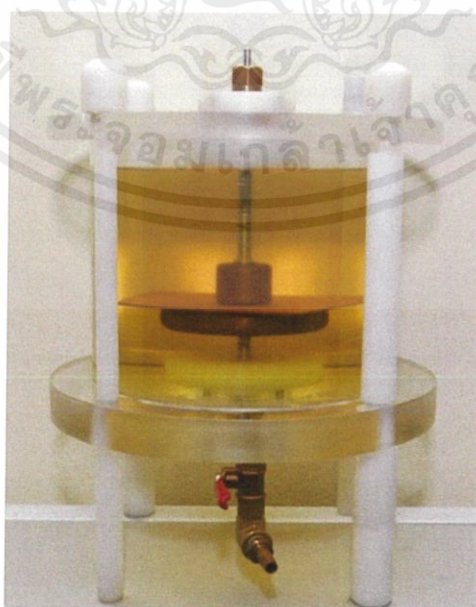
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 เพรสบอร์ดก่อนทำการอิมเพรกเนตในน้ำมัน

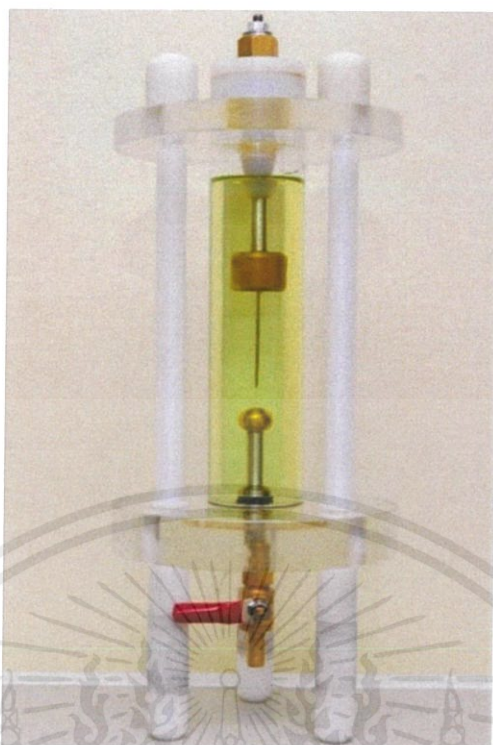


รูปที่ 2 น้ำมันแร่ (ซ้าย) น้ำมันปาล์ม (กลาง) และน้ำมัน FR3 (ขวา)



รูปที่ 3 ชุดทดสอบการเบรกดาวนของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 ชุดการทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้าอิมพัลส์ฟ้าผ่าของน้ำมัน

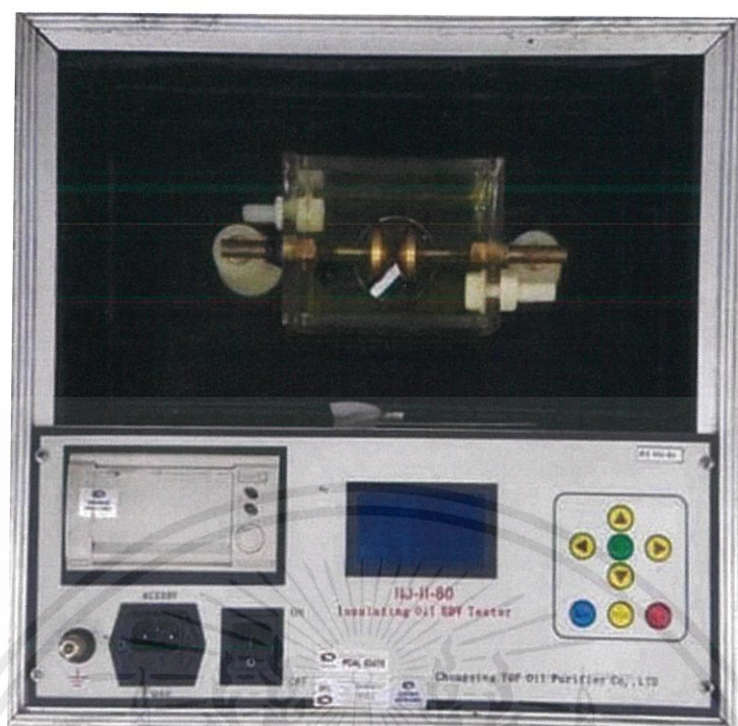


(ก)

