

การตรวจสอบดิสชาร์จบางส่วนภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยการวิเคราะห์  
ก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง

**PARTIAL DISCHARGE INVESTIGATION IN POWER  
TRANSFORMER BY DISSOLVED GAS ANALYSIS  
IN INSULATION OIL**

จิรศักดิ์ บุญโชติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การตรวจสอบดิซหาร์จบางส่วนภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยการ  
วิเคราะห์ก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง

จิรศักดิ์ บุญโชติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การตรวจสอบบดิสชาร์จบางส่วนภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยการวิเคราะห์ก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง Partial Discharge Investigation in Power Transformer by Dissolved Gas Analysis in Insulation Oil
ชื่อ - นามสกุล	นายจรัสศักดิ์ บุญโชติ
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ฉัตรชัย สุภพิทักษ์สกุล, Ph.D.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชนพงษ์ สุวรรณศรี, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2555

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....	ประธานกรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.)
.....	กรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์แคทรียา สุวรรณศรี, D.Eng.)
.....	กรรมการ (อาจารย์สุรินทร์ แห่งงาม, Ph.D.)
.....	กรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชนพงษ์ สุวรรณศรี, Dr.-Ing.)
.....	กรรมการ (อาจารย์ฉัตรชัย สุภพิทักษ์สกุล, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมหมาย ผิวสอาด, Ph.D.)

วันที่ 19 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2556

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การตรวจสอบดิสซาร์จบางส่วนภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยการวิเคราะห์ก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง
ชื่อ – นามสกุล	นายจรัสศักดิ์ บุญโชติ
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล, Ph.D.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนพงศ์ สุวรรณศรี, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2555

### บทคัดย่อ

การเกิดดิสซาร์จบางส่วนภายในหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นสาเหตุเริ่มต้นที่ทำให้หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเกิดความเสียหาย การตรวจสอบการเกิดดิสซาร์จบางส่วนมีอยู่หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้มากในปัจจุบันคือ วิธีวิเคราะห์ก๊าซที่เจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถตรวจหาความผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องดับไฟหรือปลดโหลด และให้ความถูกต้องสูง

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการจำลองการเกิดดิสซาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลง โดยการนำน้ำมันหม้อแปลงใหม่ มาทดสอบด้วยไฟฟ้าสลับแรงดันสูงในภาชนะทดสอบ เพื่อจำลองการเกิดดิสซาร์จบางส่วน ภายใต้เงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า และความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง รวมถึงการจำลองการเกิดดิสซาร์จบางส่วนในกระดวยฉนวน แล้วนำมาวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D-3612-02

ผลการวิจัยพบว่า เมื่อเกิดดิสซาร์จบางส่วนในระดับเริ่มต้นจะเกิดก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) และมีเทน ( $CH_4$ ) และเพิ่มขึ้นตามความรุนแรงตลอดช่วงของการเกิดดิสซาร์จบางส่วน ดังนั้นผลการทดลองนี้สามารถนำไปแยกแยะระดับความรุนแรงของการเกิดดิสซาร์จบางส่วน ตามแนวโน้มของก๊าซที่เพิ่มขึ้นได้

**คำสำคัญ:** ดิสซาร์จบางส่วน น้ำมันหม้อแปลง ก๊าซที่เจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง ไฮโดรคาร์บอน



<b>Thesis Title</b>	Partial Discharge Investigation in Power Transformer by Dissolved Gas Analysis in Insulating Oil
<b>Name - Surname</b>	Mr.Jeerasak Boonchot
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Mr.Chatchai Suppitaksakul, Ph.D.
<b>Thesis Co-advisor</b>	Assistant Professor Thanapong Suwanasri, Dr.-Ing.
<b>Academic Year</b>	2012

## ABSTRACT

Partial discharge in power transformer can be the original cause of transformer damage. There are several methods for detecting the partial discharge. However, the dissolved gas analysis (DGA) is currently the most well-known method to detect the partial discharge because it can perform on-line testing without shutdown the power system and also provide high accuracy of testing.

This thesis presents a model to investigate partial discharge in the insulating oil. The new insulating oil is employed by filling in the testing vessel. Then, it is applied by AC high voltage under the conditions of varying electric field and humidity in the insulating oil. The model also includes the investigation of partial discharge in the insulation paper. Then, the dissolved gases are analyzed follow the standard ASTM-3612-02.

The results show that hydrogen (H<sub>2</sub>) and methane (CH<sub>4</sub>) occur when partial discharge was taken place and they were increasing severity all along the partial discharge period. Therefore, the results can be used to classify the trend of increasing the intensity of the partial discharge.

**Keywords:** partial discharge, insulating oil, dissolved gas analysis, hydrocarbon

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ดร.ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล อาจารย์ที่ปรึกษา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนพงศ์ สุวรรณศรี อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำแนะนำและเอาใจใส่ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์ ดร.สุรินทร์ แหยมงาม คณะกรรมการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แคทริยา สุวรรณศรี ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความครบถ้วนสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณบริษัท ดาต้า เอ็นที กรุ๊ป จำกัด ที่สนับสนุนสถานที่ เครื่องมือทดสอบดิซซาร์จบางส่วนและเครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง บริษัท สุวรรณวงษ์ เอ็นจิเนียริง จำกัด สนับสนุนข้อมูลทางปฏิบัติและอนุเคราะห์น้ำมันหม้อแปลงใหม่ รวมถึงกระดาษฉนวนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทั้งหมด

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถนำหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้ คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

จิรศักดิ์ บุญโชติ



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ .....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	1
1.3 สมมุติฐานการวิจัย .....	1
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนของการวิจัย .....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 หม้อแปลงไฟฟ้า .....	4
2.2 การตรวจวัดดิซฮาร์โมนิกบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง .....	13
2.3 โครมาโตกราฟี.....	34
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	54
2.5 สรุปทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	59
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	60
3.1 การทดสอบดิซฮาร์โมนิกบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลง .....	60
3.2 ภาชนะทดสอบน้ำมันหม้อแปลง (Test Cell).....	63
3.3 อิเล็กโตรด.....	65
3.4 สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรด.....	66
3.5 น้ำมันหม้อแปลง.....	66

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.6 เครื่องทดสอบ Dissolved Gas Analysis, DGA .....	67
3.7 ขั้นตอนการทดลอง.....	68
3.8 สรุปวิธีดำเนินการวิจัย .....	74
4 ผลการวิจัย.....	75
4.1 ผลการทดลองภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ.....	76
4.2 ผลการทดลองภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย.....	84
4.3 ผลการทดลองภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง .....	92
4.4 ผลการทดลอง แบบมีกระดาดชนวนแทรกระหว่างอิเล็กโตรด.....	100
4.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	101
5 สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	102
5.1 สรุปผลการออกแบบ .....	102
5.2 สรุปผลการวิจัย.....	102
5.3 ข้อเสนอแนะ .....	104
รายการอ้างอิง .....	105
ภาคผนวก .....	107
ภาคผนวก ก ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	108
ประวัติผู้เขียน.....	136

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ข้อเปรียบเทียบของหม้อแปลงไฟฟ้าคิกคริบระบายความร้อนแบบแผ่นกับแบบคิกคริบระบายความร้อนแบบลอนลูกฟูก ..... 9
2.2	ค่า PD วัสดุสังเคราะห์ ..... 31
2.3	การใช้งานของไมกาเป็นฉนวน ..... 31
2.4	เกณฑ์การตัดสินใจของ CEGB..... 55
2.5	เกณฑ์การตัดสินใจของ California State University-Sacramento Guidelines ..... 56
2.6	เกณฑ์การตัดสินใจของ IEEE Std C57.104-1991 ..... 57
3.1	ปริมาณก๊าซตั้งต้นก่อนการทดสอบ (ppm.) ..... 67
3.2	แนวทางการทดลองภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ..... 70
3.3	แนวทางการทดลองภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย..... 71
3.4	แนวทางการทดลองภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง..... 72
4.1	ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง 14-20 ppm ..... 76
4.2	การวิเคราะห์ตามมาตรฐาน IEEE Std C57.104-1991 จากผลการทดลองในตารางที่ 4.1 78
4.3	ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง 30-40 ppm ..... 79
4.4	การวิเคราะห์ตามมาตรฐาน IEEE Std C57.104-1991 จากผลการทดลองในตารางที่ 4.3 80
4.5	ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงมากกว่า 50 ppm..... 81
4.6	การวิเคราะห์ตามมาตรฐาน IEEE Std C57.104-1991 จากผลการทดลองในตารางที่ 4.5 83
4.7	ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง 14-20 ppm..... 84
4.8	การวิเคราะห์ตามมาตรฐาน IEEE Std C57.104-1991 จากผลการทดลองในตารางที่ 4.7 86
4.9	ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง 30-40 ppm..... 87
4.10	การวิเคราะห์ตามมาตรฐาน IEEE Std C57.104-1991 จากผลการทดลองในตารางที่ 4.9 88

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.11 ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงมากกว่า 50 ppm.....	89
4.12 การวิเคราะห์ตามมาตรฐาน IEEE Std C57.104-1991 จากผลการทดลองในตารางที่ 4.11.....	91
4.13 ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง 14-20 ppm.....	92
4.14 การวิเคราะห์ตามมาตรฐาน IEEE Std C57.104-1991 จากผลการทดลองในตารางที่ 4.13.....	94
4.15 ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง 30-40 ppm.....	95
4.16 การวิเคราะห์ตามมาตรฐาน IEEE Std C57.104-1991 จากผลการทดลองในตารางที่ 4.15.....	96
4.17 ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงมากกว่า 50 ppm.....	97
4.18 การวิเคราะห์ตามมาตรฐาน IEEE Std C57.104-1991 จากผลการทดลองในตารางที่ 4.17.....	99

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า ..... 5
2.2	โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า..... 7
2.3	ตัวถังหม้อแปลงติดครีบบระบายความร้อนแบบแผ่น..... 8
2.4	ตัวถังหม้อแปลงติดครีบบระบายความร้อนแบบลอนลูกฟูก ..... 8
2.5	วงจรสมมูล PD เฉพาะส่วนของโพรงก๊าซ ในทางปฏิบัติ ..... 15
2.6	ค่าความจุไฟฟ้าของก๊าซรอบๆ หรือฉนวนส่วนต่างๆ..... 17
2.7	แรงดันตกคร่อม โพรงก๊าซและกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ขณะเกิด PD ..... 17
2.8	ลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในทางทฤษฎีสำหรับแก๊สขนาดเล็ก..... 18
2.9	วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD..... 19
2.10	แทน PD ด้วยวงจรสมมูลแบบต่างๆ ..... 23
2.11	วงจรสำหรับการเปรียบเทียบ ..... 24
2.12	วงจรที่ใช้คำนวณความไวของเครื่องตรวจจับ PD สำหรับวัสดุทดสอบทั่วไป ..... 24
2.13	วงจรทดสอบดีสตาร์จบางส่วน ..... 26
2.14	เปรียบเทียบการวัด PD ภายในหม้อแปลงตามมาตรฐาน IEC และ NEMA ..... 28
2.15	การเกิด PD โคโรนาที่เกิดในอากาศ หรือ SF6 ..... 29
2.16	โคโรนาที่เกิดในน้ำมัน ..... 29
2.17	ความเครียดสนามไฟฟ้าภายในฉนวน ..... 30
2.18	ผลสัญญาณรบกวนที่เกิดจากอุปกรณ์ ..... 32
2.19	แสดงผลของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากโลหะใกล้วงจรทดสอบไม่ต่อลงกราวด์..... 32
2.20	แสดงผลสัญญาณรบกวนที่เกิดจากฮาร์มอนิกที่เข้ามาทางแหล่งจ่าย ..... 32
2.21	แสดงผลสัญญาณรบกวนเนื่องจากขั้วต่อสายไม่แน่น ..... 33
2.22	แสดงผลสัญญาณรบกวนเนื่องจากคลื่นวิทยุ ..... 33
2.23	ทิศทางการเคลื่อนที่ของภูมิภาคเคลื่อนที่ในคอลัมน์ที่ทำให้เกิดการแพร่กระจาย แบบวน ..... 40
2.24	ความเข้มข้นของสารในจุดต่างๆ ในโครมาโตกราฟี ..... 40
2.25	ความเข้มข้นของสารในภูมิภาคเคลื่อนที่ ..... 41
2.26	การแยกตัวของสาร 1 และ 2 ในโครมาโตกราฟี..... 46

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของคอลัมน์กับ $4\sigma$ และ $\Delta\sigma$ .....	47
2.28 ค่าเวลาชะต่างๆ .....	48
2.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง H และปริมาณสารตัวอย่าง.....	50
2.30 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของภูมิภาคเคลื่อนที่ต่างๆ กับค่า H.....	51
2.31 ปริมาณภูมิภาคหนึ่งต่างกันจะให้ผลต่อ H ต่างกัน .....	52
2.32 ค่า H กับอัตราการไหลของแก๊สตัวพาจากคอลัมน์ .....	53
2.33 กราฟกำหนดขอบเขตปัญหาของ Dörmenberg.....	54
2.34 กราฟกำหนดขอบเขตปัญหาของ Duval Triangle .....	58
3.1 วงจรสมมูลการตรวจจับดิสซาร์จบางส่วน.....	60
3.2 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูง U .....	61
3.3 ตัวเก็บประจุคัปปลิง Ck และอุปกรณ์รับสัญญาณ CD.....	62
3.4 เครื่องมือวัด MI.....	63
3.5 แบบภาชนะทดสอบน้ำมันหม้อแปลง Ca .....	64
3.6 ภาชนะทดสอบน้ำมันหม้อแปลง Ca.....	64
3.7 อิเล็กโตรดแบบต่างๆ .....	65
3.8 สนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรด.....	66
3.9 เครื่องทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง.....	67
3.10 วงจรการตรวจจับดิสซาร์จบางส่วน .....	68
3.11 การปรับระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด.....	68
3.12 กระจายฉนวน.....	73
3.13 การแทรกกระจายฉนวนระหว่างอิเล็กโตรด.....	73
4.1 ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ความชื้นใน น้ำมันหม้อแปลง 14-20 ppm .....	77
4.2 วิเคราะห์ด้วยวิธี Duval Triangle จากผลการทดลองในตารางที่ 4.1 .....	78
4.3 ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ความชื้นใน น้ำมันหม้อแปลง 30-40 ppm .....	79
4.4 วิเคราะห์ด้วยวิธี Duval Triangle จากผลการทดลองในตารางที่ 4.3 .....	81



## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.5 ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงมากกว่า 50 ppm.....	82
4.6 วิเคราะห์ด้วยวิธี Duval Triangle จากผลการทดลองในตารางที่ 4.5 .....	83
4.7 ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง 14-20 ppm.....	85
4.8 วิเคราะห์ด้วยวิธี Duval Triangle จากผลการทดลองในตารางที่ 4.7 .....	86
4.9 ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง 30-40 ppm.....	87
4.10 วิเคราะห์ด้วยวิธี Duval Triangle จากผลการทดลองในตารางที่ 4.9 .....	89
4.11 ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงมากกว่า 50 ppm.....	90
4.12 วิเคราะห์ด้วยวิธี Duval Triangle จากผลการทดลองในตารางที่ 4.11 .....	91
4.13 ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง 14-20 ppm.....	93
4.14 วิเคราะห์ด้วยวิธี Duval Triangle จากผลการทดลองในตารางที่ 4.13 .....	94
4.15 ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง 30-40 ppm.....	95
4.16 วิเคราะห์ด้วยวิธี Duval Triangle จากผลการทดลองในตารางที่ 4.15 .....	97
4.17 ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงมากกว่า 50 ppm.....	98
4.18 วิเคราะห์ด้วยวิธี Duval Triangle จากผลการทดลองในตารางที่ 4.17 .....	99

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$C_2H_2$	ก๊าซอะเซทิลีน
$C_2H_4$	ก๊าซเอทิลีน
$C_2H_6$	ก๊าซอีเทน
$CH_4$	ก๊าซมีเทน
CO	ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์
$CO_2$	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
DGA	การวิเคราะห์ก๊าซที่เจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง (Dissolved Gas Analysis)
$H_2$	ก๊าซไฮโดรเจน
PD	ดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge)
ppm	หน่วยหนึ่งในล้านส่วน (Part Per Million)



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากล่าวได้ว่า หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญและมีราคาสูงมาก หากหม้อแปลงเกิดความเสียหายจะส่งผลกระทบต่ออย่างมากทั้งต่อผู้ผลิตและผู้ใช้ไฟฟ้า การเกิดดิซชาร์จบางส่วนภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเกิดความเสียหาย ปัจจุบันการตรวจวัดดิซชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังหลังการติดตั้งใช้งานทำได้ยากและมีราคาแพง การวิเคราะห์ก๊าซที่เจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง (Dissolved Gas Analysis, DGA) [1] เป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมอย่างมาก เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถตรวจหาความผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังได้โดยไม่ต้องดับไฟหรือปลดโหลด และให้ความถูกต้องสูง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการตรวจสอบดิซชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลง โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ก๊าซที่เจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง โดยได้ทำการจำลองการเกิดดิซชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลง แล้วนำน้ำมันหม้อแปลงมาวิเคราะห์ก๊าซที่เจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง เพื่อหาแนวโน้มความรุนแรงของการเกิดดิซชาร์จบางส่วนก่อนยกระดับเป็นการเกิดเบรกดาวน์และเกิดการอาร์คตามลำดับ

### 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์ก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง เพื่อตรวจสอบการเกิดดิซชาร์จบางส่วน มีวัตถุประสงค์ดังนี้

- 1.2.1 สามารถตรวจสอบการเกิดดิซชาร์จบางส่วน โดยการวิเคราะห์ก๊าซในน้ำมันหม้อแปลงได้
- 1.2.2 หาแนวโน้มความรุนแรงของการเกิดดิซชาร์จบางส่วนก่อนยกระดับพลังงานการดิซชาร์จ
- 1.2.3 เพื่อเป็นแนวทางในการบำรุงรักษาและป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเกิดความเสียหาย

### 1.3 สมมุติฐานการวิจัย

จากงานวิจัยทั้งในประเทศและต่างประเทศ ก๊าซที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยทั่วไปมีอยู่ 7 ก๊าซ [1-7] ได้แก่ ไฮโดรเจน ( $H_2$ ) คาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) คาร์บอนมอนอกไซด์ ( $CO$ ) มีเทน ( $CH_4$ ) อีเทน ( $C_2H_6$ ) เอทิลีน ( $C_2H_4$ ) อะเซทิลีน ( $C_2H_2$ ) จากการศึกษาพบว่าก๊าซที่จะแสดงตัวเมื่อเกิดดิซชาร์จบางส่วนเมื่อเกิดในน้ำมันหม้อแปลงจะได้ไฮโดรเจนในปริมาณสูงและมีเทนในปริมาณน้อย

และเมื่อเกิดดิสชาร์จในกระดาศนวนจะพบการเพิ่มปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์

ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของก๊าซทั้ง 7 ชนิด เมื่อเพิ่มพลังงานดิสชาร์จจะพบการเปลี่ยนแปลงของก๊าซข้างต้น

#### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ศึกษาการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลงและในกระดาศนวน และศึกษาการวิเคราะห์ก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง

1.4.2 ออกแบบภาชนะทดสอบและทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลงและในกระดาศนวน ภายใต้การเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าและความชื้น

1.4.3 ตรวจวัดการเกิดก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง แบบแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography, GC) รุ่น Myrkos - Portable DGA MicroGC ของ Morgan Schaffer

1.4.4 วิเคราะห์และประเมินแนวโน้มความเสียหายขั้นรุนแรงในระดับที่เป็นอันตรายต่อหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีเชิงอัตราส่วน Dörnenberg Ratio, CEGB Fault Gas Ratio, California State University-Sacramento Guidelines (Key Gas), IEEE Std C57.104-1991 (Gas Limits and Warning Level) และ Duval Triangle

#### 1.5 ขั้นตอนของการวิจัย

1.5.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน

1.5.2 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ก๊าซที่เจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง

1.5.3 ออกแบบและจัดทำด้วยทดสอบน้ำมันหม้อแปลงโดยต้องไม่เกิดการวาบไฟตามผิว

1.5.4 จัดหาน้ำมันหม้อแปลงใหม่ที่มีความชื้นต่ำและไม่มีก๊าซเจือปน

1.5.5 ทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลงและในกระดาศนวนในภาชนะทดสอบบรรจุน้ำมันหม้อแปลง ทำการวิเคราะห์ก๊าซในน้ำมันหม้อแปลงตามขอบเขตที่กำหนด

1.5.6 วิเคราะห์ผลการทดลองหาแนวโน้มความรุนแรงของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนก่อนยกระดับพลังงานการดิสชาร์จ

1.5.7 สรุปผลการทดลองและเสนอแนะแนวทางการพัฒนาและศึกษาต่อไป

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 เข้าใจการทดสอบดิซซาร์จบางส่วนและการวิเคราะห์ก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง
- 1.6.2 ประเมินแนวโน้มความเสียหายขั้นรุนแรงในระดับที่เป็นอันตรายต่อหม้อแปลงไฟฟ้าได้
- 1.6.3 สามารถแจ้งเตือนล่วงหน้าก่อนปัญหาความเสียหายลุกลาม
- 1.6.4 วางแผนการบำรุงรักษาและป้องกันความเสียหายได้ทันทั่วทั้งที่



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้เป็นการสืบค้นทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ที่ได้จัดทำขึ้น ประกอบไปด้วยเรื่องหม้อแปลงไฟฟ้า การตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน การวิเคราะห์ก๊าซที่เจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และสรุปทฤษฎีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

#### 2.1 หม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้า จากแรงดันระดับหนึ่งไปสู่อีก ระดับแรงดันหนึ่ง โดยอาศัยขงจรแม่เหล็กที่ประกอบขึ้นจากแผ่นเหล็กซิลิกอน ทำเป็นแกนให้เส้นแรง แม่เหล็กไหลผ่าน และมีขดลวดพันรอบแกนเหล็ก ทำหน้าที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็กและแปลงระดับ แรงดัน นอกจากนี้ ยังต้องมีฉนวน ซึ่งอาจจะเป็นฉนวนแข็ง ฉนวนเหลว หรือฉนวนก๊าซ

หลักการงานเบื้องต้นของหม้อแปลงไฟฟ้าในการสร้างแรงดัน โดยพิจารณาหม้อแปลง เฟสเดียว เพื่อง่ายต่อความเข้าใจ สำหรับหม้อแปลงแบบหลายเฟส มีหลักการงานเช่นเดียวกัน โดยทั่วไป หม้อแปลงไฟฟ้าจะประกอบด้วย ขดลวดอย่างน้อย 2 ชุด พันอยู่บนแกนเหล็กเดียวกัน โดย จ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ขดลวดด้านปฐมภูมิ มีจำนวนรอบ  $N_p$  รอบ และต่อ โหลดที่ขดลวดด้านทุติยภูมิ มีจำนวนรอบ  $N_s$  รอบ แสดงดังภาพที่ 2.1 ในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ รูปคลื่นแรงดันและเส้นแรง แม่เหล็ก  $\phi(t)$  สามารถประมาณได้ด้วยฟังก์ชันไซน์ในเทอมของเวลา ดังสมการที่ 2.1 [8]

จากกฎแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กตัด ผ่านขดลวด จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดตามสมการที่ 2.2 [9] โดยกำหนดให้ว่า เส้น แรงแม่เหล็กที่คล้องขดลวดที่พันอยู่รอบแกนเหล็กมีค่าเท่ากันทุกรอบ สามารถหาสมการแรงเคลื่อน เหนี่ยวนำในขดลวดได้ตามสมการที่ 2.3

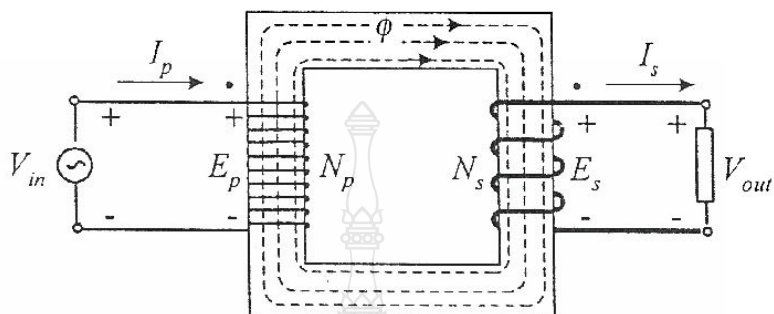
$$e(t) = N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.2)$$

$$e(t) = 2\pi f N A_{Fe} B_m \cos(\omega t - 180) \quad (2.3)$$

โดยที่

$e(t)$  คือ แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

$N$  คือ จำนวนรอบของขดลวด



ภาพที่ 2.1 แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า [8]

$$\phi(t) = \phi_m \sin \omega t = A_{Fe} B_m \sin \omega t \quad (2.1)$$

โดยที่

$\phi_m$  คือ ขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก (Wb)

$B_m$  คือ ขนาดของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (T)

$A_{Fe}$  คือ พื้นที่หน้าตัดสุทธิของแกนเหล็ก ( $\text{mm}^2$ )

$\omega$  คือ ความถี่เชิงมุม เท่ากับ  $2\pi f$  (rad/sec)

$f$  คือ ความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลัง (Hz)

ในการใช้งานจะพิจารณาแรงดันและกระแสเป็นค่ารากกำลังสองเฉลี่ย มากกว่าค่าขณะใดขณะหนึ่ง หรือค่าสูงสุด และค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของรูปคลื่นไซน์ใดๆ มีค่าเท่ากับ  $1/\sqrt{2}$  เท่าของค่ายอด ดังนั้น ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากับ

$$E_{rms} = \sqrt{2}\pi f N A_{Fe} B_m \quad (2.4)$$

จากสมการที่ 2.4 จะได้ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงดันเหนี่ยวนำที่ด้านแรงดันสูง และด้านแรงดันต่ำ ในเทอมของจำนวนรอบตามสมการที่ 2.5 [10] ฉะนั้น หม้อแปลงจึงสามารถแปลงระดับแรงดันให้สูงขึ้นหรือต่ำลงได้ โดยการพันขดลวดให้มีจำนวนรอบสัมพันธ์กับระดับของแรงดันเหนี่ยวนำตามสมการ

$$\frac{E_{HV}}{E_{LV}} = \frac{N_{HV}}{N_{LV}} \quad (2.5)$$

โดยที่

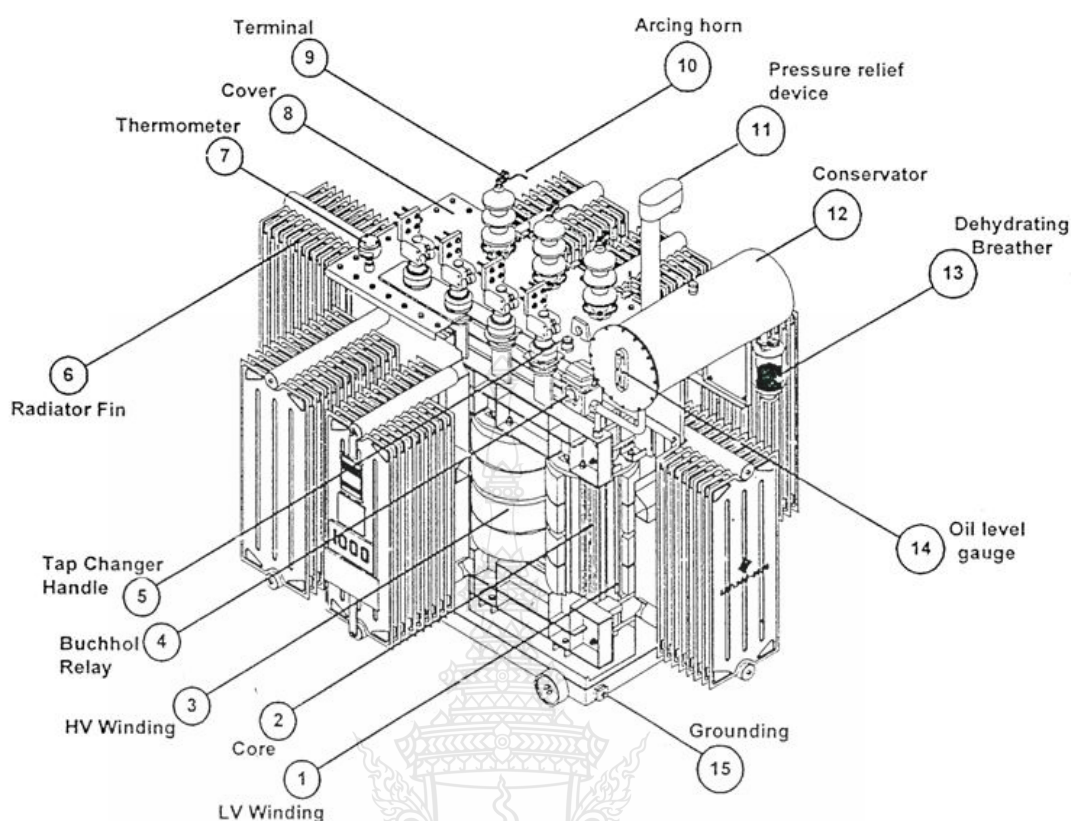
- $E_{HV}$  คือ แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ขดลวดด้านแรงดันสูง (V)
- $E_{LV}$  คือ แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ขดลวดด้านแรงดันต่ำ (V)
- $N_{HV}$  คือ จำนวนรอบของขดลวดด้านแรงดันสูง (รอบ)
- $N_{LV}$  คือ จำนวนรอบของขดลวดด้านแรงดันต่ำ (รอบ)

### 2.1.1 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า

โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า แสดงได้ดังภาพที่ 2.2 สามารถแบ่งโครงสร้างและส่วนประกอบที่สำคัญได้ดังต่อไปนี้ [11-12]

- 1) ส่วนประกอบภายนอก ได้แก่ ถังหม้อแปลง (Transformer Tank) อุปกรณ์กระจายความร้อน (Radiator Fin) ขั้วต่อสาย (Terminal) น้ำมันหม้อแปลง (Transformer Oil) ห้องรองรับน้ำมัน (Conservator) ห้องหายใจและห้องกรองความชื้น (Breather and Silica Gel) เครื่องวัดระดับน้ำมัน (Oil Gauge) เครื่องวัดอุณหภูมิ บุคโฮลทรีเลย์ (Buchholz Relay) และ บุชชิ่ง (Bushing) เป็นต้น
- 2) ส่วนต่อภายในและภายนอก ได้แก่ สายตัวนำ แท็ปเชนเจอร์ (Tap Changer) ฉนวนปลายขั้ว (Terminal Insulator) เป็นต้น
- 3) ส่วนที่เป็นวงจรแม่เหล็ก ได้แก่ แกนเหล็กซิลิกอน และส่วนที่จับยึดโครงสร้างของแกนเหล็ก (Clamping) เป็นต้น
- 4) ส่วนที่เป็นวงจรไฟฟ้า ได้แก่ ขดลวดด้านปฐมภูมิ ขดลวดด้านทุติยภูมิและเครื่องรัด (Bracing Device) เป็นต้น
- 5) ฉนวน (Insulation) เป็นฉนวนในลักษณะต่างๆที่ใช้ในส่วนต่างๆ ของหม้อแปลง เช่น ฉนวนระหว่างขดลวดแรงต่ำ กับขดลวดแรงสูง เป็นต้น



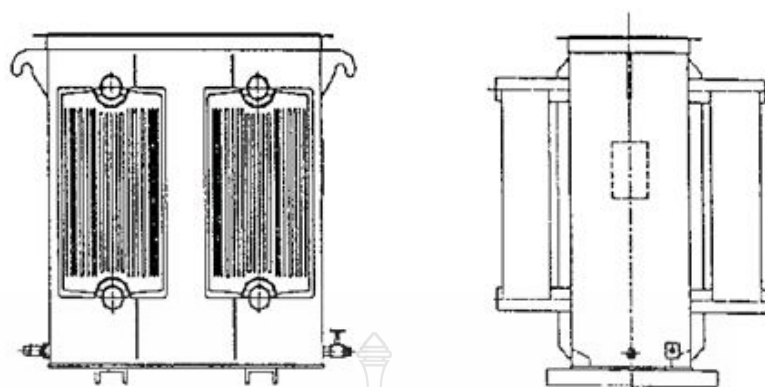


ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า

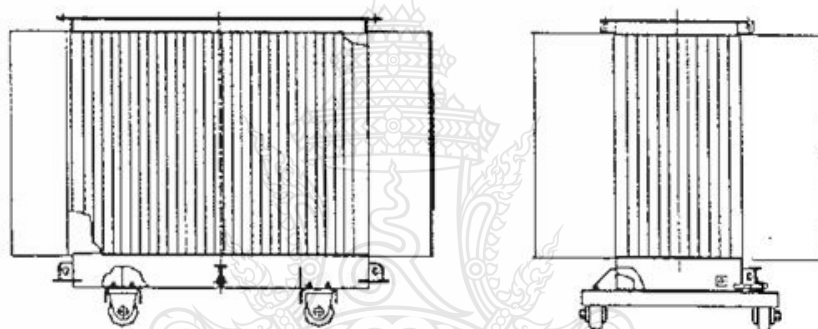
โครงสร้างและส่วนประกอบดังที่กล่าวมาแล้วนั้น หม้อแปลงทุกเครื่องไม่จำเป็นต้องมีครบทุกชิ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานของหม้อแปลงและขนาดพิกัดของหม้อแปลงด้วย เช่น แท็ปเชนเจอร์ (Tap changer) บุคโฮลรีเลย์และเทอร์โมมิเตอร์ เป็นต้น อาจจะมีหรือไม่มีก็ได้

### 2.1.2 ถังหม้อแปลง

ถังหม้อแปลง (Transformer Tank) เป็นอุปกรณ์สำหรับห่อหุ้มฉนวนเหลว หรือก๊าซของหม้อแปลง โครงสร้างของถังหม้อแปลง มีอยู่หลายลักษณะตามความเหมาะสมของผู้ผลิตหม้อแปลงหรือขึ้นอยู่กับผู้ใช้ โดยปกติแล้วผู้ใช้งานจะต้องการหม้อแปลงที่มีน้ำหนักเบา ราคาถูก สั้น สะเทือนน้อย ระดับความดังของเสียงต่ำ มีความเชื่อถือสูง และอายุการใช้งานนาน สามารถแบ่งลักษณะของถังหม้อแปลงตามชุดระบายความร้อนได้ 2 ชนิดใหญ่ๆ ดังภาพที่ 2.3 และ ภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.3 ตัวถังหม้อแปลงติดครีระบายความร้อนแบบแผ่น



ภาพที่ 2.4 ตัวถังหม้อแปลงติดครีระบายความร้อนแบบลอนลูกฟูก

ตัวถังหม้อแปลงติดครีระบายความร้อนแบบแผ่น (Radiator Fin) ตามภาพที่ 2.3 เป็นตัวถังที่มีความแข็งแรง ทนต่อการสั่นสะเทือน เหมาะสำหรับหม้อแปลงที่มีถังรองรับน้ำมัน (Conservator) ทำให้น้ำมันสัมผัสกับอากาศได้โดยตรง (Open Type) สำหรับตัวถังหม้อแปลงติดครีระบายความร้อนแบบลอนลูกฟูก (Corrugate Fin) ตามภาพที่ 2.4 ครีบนอกจากจะทำหน้าที่ ระบายความร้อนแล้วยังสามารถรองรับต่อการขยายตัวของน้ำมันเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้องมีถังรองรับน้ำมัน อากาศภายนอกไม่สามารถสัมผัสกับน้ำมันได้โดยตรง (Hermetically Sealed) ข้อเปรียบเทียบระหว่างครีระบายความร้อนแบบแผ่นกับแบบลอนลูกฟูก แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อเปรียบเทียบของหม้อแปลงไฟฟ้าติดครีบบระบายความร้อนแบบแผ่นกับแบบติดครีบบระบายความร้อนแบบลอนลูกฟูก

รายการ	ครีบบแบบแผ่น	ครีบบแบบลอนลูกฟูก
โครงสร้าง	ตัวถังและครีบบระบายความร้อน ทำจากแผ่นเหล็กหนา โครงสร้างของหม้อแปลงมีความแข็งแรง	ผนังของถังทำจากแผ่นเหล็กบาง ทำเป็นลอนเพื่อช่วยระบายความร้อน มีความกะทัดรัด
การหมุนเวียนของน้ำมัน	หมุนเวียนได้สะดวก น้ำมันที่ร้อนจะรอบตัวตู้ด้านบน เข้าสู่ชุดระบายความร้อน เมื่อเย็นตัวจะต่ำลงสู่ด้านล่าง หมุนเวียนโดยตลอด	การหมุนเวียนกระจัดกระจายไม่แน่นอน
การเพิ่มไหล	ทำได้ง่าย โดยการติดตั้งพัดลมช่วยระบายความร้อนที่ชุดระบายความร้อน	ทำได้ยากกว่า ต้องใช้พัดลมสำหรับเฉพาะงานเท่านั้น
การทนต่อความดัน	สามารถทนต่อความดันที่เกิดขึ้นภายในได้ 10 PSIG	สามารถทนต่อความดันที่เกิดขึ้นภายในได้ 3.5 PSIG
การบำรุงรักษา	ควรทำการตรวจสอบอย่างน้อยปีละ 1 ครั้ง สังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงของสีสารกรองความชื้น (Silica Gel)	ไม่ต้องทำการบำรุงรักษามากนัก เพราะ น้ำมันไม่สัมผัสอากาศภายนอกโดยตรง

