

การศึกษาและวินิจฉัยหม้อแปลงไฟฟ้า  
THE STUDY OF TRANSFORMOR AND DIAGNOSTIC



โดย

นายทวีค            เฑาะพระโสภณ

นายนิ่มขนนท์    ชัยวุฒิหยาภรณ์

นายภัทร            จักรมาวณะ

ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

การศึกษาและวินิจฉัยหม้อแปลงไฟฟ้า  
THE STUDY OF TRANSFORMER AND DIAGNOSTIC



โดย  
นายนริศ                      เตชะพะโลกุล  
นายนัสชนนท์              ธีญพิทยากุล  
นายภัทระ                    จักรมานนท์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# THE STUDY OF TRANSFORMER AND DIAGNOSTIC



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

2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2557

การศึกษาและวินิจฉัยหม้อแปลงไฟฟ้า  
THE STUDY OF TRANSFORMER AND DIAGNOSTIC



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช

ผศ.ดร.พีรุดมิ ยุทธโกวิท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2557

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาและวินิจฉัยหม้อแปลงไฟฟ้า

ผู้จัดทำ

- 1.นาย นริศ เตชะพะโลกุล
- 2.นาย นัสชนนท์ ธัญพิทยากุล
- 3.นาย ภัทระ จักรมานนท์



..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นเรศรชฐ พัฒนเดช )

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรฤทธิ ยุทธโกวิท )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาและวินิจฉัยหม้อแปลงไฟฟ้า

นาย	นริศ	เตชะพะโลกุล	
นาย	นัสชนนท์	ธัญพิทยากุล	
นาย	ภัทร	จักรมานนท์	
ผศ.ดร.	นรเศรษฐ์	พัฒนเดช	อาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ.ดร.	พีรวุฒิ	ยุทธโกวิท	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2557			

### บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษา และวินิจฉัยน้ำมันหม้อแปลงด้วยวิธีการ DGA (Dissolved Gas Analysis) คือการแยกแก๊สออกจากน้ำมันหม้อแปลง เพื่อนำแก๊สที่ได้มาการวิเคราะห์ผลหาสาเหตุปัญหาการเสื่อมสภาพของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า โดยมีแก๊สหลักๆคือ ไนโตรเจน, ออกซิเจน, ไฮโดรเจน, คาร์บอน มอนออกไซด์, คาร์บอน ไดออกไซด์, มีเทน, อีเทน, เอทิลีน และอะเซทิลีน จะถูกแปลผลด้วยวิธี Doernenburg Ratio Method (IEEE C57.104), Rogers Ratio Method (IEEE C57.104), Duval Triangle (IEC 60599), IEC Gas Ratios (IEC 60599) และ Key Gas Ratios (IEEE C57.104), โดยแสดงผลการวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม MATLAB แล้วนำผลการวิเคราะห์จากวิธีการต่างๆ ดังกล่าวมาเปรียบเทียบกัน นอกจากนี้ผลลัพธ์ที่ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์โดยภาคอุตสาหกรรม และทางพาณิชย์ ซึ่งพบว่ามีความสอดคล้องกันดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## THE STUDY OF TRANSFORMER AND DIAGNOSTIC

Naris Techapalokul

Nutchanon Thunpittayakul

Phatara Chakkaramanon

Asst.Prof.Dr. Norasage Pattanadech Supervisor

Asst.Prof.Dr. Peerawut Yutthagowit Supervisor

Year 2014

### ABSTRACT

This project is a study and diagnostic transformer insulation oil by Dissolved Gas Analysis method (DGA). The keys gas extracted from the mineral oil are Nitrogen, Oxygen, Hydrogen, Carbon monoxide, Carbon dioxide, Methane, Ethane, Ethylene and Acetylene. The interpretation of the DGA result was done by Doernenburg Ratio Method (IEEE C57.104), Rogers Ratio Method (IEEE C57.104), Duval Triangle (IEC 60599), IEC Ratio (IEC 60599) and Key Gas Ratios (IEEE C57.104), which was analyzed using MATLAB program. The interpretation gas result were compared together. Beside, These results well agreed with the interpretation results obtained from industrial sector.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยการช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ต้องขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรภูมิ ยุทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษา รวมไปถึงคุณบุญยวีร์ ฉายศิริ ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไขปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้เข้าไปศึกษาดูงาน และให้ความรู้เรื่องต่างๆเกี่ยวกับหม้อแปลงไฟฟ้า และฉนวนน้ำมันหม้อแปลง

ขอขอบคุณบริษัท เอกรัฐวิศวกรรม จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้เข้าไปศึกษาดูงานในกระบวนการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้า และวิธีการทดสอบฉนวนน้ำมันด้วยวิธีต่างๆ

ขอขอบคุณบริษัท ดาต้าเอนทรีกรุ๊ป จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้เข้าไปศึกษาดูงานในการทดสอบฉนวนน้ำมันด้วยวิธีต่างๆ รวมถึงผลการทดสอบ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคนที่ให้ความแนะนำต่างๆ และให้ความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านต่างๆและให้กำลังใจ อีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ โดยเฉพาะนาย นกัถ จิระจงเจริญ ที่ให้ความช่วยเหลือจนโครงการนี้สำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VII
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน	1
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของกำลังไฟฟ้า	3
2.2 น้ำมันหม้อแปลง	4
2.2.1 อลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (Aliphatic Hydrocarbon)	4
2.2.1.1 สมบัติของแอลคีน (Alkene)	5
2.2.1.2 สมบัติของแอลเคน (Alkane)	5
2.2.1.3 สมบัติของแอลไคน์ (Alkyne)	6
2.2.2 อลิไซคลิกไฮโดรคาร์บอน (Alicyclic Hydrocarbon)	6
2.2.3 อโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Aromatic Hydrocarbon)	7
2.3 พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า	8
2.3.1 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหม้อแปลง	9
2.3.2 ความชื้น	9
2.3.3 แก๊ส	12
2.3.4 ประจุค้าง	13
2.3.5 การเคลื่อนที่	13
2.3.6 อุณหภูมิ	14
2.3.7 การกระจายสนามไฟฟ้า	14
2.3.8 ชนิดของรูปคลื่นแรงดัน	14
2.3.9 อนุภาคเจือปนของแข็ง	14
2.4 ฉนวนแห้ง	14

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 สาเหตุการเสื่อมสภาพของน้ำมัน	15
2.5.1 การเสื่อมสภาพทางออกซิเดชัน	15
2.5.2 การเสื่อมสภาพทางไฮดรอลิก	16
2.5.3 การเสื่อมสภาพทางไฟฟ้า	16
2.5.4 การเสื่อมสภาพทางความร้อน	16
2.6 การตรวจสอบสภาพภายในหม้อแปลง	16
2.6.1 การตรวจดูสภาพผิดปกติโดยการทำให้ Dissolved Gas Analysis (DGA)	16
2.6.2 การประเมินอายุที่เหลืออยู่โดยวิธี Furan Compound	16
2.6.3 การตรวจคุณสมบัติลักษณะ	16
2.7 คราฟ เปเปอร์ และ เพรส บอร์ด (Kraft Paper and Press Board)	17
2.8 การทดสอบเบรคดาวน์ฉนวนน้ำมัน	18
2.9 ขั้นตอนการทดสอบน้ำมันหม้อแปลงด้วยวิธี Keys Gas จากห้องทดสอบบริษัทเอกรัฐหม้อแปลง	20
2.10 Dissolved Gas Analysis โดยวิธี Doernenberg Ratio Method	24
2.11 Dissolved Gas Analysis โดยวิธี Roger's Ratio Method	25
2.12 Dissolved Gas Analysis โดยวิธี Duval Triangle	26
2.13 Dissolved Gas Analysis โดยวิธี IEC Ratio	28
2.14 Dissolved Gas Analysis โดยวิธี Keys Gas ตาม มาตรฐาน ASTM D3612	29
2.15 Dissolved Gas Analysis โดยวิธี Keys Gas ตาม มาตรฐาน IEEE Std C57.104-2008	30
2.15.1 เกิดความร้อนสูงที่น้ำมัน (Overheated Oil)	31
2.15.2 เกิดความร้อนสูงที่เซลลูโลส (Overheated Cellulose)	31
2.15.3 การดิสชาร์จพลังงานต่ำ (Corona In Oil)	32
2.15.4 การดิสชาร์จพลังงานสูง (Arcing In Oil)	32
<b>บทที่ 3 การออกแบบโปรแกรม</b>	<b>33</b>
3.1 การออกแบบโปรแกรม Duval Triangle	33
3.1.1 แผนภาพการทำงานของโปรแกรม Duval Triangle	34
3.2 การออกแบบโปรแกรม IEC Ratio	37
3.2.1 แผนภาพการทำงานของโปรแกรม IEC Ratio	38
3.3 การออกแบบโปรแกรม Doernenberg Ratio Method	41
3.3.1 แผนภาพการทำงานของโปรแกรม Doernenberg Ratio Method	41

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การออกแบบโปรแกรม Rogers ratio method	42
3.4.1 แผนภาพการทำงานของโปรแกรม Rogers Ratio Method	42
3.5 การออกแบบโปรแกรม Keys Gas	43
3.5.1 แผนภาพการทำงานของโปรแกรม Keys Gas	43
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b>	<b>45</b>
4.1 เปรียบเทียบผลของแก๊สที่ได้จากบริษัท Morgan Schaffer กับ โปรแกรมที่นักศึกษาพัฒนาขึ้น	45
4.1.1 ทำการแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle	46
4.1.2 ทำการแปลผลด้วยวิธี IEC Ratio	47
4.1.3 ทำการแปลผลด้วยวิธีการ Doernenberg Ratio Method	47
4.1.4 ทำการแปลผลด้วยวิธีการ Roger's Ratio Method	47
4.1.5 ทำการแปลผลด้วยวิธีการ Keys Gas	48
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ</b>	<b>55</b>
5.1 สรุปผลการทดลอง	55
5.2 ข้อเสนอแนะ	55
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>56</b>
<b>ภาคผนวก</b>	<b>58</b>
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ	59
<b>ประวัติผู้เขียน</b>	<b>64</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของวงจรแม่เหล็กไฟฟ้า	3
2.2 ตัวอย่างสูตรโครงสร้างอลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน	5
2.3 ตัวอย่างสูตรโครงสร้างอริโซคลิกไฮโดรคาร์บอน	7
2.4 ตัวอย่างสูตรโครงสร้างอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน	7
2.5 พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบกับน้ำมันหม้อแปลง	9
2.6 ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง	10
2.7 เส้นโค้งการอิ่มตัวของน้ำ (Water Saturation Curve)	11
2.8 คราฟ เปเปอร์ (Kraft Paper)	17
2.9 เพรส บอร์ด (Press Board)	17
2.10 เส้นใยธรรมชาติ (Organic fiber)	18
2.11 แบบจำลองเครื่องทดสอบโดยใช้แท่งอิเล็กโทรดครึ่งทรงกลม	19
2.12 แบบจำลองเครื่องทดสอบโดยใช้แท่งอิเล็กโทรดครึ่งทรงกระบอก	19
2.13 แบบจำลองเครื่องทดสอบโดยใช้แท่งอิเล็กโทรดทรงกลม	19
2.14 เครื่องทดสอบเบรคดาว์นนวน้ำมัน	20
2.15 ดูดแก๊สมาตรฐานจากขวดบรรจุแก๊สมาตรฐานใส่หลอดบรรจุแก๊ส	21
2.16 ขวดบรรจุแก๊สมาตรฐาน	21
2.17 บรรจุแก๊สนำแก๊สมาตรฐานที่ดูดไว้ในหลอดทดลองใส่เข้าไปในเครื่องทดสอบ	21
2.18 เครื่อง MYRKOS Portable DGA Micro GC	22
2.19 หลอดทดลองที่ใช้บรรจุตัวอย่างน้ำมัน	22
2.20 ดูดตัวอย่างน้ำมันใส่หลอดทดลอง	22
2.21 ตัวอย่างน้ำมันที่จะทำการทดสอบ	22
2.22 ดูดแก๊สซีลียมเข้าไปในหลอดทดลองจนเต็มพื้นที่ที่เหลือของหลอดทดลอง	23
2.23 นำหลอดทดลองใส่เครื่องเขย่า	23
2.24 นำหลอดทดลองที่เขย่าแล้วเข้าเครื่องทดสอบ	24
2.25 เครื่องทดสอบกำลังทำการวิเคราะห์ และสรุปผล	24
2.26 Classical Duval Triangle	27
2.27 IEC Ratio	28
2.28 ความผิดปกติแบบ Overheated Oil	31
2.29 ความผิดปกติแบบ Overheated Cellulose	31
2.30 ความผิดปกติแบบ Corona In Oil	32
2.31 ความผิดปกติแบบ Arcing In Oil	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 Flow Chart โปรแกรม Duval Triangle ที่นักศึกษาคิดค้นขึ้น	34
3.2 Flow Chart โปรแกรม IEC Ratio ที่นักศึกษาคิดค้นขึ้น	38
3.3 Flow Chart โปรแกรม Doernenburg Ratio Method ที่นักศึกษาคิดค้นขึ้น	41
3.4 Flow Chart โปรแกรม Rogers Ratio Method ที่นักศึกษาคิดค้นขึ้น	42
3.5 Flow Chart โปรแกรม Keys Gas ที่นักศึกษาคิดค้นขึ้น	43
4.1 Duval Triangle ของบริษัท Morgan Schaffer	46
4.2 Duval Triangle ที่นักศึกษาพัฒนาขึ้น	46
4.3 IEC Ratio ที่นักศึกษาพัฒนาขึ้น	47
4.4 Keys Gas Ratio ที่นักศึกษาคิดค้นขึ้น	48



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
1.1	วิธีการดำเนินงาน	2
2.1	คุณสมบัติทางฟิสิกส์, เคมี และไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง	8
2.2	ค่าคงที่การละลายของแก๊ส (A) ตามกฎของเฮนรี ( $\mu\text{atm}/(\mu\text{L})$ ) ที่ความดันแก๊สเหนือน้ำมันหม้อแปลง 760 mmHg	13
2.3	ความสามารถในการละลายของแก๊ส (K,%Vol) ที่ความดันแก๊สเหนือน้ำมันหม้อแปลง 760 mmHg	13
2.4	รูปทรงแท่งอิเล็กโทรดที่ใช้ทดสอบตามมาตรฐาน	18
2.5	มาตรฐานการทดสอบน้ำมัน IEC 60156	20
2.6	มาตรฐานการทดสอบน้ำมัน ASTM D877	20
2.7	ความเข้มข้นของแก๊ส	25
2.8	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Doernenberg และความผิดปกติ	25
2.9	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Roger's และความผิดปกติ	26
2.10	พื้นที่และความหมายของ Classical Duval Triangle	27
2.11	ตารางการแปลความหมาย IEC Ratio	29
2.12	ชนิดแก๊สและความเข้มข้นตามมาตรฐาน ASTM D3612	30
2.13	ปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อปริมาณแก๊สเกินมาตรฐานที่คำนวณได้ตามมาตรฐาน ASTM D3612	30
4.1	ข้อมูลหม้อแปลงจากบริษัท Morgan Schaffer	45
4.2	ปริมาณแก๊สทดสอบในหน่วย (ppm)	45
4.3	การแปลผลของบริษัท Morgan Schaffer	45
4.4	สรุปผลการแปลผลตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงจากบริษัท Glow Energy	49
4.5	สรุปผลการแปลผลตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงจากบริษัท Data Entry	52
4.6	สรุปผลการแปลผลตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงจากบริษัทเอกรัฐหม้อแปลง	54
5.1	สรุปผลจำนวนเคสที่ตรงกัน	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หม้อแปลงไฟฟ้าจัดว่าเป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่มีความสำคัญชนิดหนึ่งในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งทำหน้าที่ในการแปลงระดับแรงดันเพื่อทำให้การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นไปอย่างเหมาะสม และมีประสิทธิภาพ อีกทั้งหม้อแปลงไฟฟ้านั้นต้องสามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพอย่างต่อเนื่อง และต้องมีความถูกต้องเหมาะสมกับลักษณะหน้าที่การทำงานที่หม้อแปลงจะถูกนำไปใช้งาน การทำงานที่ผิดพลาดของหม้อแปลงก่อให้เกิดความเสียหาย และส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลัง, ระบบเศรษฐกิจโดยรวม และต่อประชาชนโดยตรง

ดังนั้นการวินิจฉัยหม้อแปลงจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก โครงการนี้จึงออกแบบมาเพื่อทำการศึกษาวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติของหม้อแปลงโดยเฉพาะน้ำมันหม้อแปลง โดยจะพิจารณาในส่วนของ การวิเคราะห์ปริมาณแก๊สที่ละลายอยู่ในหม้อแปลง ซึ่งจะเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงสิ่งผิดปกติที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงได้

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1) เพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจที่ถูกต้องในโครงสร้างพื้นฐาน และหลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า
- 2) เพื่อศึกษาทฤษฎีการทดสอบหม้อแปลงที่ระบุตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงลักษณะการทดสอบ ขั้นตอนการทดสอบ และผลที่ได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน
- 3) เพื่อสามารถวิเคราะห์ผลกระทบและปัญหาของหม้อแปลงไฟฟ้า และสามารถเขียนโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ โดยวิเคราะห์จากแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1) ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานโครงสร้าง และหลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า
- 2) ศึกษาทฤษฎีการทดสอบฉนวนน้ำมันหม้อแปลงตามมาตรฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง
- 3) วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบฉนวนน้ำมันหม้อแปลง

### 1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน

- 1) ศึกษาทฤษฎี และมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับหม้อแปลงไฟฟ้า และฉนวนน้ำมันหม้อแปลง
- 2) ศึกษาการใช้งานโปรแกรมที่เกี่ยวข้อง
  - โปรแกรม MATLAB
- 3) ออกแบบกระบวนการทำงานของโปรแกรม และภาพรวมของโปรแกรม
- 4) เขียนโปรแกรมวิเคราะห์แก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันด้วยวิธีการต่างๆ ตามมาตรฐาน
- 5) ศึกษาตัวอย่างการทดสอบฉนวนน้ำมันหม้อแปลงด้วยวิธีการทดสอบต่างๆ จากหน่วยงานที่เปิดให้ทำการทดสอบได้
- 6) วิเคราะห์ และสรุปผลแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงด้วยวิธีการทดสอบต่างๆ

- 7) สรุปผลการดำเนินงาน
- 8) จัดทำปฏิญานิพนธ์

ตารางที่ 1.1 วิธีการดำเนินงาน

วิธีดำเนินงาน	ระยะเวลา									
	ปี 2557					ปี 2558				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาทฤษฎี และมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับหม้อแปลงไฟฟ้า และฉนวนน้ำมันหม้อแปลง	←-----→									
2. ศึกษาการใช้งานโปรแกรมที่เกี่ยวข้อง		←-----→								
3. ออกแบบกระบวนการทำงานของโปรแกรม และภาพรวมของโปรแกรม					←-----→					
4. เขียนโปรแกรมวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมันด้วยวิธีการต่างๆ ตามมาตรฐาน						←-----→				
5. ศึกษาตัวอย่างการทดสอบแก๊สที่ละลายในน้ำมันหม้อแปลงด้วยวิธีการทดสอบต่างๆ จากหน่วยงานที่เปิดให้ทำการทดสอบได้						←-----→				
6. วิเคราะห์ และสรุปผลการทดสอบฉนวนน้ำมันหม้อแปลงด้วยวิธีการทดสอบต่างๆ							←-----→			
7. สรุปผลการดำเนินงาน								←-----→		
8. จัดทำปฏิญานิพนธ์									←-----→	

วางแผน ←-----→

ปฏิบัติจริง ←-----→

### 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

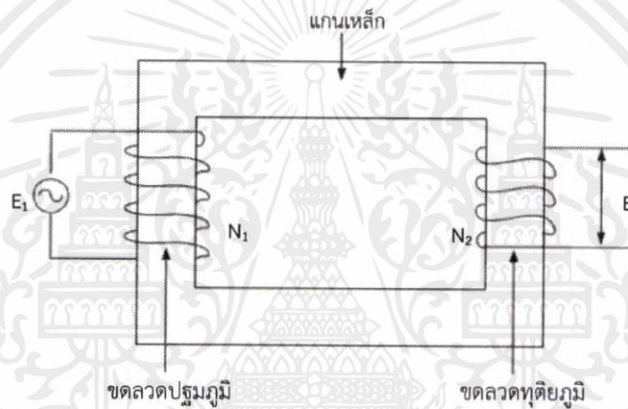
- 1) ทราบถึงมาตรฐาน ขั้นตอน และวิธีการทดสอบฉนวนน้ำมันหม้อแปลงในปัจจุบัน
- 2) ทราบถึงปัญหา และเทคนิคต่างๆ ในการทดสอบ และในการแก้ไขปัญหา
- 3) เป็นแหล่งข้อมูล และวิจัยเกี่ยวกับน้ำมันหม้อแปลงแก่นักวิจัย และนักศึกษาที่ต้องการพัฒนาและศึกษาต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของกำลังไฟฟ้า [1]

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากแรงดันระดับหนึ่งไปสู่แรงดันอีกระดับหนึ่ง อาจสูงขึ้นหรือต่ำลง หรือเท่าเดิมก็ได้ เช่น หม้อแปลงขดลวดแยก หลักการทำงานของหม้อแปลงจะอาศัยการเหนี่ยวนำของขดลวด ที่อยู่ในสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ส่วนประกอบหลักของหม้อแปลง ประกอบด้วย แกนเหล็กซึ่งทำหน้าที่เป็นทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็ก ขดลวดแรงสูง และขดลวดแรงต่ำ ซึ่งขดหนึ่งเป็นด้านป้อนแรงดันเข้า อีกขดหนึ่งเป็นด้านจ่ายแรงดันออก พันอยู่บนแกนเหล็กดังรูปที่ 2.1 นอกจากนี้ก็มีฉนวนซึ่งถือเป็นส่วนประกอบหลักในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทุกชนิด



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบวงจรแม่เหล็กไฟฟ้า

กำหนดให้

- $N_1$  คือ จำนวนรอบขดลวดด้านป้อนเข้า
- $N_2$  คือ จำนวนรอบขดลวดด้านจ่ายออก
- $E_1$  คือ แรงดันที่เหนี่ยวนำด้านป้อนเข้า
- $E_2$  คือ แรงดันที่เหนี่ยวนำด้านจ่ายออก

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำบนขดลวดเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์

$$e(t) = -N \frac{d(\varphi)}{dt} \quad (2.1)$$

เมื่อป้อนแรงดันกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ให้กับขดลวดทางด้านกำลังไฟฟ้าเข้าจะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กเป็นรูปคลื่นไซน์ด้วย

$$\varphi(t) = \varphi_{\max} \sin \omega t \quad (2.2)$$

ฉะนั้นแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดอีกชุดหนึ่งด้านจ่ายกำลังไฟฟ้าออกเปลี่ยนไปตามเวลา คือ

$$e(t) = -N\omega\phi_{\max} \cos \omega t \quad (2.3)$$

จะเห็นได้ว่าแรงดันเหนี่ยวนำ  $e(t)$  จะนำหน้าเส้นฟลักซ์แม่เหล็ก  $\phi(t)$  เป็นมุมทางไฟฟ้า  $90^\circ (= \pi/2)$  แรงดันเหนี่ยวนำค่า r.m.s. คือ

$$E = \frac{2}{\sqrt{2}} \pi f N \phi_{\max}$$

$$E = 4.44 f N \phi_{\max} \quad (2.4)$$

โดยที่

$$\phi_{\max} = B_{\max} A \quad (2.5)$$

จะได้สมการพื้นฐานของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดของหม้อแปลง คือ

$$E = 4.44 f N B_{\max} A \quad (2.6)$$

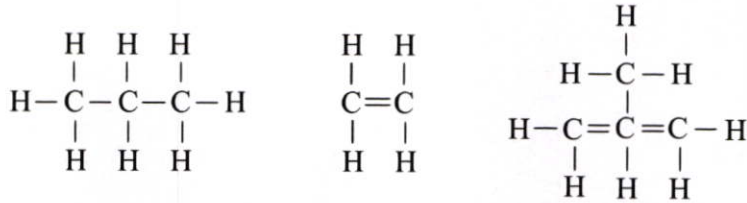
## 2.2 น้ำมันหม้อแปลง [2]