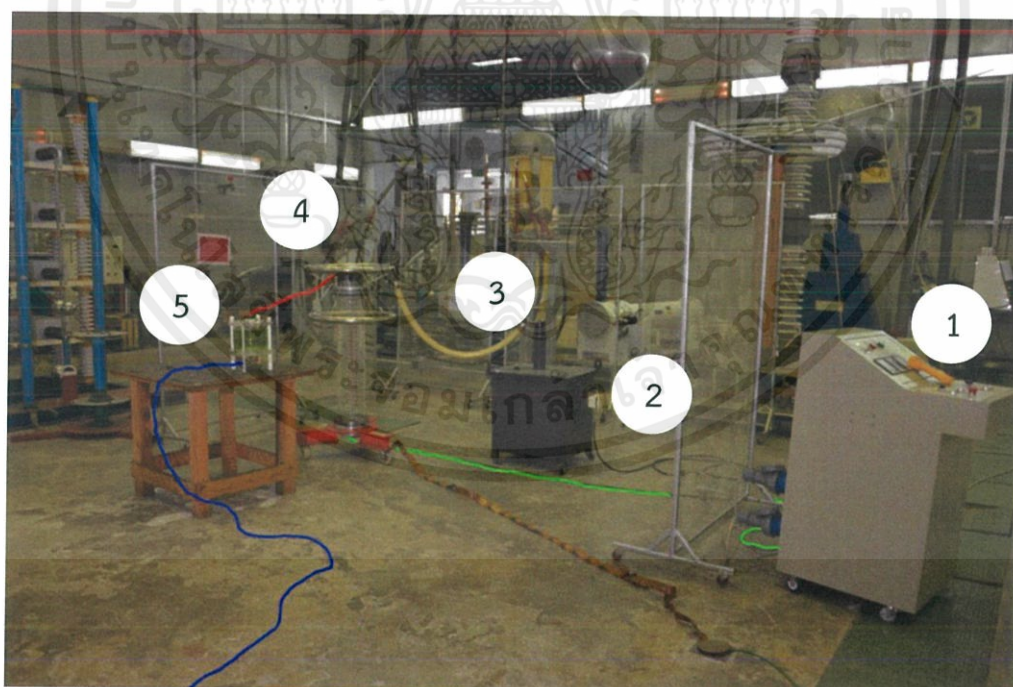
(ข)

รูปที่ 5 ภาชนะเก็บตัวอย่าง (ก) ไชรินจ์ (ข) ขวดแก้วสีชา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6 เครื่องทดสอบการเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของน้ำมัน



รูปที่ 7 วงจรทดสอบเบรกดาวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรเกนตในน้ำมัน โดย 1.ชุดควบคุมแรงดัน 2.หม้อแปลงทดสอบ 3.ตัวต้านทานน้ำ 4.โวลต์จดีไวเดอร์ 5.ชุดทดสอบการเบรกดาวนของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรเกนตในน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8 วงจรการทดสอบเบรกดาวน์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของน้ำมัน โดย 1.ชุดอัดประจุเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 2.เครื่องกำเนิดอิมพัลส์ 3.ตัวเก็บประจุโหลด 4.ชุดทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้าอิมพัลส์ฟ้าผ่าของน้ำมัน



รูปที่ 9 วงจรทดสอบการเบรกดาวน์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของเพอร์สบอร์ดที่ถูกอิมเพกต์ในน้ำมัน โดย 1.ชุดอัดประจุเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 2.เครื่องกำเนิดอิมพัลส์ 3.ตัวเก็บประจุโหลด 4.ชุดทดสอบการเบรกดาวน์ของเพอร์สบอร์ดที่ถูกอิมเพกต์ในน้ำมัน