### 2.1.3 น้ำมันหม้อแปลง

น้ำมันที่ใช้ในหม้อแปลง (Transformer Oil) นอกจากจะทำหน้าที่เป็นฉนวนแล้วยังมีหน้าที่พาความร้อนที่เกิดจากกำลังสูญเสียออกจากขดลวดและแกนเหล็ก คุณสมบัติที่สำคัญของน้ำมันหม้อแปลงเพื่อที่จะทำหน้าที่เป็นฉนวนได้อย่างสมบูรณ์ มีดังนี้

- 1) มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี มีค่าความเป็นฉนวน (Dielectric Strength) สูง
- 2) ระบายความร้อนได้ดี มีความหนืด (Viscosity)
- 3) มีจุดไหล (Pour Point) ต่ำ ไม่แข็งตัวในฤดูหนาว
- 4) ระเหยได้น้อย มีจุดวาบไฟ (Flash Point) สูง
- 5) คงทนต่อปฏิกิริยาทางเคมี ไม่มีสารไปกัดกร่อนส่วนที่เป็นโลหะ
- 6) มีค่าความเป็นกรด (Acidity) ต่ำ
- 7) สะอาดปราศจากความชื้น หรือสิ่งเจือปนต่างๆ

#### 2.1.4 ถังรองรับน้ำมัน

ถังรองรับน้ำมัน (Conservator Tank) มีลักษณะเป็นถังอยู่สูงเหนือหม้อแปลง ภายในบรรจุ น้ำมันหม้อแปลง ไว้ทำหน้าที่รองรับการขยายหรือหดตัวของน้ำมันหม้อแปลง เมื่ออุณหภูมิของน้ำมัน สูงขึ้น น้ำมันจะขยายตัวผ่านเข้าไปในท่อหรือลิ้นบังคับ (Valve) เข้าสู่ถังรองรับน้ำมัน อากาศที่สัมผัส กับน้ำมันจะถูกกรองความชื้น โดยเครื่องหายใจกรองความชื้น (Dehydrating Breather)

ขนาดของถังรองรับน้ำมันนี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งต้องสามารถรองรับน้ำมัน ส่วนที่จะขยายตัวได้ จากการทดลอง น้ำมันจะขยายตัวได้ประมาณ 7% ของน้ำมันภายในตัวถังของ หม้อแปลงในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 0-100 °C ฉะนั้นเวลาทำการออกแบบถังรองรับน้ำมัน ขนาดของ ถังรองรับน้ำมันจะต้องสามารถรองรับน้ำมันในส่วนที่จะขยายตัวได้ประมาณ 11-12% ของน้ำมัน ทั้งหมดที่อยู่ในตัวถังของหม้อแปลง

#### 2.1.5 ท่อหายใจกรองความชื้น

ความชื้นมีความสำคัญต่อความเป็นฉนวนของน้ำมัน ท่อหายใจกรองความชื้นหรือเครื่องทำ ให้อากาศแห้ง มีหน้าที่ปรับแรงดันภายในและภายนอกถังให้เท่ากัน และป้องกันความชื้นของอากาศและฝุ่น เข้าไปในหม้อแปลงได้ ฝุ่นจะถูกกรองด้วยน้ำมันที่อยู่ก้นถ้วยท่อหายใจ (Breather) นี้ ส่วนความชื้นจะ ถูกดูดซับโดยสารเคมี (Silica Gel) สารนี้มีหน้าที่ดูดความชื้นในสภาพที่ใช้งานได้ สารเคมีนี้จะมีสีน้ำเงิน แต่จะเปลี่ยนเป็นสีชมพูเมื่อเสื่อมคุณภาพแล้ว จึงควรเปลี่ยนสารใหม่ หรือทำให้แห้งแล้วค่อยนำกลับ เข้าใช้งานอีก

ความชื้นในหม้อแปลงไม่เพียงแต่ลดค่าความเป็นฉนวน (Dielectric Strength) ของน้ำมันลง เท่านั้น แต่ยังสร้างมูลน้ำมัน (Sludge) ให้อีกด้วย อากาศจะทำปฏิกิริยา (Oxidation) กับน้ำมัน สร้างมูล น้ำมันทำให้น้ำมันเป็นสีดำ มูลน้ำมันนี้จะรวมตัวเป็นตะกอนเกาะติดตามร่องของขดลวดและแกน เหล็ก (Core Loss) เป็นผลให้ฉนวนไฟฟ้า (Insulation) ของขดลวด (Winding) เสื่อมคุณภาพลง อย่างไม่รู้ตัว ถังรองรับน้ำมันและท่อหายใจกรองความชื้นอาจจะไม่มีก็ได้ ถ้าเป็นหม้อแปลงชนิดที่มี ก๊าซไนโตรเจนอัดอยู่ในถังหม้อแปลง หรือเรียกว่า หม้อแปลงแบบปิดผนึก (Sealed Tank)

#### 2.1.6 เครื่องวัดระดับน้ำมัน

โดยทั่วไป เครื่องวัดระดับน้ำมัน (Oil Level Gauge) จะติดตั้งอยู่ข้างๆ ถังรองรับน้ำมัน (Conservator) แบ่งได้เป็น 2 ชนิดด้วยกัน คือ ชนิดที่ใช้หลอดแก้ว (Rod Type Oil Gauge) และชนิดที่มี หน้าปัดเข็มชี้ (Dial Type Oil Gauge) เครื่องวัดชนิดนี้ ยังสามารถเพิ่มจุดสัมผัสที่เข็ม เพื่อติดตั้งเครื่อง เตือน (Alarm) โดยให้มีเสียงดังไปยังห้องควบคุม เมื่อน้ำมันตกถึงระดับต่ำสุด

### 2.1.7 เครื่องวัดอุณหภูมิ

เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับบอกอุณหภูมิของหม้อแปลง การบอกอุณหภูมิส่วนบนของน้ำมันหม้อแปลง (Top Oil Temperature) จะคิดด้วรับความร้อน บนฝาถังหม้อแปลงเป็นบริเวณที่น้ำมันร้อนที่สุด และอุณหภูมิของขดลวด (Winding Temperature) ต้องอาศัยวิธีวัดทางอ้อม โดยขดลวดจะร้อนมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่าน ฉะนั้น จากค่าของกระแสที่ไหลผ่าน สามารถเปรียบได้กับความร้อน โดยการนำเอากระแสที่ได้จากหม้อแปลงกระแสที่ขั้วต่อสายไฟ (BCT) ไหลผ่านขดลวดความร้อน เพื่อส่งค่าอุณหภูมิให้แก่เทอร์โมมิเตอร์ และส่งไปที่หน้าปัดแสดงผล

### 2.1.8 ลิ้นระบายความดัน

ลิ้นระบายความดัน (Pressure Relief Device) ความผิดปกติที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลง เช่น เกิดประกายไฟ (Arcing) อันเป็นผลทำให้เกิดแรงดันของก๊าซสูงขึ้น แรงดันของก๊าซที่สูงมากนี้ จะผ่านท่อระบายความดันไปกระแทกแผ่นระบายความดัน (Busting Plate) ที่ส่วนบนเพื่อออกสู่ภายนอก

### 2.1.9 แท็ปเชนเจอร์

แท็ปเชนเจอร์หรือตัวเปลี่ยนระดับแรงดัน (Tap Changer) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดหม้อแปลง เพื่อรักษาระดับแรงดันของผู้ใช้ไฟฟ้าให้คงที่ แท็ปเชนเจอร์มีสองลักษณะคือ

1) ตัวเป็นแท็ปขณะปิดวงจร (Off-Circuit Tap Changer) เป็นตัวเปลี่ยนแท็ปที่ง่ายไม่ซับซ้อนและมีราคาถูก เหมาะสำหรับหม้อแปลงที่ใช้ในระบบจำหน่าย มีขั้น (Step) ของการเปลี่ยนแรงดันประมาณ 3-5 ขั้น ก่อนจะทำการเปลี่ยนแท็ปจะต้องปิดวงจรเสียก่อน

2) ตัวเปลี่ยนแท็ปขณะจ่ายโหลด (On-Load Tap Changer) เป็นตัวเปลี่ยนแท็ปที่สามารถทำการปรับขึ้นของการเปลี่ยนแรงดันได้ในขณะที่หม้อแปลงจ่ายโหลดอยู่แต่ละมีวงจรการต่อซับซ้อนยุ่งยากและมีราคาแพงมากกว่าชนิดปิดวงจรมีขั้นของการเปลี่ยนแรงดันละเอียดและมากกว่าตัวเปลี่ยนแท็ปขณะปิดวงจร เหมาะสำหรับหม้อแปลงที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าสูง ในการเลือกใช้แท็ปจะต้องพิจารณาดังนี้

- ระดับแรงดันที่พิกัดของหม้อแปลง
- เฟอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแรงดันในแต่ละขั้น
- อัตราทนกระแสสูงสุด
- ระดับแรงดันระหว่างหน้าสัมผัส (Contact) ที่อยู่ใกล้กัน
- จำนวนขั้นของการเปลี่ยนแรงดัน

สำหรับตัวเปลี่ยนแท่งที่ใช้ในหม้อแปลงจำหน่ายตามมาตรฐานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จะเป็นตัวเปลี่ยนแท่งขณะปิดวงจร มีชั้นของการเปลี่ยนแรงดัน  $\pm 2 \times 2.5\%$  ของพิกัดแรงดันทางด้านแรงสูง ส่วนตามมาตรฐานการไฟฟ้านครหลวงนั้นจะมีชั้นของการเปลี่ยนแรงดันเป็น  $-4 \times 2.5\%$  ของพิกัดแรงดันทางด้านแรงสูง

#### 2.1.10 กับคักฟ้าผ่า

โดยปกติอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้น บริษัทผู้ผลิตจะผลิตอุปกรณ์ให้มีค่าฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าสูงกว่าระบบแรงดันที่ใช้ งาน ตัวอย่างเช่น หม้อแปลงระบบ 11 กิโลโวลต์ ตามมาตรฐาน โรงงานจะผลิตหม้อแปลงให้มีค่าฉนวนไฟฟ้าสูงประมาณ 75 กิโลโวลต์ ค่าฉนวนไฟฟ้าสูงๆ นี้ ก็เพื่อป้องกันอันตรายจากแรงดันเกินพิกัด 11 กิโลโวลต์ เช่น จากฟ้าผ่าหรือเกิดจากการสับสวิทช์ใบมีด แต่ถ้าหากเกิดฟ้าผ่าแรงดันสูงกว่านี้หม้อแปลงก็ทนไม่ได้และจะชำรุด และเวลาฟ้าผ่า แรงดันฟ้าผ่าจะเข้าทางบุชชิ่งแรงสูงเข้าสู่ขดลวดแรงสูงภายในและจะหาทางทะลุสู่ตัวถัง และแกนเหล็กเพื่อจะลงสู่กราวด์ถ้าทะลุสู่ตัวถังหรือแกนเหล็กได้ทั้งนี้ แสดงว่าขดลวดแรงสูงต้องชำรุดขดลวดแรงต่ำอาจทะลุด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ป้องกัน เช่น กับคักฟ้าผ่า (Arcing Horns) โดยจะประกอบอยู่กับบุชชิ่งแรงดันสูง

ระยะห่าง (Airgap) ของ Arcing Horns จะมีส่วนช่วยป้องกันการชำรุดของหม้อแปลง เพราะ แรงดันจะกระโดดผ่านทาง Arcing Horns (ซึ่งมีค่า Breakdown Airgap ต่ำกว่าค่าฉนวน) แทนที่จะหาทางทะลุผ่านฉนวนและน้ำมันลงตัวถัง สมมุติว่า Breakdown Airgap ของ Arcing Horns มีค่า 55 กิโลโวลต์ พอเกิดฟ้าผ่าแรงดันส่วนที่เกิน 55 กิโลโวลต์ จะกระโดดผ่านลงตัวถังทาง Arcing Horns ส่วนที่ต่ำกว่า 55 กิโลโวลต์ ไม่สามารถผ่าน Airgap ได้ หม้อแปลงก็จะรับไว้ได้ เพราะสามารถทนได้ถึง 55 กิโลโวลต์ ค่าแรงดันต่ำกว่า 55 กิโลโวลต์ จะสูญหายไปเป็นพลังงานความร้อนที่จะพยายามลงสู่กราวด์ โดยหม้อแปลงรับไว้เฉลี่ยไปตามขดลวดแรงสูง และเหนี่ยวนำไปขดลวดแรงต่ำและหาทางลงผ่านล่อฟ้าแรงต่ำ หรือแพร่กระจายไปในระบบจำหน่ายแรงต่ำ เป็นต้น ระยะ Airgap ของ Arcing Horns ควรเป็นดังนี้

- ระดับแรงดัน 11 kV ระยะควรเป็น 8.6 เซนติเมตร
- ระดับแรงดัน 22 kV ระยะควรเป็น 15.5 เซนติเมตร
- ระดับแรงดัน 33 kV ระยะควรเป็น 22 เซนติเมตร

### 2.1.11 บุชโฮลทรีเลย์

บุชโฮลทรีเลย์ (Buchholz Relay) ทำการติดตั้งเฉพาะหม้อแปลงที่มีถังรองรับน้ำมันเท่านั้น และจะต่ออยู่ระหว่างตัวถังหม้อแปลง กับถังรองรับน้ำมันทำหน้าที่ตรวจความผิดปกติในหม้อแปลง เช่น จากก๊าซที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงแจ้งสัญญาณเตือนให้ทราบ ถ้าก๊าซเกินระดับ จะส่งสัญญาณตัดไฟเข้า-ออก จากหม้อแปลงและถ่าน้ำมันภายในหม้อแปลงเกิดไหลย้อนกลับเข้าไปยังถังรองรับน้ำมัน โดยผ่านบุชโฮลทรีเลย์ด้วยความเร็วเกิน 100 cm/sec เนื่องจากเกิดการลัดวงจรภายในหม้อแปลง ทำให้แผ่นกั้นในบุชโฮลทรีเลย์พลิกก็จะส่งสัญญาณตัดไฟเข้า – ออกจากหม้อแปลงเช่นเดียวกัน

## 2.2 การตรวจจับดีสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

ฉนวนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่ทำหน้าที่สำคัญภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง คือ กั้นระหว่างส่วนที่มีศักย์ไฟฟ้าต่างกันมิให้สัมผัสกัน การที่ฉนวนเสื่อมสภาพอาจเกิดจากสาเหตุหลายประการ เช่น จากการเกิดดีสชาร์จบางส่วนภายในเนื้อฉนวน จากแรงกลไฟฟ้า จากการสูญเสียเสถียรภาพทางเคมี เป็นต้น [3] โดยที่การเกิดดีสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge, PD) จะทำให้พลังงานศักย์จากสนามไฟฟ้าเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานจลน์ของประจุไฟฟ้า หากความหนาแน่นเชิงปริมาตรของพลังงานจลน์มีค่าเกินกว่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของพลังงานการสลายตัวของพันธะเคมี (Dissociation Energy) ของวัสดุที่ใช้ทำฉนวนแล้ว ฉนวนก็จะเริ่มกระบวนการเสื่อมสภาพ ซึ่งมีผลกระทบต่ออายุการใช้งานของฉนวน โดยตรง และอาจก่อให้เกิดคลื่นวิทยุไปรบกวนอุปกรณ์ระบบสื่อสารได้ ซึ่งมาตรฐานสากลได้กำหนดค่าสูงสุดของปริมาณที่เกี่ยวข้องกับ PD เอาไว้

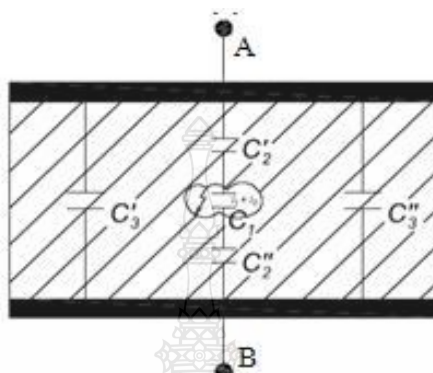
อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต่างๆ เช่น เกเบิล หม้อแปลง ปลอกฉนวนนำสาย และกับดักฟ้าผ่า เป็นต้น จะต้องได้รับการทดสอบ PD ก่อนนำไปใช้งานเพื่อให้มั่นใจว่าอุปกรณ์ดังกล่าวมีคุณภาพการฉนวนที่เหมาะสมสามารถทำงานได้ตามปกติตลอดอายุการใช้

### 2.2.1 วงจรสมมูลและธรรมชาติการเกิดดีสชาร์จบางส่วน [14]

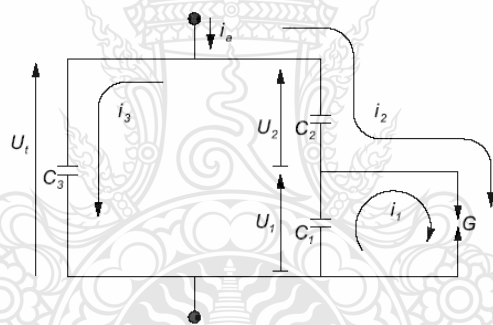
#### 1) วงจรสมมูลดีสชาร์จภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงดันสูงทั่วไป

โดยปกติแล้ววงจรสมมูลของวงจรดีสชาร์จภายในนั้นจะหมายถึง วงจรสมมูลที่ใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับ ถ้ากล่าวถึงดีสชาร์จบางส่วนอย่างลอยๆ ก็ให้หมายถึงดีสชาร์จภายใน วงจรสมมูลสำหรับฉนวนของอุปกรณ์ขณะเกิด PD อาจแทนด้วยค่าความจุไฟฟ้า  $C_1, C_2, C_3$  และสปาร์กแกป  $G$  [13] ดังภาพที่ 2.5 โดยฉนวนส่วนที่บกพร่องซึ่งโดยปกติแล้วจะเป็น โพรงก๊าซขนาดเล็กๆ จะถูกแทนค่าด้วยค่าความจุไฟฟ้า  $C_1$  และสปาร์กแกป  $G$  และค่าความจุไฟฟ้ารวมของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงดันสูงหรือวัสดุทดสอบเท่ากับ  $C_u$  จากภาพที่ 2.5 เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสายของอุปกรณ์ (ขั้ว A-B) ใน

ภาพที่ 2.5 (ก) จะทำให้เกิด แรงดันตกคร่อมส่วนต่างๆ ของฉนวนแสดงดังภาพที่ 2.5 (ข) ถ้าเกิดแรงดันตกคร่อมโพรงก๊าซสูงเกินกว่าค่าแรงดันที่โพรงก๊าซสามารถทนได้ ทำให้เกิดเบรกดาวนหรือดีสชาร์จเฉพาะบริเวณ โพรงก๊าซนี้ จึงเรียกว่าเกิด ดีสชาร์จบางส่วน หรือ PD ภายในอุปกรณ์นั้น