น้ำมันหม้อแปลงเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากการกลั่นปิโตรเลียมที่ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนหลายชนิด สามารถจำแนกตามโครงสร้างโมเลกุลได้ 3 ประเภท คือ อลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน , อลิไซคลิกไฮโดรคาร์บอน และอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน โดยอลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน และอลิไซคลิกไฮโดรคาร์บอน เป็นประเภทที่มีเสถียรภาพเนื่องจากเป็นไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว ส่วนอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ไม่มีเสถียรภาพเนื่องจากเป็นไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว แต่ประเภทยังประกอบไปด้วยโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก และมีความซับซ้อนของโครงสร้างต่างกัน ไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็ก และมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนจะอยู่ในสถานะแก๊สที่อุณหภูมิห้อง ส่วนไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลสูงมาก และมีโครงสร้างสลับซับซ้อน ระเหยยาก และมีความหนืดสูงจะมีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้องเช่น ซีฟิ่งพาราฟิน และแอสฟัลท์ เป็นต้น

2.2.1 อลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (Aliphatic Hydrocarbon) สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ภายในโมเลกุลมีอะตอมของ คาร์บอน (C) ต่อกันเป็นลูกโซ่ ในลักษณะปลายเปิด ซึ่งอาจเป็นโซ่ตรง (Straight Chain) หรือโซ่ที่มีกิ่งก้านสาขา (Branched Chain) และพันธะระหว่างคาร์บอนอะตอมอาจเป็นพันธะเดี่ยว พันธะคู่ หรือพันธะสาม หรือมีพันธะมากกว่าหนึ่งชนิด ผสมกันก็ได้ อลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ แอลคีน (Alkene), แอลเคน (Alkane) และแอลไคน์ (Alkyne)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างสูตรโครงสร้างอลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน

### 2.2.1.1 สมบัติของแอลคีน (Alkene)

#### สมบัติทางกายภาพ

1) แอลคีนมีทั้งสถานะแก๊ส ของแข็ง และของเหลว  $\text{C}_2\text{H}_4 - \text{C}_4\text{H}_8$  เป็นแก๊ส  $\text{C}_5\text{H}_{10} - \text{C}_{18}\text{H}_{36}$  เป็นของเหลว มากกว่า  $\text{C}_{18}\text{H}_{36}$  เป็นของแข็ง

2) ไม่นำไฟฟ้า มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ

3) ไม่ละลายในตัวทำละลายโมเลกุลมีขั้ว เพราะเป็นโมเลกุลไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน

#### อีเทอร์

4) จุดเดือด จุดหลอมเหลวต่ำ เพราะเป็นโมเลกุลไม่มีขั้ว จึงยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ แต่เมื่อมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้น จะมีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูงขึ้น

#### สมบัติทางเคมี

1) มีความว่องไวในปฏิกิริยามากกว่าแอลเคน เพราะแอลคีนมีหมู่ฟังก์ชันเป็น  $-\text{C}=\text{C}-$  ซึ่งไม่อิ่มตัว จึงเกิดปฏิกิริยาได้ง่าย

2) ติดไฟง่าย แต่มีเขม่าเพราะในโมเลกุลมีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนมาก หรือมีไฮโดรเจนน้อย

3) สามารถฟอกสีสารละลายโบรมีนใน  $\text{CCl}_4$  ทั้งที่มีดและที่สว่างโดยเกิดปฏิกิริยาการเติมหรือปฏิกิริยารวมตัว (Addition reaction) ด้วยโบรมีน ตรง  $\text{C}=\text{C}$  ขณะเกิดปฏิกิริยาเมื่อใช้กระดาษลิตมัสขึ้นสีน้ำเงินอ่อนเหนือปากหลอด ลิตมัสจะไม่เปลี่ยนสีทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาการฟอกสีโบรมีนเป็นปฏิกิริยาการเติม จึงไม่เกิดแก๊สไฮโดรเจนโบรมัด ซึ่งมีสมบัติเป็นกรด ปฏิกิริยาที่เกิดจึงแตกต่างจากแอลเคน

4) สามารถฟอกสีสารละลายโพแทสเซียมเปอร์มังกาเนตในสารละลายกรดโดยเกิดปฏิกิริยาการเติมด้วย  $2(\text{OH})$  ตรง  $\text{C}=\text{C}$  ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไดแอลกอฮอล์ซึ่งเป็นสารประกอบ 1,2-diols หรือ ไกลคอล (Glycol) และตะกอนสีน้ำตาลเข้ม ซึ่งตะกอนนี้คือ  $\text{MnO}_2$  ดังสมการ

### 2.2.1.2 สมบัติของแอลเคน (Alkane)

#### สมบัติทางกายภาพ

1) แอลเคนมีได้ทั้ง 3 สถานะ ถ้ามีจำนวน โมเลกุลคาร์บอน 1-4 เป็นแก๊ส, 5-17 เป็นของเหลวและ 18 ขึ้นไปเป็นของแข็ง

2) ไม่นำไฟฟ้า เพราะเป็นโมเลกุลโคเวเลนต์

3) ไม่ละลายน้ำ หรือตัวทำละลายที่โมเลกุลมีขั้ว แต่ละลายได้ในตัวทำละลายที่โมเลกุลไม่มีขั้ว

ทั้งนี้ อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ แต่ความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้นเมื่อมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้น
- 5) จุดเดือด จุดหลอมเหลวต่ำ แต่ถ้ามวลโมเลกุลเพิ่มขึ้นจุดเดือดจุดหลอมเหลวจะสูงขึ้น
- 6) แอลเคนที่มีสถานะแก๊สและของแข็งไม่มีกลิ่น ถ้าเป็นของเหลวจะมีกลิ่นเฉพาะสมบัติทางเคมี

1) แอลเคนมีความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาที่อุณหภูมิปกติ เพราะแอลเคนเป็นสารประกอบที่อิ่มตัว แต่ปฏิกิริยาจะเกิดได้ภายใต้อุณหภูมิสูงเท่านั้น เช่น ไข่แสงสว่าง หรือความร้อนหรือบางปฏิกิริยา ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

2) ติดไฟง่าย ถ้ามีออกซิเจนมากเกินไปจะไหม้ คาร์บอนไดออกไซด์, ไอน้ำ และพลังงานไม่มีเขม่าเพราะมีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบมาก

3) แอลเคนสามารถพอกีสสารละลายโบรมีนในคาร์บอนเตตระคลอไรด์ โดยเกิดปฏิกิริยาแทนที่ (Substitution reaction) เมื่อมีแสงสว่างหรืออุณหภูมิ 200 - 400°C และจะเกิดแก๊สที่เปลี่ยนสีกระดาษคลิตมัสจากน้ำเงินเป็นแดง (กรดไฮโดรโบรมิก)

### 2.2.1.3 สมบัติของแอลไคน์ (Alkyne)

สมบัติทางกายภาพ

1) แอลไคน์มีทั้งแก๊ส ของเหลว และของแข็ง

2) ไม่ละลายน้ำแต่สามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ หรือตัวทำละลายที่โมเลกุลไม่มีขั้วหรือมีสภาพขั้วน้อย เช่น อีเทอร์ เบนซีน คาร์บอนเตตระคลอไรด์ สารละลายไม่นำไฟฟ้า

3) มีจุดหลอมเหลว จุดเดือดต่ำ แต่จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้นจุดเดือดจุดหลอมเหลวของแอลไคน์โซ่ตรงบางชนิด

4) แอลไคน์มีจุดหลอมเหลว จุดเดือดสูงกว่าแอลคีนที่มีจำนวนคาร์บอนเท่ากันและลักษณะโครงสร้างทำนองเดียวกัน (จุดเดือดแอลไคน์ > แอลเคน > แอลคีน)

สมบัติทางเคมี

1) มีความไวปฏิกิริยามากกว่าแอลคีน เพราะแอลไคน์มีความไม่อิ่มตัวมากกว่าแอลคีน

2) ติดไฟง่ายให้คาร์บอนไดออกไซด์, ไอน้ำ และพลังงานและมีเขม่าเกิดขึ้นมากกว่าการเผาไหม้ของแอลคีน

3) เกิดปฏิกิริยาการเติมกับธาตุแฮโลเจนได้ ทั้งในที่สว่างและในที่มืดและปฏิกิริยานี้จะเกิดได้ดีเมื่ออยู่ในตัวทำละลายที่โมเลกุลไม่มีขั้ว เช่น คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (CCl<sub>4</sub>)

4) ฟอกจางสี KMnO<sub>4</sub> ได้

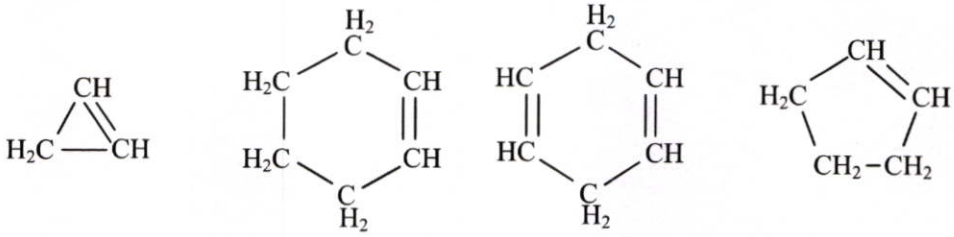
5) เกิดปฏิกิริยาการเติมด้วยน้ำ (Hydration)

6) เกิดปฏิกิริยาการเติมด้วยไฮโดรเจน (Hydrogenation)

7) เกิดปฏิกิริยาการเติมด้วยไฮโดรเจนฮาไลด์ (Hydrogenhalogenation)

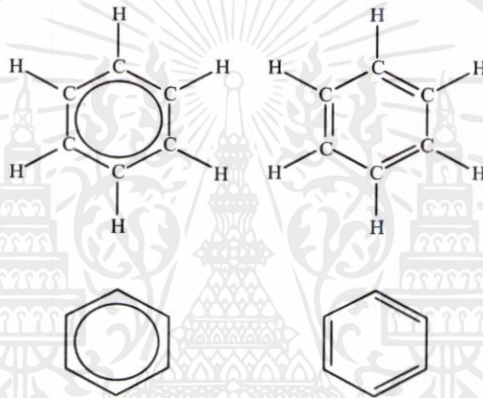
2.2.2 อลิไซคลิกไฮโดรคาร์บอน (Alicyclic Hydrocarbon) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างของคาร์บอนจัดเรียงตัวเป็นโซ่ปิดตั้งตัวอย่างด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การค้า  
ไม่ว่ากรรมใดจึ่งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างสูตรโครงสร้างออลิไซคลิกไฮโดรคาร์บอน

2.2.3 อโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Aromatic Hydrocarbon) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีวงแหวนเบนซีนเป็นองค์ประกอบภายในโมเลกุล เส้นพันธะแบบวงกลมหมายถึงอิเล็กตรอนไม่เสถียรซึ่งวิ่งวนรอบวงแหวน



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างสูตรโครงสร้างอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

นอกจากองค์ประกอบดังกล่าวแล้ว ในน้ำมันหม้อแปลงยังมีการใส่สารเติมแต่ง (Additive) เพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง โดยเฉพาะสารยับยั้งการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation Inhibitor) ช่วยให้น้ำมัน หม้อแปลงเกิดออกซิเดชันยากขึ้นจึงมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้นลักษณะสมบัติที่ต้องการของน้ำมันหม้อแปลงสำหรับการฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจะกำหนดด้วยคุณสมบัติทางฟิสิกส์, เคมี และไฟฟ้า ซึ่งต้องใช้ให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์การใช้งาน คุณสมบัติดังกล่าวแสดงในตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

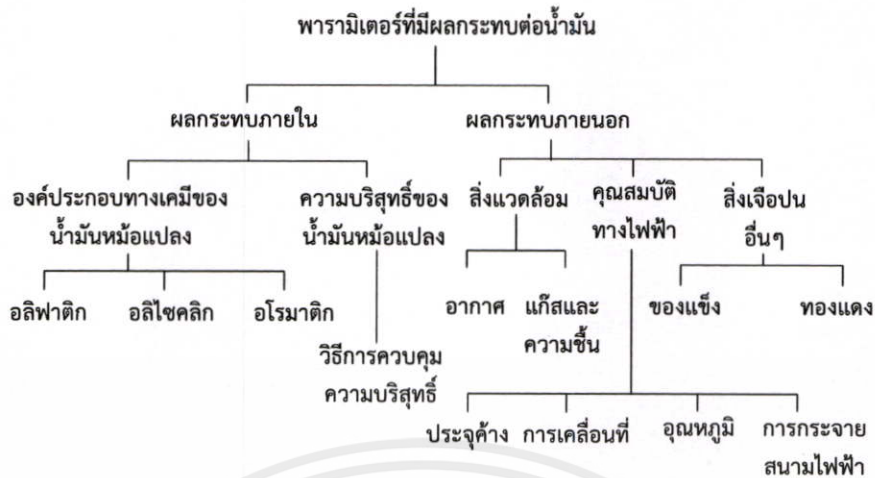
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์, เคมี และไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง

คุณสมบัติทางฟิสิกส์	คุณสมบัติทางเคมี	คุณสมบัติทางไฟฟ้า
การระบายความร้อน - ความหนาแน่น - ความหนืด - สัมประสิทธิ์การกระจาย ความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion) - ความนำไฟฟ้าเนื่องจากความร้อน (Thermal Conductivity) - ความถ่วงความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) การเก็บรักษา และปฏิบัติงาน - จุดติดไฟ - จุดวาบไฟ - ความดันไอ - อุณหภูมิติดไฟทันที (Auto Ignition Temperature)	องค์ประกอบทางเคมี - โครงสร้างโมเลกุล - อัตราส่วนปริมาณของอลิฟาติก, อลิโซคลิก และอโรมาติก - ค่าความเป็นกลาง - แรงตึงผิว (Interfacial Tension)	- ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า - ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก - ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ - ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า - ความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ - การดิสชาร์จบางส่วนและแรงดันเริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วน

### 2.3 พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

น้ำมันหม้อแปลงถูกนำไปใช้ในฉนวน และตัวระบายความร้อนภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงโดยน้ำมันหม้อแปลงต้องมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์, เคมี และไฟฟ้าที่เหมาะสมกับการใช้งาน โดยคุณสมบัติที่สำคัญของน้ำมันหม้อแปลงที่พิจารณา คือ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าและการระบายความร้อน โดยมีพารามิเตอร์หลายชนิดที่มีผลกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้แก่ชนิด และรูปร่างอิเล็กโทรด, ระยะแกป, อัตราการไหลของฉนวนเหลว, ความดัน, อุณหภูมิ อีกทั้งสิ่งเจือปนที่ปะปนอยู่ เช่น ฟองแก๊ส, อนุภาคเจือปนของแข็ง และความชื้น เป็นต้น ส่วนคุณสมบัติด้านการระบายความร้อนมีพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบได้แก่ ความหนาแน่น, ความหนืด และอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งสามารถอธิบายพารามิเตอร์ต่างๆได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบกับน้ำมันหม้อแปลง

### 2.3.1 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหม้อแปลง

องค์ประกอบทางเคมี มีผลต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าอย่างยิ่ง โดยโครงสร้างโมเลกุลขององค์ประกอบทางเคมีมีผลต่อการเคลื่อนที่ของสตริมเมอร์ซึ่งนำไปสู่การเบรกดาวนได้ เช่น ปริมาณของโครงสร้างอโรมาติกซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนแบบไม่อิ่มตัวในน้ำมันหม้อแปลงมีผลต่อความสามารถในการละลายของแก๊ส และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า นอกจากนั้นการเกิดออกซิเดชันก็มีผลทำให้โครงสร้างทางเคมีของน้ำมันหม้อแปลงเปลี่ยนแปลงไป และกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าด้วย แม้แต่การใส่สารเติมแต่งเพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงยังส่งผลต่อถึงคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงได้ เช่น การมีสารประกอบโพลีอโรมาติก (Polyaromatic) ที่ความเข้มข้นเพียงเล็กน้อยมีผลให้ความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของน้ำมันหม้อแปลงที่มีส่วนผสมของเนฟทีนิกมากมีค่าลดลงอย่างมาก

### 2.3.2 ความชื้น

Moisture content หรือ Water content เป็นค่าความชื้นที่ปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง ส่งผลทำให้ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Break down) ของฉนวนน้ำมันมีค่าต่ำลง โดยค่า Moisture content เป็นสัดส่วนโดยมวลของน้ำต่อมวลทั้งหมด ซึ่งในเรื่องของน้ำมันหม้อแปลงนั้น Moisture content จะมีปริมาณน้อยมาก จึงนิยมแสดงในหน่วย part per million (ppm)

$$\text{moisture content} = \frac{m_w}{m_t}$$

$$\text{moisture content} = \frac{m_w}{m_t} \times 10^6 \quad (\text{ppm}) \quad (2.7)$$

โดยที่  $m_w$  = มวลของน้ำ  
 $m_t$  = มวลทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับคณะทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบของน้ำที่อยู่ในน้ำมัน แบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ

1) Dissolved Water น้ำที่อยู่ในน้ำมันมีปริมาณน้อยมาก โมเลกุลของน้ำจะกระจายตัวอยู่ในน้ำมันทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นได้

2) Emulsified Water เมื่อน้ำที่อยู่ในน้ำมันมีปริมาณมากกว่า Saturation point โมเลกุลของน้ำมีมากพอจนรวมตัวกันเป็นหยดน้ำเล็กๆทำให้สังเกตเห็นได้ว่ามีเป็นลักษณะเป็น Emulsion

3) Free Water หากน้ำมีมากขึ้น หรือทิ้ง Emulsion ไว้นานๆ น้ำกับน้ำมันจะแยกชั้นกัน เนื่องจากความหนาแน่นที่ต่างกัน

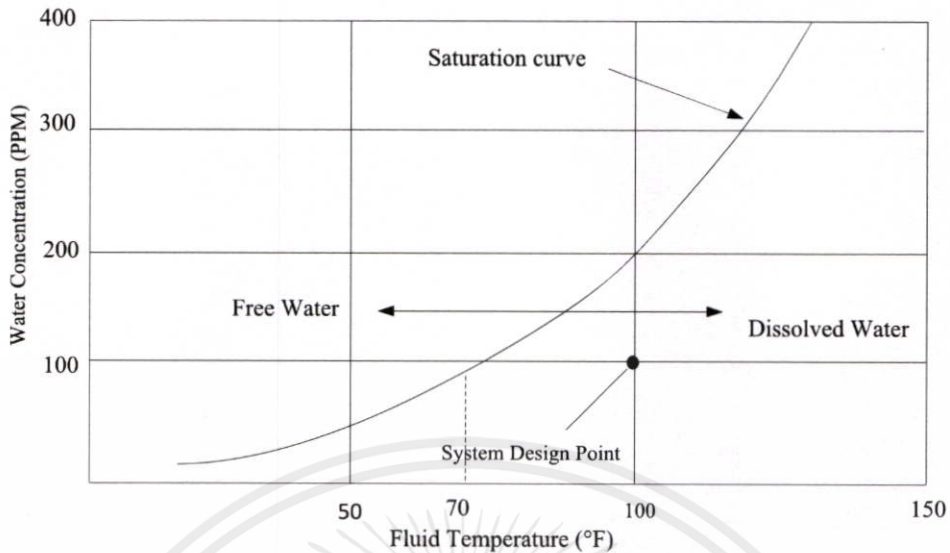


รูปที่ 2.6 ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง

โดยที่  
A คือ Dissolved Water  
B คือ Emulsified Water  
C คือ Free Water

จุดการอิ่มตัวของน้ำ (Water saturation point) หรือ ขอบเขตการอิ่มตัว (Saturation limit) ของน้ำมันจะขึ้นอยู่กับ ชนิด และ อุณหภูมิของน้ำมัน ดังนั้นการบ่งบอก ขอบเขตการอิ่มตัวต้องระบุอุณหภูมิมาด้วย เช่น Mineral oil : 55 ppm, Synthetic ester : 2700 ppm และ Natural ester : 1100 ppm ที่ 20°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 เส้นโค้งการอิ่มตัวของน้ำ (Water Saturation Curve)

เส้นโค้งการอิ่มตัวของน้ำ (Water saturation curve) เป็นเส้นที่แบ่ง ระยะเวลา (Phase) ของน้ำ ระหว่าง น้ำที่อยู่ในน้ำมันมีปริมาณน้อย (Dissolved water) กับ น้ำที่อยู่ในน้ำมันมีปริมาณมากและ เริ่มแยกชั้นกับน้ำมัน (Emulsified) และ น้ำที่แยกชั้นจากน้ำมัน (Free water) โดยจะแตกต่างกันไปตามสูตรผสม และ ชนิดของน้ำมัน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจุดการอิ่มตัวของน้ำจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิ สามารถหาค่าความสัมพันธ์ของการอิ่มตัวของความชื้น (Relative moisture saturation = (RS)) เป็นสัดส่วนระหว่าง สภาพความชื้น (Moisture content) ต่อ จุดการอิ่มตัวของน้ำ (Water saturation point) ที่อุณหภูมิหนึ่ง

$$RS = \frac{\text{moisture content}}{\text{water saturation point}} \quad (2.8)$$

ความชื้นมักละลายในฉนวนเหลวโดยอยู่ในรูปของน้ำที่อยู่ในน้ำมันมีปริมาณน้อย จนถึงสภาวะอิ่มตัวซึ่งเป็นสภาวะที่มีปริมาณความชื้นมากที่สุดที่สามารถอยู่ในรูปของน้ำที่อยู่ในน้ำมันมีปริมาณน้อย ได้ และมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง ปริมาณความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงที่เกินจากสภาวะอิ่มตัวจะอยู่ในรูปของ น้ำในสภาวะความเข้มข้นสูง (Condensed water) ส่วนน้ำที่จับกันด้วยพันธะเคมี (Bound water) เกิดจากการกลั่นที่ไม่ดีพอหรือการเกิดปฏิกิริยาเมื่อน้ำมันหม้อแปลงมีการเสื่อมสภาพ ในน้ำมันหม้อแปลงสามารถคำนวณหาความสามารถในการละลายได้สูงสุดของความชื้นได้จากความสัมพันธ์กับอุณหภูมิดังสมการที่ 2.9

$$\text{Log } W = 7.08595 - \frac{1567}{T} \quad (2.9)$$

โดยที่ W = ความสามารถในการละลายได้สูงสุดของความชื้น (ppm)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น สิทธิทั้งหมดเป็นให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.1 สามารถคำนวณหาความสามารถในการละลายได้สูงสุดของความชื้นในอุณหภูมิ 30 °C ได้เท่ากับ 82.77 ppm

ความชื้นที่เจือปนอยู่ในฉนวนเหลวจะทำให้ฉนวนมีอุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากการสูญเสียไดอิเล็กตริกที่เพิ่มขึ้น ทำให้ฉนวนเหลวเกิดการเสื่อมสภาพ ถ้าเป็นหยดน้ำที่อยู่ในน้ำมันหม้อแปลงหยดน้ำจะยึดออกตามแนวสนามไฟฟ้าทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นเมื่อถึงค่าวิกฤติจะเกิดการเบรกดาวน์โดยแนวการเบรกดาวน์จะเริ่มที่ปลายของหยดน้ำไปสู่เล็กโตรดนอกจากนี้ยังมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแยกน้ำออกเป็นแก๊สไฮโดรเจนกับแก๊สออกซิเจนที่มีอยู่ในรูปฟองแก๊สทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วน และอาจทำให้เกิดการเบรกดาวน์ตามมา

วิธีการป้องกันความชื้นไม่ให้เจือปนในฉนวนเหลวที่ดีที่สุดคือไม่ให้ฉนวนเหลวสัมผัสกับอากาศภายนอกด้วยการบรรจุในภาชนะที่ปิดมิดชิดแต่ต้องมีวิธีแก้ปัญหาการขยายตัวของฉนวนเหลวเมื่อได้รับความร้อนหรือให้สัมผัสกับอากาศโดยผ่านสารดูดความชื้น เช่น ซิลิกาเจล (Silica gel) ก็สามารถลดปริมาณความชื้นจากภายนอกได้