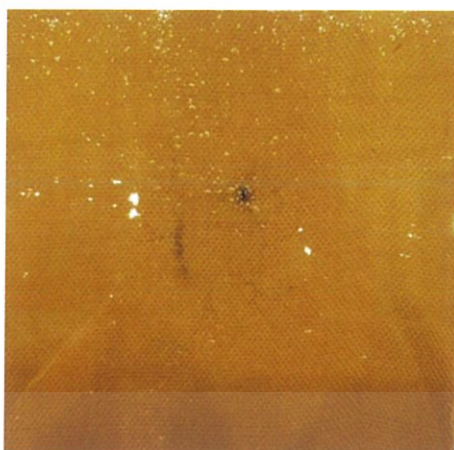
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10 น้ำมันแร่หลังผ่านการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว (ระยะแก๊ป 20 mm 15 ครั้ง)



รูปที่ 11 น้ำมัน FR3 หลังผ่านการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว  
(ระยะแก๊ป 10 mm 5 ครั้ง)



รูปที่ 12 เพอร์สบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันแร่ หลังผ่านการทดสอบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 13 เพอร์สบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมัน FR3 หลังผ่านการทดสอบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 14 เพอร์สบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตในน้ำมันปาล์ม หลังผ่านการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 15 นำน้ำมันจากการทดสอบภายในขวดแก้วสีชาใส่ไซริงค์แก้ว



รูปที่ 16 ปิดฝาไวอัล



รูปที่ 17 ไล่อากาศภายในไวอัลแทนที่ด้วยแก๊สอาร์กอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 18 นำน้ำมันจากการทดสอบใส่ไวอัล เพื่อนำไปวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน



รูปที่ 19 เครื่องวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน



รูปที่ 20 ทดสอบความชื้นของน้ำมันหลังการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นางสาวกาญจนาพร ลูกอินทร์

เกิดวันที่ 22 กรกฎาคม พ.ศ. 2539

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนเบ็ญจะมะมหาราช

เข้าศึกษาที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2558

ฝึกงานที่ กองหม้อแปลงและโรงงานซ่อม การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

ระหว่างเดือน มิถุนายน ถึง กรกฎาคม พ.ศ. 2561



ชื่อ-นามสกุล นางสาวจันทิปปภา เสมอภักดิ์

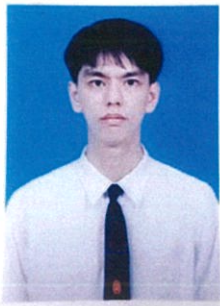
เกิดวันที่ 30 มกราคม พ.ศ. 2539

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนจุฬาภรณราชวิทยาลัย มุกดาหาร

เข้าศึกษาที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2558

ฝึกงานที่ กองหม้อแปลงและโรงงานซ่อม การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

ระหว่างเดือน มิถุนายน ถึง กรกฎาคม พ.ศ. 2561



ชื่อ-นามสกุล นายณัฐกฤต ชำนิवल

เกิดวันที่ 23 ธันวาคม พ.ศ. 2539

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนสตรีวิทยา 2  
ในพระราชูปถัมภ์สมเด็จพระศรีนครินทราบรมราชชนนี

เข้าศึกษาที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า  
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2558

ฝึกงานที่ กองหม้อแปลงและโรงงานซ่อม การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่ง  
ประเทศไทย

ระหว่างเดือน มิถุนายน ถึง กรกฎาคม พ.ศ. 2561



ชื่อ-นามสกุล นายณัฐปคัลภ์ ปิยะปัทมินทร์

เกิดวันที่ 2 กันยายน พ.ศ. 2539

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา  
น้อมเกล้า

เข้าศึกษาที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า  
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2558

ฝึกงานที่ กองหม้อแปลงและโรงงานซ่อม การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่ง  
ประเทศไทย

ระหว่างเดือน มิถุนายน ถึง กรกฎาคม พ.ศ. 2561