(ก) วงจรสมมูล PD ภายในวัสดุทดสอบ

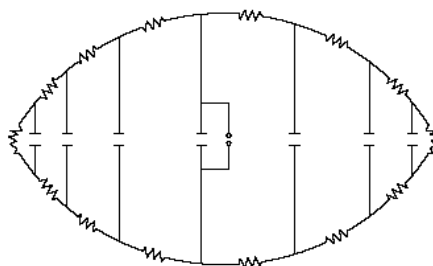


(ข) วงจรสมมูล PD ภายในวัสดุทดสอบ



(ค) การกระจายของประจุก่อนการเกิด PD





(ง) พิวของฉนวนรอบโพรงก้ำซ

ภาพที่ 2.5 วงจรสมมูล PD เฉพาะส่วนของโพรงก้ำซ ในทางปฏิบัติ

จากภาพที่ 2.5 (ข) จะได้

$$C_3 = C'_3 + C''_3 \quad (2.6)$$

$$C_2 = \frac{C'_2 C''_2}{C'_2 + C''_2} \quad (2.7)$$

$$C_3 \gg C_1 \gg C_2 \quad (2.8)$$

และ

$$C_a = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} + C_3 \approx C_3 \quad (2.9)$$

จากภาพที่ 2.5 (ข) แรงดันตกที่ขั้วสาย  $\Delta U_1$  เนื่องจากการเกิด PD สามารถคำนวณได้โดยเปรียบเทียบประจุที่สะสมก่อนและหลังการเกิด PD ได้ดังนี้

$$C_3 U_t + C_2 (U_t - \Delta U_1) = C_3 U'_t + C_2 U'_t \quad (2.10)$$

จะได้

$$\Delta U_i = (U_i - U'_i) = \frac{C_2 \Delta U_1}{(C_2 + C_3)} \quad (2.11)$$

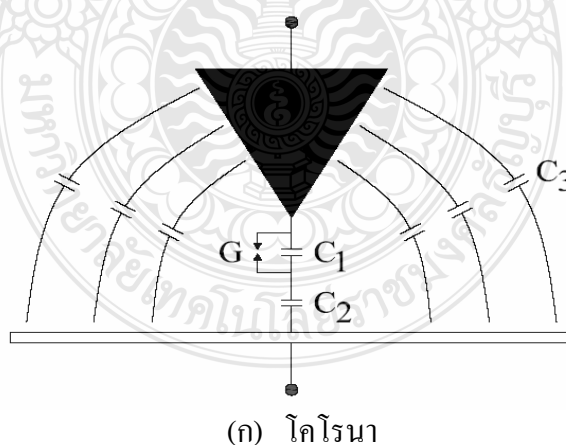
โดยที่

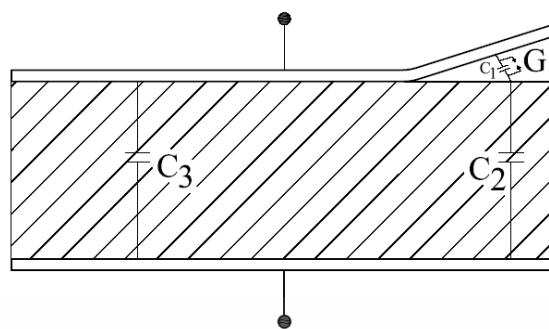
$U_i$  คือ แรงตกคร่อมขั้วสายก่อนการเกิด PD

$U'_i$  คือ แรงตกคร่อมขั้วสายหลังการเกิด PD

อนึ่งวงจรสมมูลในทางปฏิบัติของ PD เนื่องจากเกิดโพรงก๊าซหรืออากาศในเนื้อฉนวนที่แสดงในดั่งภาพที่ 2.5 (ค) และ 2.5 (ง) นั้นจะแสดงเฉพาะส่วนโพรงก๊าซและผิวของฉนวนที่อยู่ติดกับโพรงก๊าซเท่านั้น โดยในภาพที่ 2.5 (ค) แสดงการกระจายของประจุก่อนการเกิด PD หรือ เบรกดาวน์ ส่วนในภาพที่ 2.5 (ง) จะแทนผิวของฉนวนรอบโพรงก๊าซด้วยความต้านทานที่มีค่าสูงมาก และแทนโพรงก๊าซด้วยตัวเก็บประจุต่างๆ และสปาร์กแกปตรงตำแหน่งที่จะเกิดเบรกดาวน์ ดังนั้นถ้าไม่คำนึงถึงผลของความต้านทานที่ผิว ผลที่ได้จึงใกล้เคียงกับวงจรสมมูลในภาพที่ 2.5 (ข) นั่นเอง

วงจรสมมูลในภาพที่ 2.5 (ข) สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับ PD ที่เกิดในบริเวณปลายแหลมของอิเล็กโตรด หรือ ขอบคม ซึ่ง PD ในลักษณะนี้เรียกว่า โคโรนา (Corona) นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับดีสชาร์จตามผิว (Surface Discharge) ได้เช่นเดียวกันโดยสามารถแทนอากาศรอบๆ หรือฉนวนส่วนต่างๆ ด้วยค่าความจุไฟฟ้ดั่งภาพที่ 2.6 ตามลำดับ [13]





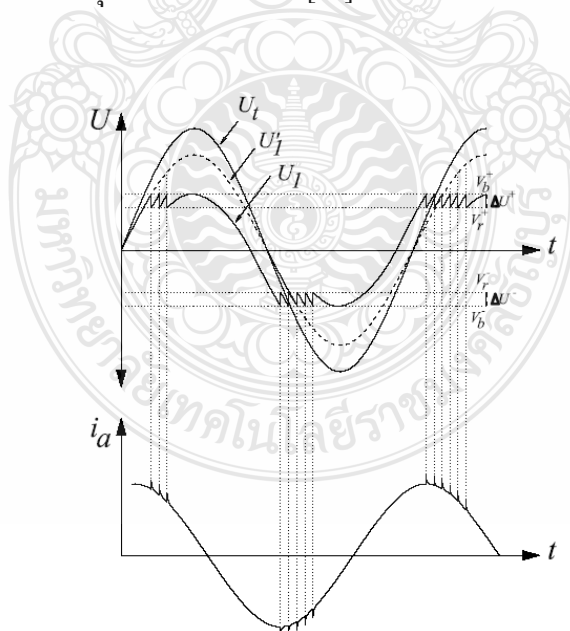
(จ) ดิสชาร์จตามผิว

ภาพที่ 2.6 ค่าความจุไฟฟ้าของก๊าชรอบๆ หรือนวนวนส่วนต่างๆ

### 2.2.2 ธรรมชาติการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

#### 1) การเกิดดิสชาร์จซ้ำ

ในทางปฏิบัติ PD อาจเกิดซ้ำๆ ได้หลายครั้งในแต่ละคาบเวลา ดังภาพที่ 2.7 โดยที่  $U_t$  คือแรงตกคร่อมขั้วสายของอุปกรณ์  $V_b$  คือแรงดันเบรกคาวน์ของโพรงก๊าช  $V_r$  คือแรงดันหลังเบรกคาวน์ของโพรงก๊าช  $U_1$  คือแรงดันคร่อมโพรงก๊าช  $U_1'$  คือแรงดันคร่อมโพรงก๊าชถ้าไม่มีการเกิด PD เลย และ  $i_a$  คือกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ ตามลำดับ [13]

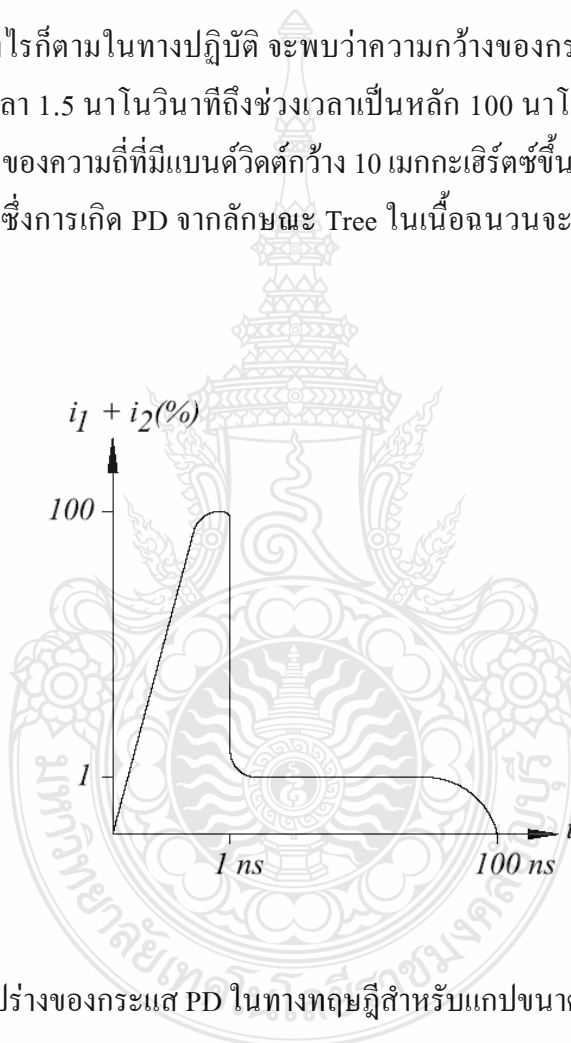


ภาพที่ 2.7 แรงดันตกคร่อมโพรงก๊าชและกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ขณะเกิด PD

## 2) ลักษณะรูปร่างของกระแสดีสารบางส่วน

ลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในแก๊ปหรือโพรงก๊าซเล็ก ในทางทฤษฎีแสดงดังภาพที่ 2.8 ขณะเกิด PD การไหลของกระแสผ่านแก๊ปจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าไอออนบวกผ่านแก๊ปสั้นๆ เมื่ออิเล็กตรอนไหลผ่านแก๊ปหมดกระแสจะลดลงอย่างรวดเร็วและกระแสที่ลดลงนี้จะยังคงไหลต่อไปอีกเนื่องจากการเคลื่อนที่ของไอออนบวก [15]

แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ จะพบว่าความกว้างของกระแสพัลส์ที่เกิดจาก PD ในฉนวนจะอยู่ในช่วงเวลา 1.5 นาโนวินาทีถึงช่วงเวลายาวเป็นหลัก 100 นาโนวินาที ดังนั้นกระแสพัลส์ดังกล่าวจึงมีสเปกตรัมของความถี่ที่มีแบนด์วิดท์กว้าง 10 เมกกะเฮิร์ตซ์ขึ้นไป และอาจจะมีมีความกว้างถึง 200 เมกกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งการเกิด PD จากลักษณะ Tree ในเนื้อฉนวนจะมีช่วงเวลาของกระแสพัลส์กว้างที่สุด [16]



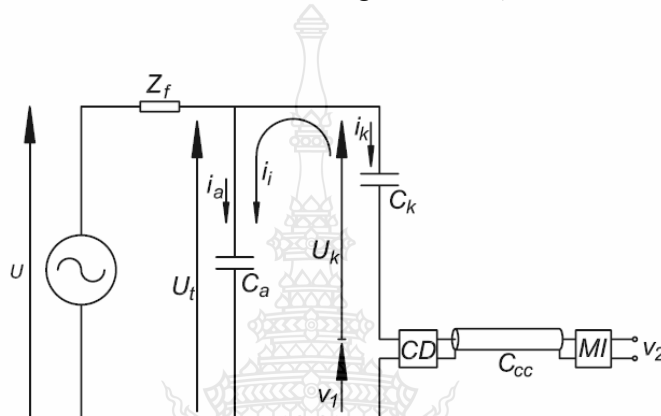
ภาพที่ 2.8 ลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในทางทฤษฎีสำหรับแก๊ปขนาดเล็ก

### 2.2.3 หลักการตรวจจับดีสารบางส่วน

การตรวจจับ PD สามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน โดยการสังเกตหรือวัดผลที่เป็นปรากฏการณ์ต่างๆของ PD การวัดผลของ PD ในเชิงปริมาณที่ได้ผลดีที่สุดคือ การวัดผลทางไฟฟ้าโดยวิธีการตรวจจับกระแสพัลส์ที่ขั้วสายของอุปกรณ์ [13]

### 1) วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD

วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD ตามมาตรฐานสากล IEC 60270 Third Edition (1998 ฉบับร่าง) [17] จะประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงหรือแรงดันทดสอบ  $U$  ตัวกรองสัญญาณ (Filter) จากแหล่งจ่ายหรืออิมพีแดนซ์  $Z_f$  วัสดุทดสอบ (Test Object,  $C_o$ ) ตัวเก็บประจุคัปปลิง (Coupling Capacitor,  $C_k$ ) อุปกรณ์รับสัญญาณ (Coupling Device, CD) สายเคเบิลนำสัญญาณ (Connecting Cable, CC) และเครื่องมือวัด (Measuring Instrument, MI) ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD

หน้าที่การทำงานและคุณสมบัติสำคัญของอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรทดสอบเป็นดังนี้

#### 1) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูง $U$

ใช้ในการจ่ายแรงดันให้วงจรทดสอบและมีขนาดพิกัดเพียงพอที่จะจ่ายโหลดได้ เช่น หม้อแปลงทดสอบ เป็นต้น

#### 2) ตัวกรองสัญญาณหรืออิมพีแดนซ์ $Z_f$

ใช้ในการกรองสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่าย เช่น ฮาร์มอนิกส์ และ PD ที่เกิดภายใน หม้อแปลงทดสอบเองที่ใช้เป็นแหล่งจ่าย เป็นต้น และหน้าที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ ป้องกัน PD จากวงจรทดสอบไหลย้อนลงกราวด์ผ่านทางแหล่งจ่ายตัวกรองดังกล่าวต้องทนแรงดันทดสอบได้และปราศจาก PD ที่แรงดันทดสอบ ตัวอย่างตัวกรองเช่น ตัวเหนี่ยวนำ (High Voltage Inductor) หรือตัวกรองชนิดผ่านแถบความถี่ต่ำ (High Voltage Low-Pass Filter) เป็นต้น ดังนั้นในกรณีที่ใช้หม้อแปลงทดสอบปราศจาก PD เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงอาจไม่จำเป็นต้องใช้ตัวกรองก็ได้ เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงทดสอบมีคุณสมบัติเป็นตัวเหนี่ยวนำอยู่แล้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งหม้อแปลงทดสอบที่มีขนาดไม่ใหญ่มากนัก

### 3) ตัวเก็บประจุคัปปลิง $C_k$

ใช้เป็นส่วนเชื่อมต่อหรือคัปปลิงสัญญาณความถี่สูงให้ครบวงจรระหว่าง  $C_a$ ,  $C_k$  และ CD ดังนั้นตัวเก็บประจุคัปปลิงต้องเป็นชนิดที่มีค่าความเหนี่ยวนำภายใน (Stray Inductance) ต่ำ ทนแรงดันได้โดยปราศจาก PD ที่แรงดันทดสอบ ตัวเก็บประจุคัปปลิงอาจเรียก Blocking Capacitor (อังกฤษ)

### 4) อุปกรณ์รับสัญญาณ CD และเครื่องมือวัด MI

อุปกรณ์ทั้งสองส่วนนี้จะทำงานร่วมกันคือทำหน้าที่อินทิเกรต (Integrate) กระแสพัลส์  $i_i$  ที่ไหลในวงจรทดสอบเนื่องจากการเกิด PD โดยมีสายนำสัญญาณ CC เป็นสายที่เชื่อมต่อระหว่าง CD และ MI อุปกรณ์รับสัญญาณ จะทำหน้าที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือเป็นตัวกรองกระแสความถี่ต่ำ (50 ถึง 400 เฮิรตซ์) และฮาร์โมนิกส์ต่างๆ จากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบมิให้เข้าไปที่เครื่องมือวัดได้ ส่วนเครื่องมือวัด PD จะทำหน้าที่สำคัญ 3 ประการคือ เป็นวงจรขยายสัญญาณ (Amplifier) เป็นวงจรกรองสัญญาณชนิดผ่านแถบ เพื่อลดสัญญาณรบกวนที่มาจากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบ และลดสัญญาณความถี่สูงที่มาจากคลื่นวิทยุและใช้ในการแสดงผล PD

หลักการทำงานของวงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD เริ่มจากการค่อยๆ ป้อนแรงดันทดสอบจากแหล่งจ่าย  $U$  ผ่านตัวกรอง  $Z_f$  ให้กับวงจรทดสอบจนกระทั่งเกิด PD ที่วัสดุทดสอบ  $C_a$  (ถ้าฉนวนของวัสดุทดสอบนั้นมีความบกพร่อง) ทำให้เกิดแรงดันตกที่ขั้วของ  $C_a$  ตามสมการที่ 2.6  $C_k$  จะดิสชาร์จประจุไปที่  $C_a$  เพื่อชดเชยแรงดันตก ผลดังกล่าวทำให้เกิดกระแสพัลส์  $i_i$  ไหลวนครบวงจรระหว่าง  $C_a$ ,  $C_k$  และ CD ดังนั้น CD และ MI วัดประจุไฟฟ้าที่ถ่ายเทระหว่าง  $C_a$  และ  $C_k$  โดยการอินทิเกรตกระแสพัลส์  $i_i$  เพื่อนำไปแสดงผลต่อไป

#### 2.2.4 การวิเคราะห์วงจรตรวจจับ PD

##### 1) วงจรสมมูล

วงจรพื้นฐานในภาพที่ 2.9 จะแทนวัสดุทดสอบ  $C_a$  ด้วยวงจรสมมูลซึ่งประกอบด้วย  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  และสปาร์กแกป  $G$  ดังภาพที่ 2.10 (ก) เนื่องจากเบรกดาวน์ในโพรงก๊าซจะใช้เวลาในการเกิดน้อยกว่า  $10^{-7}$  วินาที ซึ่งถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับคาบเวลาของแหล่งจ่าย (50 ถึง 400 เฮิรตซ์) ดังนั้นจึงอาจแทนแรงดันคร่อมโพรงก๊าซด้วยการจ่ายแรงดันรูปซัน [13] ดังภาพที่ 2.10 (ข) คือ

$$U_1 \approx \Delta U_1 U(t) \quad (2.12)$$

เมื่อ  $\Delta U_1$  คือ แรงดันตกคร่อมโพรงก๊าซและสปาร์กแกป G  
 $U(t)$  คือ ฟังก์ชันรูปขั้น (Unit Step function)

ซึ่งวงจรในภาพที่ 2.10 (จ) เป็นวงจรสมมูลของสปาร์กแกป เนื่องจากโดยปกติแล้ว  $C_3 \gg C_2$  ดังนั้นเมื่อพิจารณาอิมพีแดนซ์รวมของวงจรสมมูลมีค่าประมาณเท่ากับของ  $C_2$  เพียงตัวเดียว จึงสามารถแสดงดังสมการ 2.13

$$i_2 \approx C_2 \frac{dU_1}{dt} \approx C_2 \Delta U_1 \delta(t) \quad (2.13)$$

เมื่อ  $\delta(t)$  คือ ฟังก์ชันแบบอิมพัลส์ (Impulse Function)

ถ้านิยามให้  $q = C_2 \Delta U_1 = \int_0^{\infty} i_2 dt$  คือ ประจุที่ปรากฏของ PD