### 2.3.3 แก๊ส

ภายในน้ำมันหม้อแปลงอาจมีแก๊สปะปนอยู่ แต่แก๊สจะถูกขจัดออกไปจากน้ำมันหม้อแปลงก่อนการเติมลงในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง แต่เนื่องจากสภาพใช้งานจริง เช่น การสัมผัสกับอากาศของกระดาด และน้ำมันหม้อแปลงจะมีการเสื่อมสภาพขึ้น (Aging) หรือมีการลัดวงจรภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ทำให้มีการเจือปนในน้ำมันหม้อแปลงได้อีก ฟองแก๊สที่เข้าไปอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงอาจทำให้เกิดการปล่อยประจุบางส่วนที่เป็นสาเหตุของการที่ทำให้ฉนวนเสื่อมคุณภาพ และเกิดการเบรกดาวน์ในที่สุดแก๊สสามารถละลายอยู่ในฉนวนเหลวได้ โดยความสามารถในการละลายเป็นไปตามกฎของเฮนรี (Henry's law) ที่กล่าวว่าความสามารถในการละลาย (saturation solubility,  $K_a$ ) ของแก๊สใดๆ ที่อยู่เหนือฉนวนเหลวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความดันบางส่วนของแก๊สนั้น ดังสมการที่ 2.10

$$P_a = A_a K_a \quad (2.10)$$

โดยที่  $A_a$  ค่าคงที่การละลายของแก๊ส a ( $\mu\text{atm}/(\mu\text{L/l})$ )  
 $P_a$  ความดันบางส่วนของแก๊ส a (atm)  
 $K_a$  ความสามารถในการละลาย (%Vol)

ในสถานะสมดุลการละลาย ผลรวมของความดันบางส่วนของแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันทั้งหมด ( $P_a + P_b + P_c + \dots$ ) จะเท่ากับผลรวมความดันบางส่วนของแก๊สเหนือน้ำมันตารางที่ 2.2 และ 2.3 แสดงถึงค่าคงที่การละลาย (A) และความสามารถในการละลาย (K) ของแก๊สแต่ละชนิดที่ละลายในน้ำมันหม้อแปลง ณ อุณหภูมิ 0 - 100 °C ความดันบางส่วนของแก๊สเท่ากับ 760 mmHg และจะพบว่าแก๊สจะละลายได้มากขึ้นหรือน้อยลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของแก๊สแต่ละชนิด

ตารางที่ 2.2 ค่าคงที่การละลายของแก๊ส (A) ตามกฎของเฮนรี ( $\mu\text{atm}/(\mu\text{L}/\text{L})$ ) ที่ความดันแก๊สเหนือ น้ำมันหม้อแปลง 760 mmHg

อุณหภูมิ(°C)	0	20	40	60	80	100
อากาศ	-	9.9	9.7	9.5	9.3	9.1
N <sub>2</sub> ,ไนโตรเจน	13.0	11.6	11.4	11.1	10.3	10.3
O <sub>2</sub> ,ออกซิเจน	6.4	6.2	6.1	6.0	5.9	5.8
H <sub>2</sub> ,ไฮโดรเจน	24.6	20.4	17.5	15.4	13.8	-
CO,คาร์บอนมอนอกไซด์	8.9	8.3	7.9	7.6	7.3	-
CO <sub>2</sub> ,คาร์บอนไดออกไซด์	0.72	0.89	1.07	1.23	1.5	-

ตารางที่ 2.3 ความสามารถในการละลายของแก๊ส (K,%Vol) ที่ความดันแก๊สเหนือ น้ำมันหม้อแปลง 760 mmHg

อุณหภูมิ(°C)	0	20	40	60	80	100
อากาศ	-	10.1	0.3	10.5	10.8	10.9
N <sub>2</sub> ,ไนโตรเจน	7.7	8.6	8.8	9.0	9.7	9.7
O <sub>2</sub> ,ออกซิเจน	15.6	16.1	16.4	16.7	16.9	17.2
H <sub>2</sub> ,ไฮโดรเจน	4.1	4.9	5.7	6.5	7.2	-
CO,คาร์บอนมอนอกไซด์	11.2	12.0	12.7	13.2	13.7	-
CO <sub>2</sub> ,คาร์บอนไดออกไซด์	138.8	112.3	93.5	81.3	66.7	-

#### 2.3.4 ประจุค้าง

ประจุค้างเกิดจากการดิสชาร์จบางส่วนในบริเวณที่มีความเครียดสูงหรือเกิดหลังจากเกิดเบรกดาวน์ขึ้น ประจุมีผลทำให้ลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป โดยมีผลกระทบจากแรงดันที่ไม่มีขั้วไฟฟ้า (เช่น แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง, แรงดันเกิดอิมพัลส์) มากกว่าแรงดันที่มีขั้วทางไฟฟ้า เช่น แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ นอกจากนี้ประจุค้างยังเกิดจากปรากฏการณ์ streaming electrification ที่น้ำมันหม้อแปลงเคลื่อนที่ และเสียดสีกับฉนวนแข็ง เช่น กระดาษ, แผ่นไม้อัด เป็นต้น และทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างฉนวนแข็งกับน้ำมันหม้อแปลงเนื่องจากการสะสมประจุไฟฟ้าที่ผิวฉนวนแข็งกับน้ำมันหม้อแปลงที่มีประจุตรงข้ามกัน ความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นสูงเพียงพอที่จะทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วน และดิสชาร์จตามผิวซึ่งนำไปสู่การเบรกดาวน์ได้

#### 2.3.5 การเคลื่อนที่

การเคลื่อนที่ของน้ำมันหม้อแปลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ, การทำงานของปั๊มหรือพัดลมในการระบายความร้อน และจากปรากฏการณ์ EHD (Electro Hydro Dynamic) ทำให้เกิดฟองแก๊สในน้ำมันหม้อแปลง, เกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคเจือปนและเกิดประจุอิสระเนื่องจากการเสียดสีระหว่างฉนวนเหลวกับฉนวนแข็งที่เรียกว่าปรากฏการณ์ Streaming Electrification ซึ่งกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าด้วย

### 2.3.6 อุณหภูมิ

คุณสมบัติของพารามิเตอร์หลายตัวที่มีผลกระทบต่อความคงทนต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เช่น ความหนืด, ความตึงผิว และความหนาแน่น ทำให้กระบวนการเกิดฟองแก๊ส และลักษณะการเคลื่อนที่ของน้ำมันหม้อแปลงเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิด้วย เช่นเดียวกับปริมาณความชื้นที่สภาวะอิ่มตัวซึ่งขึ้นกับอุณหภูมินั้น โดยทั่วไปจะมีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วง 20 – 100 ppm เนื่องจากต้องพิจารณาถึงเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่ความชื้นให้ใกล้เคียงกันในการทดสอบแต่ละครั้ง และการทดสอบผลกระทบของอุณหภูมิจะรอให้อุณหภูมินิ่งก่อนจะเริ่มทำการทดสอบ

### 2.3.7 การกระจายสนามไฟฟ้า

ลักษณะความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงคล้ายกับแก๊ส กล่าวคืออิเล็กโตรดที่มีการกระจายสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของอิเล็กโตรดที่มีการกระจายสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงจะต่ำที่สุด โดยกลไกการเบรกดาวนของอิเล็กโตรดที่มีการกระจายสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจะเกิดเบรกดาวนโดยตรง ส่วนการเบรกดาวนของอิเล็กโตรดที่มีการกระจายของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอสูงมีการเกิดดิสชาร์จบางส่วนก่อนที่จะนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน ดังนั้นการออกแบบฉนวนควรออกแบบให้มีการกระจายสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอเท่าๆกันในทุกจุดเพื่อให้มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงที่ระยะแยกเดียวกัน

### 2.3.8 ชนิดของรูปคลื่นแรงดัน

แรงดันเบรกดาวนของฉนวนเหลวขึ้นอยู่กับชนิดของรูปคลื่นแรงดันที่ป้อน, วิธีการป้อน และช่วงเวลาการป้อน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าที่คงมีอยู่ ซึ่งในการออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดต่างๆภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเป็นเรื่องสำคัญมาก วิธีการตรวจสอบคุณภาพฉนวนที่ดีที่สุดคือการทดสอบจริง โดยความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าคงตัว (แรงดันกระแสตรง และแรงดันกระแสสลับ) ของฉนวนเหลวจะมีค่าต่ำกว่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์

### 2.3.9 อนุภาคเจือปนของแข็ง

อนุภาคของแข็งอาจเจือปนในน้ำมันหม้อแปลงในรูปของไฟเบอร์ (Fiber) หรือฝุ่นละอองซึ่งเกิดมาจากกระบวนการผลิตในทางอุตสาหกรรมหรือจากภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เช่น ไฟเบอร์ที่เป็นเยื่อของกระดาษฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้า, เศษทองแดงหรือเศษเหล็กซิลิคอนที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจากกระบวนการผลิต, อนุภาคคาร์บอนที่เกิดจากการทำงานตัวเองเปลี่ยนระดับแรงดัน (หรือการดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้าหรือการดับอาร์คในเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็นต้น ซึ่งอนุภาคเจือปนของแข็งในน้ำมันหม้อแปลงนี้นำไปสู่กลไกการเกิดเบรกดาวนได้)

## 2.4 ฉนวนเหลว

ฉนวนเหลวถูกนำมาใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เช่น สายเคเบิลที่มีฉนวนเป็นกระดาษชุบน้ำมัน หม้อแปลงชนิดฉนวนด้วยน้ำมัน ตัวเก็บประจุแรงสูง และเบรกเกอร์บางชนิด เป็นต้น ลักษณะโมเลกุลของฉนวนเหลวจะมีระยะห่างระหว่างโมเลกุลพอๆกันขนาดโมเลกุล ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับระยะห่างระหว่างโมเลกุลของแก๊สแล้วจะสั้นกว่ามาก ดังนั้นระยะทางอิเล็กตรอนจะสามารถเคลื่อนที่ได้จึงสั้นกว่า พลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจากสนามไฟฟ้าจึงมีน้อย ในการที่จะเกิดการแตกตัวเป็น

การขนต้องใช้น้ำมันไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงมาก ฉนวนเหลวจึงมีความแตกต่างกับฉนวนแข็ง โดยที่โมเลกุลของฉนวนเหลวไม่ได้ถูกยึดเหนี่ยวไว้ด้วยกันอย่างหนาแน่นเหมือนโมเลกุลของแข็ง โมเลกุลของเหลวสามารถเคลื่อนที่ไปมาได้โดยอิสระพอสมควร อนุภาคไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายกว่าของแข็ง เมื่ออนุภาคไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปจะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในเนื้อฉนวนเหลว ฉนวนเหลวที่นำมาใช้ในในระบบ และอุปกรณ์ส่วนใหญ่จะเป็นประเภท น้ำมันไฮโดรคาร์บอน หรือฉนวนไฟฟ้าสังเคราะห์ซึ่งทนความร้อนได้สูง ซึ่งฉนวนประเภทที่มีความบริสุทธิ์เท่านั้นหาได้ยากเช่นเดียวกับแก๊สบริสุทธิ์ ส่วนใหญ่แล้วในฉนวนจะมีสิ่งเจือปนอยู่ไม่มากก็น้อย เช่น ฝุ่น, ความชื้น ดังนั้นการวิเคราะห์เบรกดาวน์ในฉนวนเหลวจึงต้องคำนึงถึงปัจจัยของสิ่งเจือปนเป็นสิ่งสำคัญ

ลักษณะคุณสมบัติที่ต้องการของฉนวน สำหรับฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าอาจกำหนดด้วยคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญคือ

- 1) ความถ่วงจำเพาะ
- 2) จุดติดไฟ (จุดติดไฟสูง ย่อมหมายถึงโอกาสเกิดเพลิงไหม้ย่อมมีน้อย)
- 3) ความหนืด (ความหนืดสูง ย่อมหมายถึงความสามารถระบายความร้อนได้ดี)
- 4) ความเป็นกรด (ซึ่งแสดงถึงปริมาณส่วนที่เป็นกรดผสมอยู่ในของเหลว)
- 5) แฟกเตอร์พลังสูญเสีย  $\tan \delta$  (เป็นตัวชี้ให้ทราบว่า การเกิดพลังงานสูญเสียมีมากน้อยเพียงใด)

โดยหลักการแล้วฉนวนเหลวจะทำหน้าที่การฉนวนได้ดีกว่าฉนวนประเภทแก๊สและฉนวนแข็งที่จัดว่าดีกว่าฉนวนแก๊ส เพราะมีความหนาแน่นสูงกว่าฉนวนแก๊ส ย่อมมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าฉนวนแก๊ส และจัดการดีกว่าฉนวนแข็ง เพราะว่าฉนวนเหลวสามารถแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างได้ง่ายกว่า ที่สำคัญฉนวนเหลวสามารถกลับคืนสู่การเป็นฉนวนเองได้ภายหลังจากดิสชาร์จผ่านพ้นไปแล้ว ข้อดีอีกประการหนึ่งของฉนวนเหลว คือสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดี อย่างไรก็ตามฉนวนเหลวแม้จะมีข้อดีหลายประการดังที่กล่าวมาแล้ว แต่ในทางปฏิบัติเราจะพบว่ามีการใช้ฉนวนของเหลวกันน้อยกว่าฉนวนแก๊ส และฉนวนแข็ง ทั้งนี้เนื่องจากฉนวนเหลวที่ใช้กันในเชิงการค้ามักไม่บริสุทธิ์โดยสมบูรณ์ จึงใช้ฉนวนเหลวในรูปของกระบวนการเชื่อม (Impregnation) มากขึ้น

## 2.5 สาเหตุการเสื่อมสภาพของน้ำมัน

### 2.5.1 การเสื่อมสภาพทางออกซิเดชัน

การเสื่อมสภาพของน้ำมันเริ่มตั้งแต่ น้ำมันถูกบรรจุเข้าไปในอุปกรณ์ โดยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อยู่ตัว (unstable) ในน้ำมัน จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนภายในอุปกรณ์ (ซึ่งอาจเป็นออกซิเจนที่ละลายมากับน้ำมัน หรือตกค้างหลังจากผลิตจากโรงงาน หรืออาจมาจากอากาศโดยตรง ในกรณีหม้อแปลงระบบปิดที่หายใจผ่านซิลิกาเจล) ภายใต้ความชื้น, ทองแดง, เหล็ก และตัวเร่งปฏิกิริยา (ความร้อนสนามไฟฟ้า) เกิดผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเป็นออกไซด์ในรูปของ เพอร์ออกไซด์, แอลกอฮอล์ และกรดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง กรดที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับทองแดง, เหล็ก, วานิช หรือสีในหม้อแปลงเกิดสารที่ค่อนข้างนำไฟฟ้า และละลายในน้ำมันได้ปานกลาง เรียกว่า ตะกอน เมื่อตะกอนมีการสะสมตัวมากขึ้น ความสามารถในการละลายจะลดลง เกิดการตกตะกอน และก่อสารที่ขึ้นเหนียวเกาะผิวกระดาษ, ผนังตัวถัง, ร่องน้ำมัน หรือ ครีประบายความร้อน ทำให้การระบายความร้อนของอุปกรณ์แยลง สารเสื่อมสภาพนี้ จะทำให้สีของน้ำมันเหลืองมากขึ้น

จนกลายเป็นน้ำตาลอ่อนและน้ำตาลเข้มเมื่อปริมาณตะกอนมากขึ้นน้ำมันที่ใสจะขุ่นขึ้น ความสามารถในการส่งผ่านความร้อนของน้ำมันจะลดลง นอกจากนี้โพลาร์คอมเปาต์ที่เกิดจะลดความเป็นฉนวนไฟฟ้าของน้ำมันส่วนสารเจือปนหรือพวกละปนเปื้อน ได้แก่ น้ำ, ฝุ่น, และเศษผง จะทำให้น้ำมันขุ่นมัว และการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

#### 2.5.2 การเสื่อมสภาพทางไฮโดรไฮดริค

เนื่องจากน้ำมันที่มีขี้ มีค่าไดอิเล็กตริกคอนแดนซ์สูง ในขณะที่น้ำมันมีค่า 2.2 หยดน้ำในน้ำมัน ที่อยู่บริเวณที่มีความเครียดไฟฟ้าสูง จะสร้างปัญหาของการเกิดดิซชาร์จในน้ำมัน ทำให้ความแข็งแรงทางฉนวนลดลง นอกจากนี้แล้วทำให้เกิดการสูญเสียทางฉนวน (dielectric loss) เพิ่มแฟกเตอร์การสูญเสีย และการนำไฟฟ้า

#### 2.5.3 การเสื่อมสภาพทางไฟฟ้า

ความเครียดของสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันสูงขึ้นน้ำมันเสื่อมสภาพเร็วขึ้น อาจจะใช้โดยเติมสารประเภทที่มีตัวยับยั้งเข้าไปในน้ำมัน สารประเภทที่มีตัวยับยั้ง ที่เติมในน้ำมันเพื่อปรับปรุงสภาพด้านการต่อต้านออกซิเดชันส่วนใหญ่จะลดคุณสมบัติด้านค่าความแข็งแรงอิมพัลส์ของน้ำมัน

#### 2.5.4 การเสื่อมสภาพทางความร้อน

ความร้อนจะเร่งให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันให้เกิดเร็วขึ้น ทำให้น้ำมันเสื่อมสภาพเร็วขึ้น นอกจากนี้ความร้อนยังเป็นสาเหตุหลักที่สำคัญในการทำให้กระดาษฉนวนเสื่อมสภาพ โดยหากสภาพการระบายความร้อนของน้ำมันแย่ง อายุการใช้งานของกระดาษฉนวนจะสั้นลง

### 2.6 การตรวจสอบสภาพภายในหม้อแปลง

การตรวจสอบสภาพหม้อแปลงเป็นหนึ่งในขั้นตอนของการบำรุงรักษาหม้อแปลง โดยการตรวจสอบสภาพหม้อแปลงขณะที่ใช้งานอยู่ ทำได้โดยตรวจจากตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลง แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลัก คือ DGA, Furan Compound, การตรวจคุณลักษณะ

2.6.1 การตรวจดูสภาพผิดปกติ โดยการทำให้ Dissolved Gas Analysis (DGA) ซึ่งกระบวนการนี้สามารถทำได้ 4 แบบ ได้แก่

- 1) Doernenberg Ratio Method
- 2) Roger's Ratio Method
- 3) Duval Triangle
- 4) Keys Gas

2.6.2 การประเมินอายุที่เหลืออยู่ โดยวิธี Furan Compound

2.6.3 การตรวจคุณลักษณะ แบ่งออกเป็น

- 1) ตรวจความชื้นในหม้อแปลง (Moisture content)
- 2) ตรวจความเป็นกรด (acidity)
- 3) ตรวจค่าความเป็นฉนวนในสายไฟ (Tan Delta Test)
- 4) การตรวจสอบค่า Interfacial Tension (IFT)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานวิจัยเพื่อการสื่อสารเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีการนำใบเสนอราคาไปใช้

- 5) การทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมัน (Dielectric Strength) ครั้งที่มีการนำไปใช้
- 6) ตรวจสอบสีของน้ำมัน (Color)

## 2.7 คราฟ เปเปอร์ และ เพรส บอร์ด (Kraft Paper and Press Board)

เป็นกระดาษฉนวนที่กั้นอยู่ระหว่างขดลวดภายในตัวถังหม้อแปลงไฟฟ้า มีโครงสร้างทางเคมีเป็น เซลลูโลส (Cellulose) โดย Kraft paper จะเป็นกระดาษบาง ส่วน Press board เป็นกระดาษอัดซึ่งมีความหนา



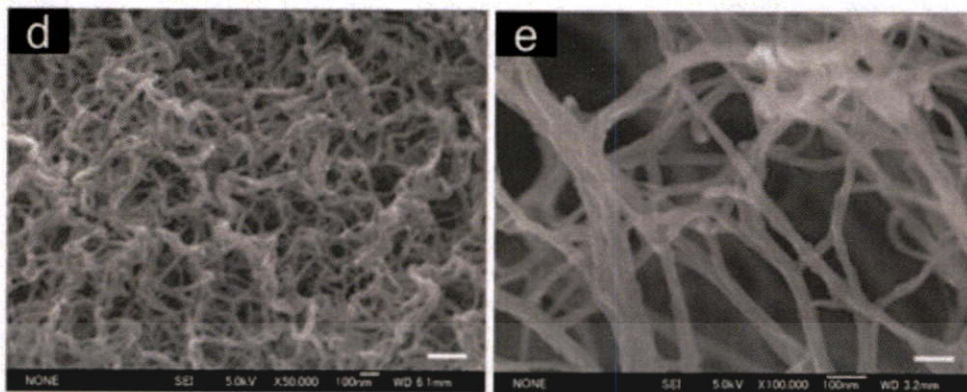
รูปที่ 2.8 คราฟ เปเปอร์ (Kraft Paper)



รูปที่ 2.9 เพรส บอร์ด (Press Board)

เนื่องจากกระดาษฉนวนมีโครงสร้างทางเคมีเป็นเซลลูโลส ซึ่งเป็น เส้นใยธรรมชาติ (Organic fiber) ซ้อนทับกันไปมาทำให้มีลักษณะเป็นรูพรุน รูพรุนดังกล่าวนี้ทำให้เนื้อเซลลูโลส สามารถดูดซับความชื้นได้ดี (Hygroscopic material)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้






รูปที่ 2.10 เส้นใยธรรมชาติ (Organic fiber)

ไฟเบอร์ (Fiber) แต่ละเส้นในเซลลูโลส จะประกอบด้วยโพลิเมอร์ เรียงตัวขนานกัน โดยโพลิเมอร์แต่ละเส้นที่ขนานกันจะยึดติดกันด้วยไฮโดรเจน เมื่อโมเลกุลของน้ำสัมผัสกับผิวหน้าของเซลลูโลสไฟเบอร์ (Cellulose Fiber) จะทำให้เกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างอะตอมออกซิเจนกับไฮโดรเจน ทำให้กระดาษฉนวนสามารถดูดซับความชื้นได้ดี

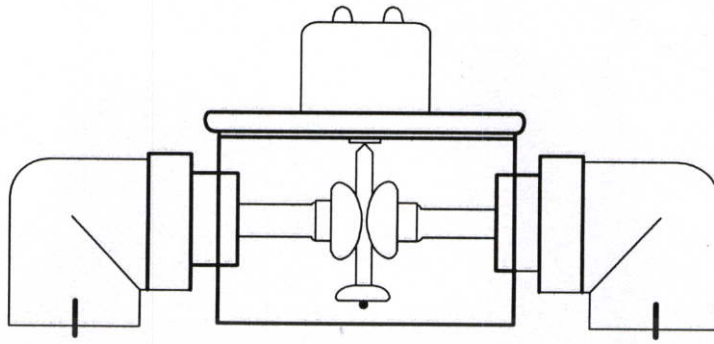
## 2.8 การทดสอบเบรคดาวน์น้ำมัน [3]

เป็นการทดสอบที่บอกถึงสารเจือปน ในน้ำมัน เช่น น้ำ, ผุ่นละออง ความสกปรกต่างๆ โดยน้ำมันที่มีความสกปรกปะปนอยู่มากจะมีค่าเบรคดาวน์ต่ำ น้ำมันที่สะอาดหรือผ่านการกรองมาใหม่ๆ จะมีค่าเบรคดาวน์สูง โดยปกติทดสอบทุก 6 เดือน สำหรับหม้อแปลงที่มีความสำคัญมาก และทุก 1 ปี สำหรับหม้อแปลงปกติ ในการทดสอบนั้นเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60156 หรือ ASTM D877, ASTM D1816

### ตารางที่ 2.4 รูปทรงแท่งอิเล็กโทรดที่ใช้ทดสอบตามมาตรฐาน

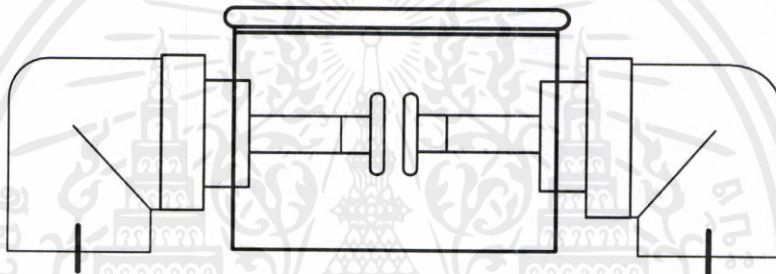
Item	Description
Electrode pair for ASTM D1816/IEC 156	
Electrode pair for ASTM D877	
Electrode pair for IEC 156	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



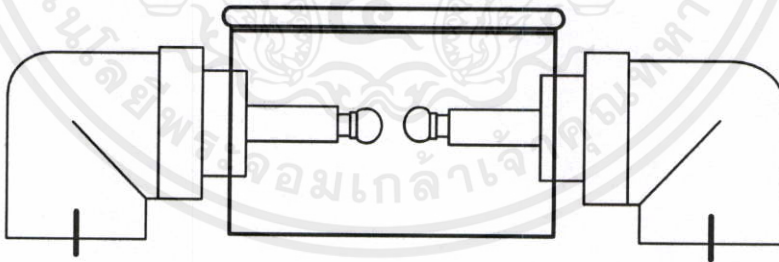
รูปที่ 2.11 แบบจำลองเครื่องทดสอบโดยใช้แท่งอิเล็กโทรดครึ่งทรงกลม

- ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดทางด้านแรงสูงและกราวด์ 1 มิลลิเมตร หรือ 2 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.12 แบบจำลองเครื่องทดสอบโดยใช้แท่งอิเล็กโทรดครึ่งทรงกระบอก

- ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดทางด้านแรงสูงและกราวด์ 2.54 มิลลิเมตร/ 0.1 นิ้ว



รูปที่ 2.13 แบบจำลองเครื่องทดสอบโดยใช้แท่งอิเล็กโทรดทรงกลม

- ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดทางด้านแรงสูงและกราวด์ 2.5 มิลลิเมตร
- Magnetic Stirrer
- Lifting Stick For Magnetic Stirrer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 มาตรฐานการทดสอบน้ำมัน IEC 60156

Equipment Voltage	≤72.5 kV	>72.5 kV ≤170 kV	>270 kV
Good kV	>40	>50	>60
Fair kV	30-40	40-50	50-60
Poor kV	<30	<30	<60

ตารางที่ 2.6 มาตรฐานการทดสอบน้ำมัน ASTM D877

Equipment Voltage	Breakdown Voltage
Good kV	≥30 kV
Fair kV	<29 kV >25 kV
Poor kV	<25 kV



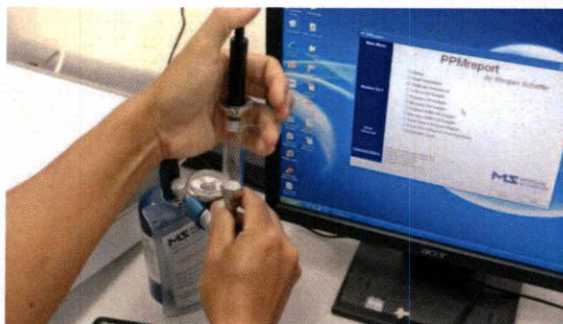
รูปที่ 2.14 เครื่องทดสอบเบรคดาวน์ฉนวนน้ำมัน

## 2.9 ขั้นตอนการทดสอบน้ำมันหม้อแปลงด้วยวิธี Keys Gas จากห้องทดสอบบริษัทเอกรัฐหม้อแปลง

1) ทำการสอบเทียบเครื่องโดยการดูแก๊สมาตรฐานจากขวดบรรจุแก๊สมาตรฐานใส่หลอดบรรจุแก๊ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 ดูดแก๊สมาตรฐานจากขวดบรรจุแก๊สมาตรฐานใส่หลอดบรรจุแก๊ส

Gas	Snake Test® Concentration (ppm)
Hydrogen (H <sub>2</sub> )	306
Methane (CH <sub>4</sub> )	1014
Carbon monoxide (CO)	448
Carbon dioxide (CO <sub>2</sub> )	2345
Ethylene (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	3471
Ethane (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	4986
Acetylene (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	2454
Oxygen (O <sub>2</sub> )	55709
Nitrogen (N <sub>2</sub> )	147868

รูปที่ 2.16 ขวดบรรจุแก๊สมาตรฐาน

2) นำแก๊สมาตรฐานที่ดูดไว้ในหลอดทดลองใส่เข้าไปในเครื่อง MYRKOS Portable DGA Micro GC



รูปที่ 2.17 บรรจุแก๊สนำแก๊สมาตรฐานที่ดูดไว้ในหลอดทดลองใส่เข้าไปในเครื่องทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



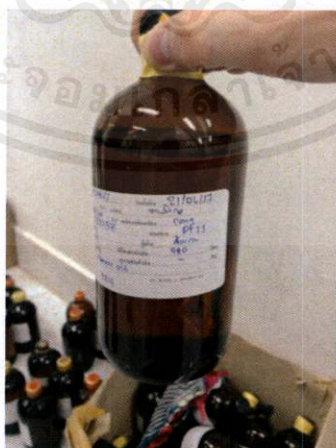
รูปที่ 2.18 เครื่อง MYRKOS Portable DGA Micro GC

3) นำน้ำมันที่จะทำการทดสอบดูใส่หลอดทดลอง



รูปที่ 2.19 หลอดทดลองที่ใช้บรรจุตัวอย่างน้ำมัน

รูปที่ 2.20 ดูตัวอย่างน้ำมันใส่หลอดทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 2.21 ตัวอย่างน้ำมันที่จะทำการทดสอบ  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) บรรจุแก๊สฮีเลียมในหลอดทดลองที่บรรจุน้ำมันทดสอบอยู่ เพื่อให้เกิดช่องว่างให้แก๊สที่เจือปนอยู่ในน้ำมัน สามารถแตกตัวออกมาในพื้นที่ว่างของหลอดทดลอง ใช้แก๊สฮีเลียมเนื่องจากเป็นแก๊สหมู่ VIII (แก๊สเฉื่อย) ไม่ทำปฏิกิริยาใดๆกับแก๊สที่ต้องการใช้ทดสอบ



รูปที่ 2.22 ดูดแก๊สฮีเลียมเข้าไปในหลอดทดลองจนเต็มพื้นที่ที่เหลือของหลอดทดลอง

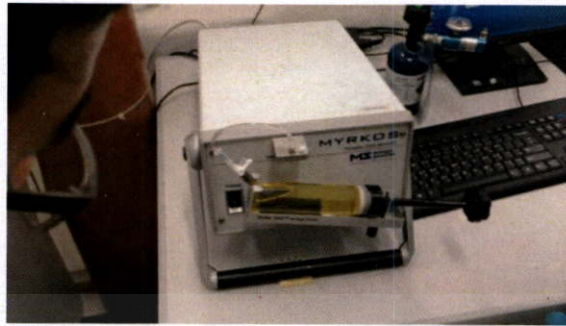
5) ทำการเขย่าตัวอย่างน้ำมันในหลอดทดลองโดยเครื่องเขย่า เพื่อให้แก๊สที่เจือปนอยู่ในน้ำมันแตกตัวออกมาในพื้นที่ว่างของหลอดทดลอง



รูปที่ 2.23 นำหลอดทดลองใส่เครื่องเขย่า

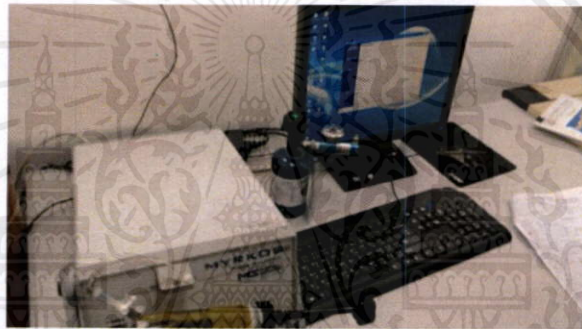
6) นำหลอดทดลองที่เขย่าแล้วเข้าเครื่อง MYRKOS Portable DGA Micro GC เพื่อวัดค่าปริมาณแก๊สที่เจือปนอยู่ในน้ำมัน (ppm)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุคัดค้านเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 นำหลอดทดลองที่เขย่าแล้วเข้าเครื่องทดสอบ

### 7) รอเครื่องทำการวิเคราะห์ และสรุปผล



รูปที่ 2.25 เครื่องทดสอบกำลังทำการวิเคราะห์ และสรุปผล

### 2.10 Dissolved Gas Analysis โดยวิธี Doernenberg Ratio Method [4]

อัตราส่วนที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์วิธี Doernenberg Ratio Method และ Roger's Ratio Method

- Ratio 1 (R1) =  $\text{CH}_4/\text{H}_2$
- Ratio 2 (R2) =  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$
- Ratio 3 (R3) =  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{CH}_4$
- Ratio 4 (R4) =  $\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_2\text{H}_2$
- Ratio 5 (R5) =  $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$

การวิเคราะห์ด้วยวิธี Doernenberg Ratio Method นั้นมีความผิดปกติทั่วไปอยู่ 3 ประเภท คือความผิดปกติด้านอุณหภูมิจากการสลายตัว, ความผิดปกติที่เกิดโดยโคโรน่า (การดิสชาร์จบางส่วนที่พลังงานต่ำ) และ ความผิดปกติโดยการอาร์คชิ่ง (การดิสชาร์จบางส่วนที่พลังงานสูง) โดยวิธีการนี้อาศัยอัตราส่วนของความเข้มข้น R1, R2, R3 และ R4 โดยค่าความเข้มข้นของแก๊สแต่ละชนิดจะถูกเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้น L1 ตามตารางที่ 2.7 ซึ่งเป็นการระบุให้แน่ชัดว่าระบบนั้นเกิดความผิดปกติจริง

ตารางที่ 2.7 ความเข้มข้นของแก๊ส

ชนิดของแก๊ส	ความเข้มข้น L1 (ppm)
H <sub>2</sub> , ไฮโดรเจน	100
CH <sub>4</sub> , มีเทน	120
CO, คาร์บอนมอนอกไซด์	350
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , อะเซทิลีน	35
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , เอทิลีน	50
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , อีเทน	65

จากนั้นจึงนำอัตราส่วน R1, R2, R3 และ R4 มาทำการเปรียบเทียบกับตารางที่ 2.8 เพื่อระบุความผิดปกติที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงว่าเป็นประเภทใดโดยจะแบ่งอัตราส่วนของแก๊สที่ได้เป็นแก๊สที่เกิดอยู่ในน้ำมันและแก๊สที่เกิดในช่องว่างอากาศ ซึ่งวิธีการนี้จำเป็นจะต้องมีค่าระดับความเข้มข้นของแก๊สสูงจึงจะสามารถให้การแปลผลที่ถูกต้องได้

ตารางที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Doernenberg และความผิดปกติ

ความผิดปกติ จากการ วินิจฉัย	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>		R3 C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub>		R4 C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	
	น้ำมัน	ช่อง อากาศ	น้ำมัน	ช่อง อากาศ	น้ำมัน	ช่อง อากาศ	น้ำมัน	ช่อง อากาศ
	1. อุณหภูมิ จากการ สลายตัว	>1.0	>1.0	<0.75	<1.0	<0.3	<0.1	>0.4
2. ความ ผิดปกติโดยโค โรน่า	<0.1	<0.01	ไม่สามารถระบุได้		<0.3	<0.1	>0.4	>0.2
3. ความ ผิดปกติโดย การอาร์คซึ่ง	>0.1 ถึง <1.0	>0.01 ถึง <0.1	>0.75	>1.0	>0.3	>0.1	<0.4	<0.2

### 2.11 Dissolved Gas Analysis โดยวิธี Roger's Ratio Method

การวิเคราะห์ด้วยวิธี Roger's Ratio Method นั้นจะใช้กระบวนการวิเคราะห์เดียวกันกับ Doernenberg Ratio Method เพียงแต่อาศัยอัตราส่วนความเข้มข้นแก๊ส R1, R2 และ R5 แทนซึ่ง Rogers Ratio Method ไม่จำเป็นต้องอาศัยความเข้มข้นของแก๊สใดๆ แต่ควรใช้วิธีการนี้ในกรณีที่มีแก๊สบางตัวสูงเกินกว่าปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Roger's และความผิดปกติ

กรณี	R2 C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	R1 CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>	R5 C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	ความผิดปกติจากการ วินิจฉัย
0	<0.1	>0.1 ถึง <1.0	<1.0	ปกติ
1	<0.1	<0.1	<1.0	ดิสซาร์จพลังงานต่ำ
2	0.1 ถึง 3.0	0.1 ถึง 1.0	>3.0	ดิสซาร์จพลังงานสูง
3	<0.1	>1.0 ถึง <1.0	1.0 ถึง 3.0	อุณหภูมิต่ำ
4	<0.1	>1.0	1.0 ถึง 3.0	อุณหภูมิ <700°C
5	<0.1	>1.0	>3.0	อุณหภูมิ >700°C

### 2.12 Dissolved Gas Analysis โดยวิธี Duval Triangle [5]

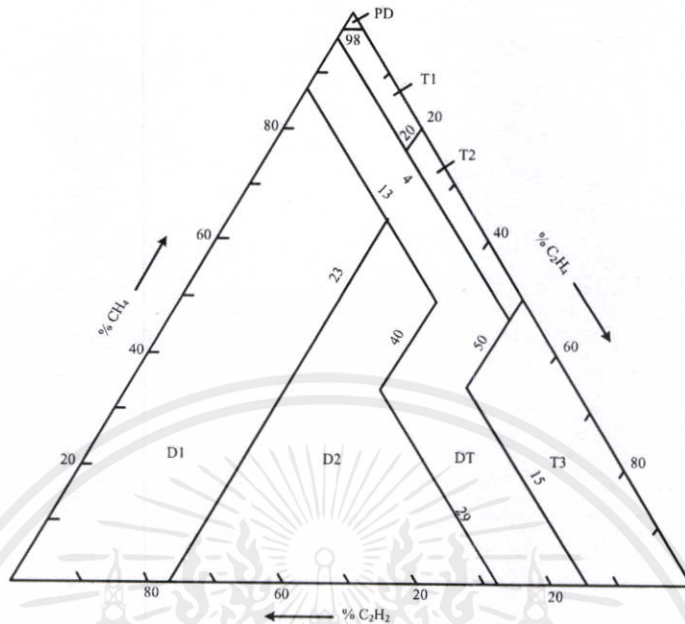
การวิเคราะห์การทดสอบด้วย Duval Triangle เป็นวิธีที่ยอมรับและนิยามกันอย่างกว้างขวาง เพราะมีความแม่นยำ และเชื่อถือได้ สามารถสื่อถึงสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ อีกทั้งยังตรวจจับความผิดปกติเริ่มแรกของหม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพถูกต้อง และแม่นยำสูง เมื่อแยกแก๊สออกมาจากน้ำมัน จะพบว่าแก๊สทั้งหมด 7 ชนิด ได้แก่ มีเทน (CH<sub>4</sub>), อีเทน (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), เอทิลีน (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), อะเซทิลีน (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>), ไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) โดยวิธี Duval Triangle จะใช้แก๊สเพียง 3 ชนิดในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ คือ อะเซทิลีนบอถึงการอาร์ค, เอทิลีนบอถึงความร้อนที่เกิดขึ้น และ มีเทนบอถึงการเกิดประกายไฟซึ่งแก๊สทั้ง 3 ตัวจะบ่งบอถึงสภาพปกติหรือผิดปกติของน้ำมันในตัวถังหม้อแปลง ได้จากการคำนวณตามสมการ 2.11, 2.12 และ 2.13 เพื่อนำไปพล็อตจุดบนสามเหลี่ยม

$$C_2H_2 = \frac{100X}{X+Y+Z} \quad (2.11)$$

$$C_2H_4 = \frac{100Y}{X+Y+Z} \quad (2.12)$$

$$CH_4 = \frac{100Z}{X+Y+Z} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 Classical Duval Triangle

จากรูปที่ 2.25 สามเหลี่ยม Classical Duval Triangle ประกอบด้วย 6 โซน ซึ่งในแต่ละโซนจะบ่งบอกถึงสภาพน้ำมันภายในตัวถังหม้อแปลง แสดงดังตารางที่ 2.10 ซึ่งความหมายของแต่ละโซนจะบ่งบอกสภาพน้ำมันว่ามีลักษณะเป็นอย่างไร มีสภาพผิดปกติหรือไม่ ทำให้ทราบสภาพเบื้องต้นของน้ำมันหม้อแปลงภายใน

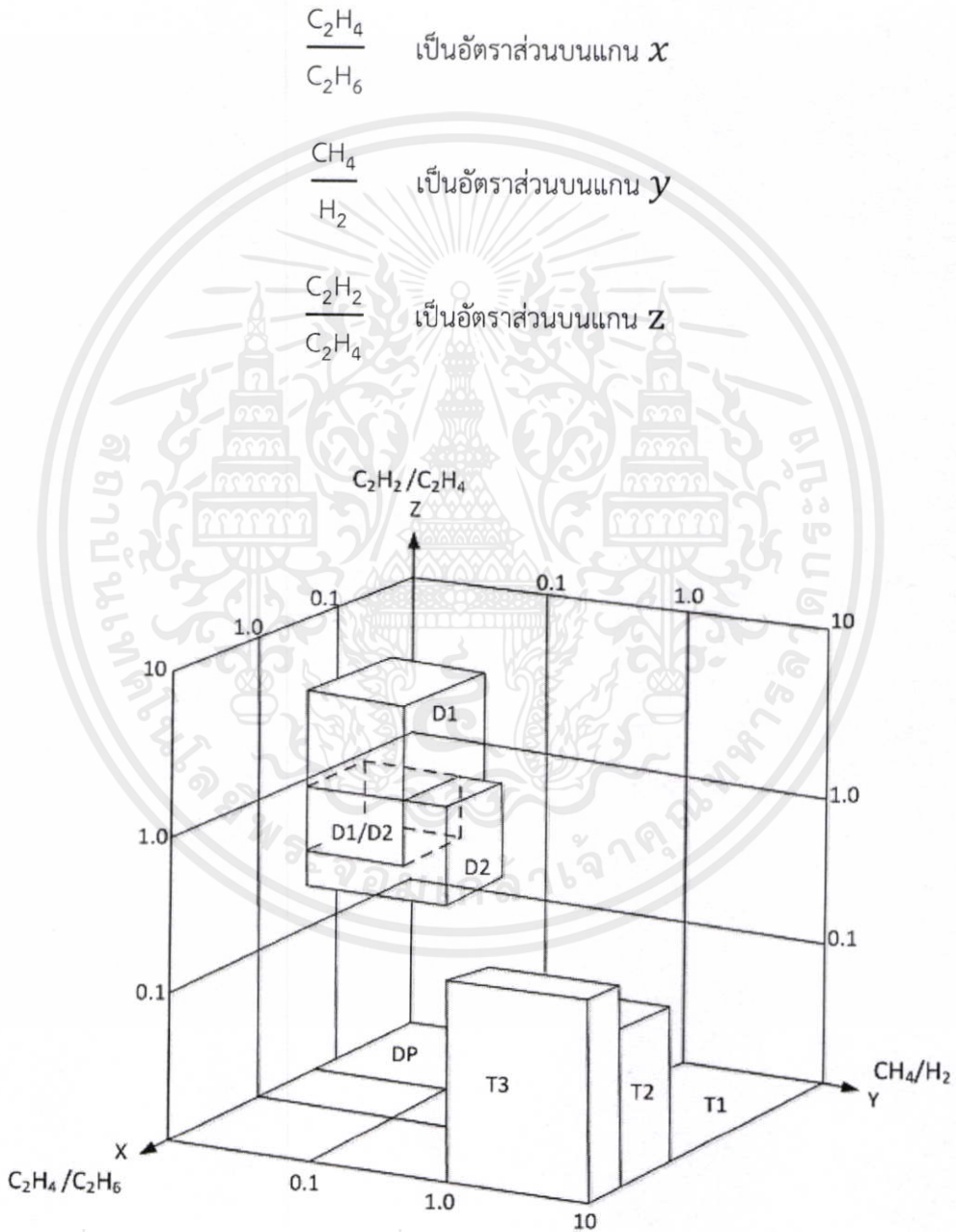
ตารางที่ 2.10 พื้นที่และความหมายของ Classical Duval Triangle

โซน	ความหมาย
PD	ดิสชาร์จบางส่วน
D1	การดิสชาร์จพลังงานต่ำ
D2	การดิสชาร์จพลังงานสูง
DT	พอลต์ผสมระหว่างไฟฟ้ากับความร้อน
T1	ปัญหาความร้อน อุณหภูมิต่ำกว่า 300°C
T2	ปัญหาความร้อน อุณหภูมิ 300-700°C
T3	ปัญหาความร้อน อุณหภูมิสูงกว่า 700°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.13 Dissolved Gas Analysis โดยวิธี IEC Ratio

การวิเคราะห์การทดสอบด้วยวิธี IEC Ratio นั้นจะวิเคราะห์คล้ายกับวิธี Duval Triangle โดยจะใช้แก๊ส 5 ชนิดในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ คือ อะเซทิลีน, เอทิลีน, มีเทน, อีเทน และ ไฮโดรเจน โดยนำแก๊สทั้ง 5 ชนิดนั้นมาทำเป็นอัตราส่วนลงในแกน 3 มิติ บนสเกลล็อกกาลิธึม ซึ่ง จุดตัดของอัตราส่วนเหล่านี้จะบ่งบอกถึงสภาพปกติหรือผิดปกติของน้ำมันในตัวถังหม้อแปลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 2.27 IEC Ratio  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.26 IEC Ratio ประกอบด้วย 6 โชน ซึ่งในแต่ละโชนนั้นแสดงในรูปแบบสามมิติ จะบ่งบอกถึงสภาพน้ำมันภายในตัวถังหม้อแปลง แสดงดังตารางที่ 2.11 ซึ่งแสดงขอบเขตของอัตราส่วนแก๊สที่ทำให้เกิดความผิดปกติและความหมายของแต่ละโชนว่ามีลักษณะสภาพน้ำมันเป็นอย่างไร มีสภาพผิดปกติหรือไม่ ทำให้ทราบสภาพเบื้องต้นของน้ำมันหม้อแปลงภายใน

ตาราง 2.11 ตารางการแปลความหมาย IEC Ratio

กรณี	ลักษณะความผิดปกติ	CH <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
PD	Partial Discharges (ดูหมายเหตุ 3 และ 4)	NS <sup>1)</sup>	<0.1	<0.2
D1	Discharges พลังงานต่ำ	>1	0.1 - 0.5	>1
D2	Discharges พลังงานสูง	0.6 - 2.5	0.1 - 1	>2
T1	Thermal fault อุณหภูมิต่ำกว่า 300 °C	NS <sup>1)</sup>	>1 แต่ NS <sup>1)</sup>	<1
T2	Thermal fault อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 300 °C และ 700 °C	<0.1	>1	1 - 4
T3	Thermal fault อุณหภูมิสูงกว่า 700 °C	<0.2 <sup>2)</sup>	>1	>4
<p>หมายเหตุ 1 : ในบางประเทศ จะใช้ C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> มากกว่า CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> และในบางประเทศอาจใช้อัตราส่วนอื่นต่างจากนี้</p> <p>หมายเหตุ 2 : แก๊สที่อยู่ด้านบนในอัตราส่วนนั้นมีความสำคัญมาก และ อาจถูกคำนวณโดยเฉพาะ</p> <p>หมายเหตุ 3 : CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> &lt; 0.2 สำหรับการ Partial Discharges ในเครื่องตรวจวัดหม้อแปลง, CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> &lt; 0.07 สำหรับ Partial Discharge ใน Bushings</p> <p>หมายเหตุ 4 : รูปแบบการสลายตัวของแก๊สคล้ายกับการเกิด Partial Discharges โดยผลของการสลายตัวของแก๊สที่ได้จาก thin oil film ระหว่าง Overheated Core Laminates ที่อุณหภูมิ 140 °C หรือสูงกว่า</p>				
<p><sup>1)</sup> NS หมายถึง ค่าที่ไม่สำคัญ เป็นค่าใดๆก็ได้</p> <p><sup>2)</sup> ค่าที่เพิ่มขึ้นจากผลรวมของ C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> อาจบ่งบอกจุดอุณหภูมิ hot spot ที่สูงกว่า 1000 °C</p>				

#### 2.14 Dissolved Gas Analysis โดยวิธี Keys Gas ตาม มาตรฐาน ASTM D3612

การวิเคราะห์ด้วยวิธี Keys Gas เป็นอีกหนึ่งวิธีที่มีประสิทธิภาพ ถูกต้อง และแม่นยำสูงอีกวิธีหนึ่ง หลังจากแยกแก๊สออกจากน้ำมัน นำน้ำมันตัวอย่างไปวิเคราะห์ผ่านเครื่องวัดปริมาณแก๊ส จะผลที่ได้ออกมาเป็นแก๊สทั้ง 7 ชนิดเช่นเดียวกับวิธี Duval Triangle ในหน่วย ppm และนำค่าที่ได้วิเคราะห์ตาม มาตรฐาน ASTM D3612 ดังแสดงในตารางที่ 2.12 หากแก๊สที่วัดได้มีปริมาณเกินมาตรฐานที่คำนวณ 5 - 10 เท่า (ในทางปฏิบัติ 2 เท่า) แสดงว่ากำลังเกิดปัญหาต่างๆดังแสดงในตารางที่ 2.13