แทนค่า  $q = C_2 \Delta U_1$  ในสมการที่ 2.13 จะได้

$$i_2 \approx q \delta(t) \quad (2.14)$$

จากสมการที่ 2.14 จึงสามารถแทนการเกิดดีสชาร์จบางส่วนด้วยแหล่งจ่ายกระแสอิมพัลส์ ดังภาพที่ 2.10 (ค) ในทางปฏิบัติจะพบว่ากระแสอิมพัลส์  $i_2$  มีช่วงเวลาการเกิด  $\leq 5$  นาโนวินาที สำหรับฉนวนของแข็งและของเหลว [3]

2) การวิเคราะห์ห้วงจรตรวจจับ PD โดยวิธีการอินทิเกรตด้วยตัวกรองผ่านแถบ

การวิเคราะห์ห้วงจรตรวจจับ PD โดยวิธีการอินทิเกรตกระแสพัลส์ด้วยตัวกรองผ่านแถบ (Band-Pass Filter) [18] ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ห้วงจรในโดเมนความถี่ โดยใช้รูปวงจรในภาพที่ 2.10 (ง) เป็นหลักคือ

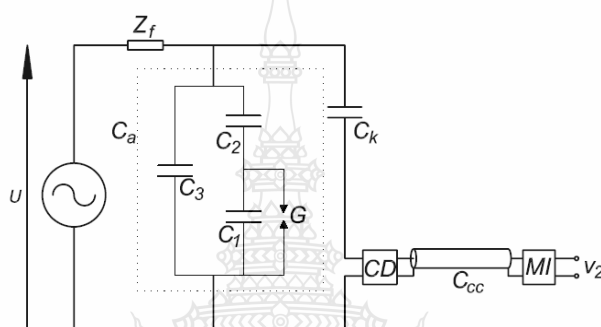
$$I_2(j\omega) \approx F[i_2] \approx q \quad (2.15)$$

โดยที่  $\omega$  คือ ความถี่ที่เชิงมุมแบบแวนเดอวาล์ว  $\omega = 2\pi f$

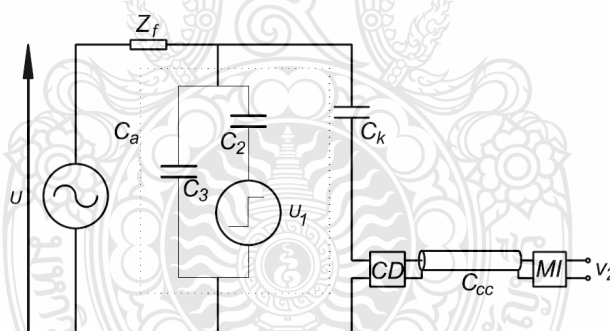
$f$  คือ ความถี่

$F[\ ]$  คือ ฟังก์ชันทรานส์ฟอร์ม

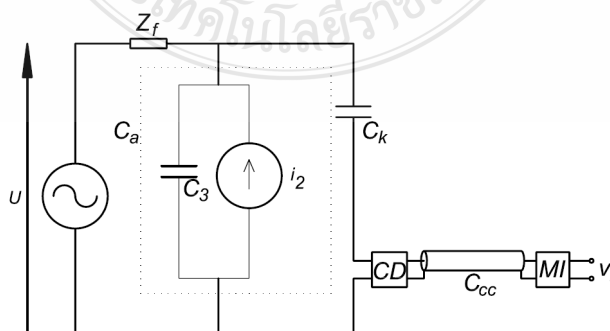
เราจะถือว่า  $|I_2(j\omega)|$  มีค่าคงที่เสมอในช่วงความถี่ที่พิจารณา ลักษณะของ  $|I_2(j\omega)|$  ในทางปฏิบัติ การตอบสนองความถี่ของเครื่องตรวจจับ PD (ประกอบด้วยอุปกรณ์รับสัญญาณ และเครื่องมือวัด) จะมีคุณสมบัติเป็นตัวกรองผ่านแถบ คือ  $Z'_m(j\omega) = V_2(j\omega)/I_{eq}(j\omega)$  ซึ่ง  $Z'_m(j\omega)$  จะคิดผลกระทบของ  $C_a$  และ  $C_k$  เข้าไปด้วย ในกรณีที่ไม่วัดผลกระทบของ  $C_a$  และ  $C_k$  จะได้  $Z'_m(j\omega) = V_2(j\omega)/I_2(j\omega)$  การเลือกความถี่ที่เหมาะสมนั้นจะต้องเลือกความถี่ในช่วงที่ปลอดภัยจากรบกวนจากภายนอกมากที่สุด ซึ่งลักษณะ ของสัญญาณรบกวนในช่วงโดเมนความถี่



(ก) แทนวัสดุทดสอบ  $C_a$  ด้วยวงจรสมมูลที่ประกอบด้วย  $C_1, C_2, C_3$  และสปาร์กแกป  $G$

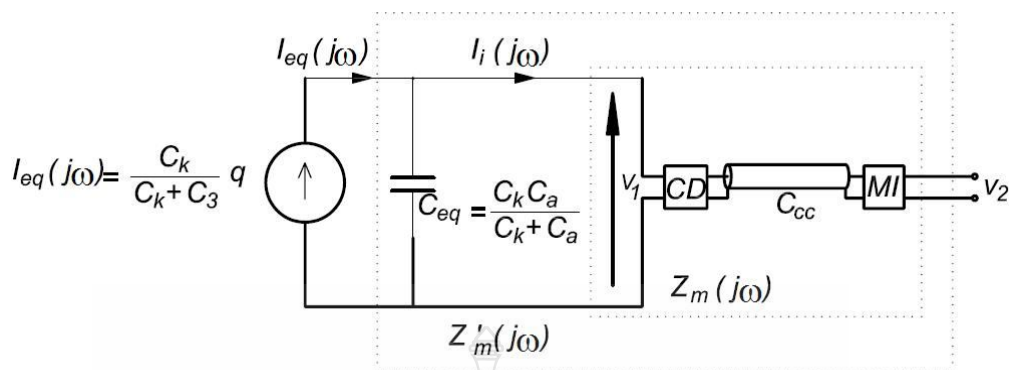


(ข) แทน  $C_1$  และ  $G$  ด้วยแรงดันภาพ คือ  $U_1 \approx \Delta U_1 U_0$



(ค) แทน  $C_2$  และ  $U_1$  ด้วยแหล่งจ่ายกระแสพัลส์  $i_2 \approx q\delta(t)$





- (ง) วงจรสมมูลสำหรับการคำนวณวงจรตรวจจับ PD โดยไม่คิดผลของ  $Z_f$  และ  $U$  เนื่องจาก  $Z_f$  มีอิมพีแดนซ์สูงเหมือนเปิดวงจร (Open Circuit) ขณะเกิด PD

ภาพที่ 2.10 แทน PD ด้วยวงจรสมมูลแบบต่างๆ

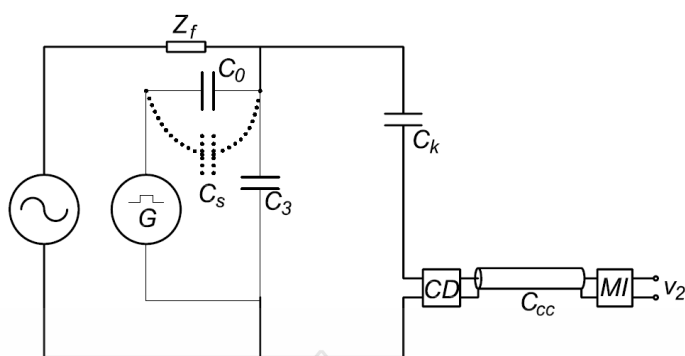
### 2.2.5 การแสดงผลของดิสชาร์จบางส่วน

การแสดงผลหรือวัดผลของดิสชาร์จบางส่วนสามารถทำได้ทั้งทางมิเตอร์ ทางจอภาพของ ออสซิลโลสโคป และทางเครื่องบันทึก ค่าของดิสชาร์จบางส่วนที่มาตรฐานกำหนด โดยปกติจะแสดง ในเทอมของ ประจุที่ปรากฏ (Apparent Charge) ของ PD หรือ ขนาดของดิสชาร์จ (Discharge Magnitude)  $q$  มีหน่วยเป็นพิโคคูลอมป์ (pC) สัญญาณเอาต์พุตของเครื่องตรวจจับ PD คือ  $v_2$  จะปรากฏ โดยตรงกับ  $q$  ดังนั้นค่ายอดของ  $v_2$  คือ  $v_{2(\text{peak})}$  จะปรากฏโดยตรงกับ  $q$  ด้วย จากเหตุผลดังกล่าวการอ่าน ค่า  $q$  จึงนิยมอ่านจากค่ายอดของ  $v_2$  ซึ่งอ่านได้จากจอภาพของออสซิลโลสโคป หรือมิเตอร์อ่านค่ายอด

### 2.2.6 เครื่องสอบเทียบดิสชาร์จมาตรฐาน

สัญญาณเอาต์พุต  $v_2$  แปรผันตามขนาดของตัวเก็บประจุคัปปลิงและวัสดุทดสอบ จึงต้องมีการสอบเทียบด้วยค่า PD มาตรฐานก่อนทำการป้อนแรงดันเข้าวงจรทดสอบโดยใช้ เครื่องปรับสอบ ดิสชาร์จมาตรฐาน (Discharge Calibrator) เพื่อใช้ในการจำลองการเกิด PD ด้วยการส่งผ่านกระแส พัลส์ที่มีขนาดของประจุมาตรฐาน  $q_0$  ที่ขั้วทั้งสองของวัสดุทดสอบ ดังภาพที่ 2.11

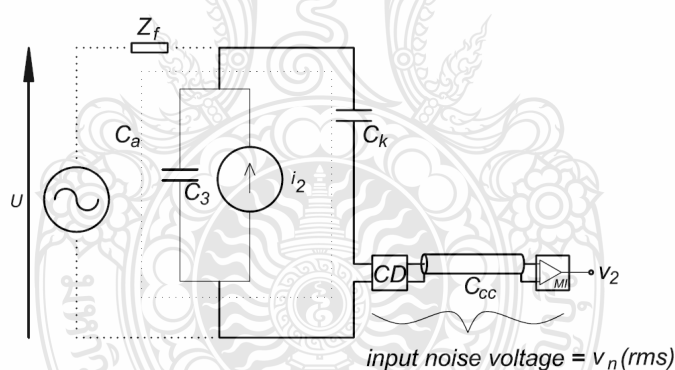
เครื่องปรับเทียบดิสชาร์จมาตรฐานประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันรูปขั้น (Step Voltage,  $G$ ) ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุขนาดเล็ก (Calibrating Capacitor,  $C_0$ ) ตามมาตรฐาน IEC กำหนดให้  $C_0 \leq 0.1C_s$  ถ้า  $C_0$  เป็นตัวเก็บประจุแรงดันต่ำ และกำหนดช่วงเวลานับ  $t_r$  ของ  $G$  ดังนี้  $t_r \leq 60\text{ns}$  ในการ ปรับเทียบต้องพิจารณาผลของค่าความจุไฟฟ้าแบบ สเตรย์  $C_s$  ด้วย คือต้องทำให้  $C_0 \gg C_s$



ภาพที่ 2.11 วงจรสำหรับการเปรียบเทียบ

### 2.2.7 การวิเคราะห์ความไว

เนื่องจากสัญญาณรบกวน ทำให้ความไวของเครื่องตรวจจับ PD ลดลง ในการคำนวณความไวนั้นจะพิจารณาเฉพาะสัญญาณรบกวนภายในเครื่องวัดเท่านั้นคือ Thermal Noise ของอุปกรณ์รับสัญญาณ (CD) และ Input Noise ของเครื่องวัด (MI) คือ  $v_{n(rms)}$  แสดงดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 วงจรที่ใช้คำนวณความไวของเครื่องตรวจจับ PD สำหรับวัสดุทดสอบทั่วไป

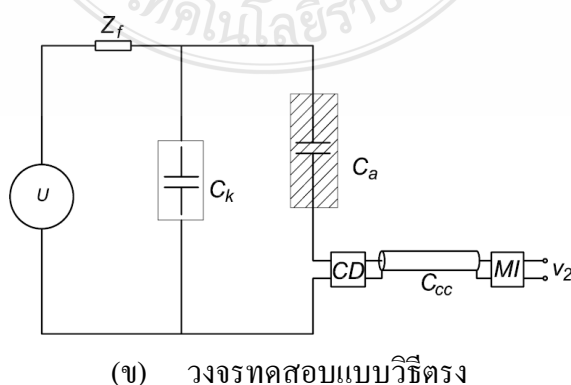
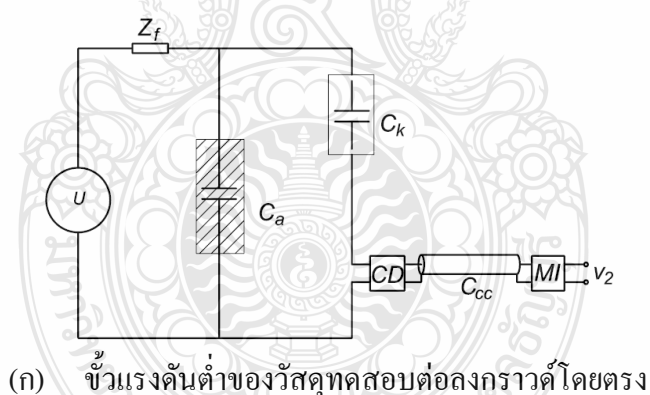
ตามข้อกำหนดของ IEC 885-2 ได้กล่าวไว้ว่าเครื่องตรวจจับหรือวัด PD จะต้องมีความสามารถในการตรวจจับพัลส์ของดีสชาร์จต่ำสุดเป็นสองเท่าของสัญญาณรบกวน

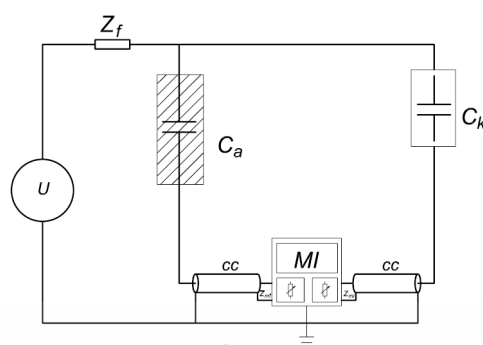
### 2.2.8 เทคนิคการวัดดีสชาร์จบางส่วน

#### 1) การวัดดีสชาร์จบางส่วนสำหรับวัสดุทดสอบทั่วไป

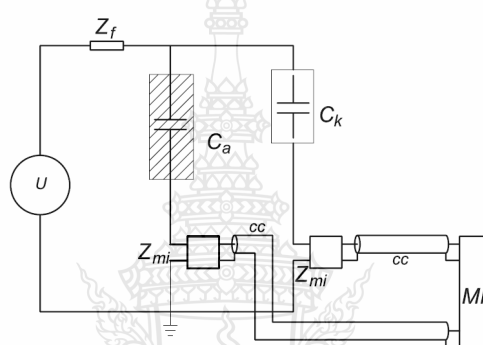
โดยปกติวัสดุทดสอบทั่วไป อาจแทนได้ด้วยตัวเก็บประจุชนิดดองค์ประกอบแบบลัมปี หรือตัวเก็บประจุธรรมดา วงจรทดสอบ PD ตามมาตรฐานต่างๆ จะมีลักษณะเช่นเดียวกัน ในที่นี้ใช้

วงจรทดสอบแบบมาตรฐาน IEC โดยภาพที่ 2.13 (ก) และภาพที่ 2.13 (ข) เป็นวงจรทดสอบแบบวิธีตรง ข้อดีของวงจรภาพที่ 2.13 (ก) คือขั้วแรงดันต่ำของวัสดุทดสอบต่อลงกราวด์โดยตรง ในกรณีที่วัสดุทดสอบเกิดการเบรกดาวน์อุปกรณ์รับสัญญาณจะไม่ต้องได้รับความเสียหาย และเหมาะสำหรับทดสอบวัสดุทดสอบที่มีขั้วแรงดันต่ำหรือชิลด์หรือ Screen ขนาดใหญ่ เช่น เคเบิล เป็นต้น เนื่องจากสัญญาณรบกวนที่ชิลด์ของเคเบิลจะถูกต่อลงกราวด์โดยตรง ข้อดีของวงจรภาพที่ 2.13 (ข) จะให้ความไวในการวัดสูงกว่าแบบแรกในกรณีที่วัสดุทดสอบมีขนาดเล็ก เนื่องจากผลของตัวเก็บประจุแบบสตรีย์จะทำให้ตัวเก็บประจุนับปดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในภาพที่ 2.13 (ค) เป็นวงจรทดสอบแบบสมดุล วงจรแบบนี้จะมีข้อได้เปรียบในเรื่องการลดสัญญาณรบกวนที่เข้ามาจากแหล่งจ่ายหรือสัญญาณแบบ คอมมอน โหมด ในภาพที่ 2.13 (ง) เป็นวงจรทดสอบแบบแยกขั้วสัญญาณได้ (Polarity Discrimination) มีข้อดีเช่นเดียวกับวงจรทดสอบแบบสมดุล แต่มีความสามารถเพิ่มเติมในการแยกขั้วสัญญาณรบกวนจากภายนอกออกจาก PD ภายในวงจรทดสอบได้ แต่ข้อเสียของวงจรในภาพที่ 2.13 (ข) 2.13 (ค) และ 2.25 (ง) อาจทำให้เครื่องวัดได้รับความเสียหายในกรณีที่วัสดุทดสอบเกิดเบรกดาวน์และไม่เหมาะในการทดสอบวัสดุทดสอบที่มีชิลด์ขนาดใหญ่ เนื่องจากชิลด์ไม่ได้ต่อลงกราวด์โดยตรง ดังนั้นถ้ามีสัญญาณรบกวนที่ชิลด์จะทำให้ความไวในการวัด PD ลดลง





(ค) วงจรทดสอบแบบสมดุล



(ง) วงจรทดสอบแบบแยกขั้วสัญญาณ

ภาพที่ 2.13 วงจรทดสอบคิซซาร์จบางส่วน

การปรับเทียบวงจรทดสอบโดยปกติจะทำก่อนการป้อนแรงดันเข้าวงจรทดสอบ โดยใช้เครื่องปรับเทียบคิซซาร์จมาตรฐานในการป้อนกระแสพัลส์สั้นๆ ที่มีประจุ (Pulse Area)  $q_{cal}$  ซึ่งทราบค่าที่แน่นอนที่ขั้วทั้งสองของวัสดุทดสอบ ถ้าเครื่องตรวจจับ PD อ่านค่า PD ได้  $a_1$  ดังนั้น Scale Factor  $K_1 = q_{cal}/a_1$  หลังจากทำการปรับเทียบเสร็จแล้วต้องเอาเครื่องปรับเทียบคิซซาร์จมาตรฐานออก และทำการปรับลดแรงดันเข้าเพื่อทำการทดสอบ (ในกรณีที่  $C_0$  เป็นตัวเก็บประจุแรงดันต่ำ) ในขั้นตอนที่ทำการทดสอบตามพิคัดแรงดันที่มาตรฐานกำหนด ถ้าในขณะนั้นเครื่องตรวจจับ PD อ่านค่าได้  $A_1$  ดังนั้นประจุที่ปรากฏของ PD คือ  $q = K_1 A_1$  และความไวของวงจรทดสอบ  $q_{min} = 2K_1 h_n$  เมื่อ  $h_n$  คือค่าสูงสุดของระดับ Background Noise ที่อ่านจากเครื่องตรวจจับ PD หลังการปรับเทียบ