ตารางที่ 2.12 ชนิดแก๊สและความเข้มข้นตามมาตรฐาน ASTM D3612

แก๊ส	ความเข้มข้น (ppm)
H <sub>2</sub> , ไฮโดรเจน	2n + 50
CH <sub>4</sub> , มีเทน	2n + 50
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , เอทิลีน	2n + 50
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , อีเทน	2n + 50
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , อะเซทิลีน	5n + 10
CO, คาร์บอนมอนอกไซด์	25n + 500
CO <sub>2</sub> , คาร์บอนไดออกไซด์	100n + 1500

โดยที่ n เป็นจำนวนปีที่ใช้งาน

ตารางที่ 2.13 ปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อปริมาณแก๊สเกินมาตรฐานที่คำนวณได้ตามมาตรฐาน ASTM D3612

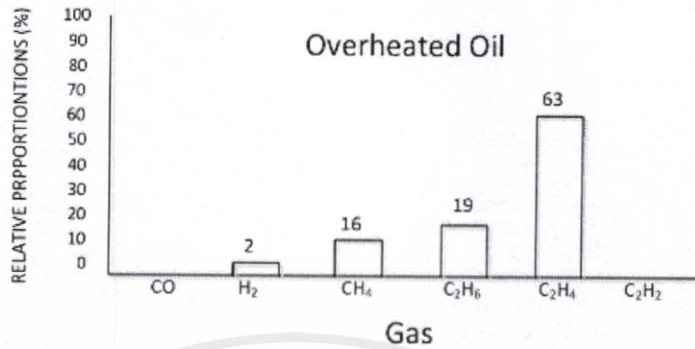
ปัญหาด้านความร้อน (Thermal Heating)	น้ำมัน	อุณหภูมิต่ำ : CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> อุณหภูมิสูง : C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> (CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )
	เซลลูโลส	อุณหภูมิต่ำ : CO <sub>2</sub> (CO) อุณหภูมิสูง : CO (CO <sub>2</sub> )
ดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge)	น้ำมัน	H <sub>2</sub>
	เซลลูโลส	H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CO
อาร์คซิง (Arcing)		H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )

\*หมายเหตุ ใน () คือแก๊สที่อาจตรวจพบได้เล็กน้อย

### 2.15 Dissolved Gas Analysis โดยวิธี Keys Gas ตาม มาตรฐาน IEEE Std C57.104-2008

วิธีการนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำมันแต่ละชนิดรวมถึงแก๊สที่เกิดจากการแตกตัวของเซลลูโลส ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ใช้สำหรับการคำนวณหาฟอลต์แต่ละชนิดจากแก๊สที่เกิดขึ้น ในสภาวะอุณหภูมิแตกต่างกัน โดยแก๊สที่ระบุได้เหล่านี้เรียกว่า “keys gas” จากรูปที่ 2.27 ถึงรูปที่ 2.30 ที่แสดงผลของ “key gases” ในแต่ละรูปแบบและเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของฟอลต์พื้นฐานทั้งสี่ประเภท โดยฟอลต์แต่ละชนิดจะแปลผลจากแก๊สที่เกิดขึ้นในปริมาณมากที่สุด

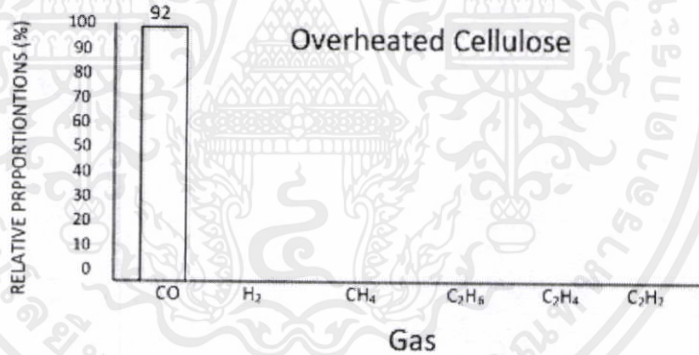
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.28 ความผิดปกติแบบ Overheated Oil

### 2.15.1 เกิดความร้อนสูงที่น้ำมัน (Overheated Oil)

เกิดความร้อนสูงที่น้ำมันจะเกิดการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอนทำให้เกิดแก๊สเอทิลีนในปริมาณมาก แต่จะเกิดแก๊สมีเทน, ไฮโดรเจน และอีเทน ในปริมาณน้อยๆ อาจมีการก่อตัวของอะเซทิลีน เมื่อเกิดฟอลต์ หรือจากหน้าสัมผัสทางไฟฟ้า แก๊สหลัก คือ เอทิลีน

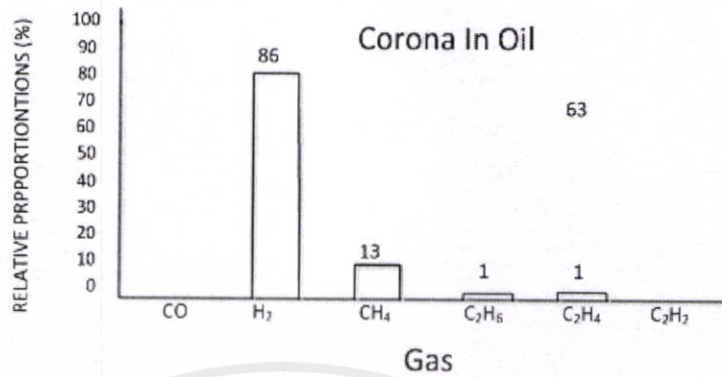


รูปที่ 2.29 ความผิดปกติแบบ Overheated Cellulose

### 2.15.2 เกิดความร้อนสูงที่เซลลูโลส (Overheated Cellulose)

เกิดความร้อนสูงที่เซลลูโลสจะเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ปริมาณมาก และเพิ่มขึ้นจากการที่เซลลูโลสเกิดความร้อนสูง ซึ่งแก๊สไฮโดรคาร์บอน เช่น มีเทน และเอทิลีน จะเกิดการก่อตัวเมื่อฟอลต์นั้นมาจากอุปกรณ์ที่แช่อยู่ในน้ำมัน แก๊สหลัก คือ คาร์บอนมอนอกไซด์

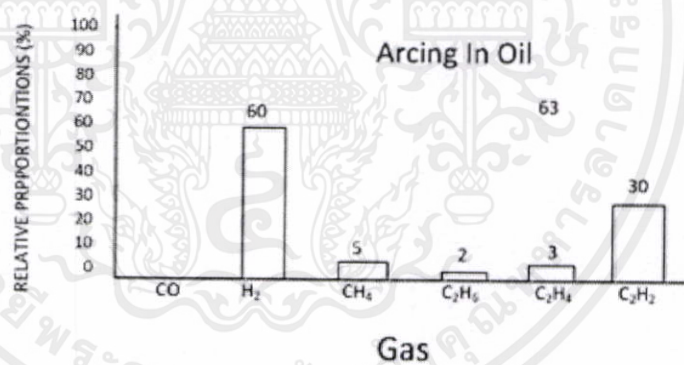
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.30 ความผิดปกติแบบ Corona In Oil

### 2.15.3 การดิสชาร์จพลังงานต่ำ (Corona In Oil)

การดิสชาร์จพลังงานต่ำซึ่งจะทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนปริมาณมาก แต่จะเกิดแก๊สมีเทน, อีเทน และเอทิลีนในปริมาณน้อย ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้กับปริมาณรวมของคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีผลมาจากการดิสชาร์จในเซลลูโลส แก๊สหลัก คือ ไฮโดรเจน



รูปที่ 2.31 ความผิดปกติแบบ Arcing In Oil

### 2.15.4 การดิสชาร์จพลังงานสูง (Arcing In Oil)

การดิสชาร์จพลังงานสูงซึ่งจะทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจน และอะเซทิลีนปริมาณมาก แต่จะเกิดแก๊สมีเทน และเอทิลีนปริมาณน้อย คาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์อาจจะเกิดขึ้นโดยพลตที่มาจากเซลลูโลส แก๊สหลัก คือ อะเซทิลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3 การออกแบบโปรแกรม

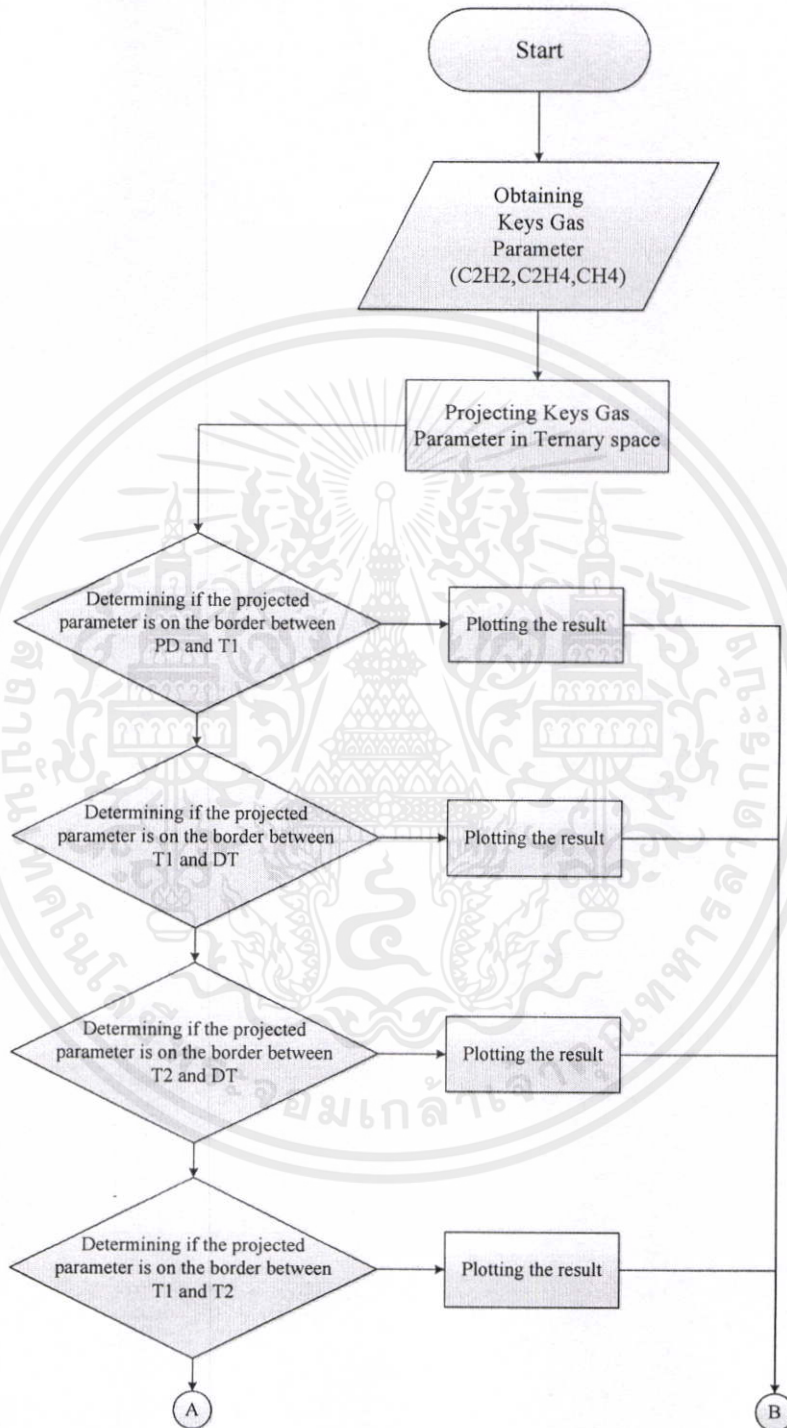
ในการออกแบบโปรแกรมที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ผลการทดสอบน้ำมันหม้อแปลงตามมาตรฐาน IEC 60599 และ IEEE std.C57-2008 นักศึกษาใช้โปรแกรม MATLAB ในการออกแบบและเขียนโปรแกรม โดยเขียนคำสั่งใน M-file และเรียกใช้คำสั่ง (Function) จาก Command Window สำหรับโปรแกรมที่แสดงผลเป็นกราฟ โปรแกรมจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนการคำนวณและส่วนการแสดงผล สำหรับโปรแกรมที่ไม่มีส่วนแสดงผลเป็นกราฟ จะแสดงผลออกมาใน Command Window

#### 3.1 การออกแบบโปรแกรม Duval Triangle

เริ่มจากการรับค่าปริมาณแก๊สมา 3 แก๊ส ได้แก่ อะเซทิลีน, เอทิลีน, มีเทน จากนั้นนำค่าทั้ง 3 มาทำเป็นเปอร์เซ็นต์ที่จะนำค่าที่ได้มาคำนวณหาจุดตกบนแกน Ternary หรือกราฟ Duval Triangle นั้นเอง จากนั้นคำนวณเงื่อนไขแรกว่าจุดตกที่คำนวณได้นั้น อยู่บนเส้นแบ่งโซนบนกราฟ Duval Triangle หรือไม่ ถ้าอยู่บนเส้นแบ่งโซน ให้แสดงผลเป็นชื่อโซนที่ถูกแบ่งอยู่ระหว่างเส้นทั้งสองโซนหรือเงื่อนไขที่สองคือจุดตกที่คำนวณได้นั้นอยู่ในโซนที่แบ่งไว้หรือไม่ ถ้าอยู่ ให้ทำการแสดงผลตามชื่อโซนที่กำหนดไว้ ในการออกแบบ Duval Triangle นั้น เนื่องจากโปรแกรม MATLAB จะอ้างอิงตามแกน X,Y,Z ทำให้ไม่สามารถแสดงผลหรือคำนวณจุดตกได้ ต้องทำการแปลงแกนจาก X,Y,Z ไปสู่แกนรูป 3 เหลี่ยมไปเก็บไว้ในตัวแปร 3 ค่า (ในที่นี้ใช้ fA, fB, fC) จากนั้นจึงจะสามารถแบ่งโซนตามมาตรฐานได้ และในส่วนของการแสดงผลการพล็อต ในทำนองเดียวกัน ต้องทำการแปลงคู่อันดับจาก X,Y ไปเป็นคู่อันดับตามแนวแกนรูปสามเหลี่ยมที่เก็บไว้ในตัวแปร 3 ค่าที่ได้กล่าวมาข้างต้น จากนั้นนำฟังก์ชันการพล็อตที่สามารถพล็อตจุดบน Duval Triangle ได้แล้ว ไปทำการพล็อตโซนต่างๆ และพล็อตจุดตก

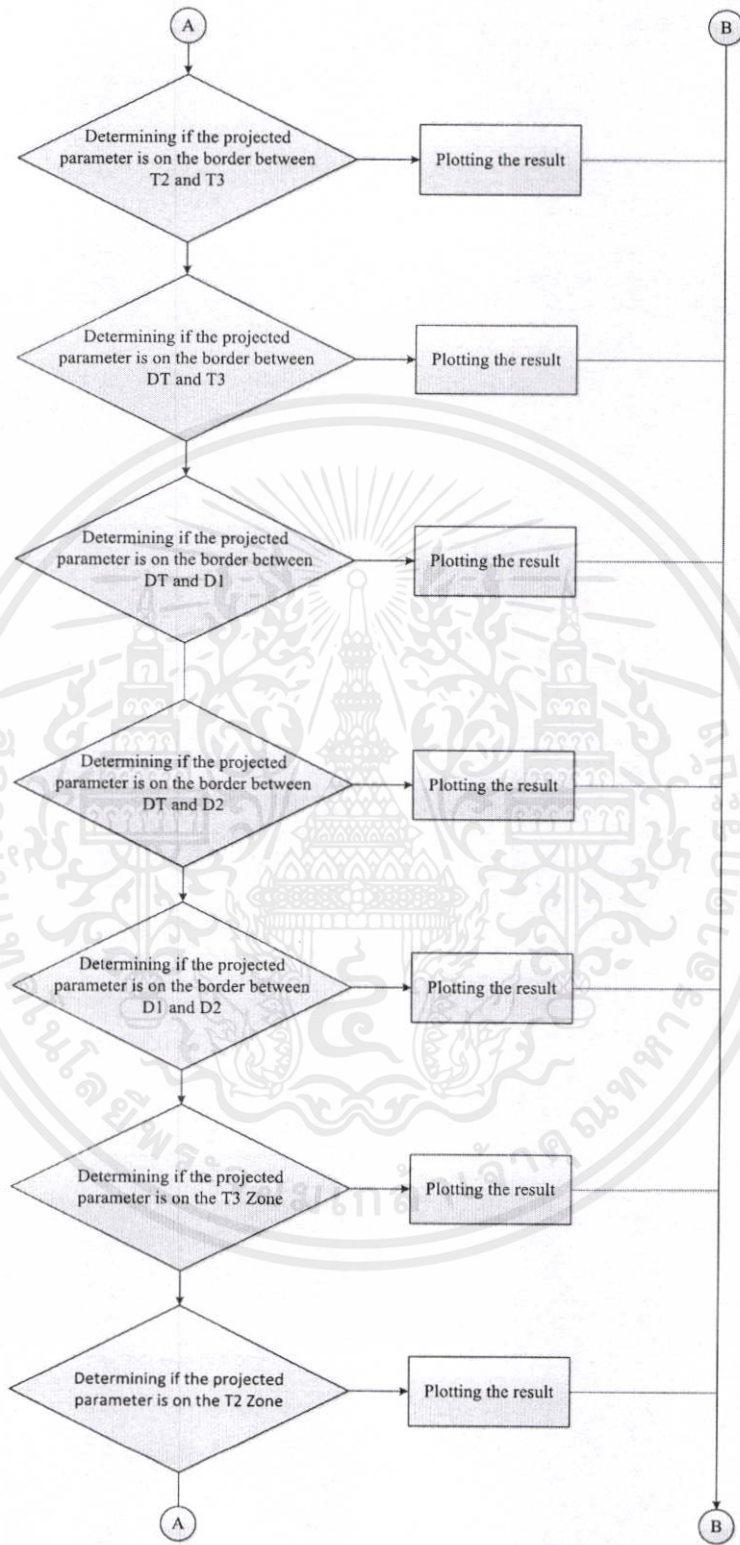
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.1 แผนภาพการทำงานของโปรแกรม Duval Triangle

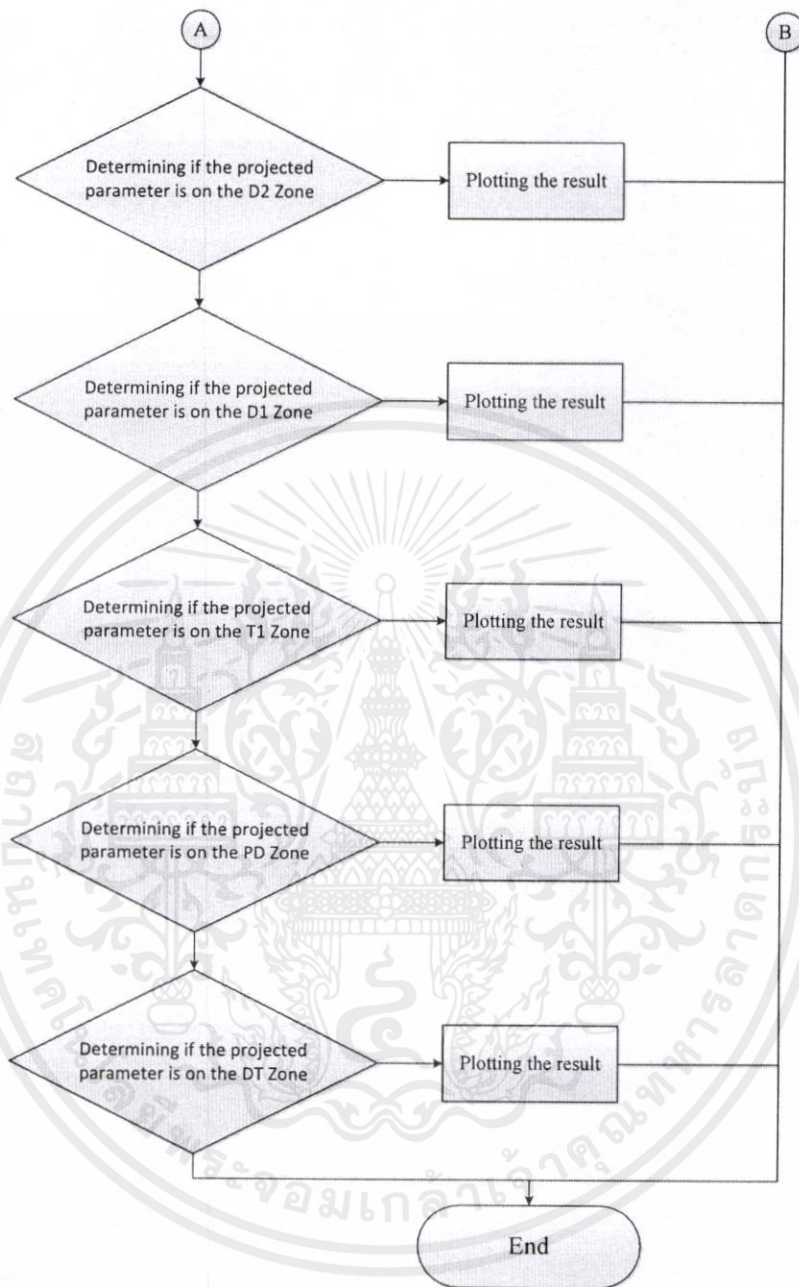


รูปที่ 3.1 Flow Chart โปรแกรม Duval Triangle ที่นักศึกษาคิดค้นขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ส่วนบุคคลเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.1 Flow Chart โปรแกรม Duval Triangle ที่นักศึกษาคิดค้นขึ้น(ต่อ)  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงนิตยสารหรือสิ่งพิมพ์ใดๆที่มุ่งหวังการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 Flow Chart โปรแกรม Duval Triangle ที่นักศึกษาคิดค้นขึ้น(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

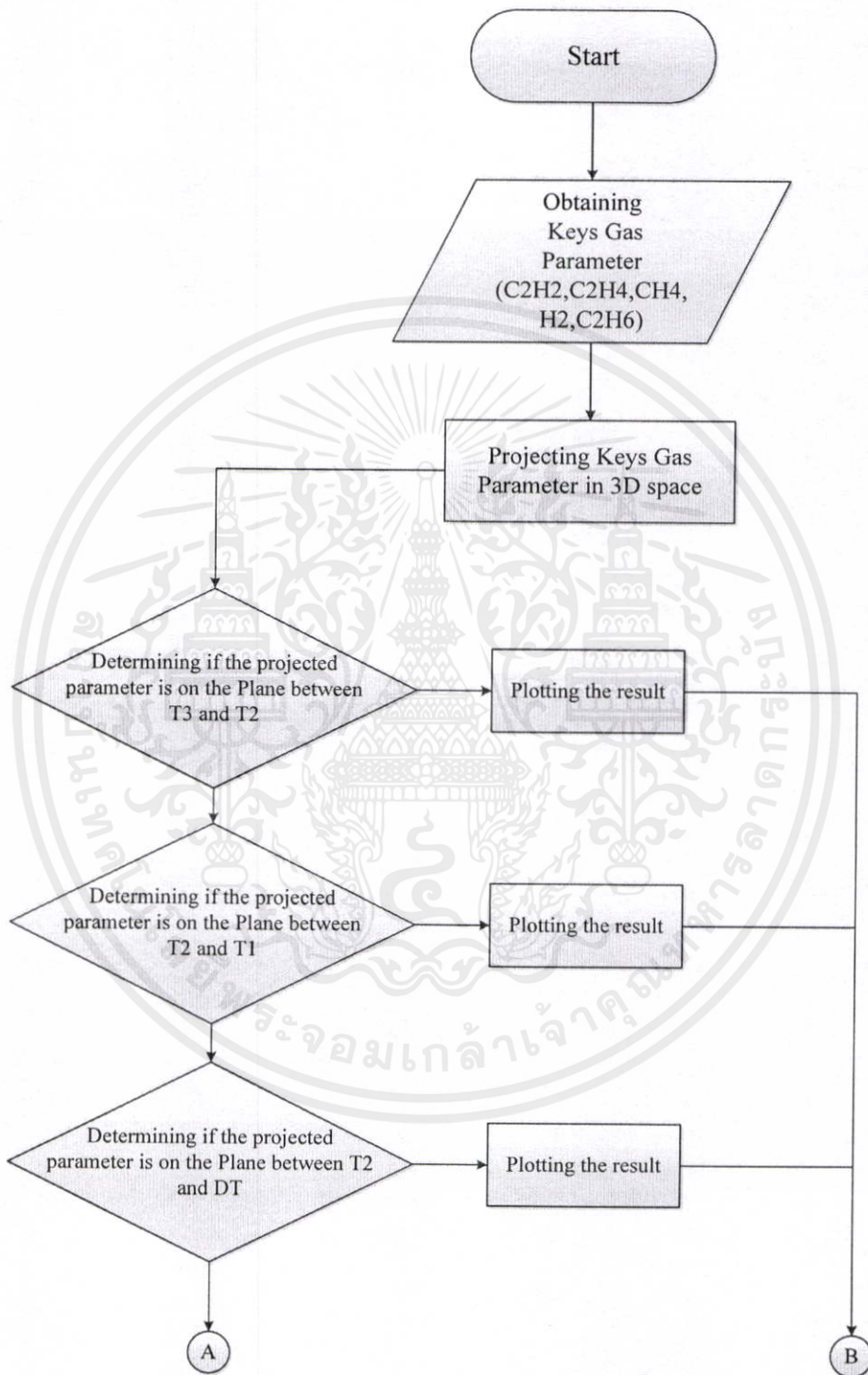
### 3.2 การออกแบบโปรแกรม IEC Ratio

เริ่มจากการรับค่าปริมาณแก๊สมา 5 แก๊ส ได้แก่ อะเซทิลีน, เอทิลีน, มีเทน, อีเทน และ ไฮโดรเจน จากนั้นนำค่าทั้ง 5 มาทำเป็นอัตราส่วนเพื่อนำไปพล็อตบนแกน X,Y,Z โดยแกน X คือ อัตราส่วนระหว่างอะเซทิลีนกับอีเทน, Y คืออัตราส่วนระหว่างมีเทนกับไฮโดรเจน และแกน Z คือ อัตราส่วนระหว่างอะเซทิลีนกับเอทิลีน ซึ่งอยู่ในลึอกกาลิธีมสเกล จากนั้นคำนวณเงื่อนไขแรกว่าจุดตกที่คำนวณได้นั้น อยู่บนระนาบระหว่างแต่ละโซนบนกราฟ 3D หรือไม่ ถ้าอยู่บนระนาบระหว่างโซน ให้แสดงผลเป็นชื่อโซนทั้งสองโซนระหว่างระนาบนั้น ยกเว้นกรณีที่ตกบนระนาบระหว่าง D1 กับ D1D2 หรือ D2 กับ D1D2 ให้แสดงผลเป็น D1/D2 หรือเงื่อนไขที่สอง คือจุดตกที่คำนวณได้นั้นอยู่ในโซนที่แบ่งไว้หรือไม่ ถ้าอยู่ ให้ทำการแสดงผลตามชื่อโซนที่กำหนดไว้ ถ้าไม่ ให้แสดงผลว่า Out of Range หรือเงื่อนไขที่สาม คือ กรณีที่มีค่าในแกนใดแกนหนึ่งเกิน 10 ทำให้เกินขอบเขตของมาตรฐานในการวิเคราะห์ผล ให้แสดงค่าที่แกนนั้นๆเป็น NaN

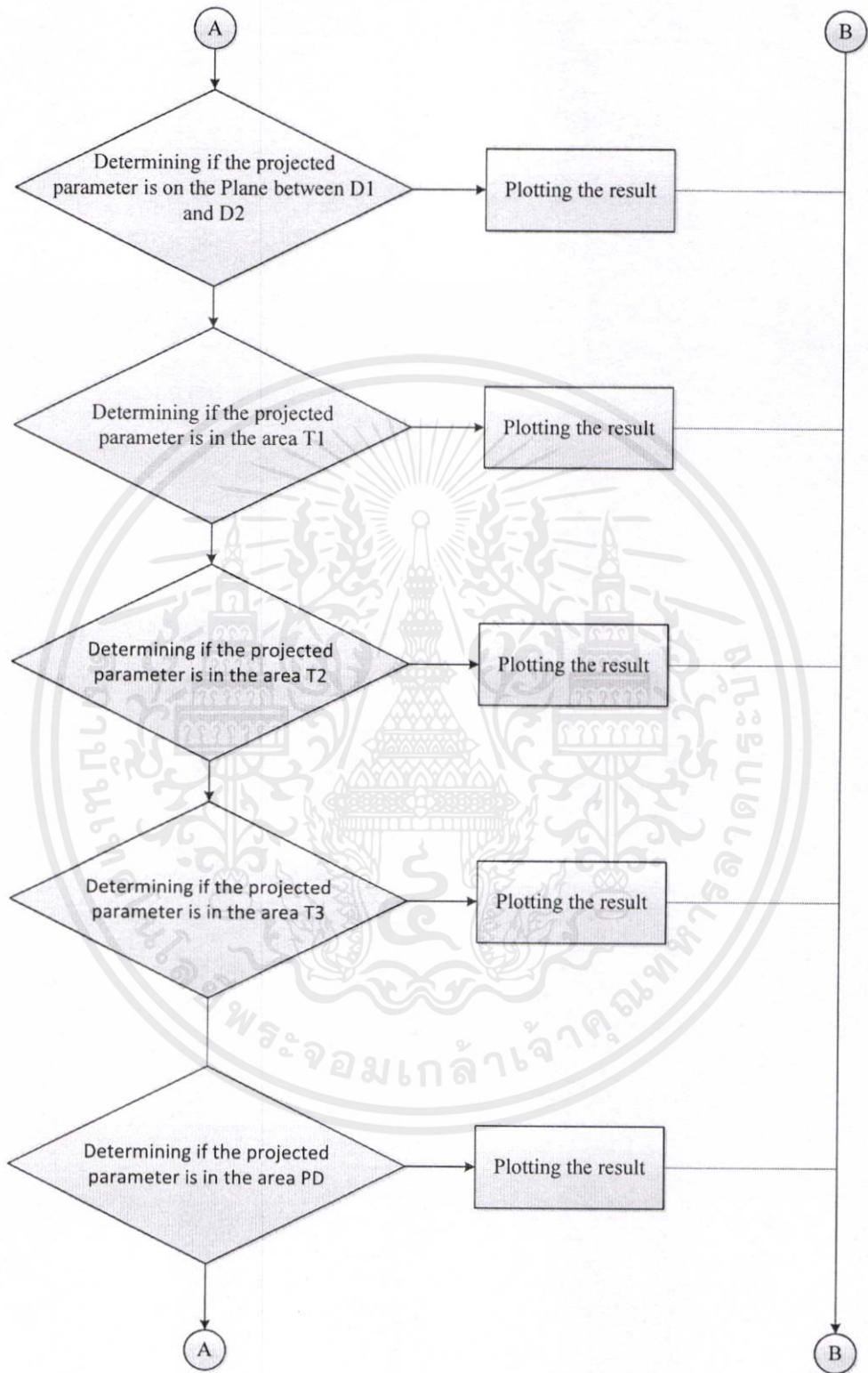


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

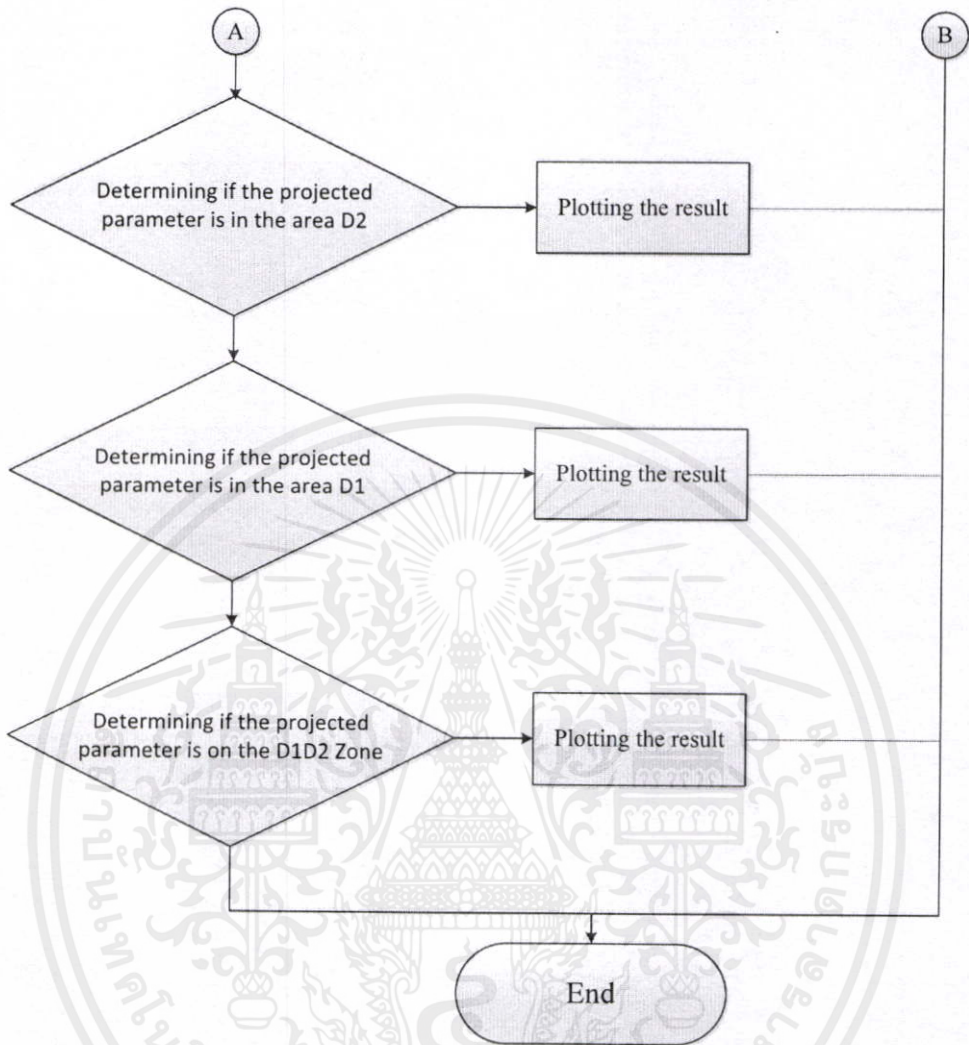
## 3.2.1 แผนภาพการทำงานของโปรแกรม IEC Ratio



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 3.2 Flow Chart โปรแกรม IEC Ratio ที่นักศึกษาคิดค้นขึ้น  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีที่ผิดแบบลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารที่ผู้สร้างที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.2 Flow Chart โปรแกรม IEC Ratio ที่นักศึกษาคิดค้นขึ้น(ต่อ)  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



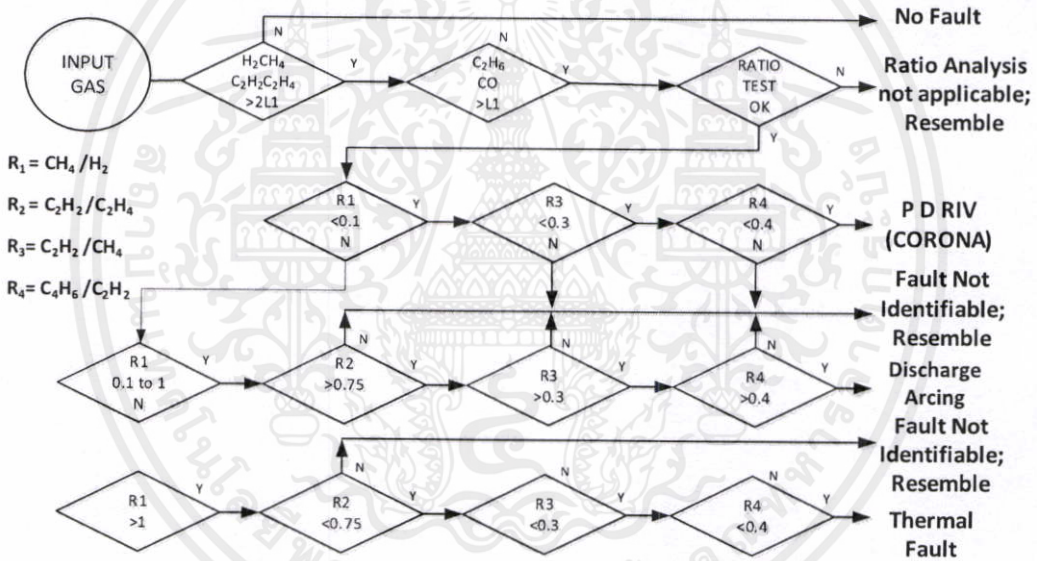
รูปที่ 3.2 Flow Chart โปรแกรม IEC Ratio ที่นักศึกษาคิดค้นขึ้น(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การออกแบบโปรแกรม Doernenburg Ratio Method

โปรแกรมเริ่มจากการรับค่าอินพุตเป็นแก๊ส 6 ชนิด คือ อะเซทิลีน, เอทิลีน, มีเทน, อีเทน, ไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์ จากนั้นนำค่าความเข้มข้นของแก๊ส ไฮโดรเจน, มีเทน, อะเซทิลีน และเอทิลีน มาเปรียบเทียบกับค่าลิมิตความเข้มข้นตามตาราง L1 โดยถ้าหากความเข้มข้นของแก๊สใดใน 4 ชนิดนี้มากกว่า 2 เท่าของค่าความเข้มข้นตามตาราง L1 และหนึ่งในสองแก๊สระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์ กับอีเทน ต้องมีค่ามากกว่าค่าความเข้มข้นตามตาราง L1 จึงจะสามารถพิจารณาสภาพฟอลต์ได้ เมื่อพิจารณาความเข้มข้นแล้วจึงนำความเข้มข้นมาคิดค่าอัตราส่วน R1, R2, R3 และ R4 เมื่อตรวจสอบแล้วว่าค่าอัตราส่วนทั้งสี่ค่าเป็นจริงตามมาตรฐานจึงนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่อยู่ในตารางผลความผิดปกติ ถ้าค่าอยู่ระหว่างช่วงที่ระบุไว้จึงสามารถแปลผลชนิดของฟอลต์ได้

#### 3.3.1 แผนภาพการทำงานของโปรแกรม Doernenburg Ratio Method



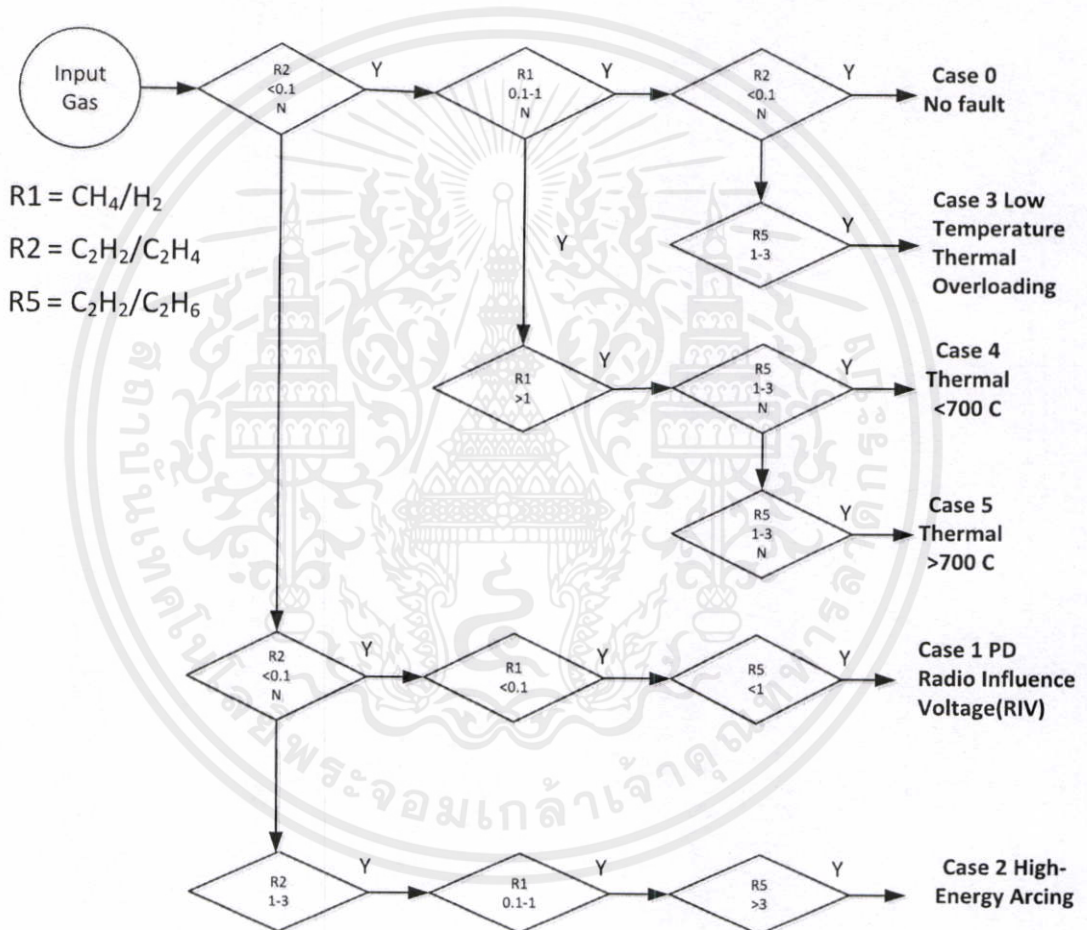
รูปที่ 3.3 Flow Chart โปรแกรม Doernenburg Ratio Method ที่นักศึกษาคิดค้นขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การออกแบบโปรแกรม Rogers ratio method

โปรแกรมเริ่มจากการรับค่าอินพุตเป็นแก๊ส 6 ชนิด คือ อะเซทิลีน, เอทิลีน, มีเทน, อีเทน, ไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์ จากนั้นนำความเข้มข้นแก๊สมาคิดหาค่าอัตราส่วน R1, R2, และ R5 เมื่อตรวจสอบแล้วว่าค่าอัตราส่วนทั้งสามเป็นจริงตามมาตรฐาน จึงนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่อยู่ในตารางแสดงผลความผิดปกติ ถ้าค่าอยู่ระหว่างช่วงที่ระบุไว้จึงสามารถแปลผลชนิดของฟอลต์ได้

#### 3.4.1 แผนภาพการทำงานของโปรแกรม Rogers Ratio Method



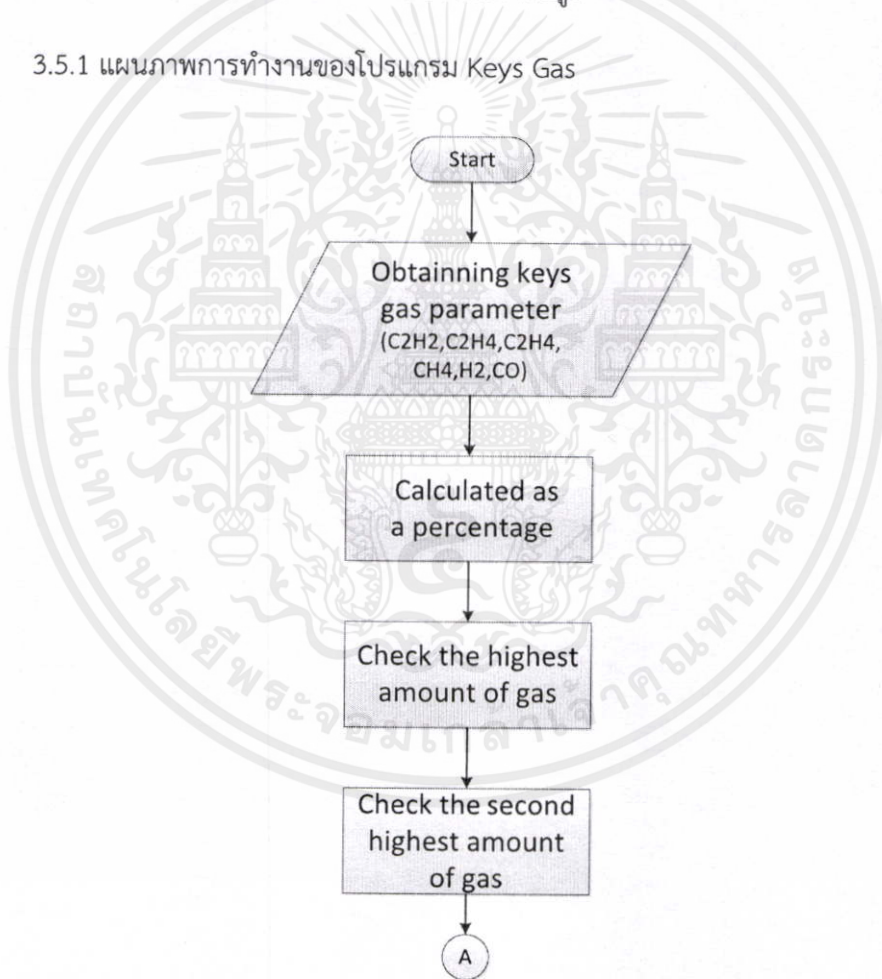
รูปที่ 3.4 Flow Chart โปรแกรม Rogers Ratio Method ที่นักศึกษาคิดค้นขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

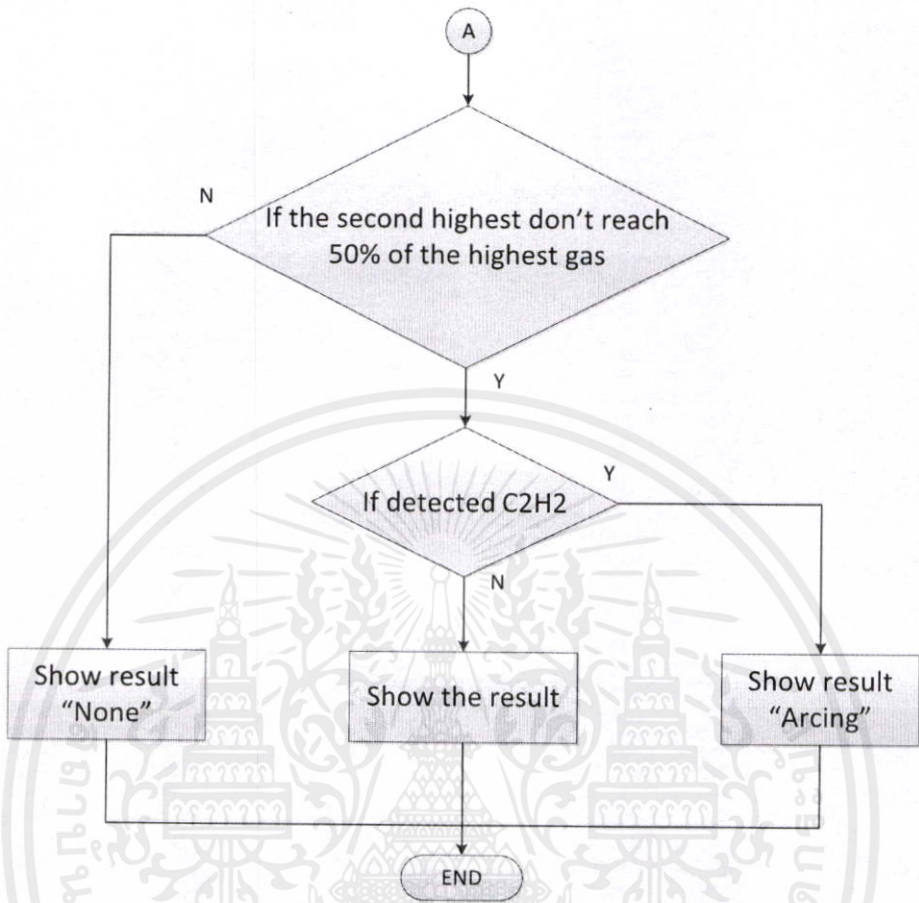
### 3.5 การออกแบบโปรแกรม Keys Gas

โปรแกรมเริ่มจากรับค่าอินพุทแก๊ส 6 ชนิด คือ อะเซทิลีน, เอทิลีน, มีเทน, อีเทน, ไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์ จากนั้นนำแก๊สแต่ละชนิดมาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์แล้วพิจารณาปริมาณเทียบกับ แก๊สที่มีปริมาณมากที่สุดจะเป็นแก๊สหลัก เทียบกับปริมาณแก๊สที่มากเป็นอันดับที่สอง ถ้าแก๊สที่มีปริมาณมากเป็นอันดับที่สองมีค่าไม่ถึง 50% ของปริมาณแก๊สหลัก จะสรุปผลตามมาตรฐาน โดยถ้าแก๊สหลักเป็นแก๊สเอทิลีน จะเป็นพอลดท์ที่เกิดจากความร้อนกับฉนวนน้ำมัน ถ้าแก๊สหลักเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะเป็นพอลดท์ที่เกิดจากความร้อนกับฉนวนกระตาศ ถ้าแก๊สหลักเป็นแก๊สไฮโดรเจนจะเป็นพอลดท์ที่เกิดจากดิสซาร์จพลังงานต่ำ แต่ถ้าหากผิวดึงเอนโซดิงกล่าว จะไม่สามารถหาแก๊สหลักและสรุปผลได้ และอีกเงื่อนไขหนึ่งคือหากเกิดแก๊สอะเซทิลีนในระบบจะสรุปผลทันทีว่าเกิดการอาร์คชิ่ง หรือหมายถึงพอลดท์ที่เกิดจากดิสซาร์จพลังงานสูง