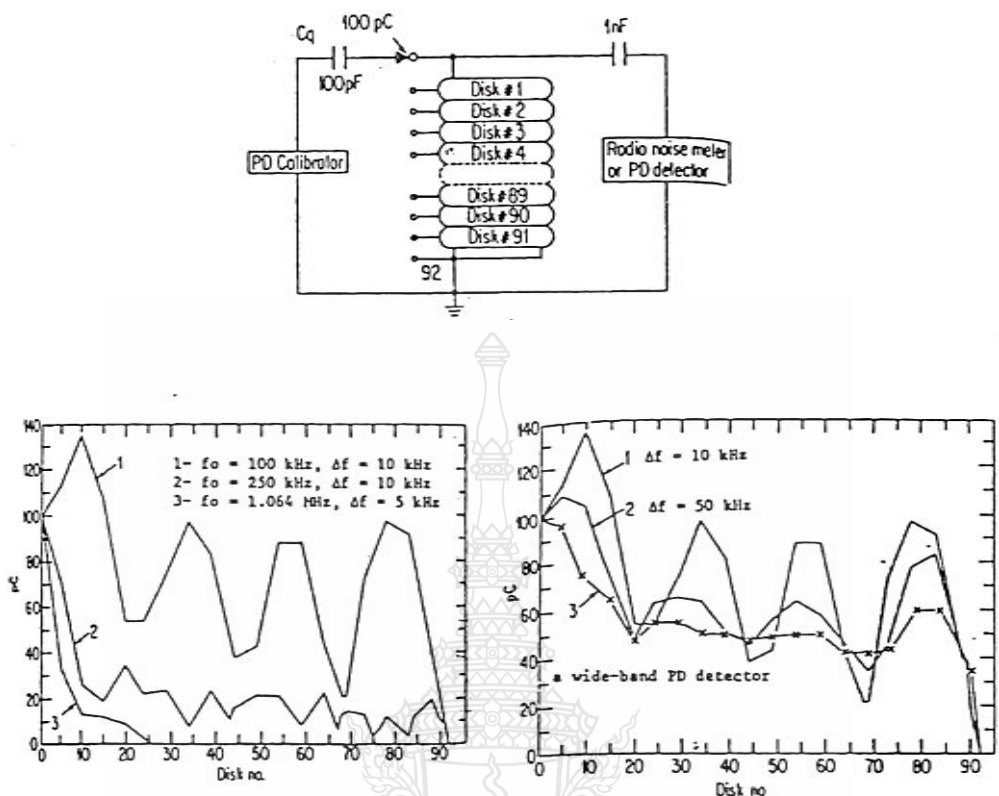
## 2) การตรวจจับ PD ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีโครงสร้างแบบขดลวด

อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีโครงสร้างแบบขดลวด ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้า รีแอกเตอร์ มอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น การวัดคิซซาร์จบางส่วนในกรณีนี้จะมีการสูญเสียภายในอุปกรณ์

เกิดเรโซแนนซ์ และเกิดคลื่นจรเข้ามาเกี่ยวข้อง การทดสอบจึงทำได้ยุ่งยากพอสมควร ในที่นี้จะอธิบายเฉพาะการทดสอบ PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าเท่านั้น

การตรวจจับ PD ในหม้อแปลงไฟฟ้า มาตรฐาน IEC (IEC Publ.No.76-3) ยอมให้มี การทดสอบ PD โดยใช้เครื่องตรวจจับ PD ทั้งสองแบบที่กล่าวมาแล้ว แต่ NEMA Publ.No.TR1 จะใช้ มิเตอร์กึ่งค่ายอดซึ่งเป็นเครื่องตรวจจับ PD แบบแถบแคบชนิดหนึ่งในการวัด ปกติจะทำการทดสอบที่ ความถี่กึ่งกลาง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ เนื่องจากหม้อแปลงมีคุณสมบัติเป็นองค์ประกอบแบบกระจาย ดังนั้นจึง เกิดคลื่นจร และ การเกิดเรโซแนนซ์บางความถี่ขณะเกิด PD ภายในหม้อแปลง ต่อมาได้มีการทดลอง เปรียบเทียบผลการวัด PD มาตรฐาน IEC และ NEMA ด้วยการจำลองการเกิด PD ในหม้อแปลงที่มี โครงสร้างแบบ Disk โดยการป้อน PD ที่ Disk ต่างๆ ของหม้อแปลง แล้วใช้เครื่องตรวจจับ PD แบบ ต่างๆ ในการแสดงดังภาพที่ 2.14 ในภาพที่ 2.14 (ก) ทำการป้อน PD จำลอง ขนาด 100 พิโคลอมป์ ที่ Disk ต่างๆ แล้วทำการวัด PD โดยใช้เครื่องตรวจจับ PD แบบแถบแคบที่ความถี่กึ่งกลาง หรือ  $f_0$  ต่างๆ กัน จะพบว่า PD ที่วัดได้โดยใช้เครื่องตรวจจับ PD ตามมาตรฐาน NEMA จะสามารถตรวจจับ PD ที่ Disk ต่างๆ ได้เพียงบางส่วนเท่านั้นเนื่องจาก PD เกิดการสูญเสียอย่างมากที่ความถี่สูง ดังภาพที่ 2.14 ดังนั้นการเกิด PD มาตรฐาน NEMA จึงควรหลีกเลี่ยง ภาพที่ 2.14 (ค) แสดงการตรวจจับ PD ด้วย เครื่องตรวจจับ PD ที่มีแบนด์วิดท์ต่างกันการเกิดเรโซแนนซ์จะลดลง จึงสรุปได้ว่าการทดสอบ PD ใน หม้อแปลงตามมาตรฐาน IEC โดยใช้เครื่องตรวจจับ PD แบบแถบกว้างจะเหมาะสมที่สุด

วิธีการทดสอบ PD ในหม้อแปลงจะทำการทดสอบวิธีเดียวกับ ข้อ 2.5.1 แต่การต่อวงจร อาจมีความแตกต่างกันบ้าง ซึ่งสามารถดูรายละเอียดจาก IEC Publ.No.270 หรือมาตรฐานอื่นๆ ที่ เกี่ยวข้อง



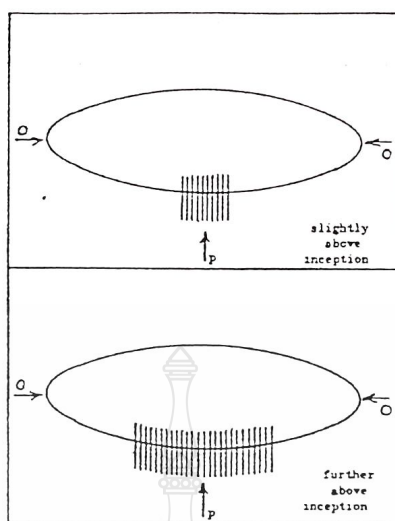
ภาพที่ 2.14 เปรียบเทียบการวัด PD ภายในหม้อแปลงตามมาตรฐาน IEC และ NEMA [3]

### 3) การประเมินค่า PD

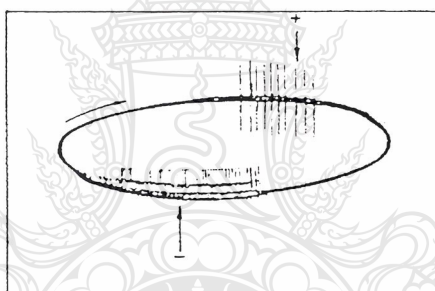
การประเมินค่าของ PD ที่อาจจะมีผลต่ออายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ต้องทำการพิจารณาจาก PD Pattern นี้ ได้จากการแสดง การวิเคราะห์และวินิจฉัยสรุปได้ดังนี้

#### 1. โครโรนา

การเกิดโครโรนาภายนอกอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจะไม่มีผลกระทบต่ออายุการใช้งานต่ออุปกรณ์นั้น ซึ่งอาจยอมให้เกิด PD ได้ถึงหลักร้อยพิโคคูลอมป์ แต่ถ้าเป็นโครโรนาที่เกิดภายในอุปกรณ์เช่น โครโรนาที่เกิดภายในก๊าซ SF<sub>6</sub> เพียงไม่กี่พิโคคูลอมป์ ก็อาจทำให้ระบบฉนวนนั้นเสียหายได้ ตัวอย่าง Pattern ส่วนการเกิด PD โครโรนาที่เกิดในอากาศ หรือ SF<sub>6</sub> แสดงดังภาพที่ 2.15 และโครโรนาที่เกิดในน้ำมันแสดงดังภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.15 การเกิด PD โคลโรนาที่เกิดในอากาศ หรือ SF<sub>6</sub> [3]



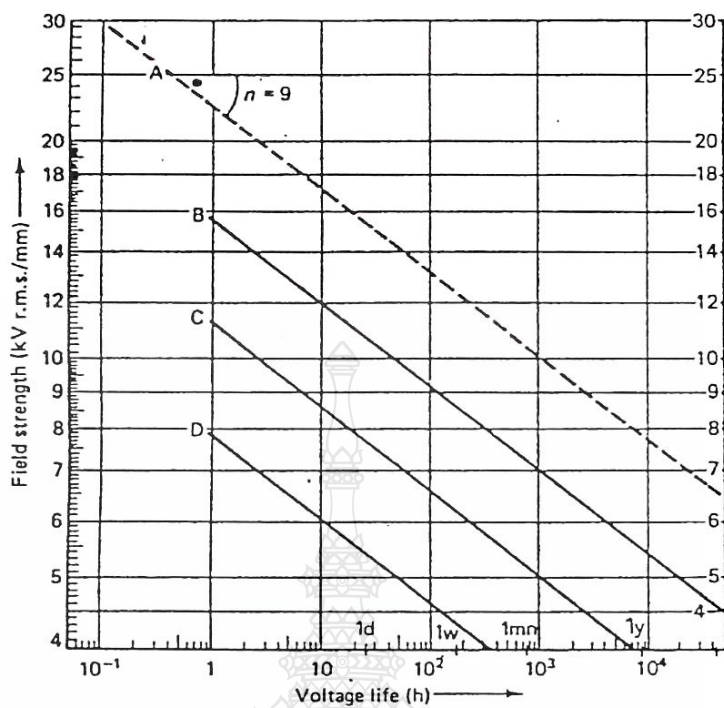
ภาพที่ 2.16 โคลโรนาที่เกิดในน้ำมัน [3]

2. ดิสชาร์จตามผิว

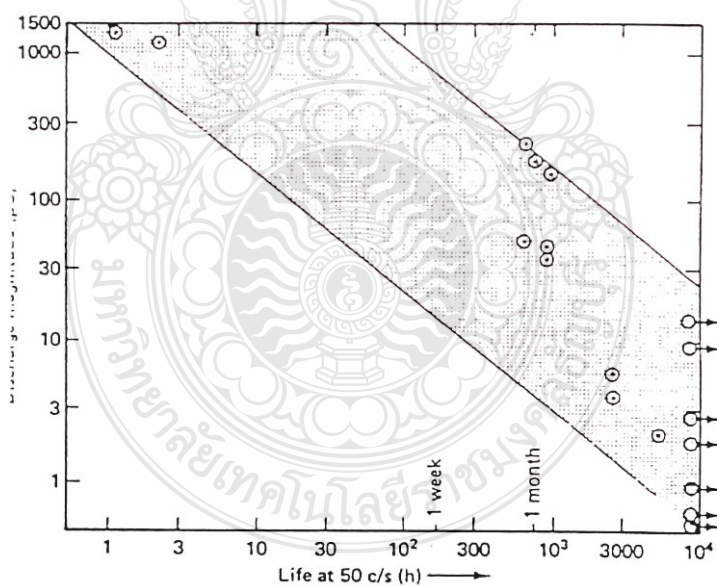
ดิสชาร์จตามผิวที่เกิดกับระบบฉนวนจะอันตรายน้อยกว่าดิสชาร์จภายในฉนวน เนื่องจากพลังงานต่อปริมาตรน้อยกว่า จึงยอมให้เกิด PD ได้สูงกว่า

3. ดิสชาร์จภายใน

ดิสชาร์จภายในจะเกิดอันตรายต่อระบบฉนวนมากที่สุด ขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าภายในฉนวน ซึ่งฉนวนแต่ละชนิดจะทนทานต่อ PD ไม่เท่ากัน รายละเอียดแสดงดังภาพที่ 2.17 (ก) และภาพที่ 2.17 (ข) และตารางที่ 2.2 และ 2.3



(ก) PD ของฉนวนแต่ละชนิด



(ข) ตัวอย่าง PD ในฉนวน PVC ที่ 6kV/mm [3]

ภาพที่ 2.17 ความเครียดสนามไฟฟ้าภายในฉนวน



ตารางที่ 2.2 ค่า PD วัสดุสังเคราะห์ [3]

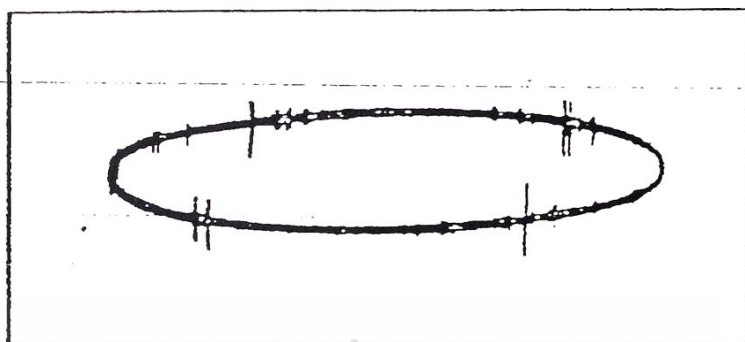
Operating Stress (Effective Voltage) (kV/mm)	Permissible Discharge Magnitude (pC)
$\leq 1.5$	No Discharge Test Required
2.0	100
2.5	30
3.0	5
3.5	1
$\geq 4.0$	At Least 1 pC Additional Overvoltage Tests are Required

ตารางที่ 2.3 การใช้งานของไมกาเป็นฉนวน

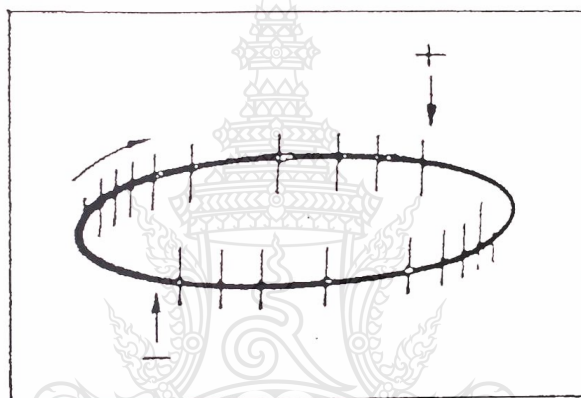
Measured Discharge Magnitude (pC)	Evaluation
1,000	Permissible
10,000	Limits the Voltage Life, Machine Bar to be Replaced at the Next Overhaul
100,000	Breakdown to be Expected in Ashort Time, Immediate Replacement Required

#### 4) สัญญาณรบกวน

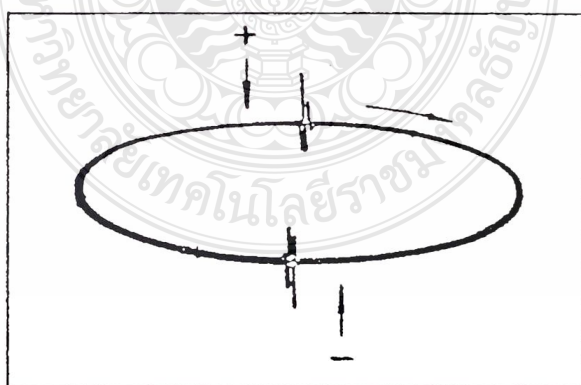
ในการตรวจจับ PD บ่อยครั้งที่มีสัญญาณรบกวนจากภายนอกเข้ามาจนทำให้การวัด PD ผิดพลาดและได้ผลมากกว่าความเป็นจริง ทำให้เกิดการเข้าใจผิดว่าอุปกรณ์แรงสูงนั้นไม่ได้คุณภาพ กล่าวคือค่า PD ที่วัดได้สูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด ตัวอย่างสัญญาณรบกวนหรือปัญหาจากสาเหตุอื่นๆ แสดงดังภาพที่ 2.18 ถึง 2.22



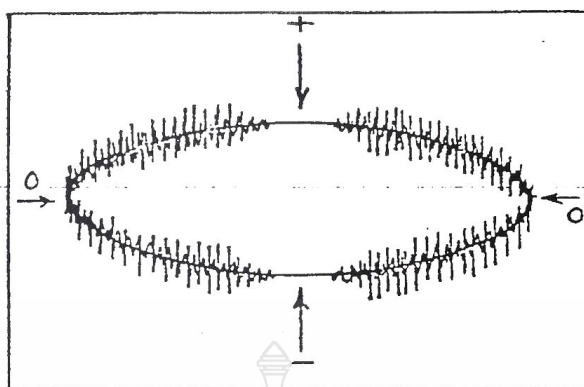
ภาพที่ 2.18 ผลสัญญาณรบกวนที่เกิดจากอุปกรณ์



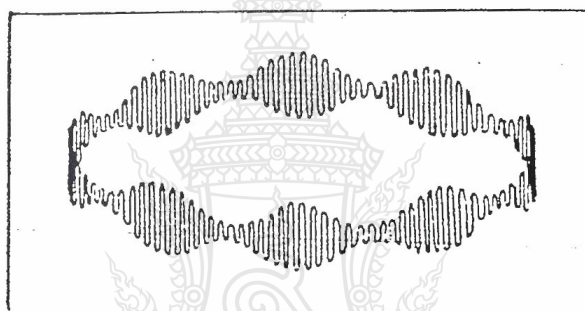
ภาพที่ 2.19 ผลของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากโลหะใกล้วงจรทดสอบไม่ต่อลงกราวด์



ภาพที่ 2.20 สัญญาณรบกวนที่เกิดจากฮาร์โมนิกที่เข้ามาทางแหล่งจ่าย



ภาพที่ 2.21 สัญญาณรบกวนเนื่องจากข้อต่อสายไม่แน่น



ภาพที่ 2.22 สัญญาณรบกวนเนื่องจากคลื่นวิทยุ

### 2.2.9 คุณสมบัติของเครื่องตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน

ข้อกำหนดของเครื่องตรวจจับ PD ตามมาตรฐาน IEC โครงการนี้ใช้ข้อกำหนดตาม IEC 270 (1981) ซึ่งยังคงใช้อยู่ถึงปัจจุบันนี้ และ IEC 60270 (1998 ฉบับร่าง) ที่มีการแก้ไขข้อบกพร่องและเพิ่มเติมรายละเอียดเกี่ยวกับข้อกำหนด วิธีการทดสอบ และวิธีการปฏิบัติ เพื่อให้การตรวจจับหรือการวัด PD มีความถูกต้องและเหมาะสมยิ่งขึ้น ซึ่งจะมาแทน IEC 270 (1981) ในอนาคตอันใกล้นี้ ซึ่งข้อกำหนดตาม IEC 60270 (1998 ฉบับร่าง) จะครอบคลุมข้อกำหนดทุกข้อตาม IEC270 (1981)