#### 3.5.1 แผนภาพการทำงานของโปรแกรม Keys Gas



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 Flow Chart โปรแกรม Keys Gas ที่นักศึกษาคิดค้นขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 เปรียบเทียบผลของแก๊สที่ได้จากบริษัท Morgan Schaffer กับโปรแกรมที่นักศึกษาพัฒนาขึ้น

ในบทนี้จะเป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบด้วยโปรแกรมที่นักศึกษาพัฒนาขึ้น เทียบกับผลการทดสอบจากโปรแกรมของบริษัท Morgan Schaffer ซึ่งมีการใช้วิธีในการวิเคราะห์ ได้แก่ Duval Triangle, Rogers Gas Ratio, IEC Ratio, Doernenburg Ratio Method และ Keys gas ซึ่งนักศึกษาได้นำโปรแกรมที่นักศึกษาเป็นผู้พัฒนามาทำการเปรียบเทียบด้วยวิธีเดียวกัน

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลหม้อแปลงจากบริษัท Morgan Schaffer

Name	Serial No.	Equipment No.	Location	Substation name	Equipment type
EP LIME KLIN TR4	2011040240	Equip No.TR4	Montreal – Site A1	MS Sub A	Transformer (TRN)
Equipment Manufacturer	Description	Oil type	Oil Volume(l)	Tank Type	Year of manufacture
Zhe Jing Jin Hua	Full example with data from real transformer	Mineral Oil(ASTM361 2)	100	Main	2000

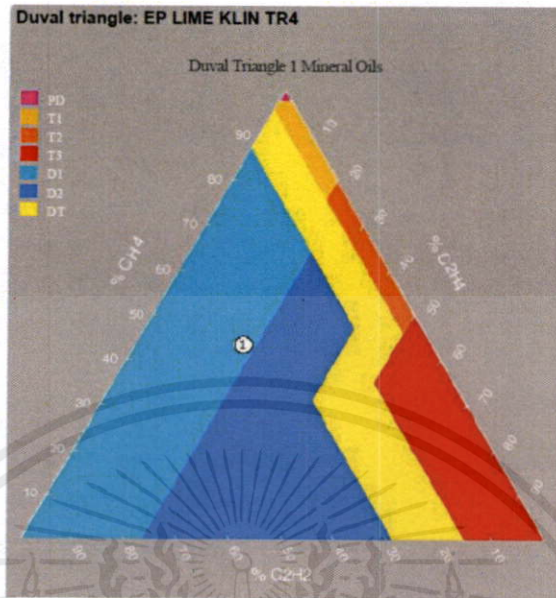
ตารางที่ 4.2 ปริมาณแก๊สทดสอบในหน่วย (ppm)

Data	H2	CH4	C2H6	C2H4	C2H2	O2	N2	CO2	CO
10/28/2014 3:00:36 AM	1,210	76	10	35	62	18,493	58,376	198	66

ตารางที่ 4.3 การแปลผลของบริษัท Morgan Schaffer

Date	Duval Triangle	Rogers gas ratio
10/28/2014 3:00:36 AM	D1 = Electrical discharges of lowenergy	Unknown
IEC 60599 gas ratios		Doernenburg
Unknown fault: Partial or mixture of faults – mainly partial discharges		Key gas Electrical-Arcing

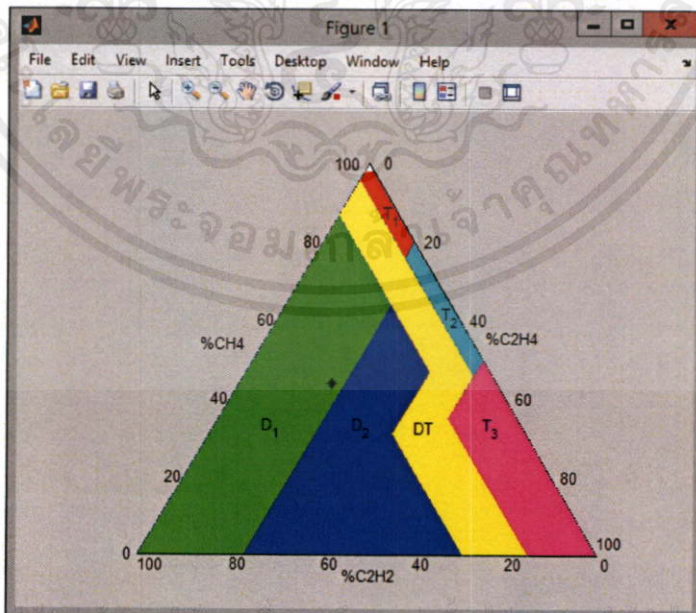
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 Duval Triangle ของบริษัท Morgan Schaffer

4.1.1 ทำการแปลผลด้วยวิธี Duval Triangle

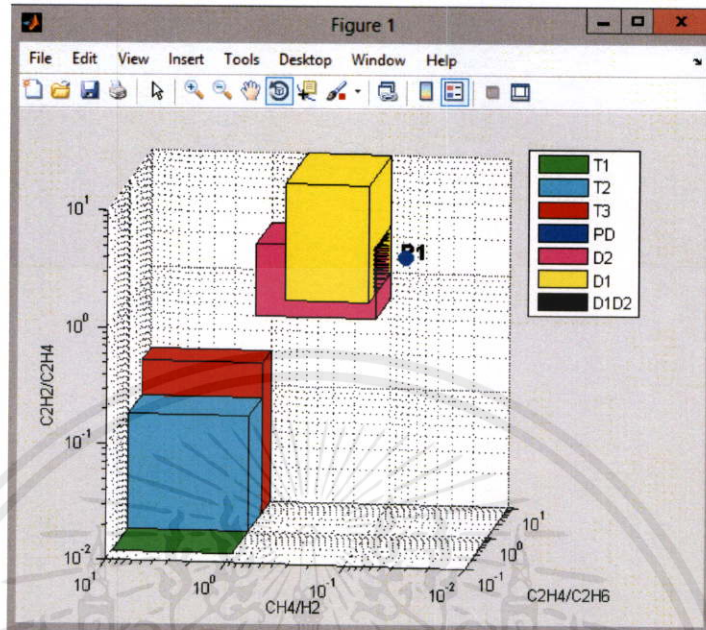
จากรูปที่ 4.5 เมื่อใส่ปริมาณแก๊ส มีเทน 76 ppm, เอทิลีน 35 ppm และ อะเซทิลีน 62 ppm ลงในโปรแกรม Duval Triangle จะได้สภาพความผิดปกติที่ตรวจพบ คือ D1 = Discharge Low Energy (ดิสชาร์จที่พลังงานต่ำ)



รูปที่ 4.2 Duval Triangle ที่นักศึกษาพัฒนาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการรบกวนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 ทำการแปลผลด้วยวิธี IEC Ratio



รูปที่ 4.3 IEC Ratio ที่นักศึกษาพัฒนาขึ้น

จากรูปที่ 4.6 เมื่อใส่ปริมาณแก๊ส มีเทน 76 ppm, เอทิลีน 35 ppm, อะเซทิลีน 62 ppm, อีเทน 10 ppm และ ไฮโดรเจน 1210 ppm ลงในโปรแกรม IEC Ratio จะได้สภาพความผิดปกติที่ตรวจพบ คือบริเวณนอกโซนใกล้เคียงกับ D1 = Discharge Low Energy (ดิสชาร์จที่พลังงานต่ำ)

#### 4.1.3 ทำการแปลผลด้วยวิธีการ Doernenberg Ratio Method

function Doernenburgratio(H2,CH4,CO,C2H2,C2H4,C2H6)

```
>> Doernenburgratio(1210,76,66,62,35,10)
```

No Fault

จากการแปลผล ความผิดปกติที่วิธี Doernenberg Ratio Method ตรวจพบคือ No Fault

#### 4.1.4 ทำการแปลผลด้วยวิธีการ Roger's Ratio Method

function Rogersratio(H2,CH4,CO,C2H2,C2H4,C2H6)

```
>> Rogersratio(1210,76,66,62,35,10)
```

R1 =

0.0628

R2 =

1.7714

R5 =

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 3.5000 วนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการแปลผล ความผิดปกติที่วิธี Roger's Ratio Method ตรวจพบคือ UNKNOWN

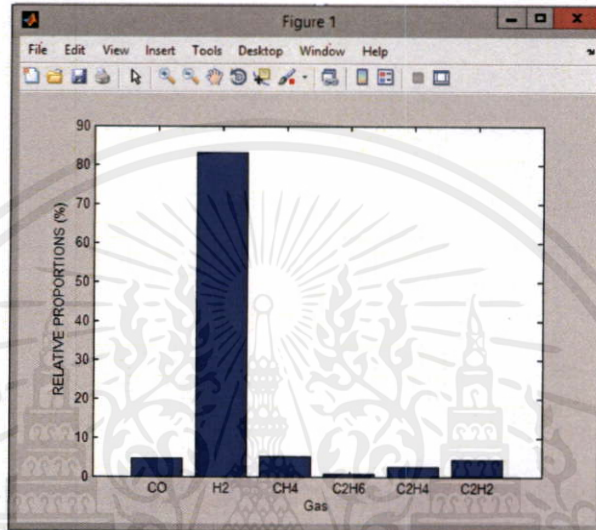
#### 4.1.5 ทำการแปลผลด้วยวิธีการ Keys Gas

function ieekeygases(CO\_1,H2\_1,CH4\_1,C2H6\_1,C2H4\_1,C2H2\_1)

>> ieekeygases(66,1210,76,10,35,62)

Arcing in Oil

จากการแปลผล ความผิดปกติที่วิธี Keys Gas ตรวจพบคือ Arcing in Oil



รูปที่ 4.4 Keys Gas Ratio ที่นักศึกษาคิดค้นขึ้น

จากรูปที่ 4.7 จากการแปลผล ความผิดปกติที่วิธี Keys Gas ตรวจพบคือ Arcing in Oil (เกิดการอาร์คซึ่งที่ฉนวนน้ำมัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 สรุปผลการแปลผลตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงจากบริษัท Glow Energy

Case	ID	Gas Concentration (ppm)							Duval Triangle จากบริษัท Glow Energy	Duval Triangle	IEC Ratio	Rogers Ratio	Doernenburg Ratio	Keys Gas
		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>						
1	TR-1	86	4	ND	4	ND	162	3957	T3	T3	Out of range	Unknown	No fault	None
2	TR-2	ND	ND	ND	ND	ND	27	555	D2	Invalid Data	Out of range	Unknown	No fault	Overheated Cellulose
3	TR-3	43	3	ND	ND	13	102	2676	PD	PD	PD	Unknown	No fault	Overheated Cellulose
4	TR-4	47	99	ND	9	367	367	4586	T1	T1	T1	Unknown	No fault	None
5	1APC- XF-24	46	14	ND	ND	11	146	945	PD	PD	Out of range	Unknown	No fault	Overheated Cellulose
6	1APE- XF-2	44	14	ND	ND	ND	351	6364	PD	PD	Out of range	Unknown	No fault	Overheated Cellulose
7	1GTB- XF-1	42	19	ND	ND	18	156	1813	PD	PD	Out of range	Unknown	No fault	Overheated Cellulose
8	2APC- XF-24	44	5	ND	1	12	222	2000	T1	T1	Out of range	No fault	No fault	Overheated Cellulose
9	2APE- XF-1	43	12	ND	ND	ND	623	6567	PD	PD	Out of range	Unknown	No fault	Overheated Cellulose

หมายเหตุ : Invalid Data หมายถึง ไม่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้

ตารางที่ 4.2 สรุปผลการแปลผลตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงจากบริษัท Glow Energy (ต่อ)

Case	ID	Gas Concentration (ppm)							Duval Triangle จากบริษัท Glow Energy	Duval Triangle	IEC Ratio	Rogers Ratio	Doernenburg Ratio	Keys Gas
		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>						
10	2APE-XF-2	42	1	ND	ND	ND	289	2399	PD	PD	Out of range	Unknown	No fault	Overheated Cellulose
11	2GTB-XF-1	44	8	ND	1	15	140	1597	T1	T1	Out of range	No fault	No fault	Overheated Cellulose
12	EKT5 1A	43	2	ND	ND	ND	218	1916	PD	PD	Out of range	Unknown	No fault	Overheated Cellulose
13	KT51 A	ND	ND	ND	ND	ND	171	1540	D2	Invalid Data	Out of range	Unknown	No fault	Overheated Cellulose
14	3GTB-XF-1	44	5	ND	ND	ND	171	1761	PD	PD	Out of range	Unknown	No fault	Overheated Cellulose
15	3APE-XF1	44	6	ND	5	ND	352	3764	T2	T2	T2	Unknown	No fault	Overheated Cellulose
16	31BA T10	46	14	ND	2	2	275	3094	T1	T1	Out of range	Low Temperature Thermal Overloading	No fault	Overheated Cellulose

หมายเหตุ : Invalid Data หมายถึง ไม่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้

ตารางที่ 4.3 สรุปผลการแปลผลตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงจากบริษัท Glow Energy (ต่อ)

Case	ID	Gas Concentration (ppm)						Duval Triangle จากบริษัท Glow Energy	Duval Triangle	IEC Ratio	Rogers Ratio	Doernenburg Ratio	Keys Gas	
		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>
17	31BB T10	32	2	ND	8	ND	334	1932	T3	T3	Out of range	Unknown	No fault	Overheated Cellulose
18	32BA T10	44	55	ND	10	54	308	2267	T1	T1	T1	Unknown	No fault	Overheated Cellulose
19	32BB T10	48	2	ND	1	ND	218	1155	T2	T2	Out of range	Unknown	No fault	Overheated Cellulose
20	50BA T01G T001	3	6	ND	ND	ND	227	1847	PD	PD	Out of range	Unknown	No fault	Overheated Cellulose
21	51BB T01G T001	14	4	ND	10	ND	239	1141	T3	T3	Out of range	Unknown	No fault	Overheated Cellulose
22	52BA T01G T001	18	8	ND	ND	ND	285	1935	PD	PD	Out of range	Unknown	No fault	Overheated Cellulose

หมายเหตุ : Invalid Data หมายถึง ไม่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้

ตารางที่ 4.4 สรุปผลการแปลผลตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงจากบริษัท Data Entry

Location	ID	DGA RESULT (PPM) , TEST METHOD BY ASTM 3612										Interpretation ของบริษัท Data Entry			Interpretation จากโปรแกรมที่ปรึกษาทางเทคนิค				
		C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	Key's gas	Duval triangle	IEC 60599	Duval Triangle	IEC Ratio	Rogers Ratio	Doernenburg Ratio	Key's Gas			
SVS	TR6	ND	61.16	ND	1.85	391.69	3192.94	ND	Normal	T3	T3	T3	T3	THERMAL >700 C	No Fault	Overheated Cellulose			
	TR3	ND	49.27	ND	1.11	402.05	9111.68	3.57	Normal	T3	-	T3	-	UNKNOWN	No Fault	Overheated Cellulose			
	TR4	ND	63.41	2.55	2.04	237.22	5211.36	ND	Normal	T3	T3	T3	T3	THERMAL >700 C	No Fault	Overheated Cellulose			
SCG (PM4)	TR5	ND	48.88	ND	3.19	190.77	3903.65	7.93	Normal	T3	-	T3	-	UNKNOWN	No Fault	Overheated Cellulose			
	TR3	ND	16.87	ND	2.27	313.44	8070.39	5.04	Normal	T3	-	T3	-	UNKNOWN	No Fault	Overheated Cellulose			
	TR4	ND	103.1	ND	2.52	361.71	6488.35	3.39	Normal	T3	T3	T3	-	UNKNOWN	Resample	Overheated Cellulose			
SCG (PM5)	TR5	ND	54.55	ND	2.67	287.39	7021.84	6.84	Normal	T2	T3	T3	-	UNKNOWN	No Fault	Overheated Cellulose			
	TR3	ND	28.55	ND	2.68	175.69	2472.01	3.43	Overheat	T1	-	T3	-	UNKNOWN	No Fault	Overheated Cellulose			
	TR4	ND	17.89	153.99	105.52	445.20	2466.89	12.2	Normal	T3	T1	T1	T1	UNKNOWN	No Fault	Overheated Cellulose			
SCG (PM6)	TR5	ND	2.05	ND	5.07	224.09	2733.20	7.54	Normal	T3	-	T2	-	UNKNOWN	No Fault	Overheated Cellulose			

หมายเหตุ : ND = Not Detectable

ตารางที่ 4.5 สรุปผลการแปลผลตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงจากบริษัท Data Entry (ต่อ)

location	ID	DGA RESULT (PPM) , TEST METHOD BY ASTM 3612										Interpretation ของบริษัท Data Entry			Interpretation จากโปรแกรมที่นักศึกษาพัฒนาขึ้น				
		C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	Keys gas	Duval triangle	IEC 60599	Duval Triangle	IEC Ratio	Rogers Ratio	Doernenburg Ratio	Keys Gas			
SCG (PM7)	TR3	ND	36.65	ND	4.04	224.68	3746.77	3.83	Overheat	T3	-	T3	T3	THERMAL >700 C	No Fault	Overheated Cellulose			
	TR4	ND	754.1 2	145.80	139.05	272.34	6936.54	6.14	Normal	T3	T3	T3	THERMAL >700 C	Resample	Overheated Oil				
	TR5	ND	64.96	ND	1.77	251.63	3459.83	ND	Normal	T3	T3	T3	THERMAL >700 C	No Fault	Overheated Cellulose				
	TR2	ND	9.58	ND	1.79	184.34	2119.06	ND	Normal	T3	-	T3	T3	THERMAL >700 C	No Fault	Overheated Cellulose			
	TR3	ND	16.11	1.86	3.67	228.47	6120.73	6.17	Normal	T2	-	T3	-	UNKNOWN	No Fault	Overheated Cellulose			
SCG (PM8)	TR4	ND	4.27	ND	9.92	148.12	4030.19	5.09	Normal	T2	-	T2	T3	THERMAL >700 C	No Fault	Overheated Cellulose			
	TR5	ND	13.90	1.06	17.30	255.60	3629.05	16.64	Normal	T2	-	T2	T3	THERMAL >700 C	No Fault	Overheated Cellulose			
	TR7	ND	5.33	3.58	7.53	70.53	1472.84	22.03	Normal	T3	-	T2	-	LOW TEMP THERMAL	No Fault	Overheated Cellulose			
SCG (PM9)	TR4	ND	4.27	ND	9.92	148.12	4030.19	5.09	Normal	T2	-	T2	T3	THERMAL >700 C	No Fault	Overheated Cellulose			
	TR5	ND	13.90	1.06	17.30	255.60	3629.05	16.64	Normal	T2	-	T2	T3	THERMAL >700 C	No Fault	Overheated Cellulose			

หมายเหตุ : ND = Not Detectable

ตารางที่ 4.6 สรุปผลการแปลผลตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงจากบริษัท Data Entry (ต่อ)

Case	ID	Gas Concentration (ppm)							Keys Gas ASTM3612 เอกรู้ทั้งหมดแปลง	Duval Triangle	IEC Ratio	Rogers Ratio	Doernenburg Ratio	Keys Gas
		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>						
1	4300162	12	186	0	52	1687	143	4137	Thermal heating : Low temperature	T2	T1	Unknown	No fault	None
2	4300142	19	320	0	62	2117	317	5591	Normal	T1	T1	Unknown	Resample	None

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

โปรแกรมวิเคราะห์ผล DGA (Dissolve Gas Analysis) ด้วยวิธีการ Duval Triangle ที่นักศึกษาได้พัฒนาสามารถใช้งานได้จริง มีประสิทธิภาพเทียบเท่าโปรแกรมที่ใช้ในทางพาณิชย์ และสามารถแปลผลได้ตรงกันกับโปรแกรมที่ใช้ในทางพาณิชย์ อีกทั้งยังมีโปรแกรม IEC Ratio, Doernenburg Ratio Method, Rogers Ratio Method และ Keys Gas เพื่อเป็นทางเลือกในการใช้วิเคราะห์ผล เนื่องจากในการค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ DGA มีค่าใช้จ่ายสูง ต้องใช้ผู้ปฏิบัติงานที่มีประสบการณ์ในการแปลผล อีกทั้งโปรแกรมที่ใช้ในทางพาณิชย์มีราคาสูงมาก เมื่อนักศึกษาได้พัฒนาโปรแกรมขึ้นเอง ทำให้สามารถวิเคราะห์ผลเองได้ ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจ้าง ซึ่งเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายได้เป็นอย่างดี

ตารางที่ 5.1 สรุปผลจำนวนเคสที่ตรงกัน

ชื่อบริษัท	วิธีแปลผลที่ใช้	จำนวนเคสที่ผลตรงกัน	จำนวนเคสทั้งหมด
บริษัท Glow Energy	Duval Triangle	20	22
บริษัท Data Entry	Duval Triangle	12	18
	IEC Ratio	12	
	Keys Gas	2	
บริษัทเอกรัฐหม้อ แปลง	Keys Gas	0	2

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

การวิเคราะห์ผลนั้น เนื่องจากวิธีในการวิเคราะห์นั้นมีอยู่หลายวิธี และหลายมาตรฐาน ซึ่งแต่ละวิธีนั้นเกิดจากการทดลองซ้ำๆกันจนเกิดเป็นข้อมูลเชิงสถิติ ทำให้การแปลผลจะสามารถแปลผลสภาพผิดปกติที่เกิดบ่อยๆได้แม่นยำ แต่ทั้งนี้ ยังมีอีกหลายกรณีที่ไม่สามารถแปลผลได้ตามมาตรฐาน ทำให้ในการวินิจฉัยนั้นเป็นไปได้ยาก ดังนั้นในการวินิจฉัย ผู้วินิจฉัยต้องมีทั้งความรู้และประสบการณ์มาพอสมควร ถึงจะสามารถแปลผลได้อย่างแม่นยำและถูกต้องมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] นายวิศรุต เล็กอุทัย และคณะ, การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า, ปรินูญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.
- [2] นายกิตติ หุตะวานิชย์กุล และคณะ, การศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงหม้อแปลง, ปรินูญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.
- [3] ASTM D3612 - 02(2009), Standard Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oil by Gas Chromatography, 2009.
- [4] IEEE Std C57.104, "IEEE Guide for the interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers", 2008.
- [5] IEC Publication 60599, "Mineral Oil-Impregnated Equipment in Service – Guide to the Interpretation of Dissolved and Free Gases Analysis", March 1999.
- [6] IEC 60156, "Insulating liquids – Determination of the breakdown voltage at power frequency – Test method", 1995.
- [7] ASTM D1816-12, Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using VDE Electrodes, 2012.
- [8] IEC 60296, "Fluids for electrotechnical application – Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear", 2003.
- [10] ผศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช, วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า(เล่ม1) ฉนวนและวัสดุฉนวนไฟฟ้า Electrical Engineering Materials, กรุงเทพมหานคร: ห้างหุ้นส่วนจำกัด มิน เซอร์วิส ซัพพลาย, 2557.
- [11] Amanpreet Singh Gill, "The Design of Transformer oil," IEEE Conf. Elect. Ins., pp. 247-250, 5 April 2000.
- [12] Kanika Shrivastava, "A Novel Association Rule Mining with IEC Ratio Based Dissolved Gas Analysis for Fault Diagnosis of Power Transformers", ME in High Voltage and Power System in Electrical Engineering, JEC, Jabalpur, 2012.
- [13] Duval M., James Dukarm, "Improving the Reliability of Transformer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงนามไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ ใช้งาน หรือใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Gas-in-Oil Diagnosis”, IEEE Elec. Insul. Mag., Vol.21, No.4, pp. 21-27, 2005.
- [14] M.Duval, “A Review of Faults Detectable by Gas-in-Oil Analysis in Transformers”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.18, No.3, p.8 (2002).
- [15] M.Duval and A.dePablo, “Interpretation of Gas-in-Oil Analyses Using New IEC Publication 60599 and IEC TC10 Databases”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.17, No.2, p.31 (2001).
- [16] M.Duval, “Fault gases formed in oil-filled breathing EHV power transformers- The interpretation of gas analysis data”, IEEE PAS Conf.Paper No C 74 476-8, 1974.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การศึกษาและวินิจฉัยหม้อแปลงไฟฟ้า

## THE STUDY OF TRANSFORMER AND DIAGNOSTIC

นริศ เตชทะโลกุล<sup>1</sup> นัศชนนท์ รัชฎีพิทยากุล<sup>2</sup> ภัทรุช จักรมานนท์<sup>3</sup>

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าจอมคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ดลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 Email: phatara08@gmail.com

### บทคัดย่อ

ปริญญาโทฉบับนี้เป็นการศึกษาและวินิจฉัยน้ำมันหม้อแปลงด้วยวิธีการ DGA (Dissolved Gas Analysis) คือการแยกแก๊สออกจากน้ำมันหม้อแปลง เพื่อนำแก๊สที่ได้มาวิเคราะห์ผลหาสาเหตุปัญหาการเสื่อมสภาพของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า โดยมีแก๊สหลักๆคือไนโตรเจน, ออกซิเจน, ไฮโดรเจน, คาร์บอน มอนออกไซด์, คาร์บอน ไดออกไซด์, มีเทน, อีเทน, เอทิลีน และอะเซทิลีน จะถูกแปลผลด้วยวิธี Key Gas Ratios (IEEE C57.104), Doernenburg Ratio Method (IEEE C57.104), Rogers Ratio Method (IEEE C57.104), Duval Triangle (IEC 60599) และ IEC Gas Ratios (IEC 60599) โดยแสดงผลการวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม MATLAB แล้วนำผลการวิเคราะห์จากวิธีการต่างๆ ดังกล่าวมาเปรียบเทียบกัน นอกจากนี้ผลลัพธ์ที่ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์โดยภาคอุตสาหกรรม และทางพาณิชย์ ซึ่งพบว่ามีความสอดคล้องกันดี

**คำสำคัญ:** วินิจฉัยน้ำมันหม้อแปลง, ไนโตรเจน, ออกซิเจน, ไฮโดรเจน, คาร์บอน มอนออกไซด์, คาร์บอน ไดออกไซด์, มีเทน, อีเทน, เอทิลีน, อะเซทิลีน

### Abstract

This project is a study and diagnostic transformer insulation oil by Dissolved Gas Analysis method (DGA). The keys gas extracted from the mineral oil are Nitrogen, Oxygen, Hydrogen, Carbon monoxide, Carbon dioxide, Methane, Ethane, Ethylene and Acetylene. The interpretation of the DGA result was done by Key Gas Ratios (IEEE C57.104), Doernenburg Ratio Method (IEEE C57.104), Rogers Ratio Method (IEEE C57.104), Duval Triangle (IEC 60599) and IEC Ratio Method (IEC 60599), which was analyzed using MATLAB program. The interpretation gas result were compared together. Beside, These results well agreed with the interpretation results obtained from industrial sector.