## 2.3 โครมาโตกราฟี

โครมาโตกราฟี [19] เป็นศาสตร์ของการแยกสารผสมออกจากกันแขนงหนึ่ง เริ่มตั้งแต่ปลายคริสต์ศตวรรษที่ 19 โดยนักพฤกษศาสตร์ชาวรัสเซียชื่อทเวตต์ (Tswett) ซึ่งทำวิทยานิพนธ์ในหัวข้อเรื่อง Physical and Chemical of Chlorophyll ในขณะที่ทำวิทยานิพนธ์นี้ ทเวตต์ได้แยกสารคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) ออกจากพืชโดยใช้สารดูดซับ (Adsorbent) บรรจุลงในคอลัมน์แก้วแล้วชะด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ สารสกัดจากพืชที่มีคลอโรฟิลล์ผสมอยู่นั้นถูกแยกออกเป็นชั้นๆ และมีสีสรรคต่างๆ กัน ทเวตต์จึงให้ชื่อวิธีการนี้ว่า โครมาโตกราฟี (Chromatography) ซึ่งเป็นภาษากรีก คำว่า Chrom แปลว่าสีและคำว่า Graph แปลว่าเขียนหรือบันทึก ในขณะเดียวกัน นักเคมีชาวอังกฤษชื่อรีด (Reed) ก็ได้ตีพิมพ์บทความการแยกสารอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยผ่านเข้าไปในคอลัมน์ที่บรรจุด้วยดินขาวเคโอลิน (Kaolin) นอกจากนี้เดย์ (Day) นักธรณีเคมีก็ได้ใช้วิธีเดียวกันนี้แยกน้ำมันปิโตรเลียมด้วยคอลัมน์บรรจุแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) และ Fuller's Earth ทว่าโครมาโตกราฟีในสมัยนั้นไม่เป็นที่นิยม จนกระทั่งปี ค.ศ. 1931 เลเดอร์เรอร์ (Lederer) ได้นำวิธีของทเวตต์มาแยกสารคาโรทีน (Carotenes) ในหัวแครอทและสารแซนโทฟิลล์ (Xanthophylls) ในไข่แดง หลังจากนั้นโครมาโตกราฟีจึงค่อยๆ แพร่หลายออกไป ปัจจุบันโครมาโตกราฟีได้พัฒนาไปมาก สามารถใช้แยกสารผสมทั้งที่มีสีและไม่มีสี อีกทั้งยังมีรูปแบบต่างๆ มากชนิดด้วยกัน ซึ่งอาจจะแบ่งเรียกตามลักษณะปรากฏทางกายภาพ ดังนี้

- 1) โครมาโตกราฟีแบบคอลัมน์ (Column Chromatography)
- 2) โครมาโตกราฟีแบบกระดาษ (Paper Chromatography)
- 3) โครมาโตกราฟีแบบชั้นบาง (Thin-layer Chromatography, TLC)
- 4) โครมาโตกราฟีแบบของเหลวสมรรถนะสูง (เอชพีแอลซี High Performance Liquid Chromatography, HPLC)
- 5) แก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography, GC)
- 6) โครมาโตกราฟีแบบแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Chromatography)
- 7) เจลโครมาโตกราฟี (Gel Chromatography)
- 8) โครมาโตกราฟีแบบของไหลยิ่งยวด (Supercritical Fluid Chromatography) และแบ่งเรียกตามหลักการพื้นฐานของการแยกได้คือ
  1. โครมาโตกราฟีแบบดูดซับ (Adsorption Chromatography)
  2. โครมาโตกราฟีแบบแบ่งละลาย (Partition Chromatography)
  3. โครมาโตกราฟีแบบแลกเปลี่ยนไอออน

4. เจลโครมาโตกราฟี (เป็นกรณีพิเศษของโครมาโตกราฟีแบบแบ่งละลาย)
5. โครมาโตกราฟีแบบสัมพรรคภาพ (Affinity Chromatography)

ปัจจุบันทฤษฎีของโครโมโตกราฟีได้นำความรู้ทางเคมีฟิสิกส์มาใช้กันมากทำให้สามารถจะคาดเดาพฤติกรรมเคลื่อนที่ของสารในโครมาโตกราฟีได้ค่อนข้างแม่นยำ คุณลักษณะสารแต่ละตัวในโครมาโตกราฟีอาจจะกล่าวในเทอมของ R (Retardation Factor) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของระยะทางที่สารนั้นเคลื่อนที่ไปต่อระยะทางของตัวชะ (Eluent) ที่เคลื่อนที่ไป อัตราส่วนนี้เรียกว่า  $R_f$  สำหรับการแยกในคอลัมน์ซึ่งอัตราการไหลเป็นเชิงเส้นตรง หรือเรียกว่า  $R_f$  สำหรับ TLC

### 2.3.1 กลไกการเคลื่อนที่ของโซน

การที่สารผสมสามารถแยกออกจากกันในโครมาโตกราฟีนั้นก็เนื่องด้วยโมเลกุลสารเหล่านั้นเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน ดังนั้นความรู้และความเข้าใจถึงกลไกการเคลื่อนที่ของสาร หรือสาเหตุของสารเคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่เท่ากันจะช่วยให้อธิบายโครมาโตกราฟีได้ดีขึ้น หากมองดูโซนต่างๆ ในโครมาโตกราฟีจากลักษณะปรากฏ จะเห็นว่าสารเหล่านี้เคลื่อนที่อย่างสม่ำเสมอด้วยความเร็วเป็นอัตราส่วนคงที่ต่อตัวชะหรือ วัฏภาคเคลื่อนที่ (Mobile Phase) แต่หากมองลึกลงไปถึงระดับโมเลกุลแล้ว จะเห็นว่าการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเหล่านี้แตกต่างไปจากลักษณะปรากฏคือ โมเลกุลแต่ละโมเลกุลจะเคลื่อนที่อย่างไร้ระเบียบและเคลื่อนที่ไปทุกทิศทางอย่างอิสระต่อกัน ในขณะที่บางโมเลกุลจะถูกดูดด้วยสารดูดซับหรือแทรกตัวเข้าไปในวัฏภาคนิ่ง (Stationary Phase) โมเลกุลนั้นจะหยุดเคลื่อนที่ชั่วขณะ โมเลกุลอื่นๆ ที่ไม่ถูกดูดซับหรือหลุดจากการถูกดูดซับไว้ จะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับวัฏภาคเคลื่อนที่ และเคลื่อนที่ล้าหน้าไป โมเลกุลที่เคลื่อนที่ล้าหน้าเหล่านี้เมื่อไปพบกับสารดูดซับหรือวัฏภาคนิ่งใหม่ ก็จะถูกดูดซับไว้ หรือแทรกตัวเข้าไปในวัฏภาคนิ่งและหยุดเคลื่อนที่จนกว่าจะถูกชะหลุดออกมาอยู่ในวัฏภาคเคลื่อนที่จึงจะเริ่มเคลื่อนที่ใหม่ได้ โมเลกุลที่ถูกดูดซับหรือแทรกตัวอยู่ในวัฏภาคนิ่งตอนแรกนั้น เมื่อถูกชะหลุดก็จะเคลื่อนที่ไปตามวัฏภาคเคลื่อนที่และแซงล้าหน้าโมเลกุลที่เคยแซงหน้ามันมา แต่เมื่อไปพบสารดูดซับหรือวัฏภาคนิ่งตัวใหม่อีก มันจะถูกดูดซับไว้และหยุดเคลื่อนที่ปรากฏการณ์การเคลื่อนที่และหยุดการเคลื่อนที่นี้จะเกิดขึ้นซ้ำๆ ตลอดไปตราบเท่าที่โมเลกุลเหล่านั้นยังอยู่ในคอลัมน์ หรืออยู่ในโครมาโตกราฟีอื่นๆ ดังนั้น การเคลื่อนที่ของโมเลกุลต่างๆ ในโครมาโตกราฟีจะเคลื่อนที่ หยุดๆ สลับกันไป โดยส่วนหนึ่งของสารจะเคลื่อนที่พร้อมวัฏภาคเคลื่อนที่ ในขณะที่อีกส่วนหนึ่งจะหยุดอยู่ในวัฏภาคนิ่งสลับกันไปอย่างต่อเนื่อง ทำให้มองเห็นลักษณะภายนอกคล้ายกับว่าสารทั้งหมดเคลื่อนที่ไปพร้อมๆ กันด้วยความเร็วสม่ำเสมอ สารต่างๆ จะใช้เวลาในวัฏภาคนิ่ง (ไม่เคลื่อนที่) และใช้เวลาในวัฏภาคเคลื่อนที่ (เคลื่อนที่

ด้วยความเร็ว เท่ากับวิภูภาคเคลื่อนที่) แตกต่างกัน และเป็นสาเหตุที่สารต่างชนิดกันจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่เท่ากัน ด้วยเหตุที่โมเลกุลทั้งหลายเคลื่อนที่อย่างไม่ระเบียบและเคลื่อนไปในทุกทิศทางนั่นเอง จึงทำให้เกิดการแพร่กระจายตัวของไอออน (กลุ่มสาร) พร้อมๆ กับการเคลื่อนที่ของไอออน

ถ้ากำหนดให้

TS เป็นเวลาที่โมเลกุลถูกดูดซับหรือเวลาที่โมเลกุลอยู่ในวิภูภาคหนึ่ง

TM เป็นเวลาที่โมเลกุลอยู่ในวิภูภาคเคลื่อนที่

F เป็นอัตราการไหลของวิภูภาคเคลื่อนที่

ด้วยเหตุที่โมเลกุลหนึ่ง จะหมุนเวียนซ้ำๆ ระหว่างวิภูภาคเคลื่อนที่และวิภูภาคหนึ่ง สลับกันไป โดยใช้เวลา  $T_S$  เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเป็น 0 และใช้เวลา  $T_M$  เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเป็น F จะได้ระยะทางที่โมเลกุลหนึ่งๆ เคลื่อนที่ไป  $= T_M \times F$  ในขณะที่วิภูภาคเคลื่อนที่ที่จะเคลื่อนที่ไป  $= (T_M + TS) \times F$  โดยจำกัดความ  $R =$  ระยะทางที่สารเคลื่อนที่ไป / ระยะทางที่วิภูภาคเคลื่อนที่เคลื่อนที่ไป

$$R = \frac{T_M \times F}{(T_M + T_S) \times F} \quad (2.16)$$

หรือ

$$R = \frac{1}{1 + k'} \quad (2.17)$$

โดย  $k' = \frac{T_S}{T_M}$

สมการที่ 2.17 นี้ แสดงการเคลื่อนที่ของโมเลกุลในโครมาโตกราฟีจากพื้นฐานทางจลนศาสตร์ ถ้าพิจารณาทางอุณหพลศาสตร์จะช่วยให้เห็นภาพอีกมุมหนึ่ง โดยอุณหพลศาสตร์จะพิจารณาถึงสมดุลภาพของโมเลกุลทั้งหมดในไอออนหนึ่งๆ โมเลกุลบางส่วนจะอยู่ในวิภูภาคหนึ่ง และบางส่วนจะอยู่ในวิภูภาคเคลื่อนที่ในภาวะสมดุล หรือเกือบจะสมดุลตลอดเวลา

ถ้าให้  $C_S$  = ความเข้มข้นของสารในวัฏภาคนิ่ง  
 $C_M$  = ความเข้มข้นของสารในวัฏภาคเคลื่อนที่  
 $V_S$  = ปริมาตรของวัฏภาคนิ่ง  
 $V_M$  = ปริมาตรของวัฏภาคเคลื่อนที่

จะได้ ปริมาณสารในวัฏภาคนิ่ง  $= C_S \times V_S$   
 ปริมาณสารในวัฏภาคเคลื่อนที่  $= C_M \times V_M$

ในกรณีที่เป็น Adsorption Chromatography เปลี่ยน  $V_S$  เป็น  $A_S$  (พื้นที่ผิวของสารดูดซับ)  
 ปริมาณสารในโซน  $= C_S \times A_S$  จะได้

$$R = \frac{C_M \times V_M}{(C_M \times V_M + C_S \times V_S)} \quad (2.18)$$

หรือ

$$R = \frac{V_M}{V_M + K \cdot V_S} \quad (2.19)$$

โดย  $K$  เป็นสัมประสิทธิ์การแบ่งละลาย (Partition Coefficient) มีค่าเท่ากับ  $C_S/C_M$  ในกรณีที่  
 ต้องการความละเอียดและแม่นยำสูง  $K$  จะเป็นแอกทิวิตี (Activity) แทนความเข้มข้น แต่ในสารละลาย  
 เจือจางมากๆ ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นและแอกทิวิตีนั้นน้อยมาก การใช้ความเข้มข้นจะให้  
 ค่าผิดพลาดไม่มาก

สมการที่ 2.19 นี้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $R$  กับค่า  $K$  คือ องค์ประกอบใดๆ  
 ที่ทำให้ค่า  $K$  นี้เปลี่ยนไปจะมีผลต่อค่า  $R$  ในทิศทางตรงกันข้าม ถ้า  $K$  มีค่ามาก  $R$  จะมีค่าน้อยเช่น  
 อุณหภูมิจะมีผลต่อค่า  $K$  โดยส่วนใหญ่การถ่ายเทมวลจากวัฏภาคเคลื่อนที่เข้าสู่วัฏภาคนิ่งจะเป็น  
 กระบวนการคายความร้อน (Exothermic Process) และในทางตรงข้าม การถ่ายเทมวลจากวัฏภาคนิ่ง  
 ออกมายังวัฏภาคเคลื่อนที่มักจะเป็นกระบวนการดูดกลืนความร้อน (Endothermic Process) ดังนั้น  
 การเพิ่มอุณหภูมิของระบบให้สูงขึ้น ระบบจะดูดกลืนความร้อนพร้อมกับถ่ายเทมวลจากวัฏภาคนิ่งมา  
 สู่วัฏภาคเคลื่อนที่มากขึ้น (ค่า  $K$  จะลดลงและค่า  $R$  สูงขึ้น) การเคลื่อนที่ของโมเลกุลในโครมาโตกราฟี  
 จะเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น

การวิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิต่อค่า  $K$  ในเชิงปริมาณนั้นจะต้องใช้สมการทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) เข้าช่วย โดยอุณหพลศาสตร์ให้ค่า  $K$  เป็นค่าคงตัวสมดุล (Equilibrium Constant) เพราะการถ่ายเทมวลระหว่างผิวของวัฏภาคหนึ่งและวัฏภาคเคลื่อนที่เกิดได้รวดเร็วและจะอยู่ในสภาวะสมดุล หรือเกือบจะสมดุลตลอดเวลา

นั่นคือ

$$\Delta G^\circ = -R^\circ T \ln K \quad (2.20)$$

หรือ  $K = e^{-\Delta G^\circ / R^\circ T}$

$$\Delta G^\circ = -R^\circ T \ln K \quad (2.21)$$

$\Delta G^\circ$  = พลังงานอิสระของการละลาย

$\Delta H^\circ$  = เอนทัลปีของการละลาย (Enthalpy of Solution)

$\Delta S^\circ$  = เอนโทรปีของการดูดซับ (Entropy of Solution)

$T$  = อุณหภูมิ (Kelvin)

$R^\circ$  = ค่าคงตัวของแก๊ส (Gas Constant)

$\Delta H^\circ$  มักมีค่าเป็นลบ (ตามที่กล่าวมาข้างต้นว่าการถ่ายเทมวลจากวัฏภาคเคลื่อนที่เข้าสู่วัฏภาคหนึ่งจะเป็นกระบวนการคายความร้อน) โดยทั่วไป  $\Delta H^\circ$  จะมีค่าระหว่าง 0 ถึง -20 กิโลแคลอรี/โมล แต่บางครั้ง  $\Delta H^\circ$  อาจมีค่าเป็นบวกได้เช่นกัน ผลของอุณหภูมิจะเห็นได้ชัดในแก๊สโครมาโตกราฟีและโครมาโตกราฟีแบบเฮกซ์เฟส นอกจากอุณหภูมิแล้วความดันก็มีอิทธิพลต่อค่า  $K$  เช่นกัน แต่อิทธิพลของความดันนั้นค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับอิทธิพลของอุณหภูมิ

ทั้งอุณหภูมิและความดันนั้นเป็นองค์ประกอบทางกายภาพที่มีผลต่อค่า  $K$  และ  $R$  ได้แก่ โมเลกุลของสารที่ต้องการแยกวัฏภาคหนึ่งและวัฏภาคเคลื่อนที่ เป็นต้น ถ้าโมเลกุลของสารที่จะแยกและวัฏภาคหนึ่งมีความมีขั้ว (Polarity) สูง มันจะมีแรงดึงดูดซึ่งกันและกันสูง เมื่อชะด้วยตัวทำละลายที่มีความมีขั้วต่ำ โอกาสที่สารจะถูกชะออกมาสู่วัฏภาคเคลื่อนที่ที่น้อย ค่า  $K$  จะมากและค่า  $R$  จะน้อย ถ้าเพิ่มความมีขั้วของวัฏภาคเคลื่อนที่ให้สูงขึ้น สารที่ต้องการแยกจะถูกชะออกมาในวัฏภาคเคลื่อนที่



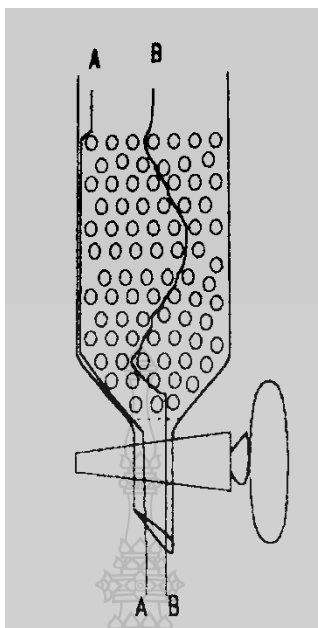
มากขึ้น ค่า  $K$  จะน้อยลงและค่า  $R$  สูงขึ้น แยกสารดูดซับและวัฏภาคเคลื่อนที่มีความเข้มข้นต่ำ สารจะถูกชะออกมาได้มาก ค่า  $K$  น้อยและค่า  $R$  สูง แต่ถ้าเพิ่มความเข้มข้นของวัฏภาคเคลื่อนที่ สารจะถูกชะออกมาน้อยลงค่า  $K$  จะสูงขึ้นและค่า  $R$  น้อยลง เป็นต้น