**Keywords:** diagnostic transformer insulation oil, Nitrogen, Oxygen, Hydrogen, Carbon monoxide, Carbon dioxide, Methane, Ethane, Ethylene, Acetylene

### 1. บทนำ

หม้อแปลงไฟฟ้าจัดว่าเป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่มีความสำคัญชนิดหนึ่งในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งทำหน้าที่ในการแปลงระดับแรงดันเพื่อให้การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นไปอย่างเหมาะสม และมีประสิทธิภาพ อีกทั้งหม้อแปลงไฟฟ้านั้นต้องสามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพอย่างต่อเนื่อง และต้องมีความถูกต้องเหมาะสมกับลักษณะหน้าที่การทำงานที่หม้อแปลงจะถูกนำไปใช้งาน

เนื่องจากในปัจจุบันประเทศไทยยังขาดผู้ที่มีความรู้ความเข้าใจที่ถูกต้องในอุปกรณ์หม้อแปลงไฟฟ้า ในโรงงานนี้จึงได้ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้าง หลักการทำงาน หลักการทดสอบของฉนวนน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า และการวินิจฉัยผลกระทบที่เกิดจากปัญหาต่างๆ กับหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อเป็นแหล่งข้อมูลเกี่ยวกับหม้อแปลงไฟฟ้าให้กับผู้ที่ต้องการศึกษา

### 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การตรวจสอบสภาพหม้อแปลงเป็นหนึ่งขั้นตอนของการบำรุงรักษาหม้อแปลง โดยการตรวจสอบสภาพหม้อแปลงขณะที่ใช้งานอยู่ทำได้โดยตรวจด้วยน้ำมันหม้อแปลง วิธีที่นิยมคือ Dissolved Gas Analysis (DGA) โดยใช้การแปลผล 5 วิธี Doernenburg Ratio Method, Rogers Ratio Method, Duval Triangle, IEC Ratio และ Keys Gas

#### 2.1 Dissolved Gas Analysis โดยวิธี Doernenburg Ratio Method

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

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

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

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

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

วิธี Doernenburg Ratio Method มีความคิดปกติทั่วไปอยู่ 3 ประเภทคือความคิดปกติด้านอุณหภูมิจากการสลายตัว, ความคิดปกติที่

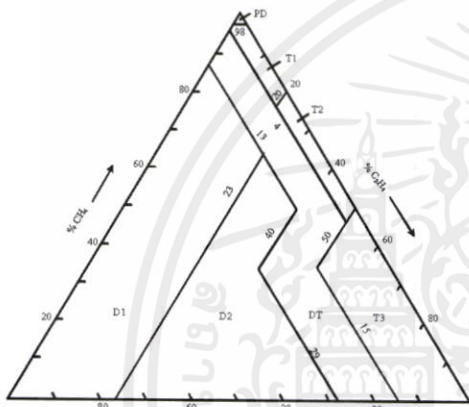
เกิดโดยโคโรน่า และ ความผิดปกติโดยการอาร์คซึ่ง โดยวิธีการนี้อาศัย อัตราส่วนของความเข้มข้น R1, R2, R3 และ R4

**2.2 Dissolved Gas Analysis โดยวิธี Roger's Ratio Method**

การวิเคราะห์ที่ด้วยวิธี Roger's Ratio Method นั้นจะใช้ กระบวนการวิเคราะห์ที่เดียวกันกับ Doernenberg Ratio Method เพียงแต่ อาศัยอัตราส่วนความเข้มข้นแก๊ส R1, R2 และ R5

**2.3 Dissolved Gas Analysis โดยวิธี Duval Triangle**

วิธี Duval Triangle จะใช้แก๊สเพียง 3 ตัวในการวิเคราะห์ผล คือ อะเซทิลีน, เอทิลีน, มีเทน ซึ่งแก๊สทั้ง 3 ตัวจะบ่งบอกถึงสภาพปกติ หรือผิดปกติบนนั้นในตัวถังหม้อแปลง



รูปที่ 1 Classical Duval Triangle

ตารางที่ 2 การแปลความหมาย DGA

กรณี	ลักษณะความผิดปกติ	CH <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
PD	Partial Discharges	NS	<0.1	<0.2
D1	Discharges พลังงานต่ำ	>1	0.1 - 0.5	>1
D2	Discharges พลังงานสูง	0.6 - 2.5	0.1 - 1	>2
T1	Thermal fault ต่ำ < 300 °C	NS	>1 แต่ NS	<1
T2	Thermal fault 300 °C - 700 °C	<0.1	>1	1 - 4
T3	Thermal fault สูง > 700 °C	<0.2	>1	>4

**2.5 Dissolved Gas Analysis โดยวิธี Keys Gas ตาม มาตรฐาน IEEE Std C57.104-2008**

วิธีการนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำมันแต่ละชนิดรวมถึงแก๊สที่เกิดจากการแตกตัวของเซลล์ไอส ใช้สำหรับการคำนวณหาฟอลต์แต่ละชนิดจากแก๊ส ในสภาวะอุณหภูมิแตกต่างกัน โดยแก๊สที่ระบุได้เหล่านี้ เรียกว่า "keys gas"

**3. การออกแบบโปรแกรม**

ใช้โปรแกรม MATLAB ในการออกแบบและเขียนโปรแกรม โดยเขียนคำสั่งใน M-file และเรียกใช้คำสั่ง (Function) จาก Command Window สำหรับโปรแกรมที่แสดงผลเป็นกราฟ โปรแกรมจะแบ่ง ออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนการคำนวณ และส่วนการแสดงผล สำหรับ โปรแกรมที่ไม่มีส่วนแสดงผลเป็นกราฟ จะแสดงผลออกมาใน Command Window

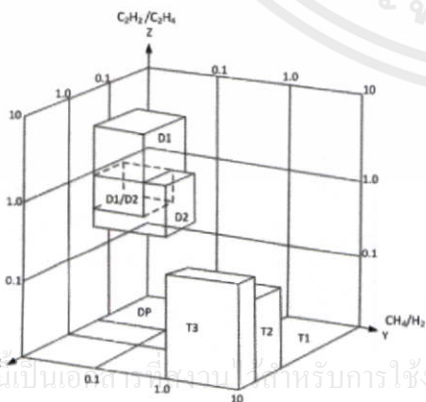
**3.1 การออกแบบโปรแกรม Duval Triangle**

เริ่มจากทำการรับค่าปริมาณแก๊สมา 3 แก๊ส ได้แก่ อะเซทิลีน, เอทิลีน และ มีเทน จากนั้นนำค่าทั้ง 3 มาทำเป็นเปอร์เซ็นต์ที่จะ นำค่าที่ได้มาคำนวณหาจุดตกบนแกน Ternary หรือกราฟ Duval Triangle นั้นเอง จากนั้นคำนวณเงื่อนไขแรกว่าจุดตกที่คำนวณได้นั้น อยู่บนเส้น แบ่งโซนบนกราฟ Duval Triangle หรือไม่ ถ้าอยู่บนเส้นแบ่งโซน ให้ แสดงผลเป็นชื่อ โซนที่ถูกแบ่งอยู่ระหว่างเส้นทั้งสองโซน หรือเงื่อนไขที่ สองคือจุดตกที่คำนวณได้นั้นอยู่ใน โซนที่แบ่งไว้หรือไม่ ถ้าอยู่ ให้ทำการ แสดงผลตามชื่อ โซนที่กำหนดไว้ ในการออกแบบ Duval Triangle นั้น เนื่องจากโปรแกรม MATLAB จะอ้างอิงตามแกน X,Y,Z ทำให้ไม่ สามารถแสดงผลหรือคำนวณจุดตกได้ ต้องทำการแปลงแกนจาก X,Y,Z ไปสู่แกนรูป 3 เหลี่ยมไปเก็บไว้ในตัวแปร 3 ค่า (ในที่นี้ใช้ a, b, c) จากนั้นจึงจะสามารถแบ่งโซนตามมาตรฐานได้ และในส่วนของการ

**2.4 Dissolved Gas Analysis โดยวิธี IEC Ratio**

การวิเคราะห์การทดสอบด้วยวิธี IEC Ratio ใช้แก๊ส 5 ชนิดในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ คือ อะเซทิลีน, เอทิลีน, มีเทน, อีเทน และ ไฮโดรเจน โดยนำแก๊สทั้ง 5 ชนิดนั้นมาทำเป็นอัตราส่วนลงในแกน 3 มิติ

$$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}, \frac{CH_4}{H_2}, \frac{C_2H_4}{C_2H_6}$$



รูปที่ 2 IEC Ratio

แม้ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และสงวนลิขสิทธิ์ไว้ด้วย

แสดงผลการพล็อต ในทำนองเดียวกัน ต้องทำการแปลงคู่อันดับจาก X,Y ไปเป็นคู่อันดับตามแนวแกนรูปสามเหลี่ยมที่เก็บไว้ในตัวแปร 3 ค่าที่ได้ กล่าวมาข้างต้น จากนั้นนำฟังก์ชันการพล็อตที่สามารถพล็อตจุดบน Duval Triangle ได้แล้ว ไปทำการพล็อตโซนต่างๆ และพล็อตจุดตก

3.2 การออกแบบโปรแกรม IEC Ratio

เริ่มจากการรับค่าปริมาณแก๊สมา 5 แก๊ส ได้แก่ อะเซทิลีน, เอทิลีน, มีเทน, อีเทน และ ไฮโดรเจน จากนั้นนำค่าทั้ง 5 มาทำเป็น อัตราส่วนเพื่อนำไปพล็อตบนแกน X,Y,Z โดยแกน X คืออัตราส่วนระหว่าง C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> : C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, Y คืออัตราส่วนระหว่าง CH<sub>4</sub> : H<sub>2</sub> และแกน Z คืออัตราส่วนระหว่าง C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> : C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> ซึ่งอยู่ในลือกกลาสิคิมสเทล จากนั้นคำนวณเงื่อนไขแรกว่าจุดตกที่คำนวณได้นั้น อยู่บนระนาบระหว่างแต่ละโซนบน กราฟ 3D หรือไม่ ถ้าอยู่บนระนาบระหว่างโซน ให้แสดงผลเป็นชื่อโซน ทั้งสองโซนระหว่างระนาบนั้น ยกเว้นกรณีที่เกิดบนระนาบระหว่าง D1 กับ D1D2 หรือ D2 กับ D1D2 ให้แสดงผลเป็น D1/D2 หรือเงื่อนไขที่สองคือจุดตกที่คำนวณได้นั้นอยู่ใน โซนที่แบ่งไว้หรือไม่ ถ้าอยู่ ให้ทำการแสดงผลตามชื่อ โซนที่กำหนดไว้ ถ้าไม่ ให้แสดงผลว่า Out of Range หรือเงื่อนไขที่สาม คือ กรณีที่มีค่าในแกนใดแกนหนึ่งเกิน 10 ทำให้เกินขอบเขตของมาตรฐานในการวิเคราะห์ผล ให้แสดงค่าที่แกนนั้นๆ เป็น NaN

3.3 การออกแบบโปรแกรม Doernenburg Ratio Method

โปรแกรมเริ่มจากการรับค่าอินพุตเป็นแก๊ส 6 ชนิด คือ อะเซทิลีน, เอทิลีน, มีเทน, อีเทน, ไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์ จากนั้นนำค่าความเข้มข้นของแก๊ส ไฮโดรเจน, มีเทน, อะเซทิลีน และเอทิลีน มาเปรียบเทียบกับค่าลิมิตความเข้มข้นตามตาราง L1 โดยถ้าหากความเข้มข้นของแก๊สใดใน 4 ชนิดนี้มากกว่า 2 เท่าของค่าความเข้มข้นตาม ตาราง L1 และหนึ่งในสองแก๊สระหว่าง คาร์บอนมอนอกไซด์ กับอีเทน ต้องมีค่ามากกว่าเข้มข้นในตาราง L1 จึงจะสามารถพิจารณาสภาพ พอลต์ได้ เมื่อพิจารณาความเข้มข้นแล้วจึงนำความเข้มข้นมาคิดค่า อัตราส่วน R1, R2, R3 และ R4 เมื่อตรวจสอบแล้วว่าค่าอัตราส่วนทั้งสี่ค่า เป็นจริงตามมาตรฐานจึงนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่อยู่ในตารางผลความ ผิดปกติ ถ้าค่าอยู่ระหว่างช่วงที่ระบุไว้จึงสามารถแปลผลชนิดของพอลต์ ได้

3.4 การออกแบบโปรแกรม Rogers ratio method

โปรแกรมเริ่มจากการรับค่าอินพุตเป็นแก๊ส 6 ชนิด คือ อะเซทิลีน, เอทิลีน, มีเทน, อีเทน, ไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์ จากนั้นนำความเข้มข้นแก๊สมาคิดหาค่าอัตราส่วน R1, R2, และ R5 เมื่อ ตรวจสอบแล้วว่าค่าอัตราส่วนทั้งสามเป็นจริงตามมาตรฐาน จึงนำไป เปรียบเทียบกับค่าที่อยู่ในตารางแสดงผลความผิดปกติ ถ้าค่าอยู่ระหว่าง ช่วงที่ระบุไว้จึงสามารถแปลผลชนิดของพอลต์ได้

3.5 การออกแบบโปรแกรม Keys Gas

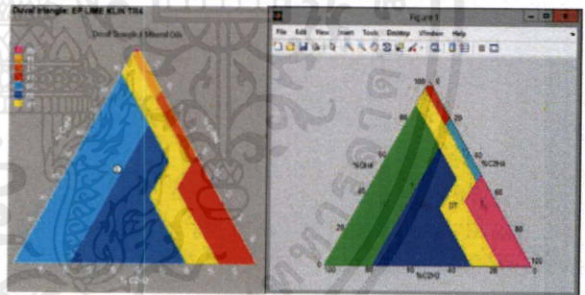
โปรแกรมเริ่มจากการรับค่าอินพุตแก๊ส 6 ชนิด คือ อะเซทิลีน, เอ

ลีน, มีเทน, อีเทน, ไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์ จากนั้นนำแก๊ส แต่ละชนิดมาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์แล้วพิจารณาปริมาณเทียบกับ แก๊สที่มี ปริมาณมากที่สุดจะเป็นแก๊สหลัก เทียบกับปริมาณแก๊สที่มากเป็นอันดับที่ สอง ถ้าแก๊สที่มีปริมาณมากเป็นอันดับที่สองมีค่าไม่ถึง 50% ของปริมาณ แก๊สหลัก จะสรุปผลตามมาตรฐาน โดยถ้าแก๊สหลักเป็นแก๊สเอทิลีน จะ เป็นพอลต์ที่เกิดจากความร้อนกับจำนวนน้ำมัน ถ้าแก๊สหลักเป็นแก๊ส คาร์บอนมอนอกไซด์จะเป็นพอลต์ที่เกิดจากความร้อนกับจำนวน กระดาษ ถ้าแก๊สหลักเป็นแก๊สไฮโดรเจนจะเป็นพอลต์ที่เกิดจากคิสซาร์จ พลังงานต่ำ แต่ถ้าหากผัดเจ็อน ไซดังกล่าว จะไม่สามารถหาแก๊สหลักและ สรุปผลได้ และอีกเงื่อนไขหนึ่งคือหากเกิดแก๊สอะเซทิลีนในระบบจะ สรุปผลทันทีว่าเกิดการอาร์คซิ่ง หรือหมายถึงพอลต์ที่เกิดจากคิสซา พลังงานสูง

4.ผลการทดลอง

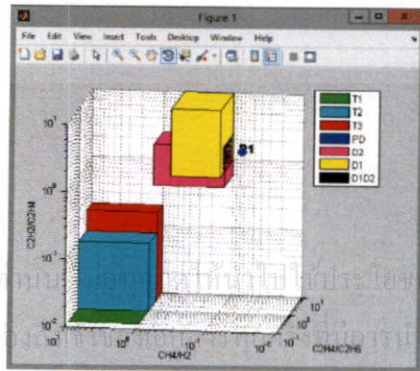
4.1 เปรียบเทียบผลของแก๊สที่ได้จากบริษัท Morgan Schaffer กับ โปรแกรมที่นักศึกษาพัฒนาขึ้น

Duval Triangle ระหว่างโปรแกรมของบริษัท Morgan Schaffer และ โปรแกรมที่นักศึกษาพัฒนาขึ้นแสดงพอลต์ D1



รูปที่ 3 เปรียบเทียบ Duval Triangle

4.2 แสดงผลของโปรแกรมที่นักศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมด้วยวิธี IEC Ratio, Doernenburg Ratio Method, Roger's Ratio Method และ Keys Gas



รูปที่ 4 IEC Ratio แสดงพอลต์ได้ D1

function Rogersratio(H2,CH4,CO,C2H2,C2H4,C2H6)

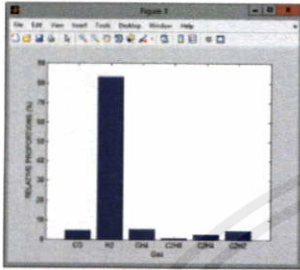
>> Rogersratio(1210,76,66,62,35,10)

ความคิดปกติที่วิธี Roger's Ratio Method ตรวจพบคือ UNKNOWN

function Doemenburgratio(H2,CH4,CO,C2H2,C2H4,C2H6)

>> Doemenburgratio(1210,76,66,62,35,10)

ความคิดปกติที่วิธี Doemenberg Ratio Method ตรวจพบคือ No Fault



รูปที่ 5 Keys Gas Ratioตรวจพบคือ Arcing in Oil

### 5. สรุปผลการทดลอง

โปรแกรมวิเคราะห์ผล DGA (Dissolve Gas Analysis) ด้วยวิธีการ Duval Triangle ที่นักศึกษาได้พัฒนาสามารถใช้งานได้จริง มีประสิทธิภาพเทียบเท่าโปรแกรมที่ใช้ในทางพาณิชย์ และสามารถแปลผลได้ตรงกันกับโปรแกรมที่ใช้ในทางพาณิชย์ อีกทั้งยังมีโปรแกรม IEC Ratio, Doemenburg Ratio Method, Rogers Ratio Method และ Keys Gas เพื่อเป็นทางเลือกในการใช้วิเคราะห์ผล เนื่องจากในการค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ DGA มีค่าใช้จ่ายสูง ต้องใช้ผู้ปฏิบัติงานที่มีประสบการณ์ในการแปลผล อีกทั้งโปรแกรมที่ใช้ในทางพาณิชย์มีราคาสูงมาก เมื่อนักศึกษาได้พัฒนาโปรแกรมขึ้นเอง ทำให้สามารถวิเคราะห์ผลเองได้ ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจ้าง ซึ่งเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายได้เป็นอย่างดี

### 6. กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นรเศรษฐ พัฒนเดช และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรจุมิ ยูทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษา รวมไปถึงคุณบุณยวีร์ ฉายศิริ ที่คอยดูแลเอาใจใส่อย่างใกล้ชิดเสมอมา ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไข ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคน โดยเฉพาะนางสาว พัชรี ทองอินตะ ที่ช่วยแก้ปัญหาด้วยดีมาโดยตลอด

### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Greg C. Stone, and et al, **Electrical Insulation for Rotating Machines**, 2<sup>nd</sup> ED, John Wiley & Sons, Inc., 2014.
- [2] นรเศรษฐพัฒนเดช, **วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า**, พิมพ์ครั้งที่ 3, ห้างหุ้นส่วนจำกัด มิน เซอร์วิส ซัพพลาย, 2557.
- [3] ศุภวัตร น้าประเสริฐ, "การศึกษาแบบจำลองจุดบกพร่องของฉนวนในเครื่องจักรกลหมุน โดยการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วน" **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- [4] IEEE Standard 43-2000, Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery.
- [5] IEEE Standard 95-2002, Recommended Practice for Insulation Testing of AC Electric Machinery (2300 V and Above) With High Direct Voltage.
- [6] IEEE Standard 286-2000, Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation.
- [7] S. A. Bhumiwat, "Application of polarisationdepolarisation current (PDC) technique on fault and trouble analysis of stator insulation", in **CIGRE SC A1 & D1 Joint Colloquium**, Gyeongju, Korea, October 24, 2007, p.79-87.
- [8] S. A. Bhumiwat, "On-site non-destructive dielectric response diagnosis of rotating machines," **IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation**, vol. 17, no. 5, October 2010, p. 1453-1460.
- [9] S. A. Bhumiwat, "Practical experiences on condition assessment of stator insulation using Polarisation / Depolarisation Current technique", in **CIGRE 2008 Session**, Paris, August 24-29, 2008, pp. D1-210.
- [10] S. A. Bhumiwat, "Insulation Resistance and Polarization of Rotating Machines", in **Electrical Insulation Conference**, Annapolis, Maryland, June 5-8, 2011.
- [11] IEC Publication 60599, "Mineral Oil-Impregnated Equipment in Service - Guide to the Interpretation of Dissolved and Free Gases Analysis", March 1999.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



นายนริศ เตชะพะโลกุล เกิดเมื่อวันที่ 18 มกราคม 2535 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนหอวัง และ สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Email: techapalokul@hotmail.com

สถานที่ฝึกงาน: บริษัท Loxleywireless Co. Ltd.



นายณัฐชนนท์ ธีญพิทยากุล เกิดเมื่อวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2536 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียน นวมินทราชินูทิศ หอวัง นนทบุรี และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Email:nutchnon.nonstop@gmail.com

สถานที่ฝึกงาน: บริษัท Toshiba Carrier (Thailand) Co.,Ltd.



นายภัทร จักรมานนท์ เกิดเมื่อวันที่ 8 กันยายน 2535 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร (ฝ่ายมัธยม) และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Email:phataratana08@gmail.com

สถานที่ฝึกงาน: บริษัท CHAROENCHAI CO., LTD. Manufacturer In Thailand

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้