### 2.3.2 การกระจายตัวของโซน

ในภาคปฏิบัติของการทำโครมาโตกราฟีของสารผสมใดๆ สารที่ต้องการแยกมักใส่เป็นชั้นหรือโซน (ในคอลัมน์) หรือเป็นจุดเล็กๆ (ใน TLC หรือโครมาโตกราฟีแบบกระดาษ) เมื่อเสร็จสิ้นการทดลอง โซนหรือจุดสุดท้ายจะกว้างขึ้นกว่าขณะที่ใส่ลงไปครั้งแรกเสมอ การแพร่กระจายของโมเลกุลต่างๆ ทำให้โซนหรือจุดใหญ่ขึ้น ถ้ามีการกระจายตัวมาก โซนจะใหญ่มาก โซนสองโซนที่ใกล้กันอาจจะซ้อนกัน หรือแยกออกจากกันไม่สมบูรณ์แต่หากโซนทั้งสองเล็กหรือแคบลงระดับหนึ่ง การแยกสารผสมทั้งสองจะแยกได้สมบูรณ์ ดังนั้นการทำโครมาโตกราฟีจึงต้องพยายามทำให้การกระจายตัวของโซนลดลงหรือเกิดได้น้อยที่สุด เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการแยกสารสูงสุด ปัจจัยสำคัญที่จะทำให้โซนแผ่ขยายออกนั้นอาจแยกออกได้เป็น 3 ชนิดคือ

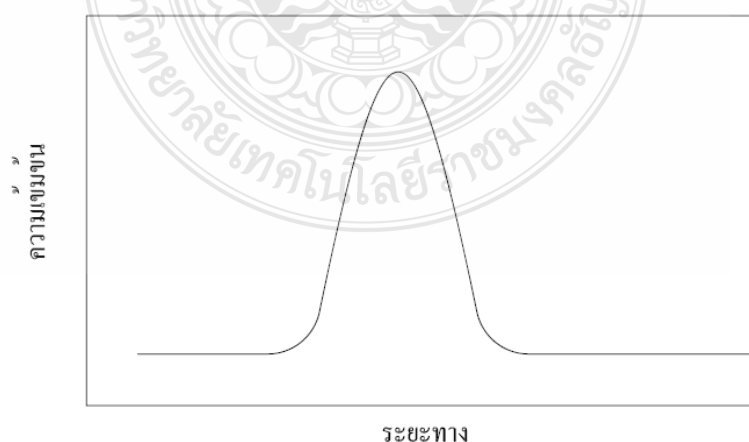
1) การแพร่กระจายแบบธรรมดา (Ordinary Diffusion) เกิดจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลในลักษณะไม่มีระเบียบ (Random) เคลื่อนที่จากที่ๆ มีความเข้มข้นสูงกว่าไปยังที่ๆ มีความเข้มข้นต่ำกว่าซึ่งอยู่บริเวณรอบๆ โซน

2) การแพร่กระจายแบบวน (Eddy Diffusion) เกิดจากการเคลื่อนที่ของสารไปสู่จุดหมายปลายทางด้วยระยะทางที่ไม่เท่ากันในคอลัมน์ หรือบนกระดาษกรอง ถ้าดูจากลักษณะคอลัมน์ที่บรรจุสารดูดซับไว้ (ภาพที่ 2.23) จะเห็นว่าระยะทางจากแนวต่อของสารดูดซับจากคอลัมน์ (เส้นทาง A) จะมีอุปสรรคขัดขวางการเคลื่อนที่ของสารหรือวัฏภาคเคลื่อนที่น้อยที่สุด และยังมีระยะทางสั้นที่สุดเมื่อเทียบกับเส้นทาง (B) ซึ่งไหลผ่านตรงกลางหรือส่วนอื่นๆ ของคอลัมน์ซึ่งมีสารดูดซับบรรจุอยู่แน่น และการเรียงตัวของสารดูดซับเหล่านี้เป็นไปอย่างไม่มีระเบียบ วัฏภาคเคลื่อนที่จะวิ่งผ่านไปตามช่องว่างระหว่างอนุภาคของสารดูดซับ เมื่อไปชนสารดูดซับมันจะเบี่ยงเบนไปตามช่องว่าง ทำให้ทิศทางการไหลคดเคี้ยวและมีระยะทางไกลกว่าเป็นผลให้โมเลกุลที่เคลื่อนที่ตรงบริเวณรอยต่อวิ่งไปถึงจุดหมายปลายทางได้เร็วกว่า และเป็นสาเหตุหนึ่งของการขยายตัวของโซนกว้างขึ้น



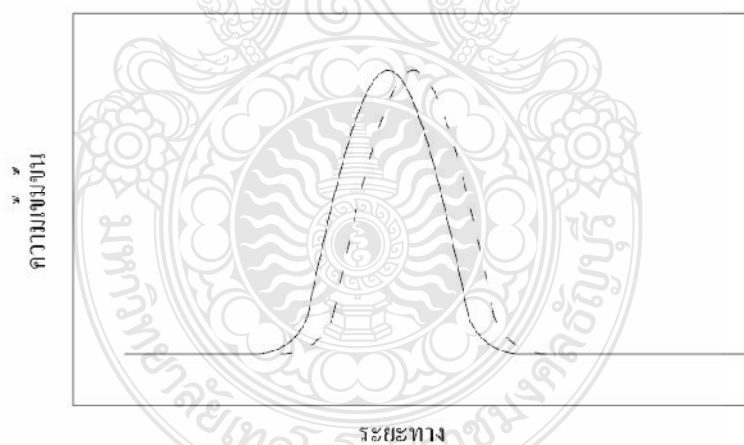
ภาพที่ 2.23 ทิศทางการเคลื่อนที่ของวัฏภาคเคลื่อนที่ในคอลัมน์ที่ทำให้เกิดการแพร่กระจายแบบวน

3) การแพร่กระจายที่เกิดจากความไม่สมดุลเฉพาะจุด (Local Non-equilibrium) บางแห่ง ใช้การแพร่กระจายที่เกิดจากแรงต้านการถ่ายเทมวล (Resistant to Mass Transfer) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญอันหนึ่งที่ทำให้เกิดการกระจายตัวของโซนมืดมีความซับซ้อนและเข้าใจค่อนข้างยากกว่าสององค์ประกอบที่กล่าวมาข้างต้น ถ้านำเอาความเข้มข้นของสาร ณ จุดต่างๆ ในโซนหนึ่งๆ มาเขียนกราฟ จะได้กราฟรูประฆัง (Gaussian Curve)



ภาพที่ 2.24 ความเข้มข้นของสารในจุดต่างๆ ในโครมาโตกราฟี

ดังแสดงในภาพที่ 2.24 ที่จุดกึ่งกลางโซนจะมีความเข้มข้นสารสูงสุดและลดน้อยลงตามลำดับทั้งบริเวณด้านหน้าและด้านหลังของโซน หากพิจารณาด้านหน้าของโซนซึ่งมีความเข้มข้นน้อยกว่าตรงกลางโซน หากพิจารณาด้านหน้าของโซนซึ่งมีความเข้มข้นน้อยกว่าตรงกลางโซน ภูมิภาคเคลื่อนที่จะพาสารที่มีความเข้มข้นสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าสารจะถูกถ่ายเทจากภูมิภาคเคลื่อนที่เข้าสู่ภูมิภาคนิ่งอย่างรวดเร็ว ถ้าให้ภูมิภาคเคลื่อนที่หยุดไหลชั่วขณะ การเรียงตัวของสารระหว่างภูมิภาคทั้งสองจะถึงจุดสมดุลแต่การทำโครมาโตกราฟีนั้น ภูมิภาคเคลื่อนที่จะไหลอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ดังนั้น การเรียงตัวของสารระหว่างภูมิภาคทั้งสองยังไม่ทันถึงจุดสมดุลดี ภูมิภาคเคลื่อนที่ก็พาเอาสารจากที่ๆ มีความเข้มข้นสูงมาเพิ่มให้อีก ทำให้บริเวณด้านหน้าของโซนมีสถานะเกือบจะถึงจุดสมดุลมากกว่าจะอยู่ในสถานะสมดุลที่แท้จริง และความเข้มข้นของสารในภูมิภาคเคลื่อนที่ที่จะสูงกว่าความเข้มข้นในสถานะสมดุลเล็กน้อย ดังแสดงในกราฟภาพที่ 2.25 (เส้นไขปลา) เมื่อพิจารณาทางด้านหลังของโซน ความเข้มข้นของสารในภูมิภาคเคลื่อนที่ที่จะต่ำกว่าจุดกึ่งกลางโซน ภูมิภาคเคลื่อนที่ที่จะพาสารจากที่ๆ มีความเข้มข้นต่ำมายังที่ๆ มีความเข้มข้นสูงกว่า โมเลกุลสารจะเรียงตัวใหม่เข้าสู่สถานะสมดุลโดยคายสารจากภูมิภาคนิ่งออกมายังภูมิภาคเคลื่อนที่ ถ้าให้ภูมิภาคเคลื่อนที่หยุดไหลชั่วขณะหนึ่งการเรียงตัวของสารก็จะเข้าสู่สถานะสมดุล



ภาพที่ 2.25 ความเข้มข้นของสารในภูมิภาคเคลื่อนที่

ในทางปฏิบัติ การไหลของสัญญาณเคลื่อนที่จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้น บริเวณด้านหลังโชนก็จะมีลักษณะคล้ายกับด้านหน้าโชนเช่นกันคือ อยู่ในสภาวะที่เกือบจะถึงจุดสมดุล การคายสารออกจากสัญญาณหนึ่งสู่สัญญาณเคลื่อนที่ จะยังไม่ถึงจุดสมดุล ความเข้มข้นของสารในสัญญาณเคลื่อนที่จะต่ำกว่าสภาวะสมดุลที่แท้จริง (เส้นไขปลาในภาพที่ 2.25)

เนื่องจากความเข้มข้นของสารในสัญญาณเคลื่อนที่บริเวณด้านหน้าโชนสูงกว่าจุดสมดุล ปริมาณสารที่เกินดุลนี้จะเคลื่อนที่ด้วยอัตราความเร็วที่สูงกว่าความเร็วเฉลี่ย คือ ความเร็วที่จุดกึ่งกลางโชนซึ่งมีความเร็วเฉลี่ยเป็น  $R_F$  ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลสารที่เกินดุลนี้เป็นสารที่ใช้เวลาในสัญญาณเคลื่อนที่มากกว่าโมเลกุลสารที่อยู่ในสภาวะสมดุลหากอัตราไหลของสัญญาณเคลื่อนที่ยิ่งสูง การเรียงตัวของโมเลกุลระหว่างสัญญาณหนึ่งและสัญญาณเคลื่อนที่จะห่างไกลจากสภาวะสมดุลมากขึ้น โมเลกุลสารที่อยู่ด้านหน้านี้จะเคลื่อนที่ห่างออกไปจากกึ่งกลางโชนมากยิ่งขึ้น ในทางกลับกัน หากอัตราการไหลของสัญญาณเคลื่อนที่ลดลง การเรียงตัวของโมเลกุลในสัญญาณทั้งสองจะใกล้จุดสมดุลยิ่งขึ้น โมเลกุลสารที่อยู่ด้านหน้านี้จะเคลื่อนที่ไม่ต่างจากกึ่งกลางโชนมากนัก ส่วนความเข้มข้นของสารในสัญญาณเคลื่อนที่ทางด้านหลังโชนซึ่งต่ำกว่าจุดกึ่งกลางโชนก็จะเคลื่อนที่ช้ากว่าอัตราความเร็วเฉลี่ย และเคลื่อนที่ห่างจากจุดกึ่งกลางโชนมากขึ้นหากอัตราไหลของสัญญาณเคลื่อนที่สูงขึ้น เมื่อเวลาการทำโครมาโตกราฟียาวนาน ระยะห่างของสารด้านหน้าและด้านหลังโชนจะยิ่งมากขึ้น ปรากฏการณ์ความไม่สมดุลเฉพาะจุดนี้จะเกิดขึ้นพร้อมๆ กับการแพร่กระจายแบบธรรมดาและการแพร่กระจายแบบวน ปรากฏการณ์ทั้งสามนี้เป็นปรากฏการณ์ที่ไม่ปรารถนา ดังนั้นการทำโครมาโตกราฟีทั่วไปจะต้องพยายามลดการแพร่กระจายทั้งสามลงให้เหลือน้อยที่สุดเพื่อให้การทำโครมาโตกราฟีได้ประสิทธิภาพและอำนาจการแยกสารสูงสุด

### 2.3.3 สมการแวนดิมเตอร์

เมื่อพิจารณาถึงความเข้มข้น ณ จุดต่างๆ ในโชนหนึ่งๆ จะได้กราฟภาพที่ 2.24 ซึ่งเป็นกราฟรูปประฆัง ซึ่งเป็นผลจากการแพร่กระจายทั้งสามชนิดที่กล่าวมาข้างต้น การวัดการขยายของโชนในโครมาโตกราฟีนั้นสามารถที่จะนำเอาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) มาใช้ในการวิเคราะห์ โดยสมมุติให้การแพร่กระจายทั้ง 3 เกิดขึ้นอย่างเป็นอิสระต่อกัน

จากวิชาสถิติ

$$\sigma_t^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 \quad (2.22)$$

จะได้

$$\sigma_t^2 = \sigma_0^2 + \sigma_E^2 + \sigma_N^2 \quad (2.23)$$

$\sigma_0^2$  = การแพร่กระจายแบบธรรมดา

$\sigma_E^2$  = การแพร่กระจายแบบวน

$\sigma_N^2$  = การแพร่กระจายเกิดจากความไม่สมดุลเฉพาะจุด

$\sigma_t^2$  = การแพร่กระจายรวม

การแพร่กระจายแบบธรรมดานั้นมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจาย (Diffusion Coefficient) ตามสมการของไอน์สไตน์ (Einstein) คือ

$$\sigma_0^2 = 2DT_M \quad (2.24)$$

โดย  $D$  = สัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจายของสาร

$T_M$  = เวลาที่สารอยู่ในวัฏภาคเคลื่อนที่

เพราะสารจะแพร่กระจายได้ดีในวัฏภาคเคลื่อนที่ ส่วนในวัฏภาคนิ่งการแพร่กระจายของสารจะเกิดได้น้อยมากเมื่อเทียบกับวัฏภาคเคลื่อนที่จึงไม่นำมาคำนวณ

ถ้าให้  $L$  = ความยาวของคอลัมน์

จะได้  $T_M \times F = L$

หรือ

$$T_M = \frac{L}{F} \quad (2.25)$$

แทนค่า  $T_M$  ลงในสมการที่ 2.24 จะได้

$$\sigma_0^2 = 2D \cdot \frac{L}{F} \quad (2.26)$$

ซึ่งเป็นการกระจายสมการของไอออนสไตน์ออกมาในเทอมที่วัดค่าได้ในทางปฏิบัติ

การแพร่กระจายแบบวนนั้นหาค่าได้โดยอาศัยกระบวนการสุ่ม (Random) ตัวอย่างของกระบวนการสุ่มอันหนึ่งคือ การวิ่งของมด ถ้าเราทำรังมดตกลงบนพื้น แรงกระแทกจะทำให้มดตกใจ และวิ่งออกจากรังในทุกทิศทางอย่างสับสน บางตัวจะวิ่งวน บางตัววิ่งออกไปสักระยะหนึ่งจะวิ่งกลับ เมื่อปล่อยทิ้งไว้สักระยะหนึ่งจะพบว่าจำนวนมดตรงจุดกึ่งกลาง (รังมด) จะมีจำนวนสูงสุด และลดน้อยลงในบริเวณห่างออกไปตามลำดับ เมื่อนำจำนวนมดที่ระยะต่างๆ มาเขียนกราฟจะได้กราฟเป็นลักษณะกราฟรูประฆัง ขอบข่ายของการกระจายออกไปของมดนี้วัดได้ด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานตามทฤษฎีกระบวนการสุ่ม (Random Process) คือ

$$\sigma = l\sqrt{n} \quad (2.27)$$

$l$  = ความยาวของแต่ละก้าว

$N$  = จำนวนก้าว

นั่นคือ การแพร่กระจายจะมากขึ้นตามความยาวของแต่ละก้าว และจำนวนก้าวที่ก้าวเดินไป การแพร่กระจายแบบวนซึ่งเกิดจากการไหลของภูมิภาคเคลื่อนที่ในทิศทางที่ต่างกันในคอลัมน์ เมื่อภูมิภาคเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างมันจะไหลไปข้างหน้า แต่เมื่อไปชนกับอนุภาคของสารดูดซับ มันจะเปลี่ยนทิศทาง ดังนั้น ก้าวหนึ่งๆ ของภูมิภาคเคลื่อนที่ที่เคลื่อนไปในคอลัมน์จะมีค่าเทียบเท่ากับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของสารดูดซับ ( $d_p$ ) และจำนวนก้าวเท่ากับ  $L/d_p$  เมื่อนำค่านี้ไปแทนค่าในสมการที่ 2.27 จะได้

$$\sigma_E = d_p \sqrt{\frac{L}{d_p}} \quad (2.28)$$

$$\sigma_E^2 = L.d_p \quad (2.29)$$

สภาวะไม่สมดุลเฉพาะจุดนั้นสามารถวิเคราะห์ในลักษณะเดียวกันกับการแพร่กระจายแบบวน โดยพิจารณาสารที่กระจายตัวระหว่างภูมิภาคเคลื่อนที่และภูมิภาคนิ่ง คือ สารจะใช้เวลา  $T_M$  ในภูมิภาคเคลื่อนที่และเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเท่า  $F$  และในจะใช้เวลา  $T_S$  ภูมิภาคนิ่งซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเป็น 0 (หรือไม่เคลื่อนที่เลย) ดังนั้น สารในโครมาโตกราฟจะเคลื่อนที่ หยุคๆ ในคอลัมน์

#### 2.3.4 การแยกสาร

จุดมุ่งหมายของการทำโครมาโตกราฟีก็เพื่อจะแยกสารผสมออกจากกัน ถ้าไม่สามารถจะแยกสารผสมออกจากกันก็นับเป็นความล้มเหลวของการทำโครมาโตกราฟี ถ้าสามารถแยกออกจากกันเพียงบางส่วนและต้องใช้เวลายาวนานเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ ก็อาจนับว่าเป็นความสำเร็จเพียงบางส่วน การใช้โครมาโตกราฟีในการแยกสารผสมไม่จำเป็นจะต้องประสบผลสำเร็จเสมอไป บางครั้งการนำเอาหลักการข้างต้นมาใช้เพื่อช่วยลดการขยายตัวของโซนให้เหลือน้อยที่สุด แต่ก็ยังไม่สามารถแยกสารผสมออกจากกันได้ การศึกษาถึงอำนาจการแยกสาร (Resolution) ของโครมาโตกราฟีจะช่วยเสริมความรู้ข้างต้นในการเลือกหาวิธีการแยกสารให้ดีขึ้น หรือในกรณีที่สารผสมแยกออกจากกันได้ง่าย การศึกษาถึงอำนาจการแยกสารอาจจะช่วยย่นระยะเวลาของการทำโครมาโตกราฟีลงได้ อำนาจการแยกสาร ( $R_s$ ) อาจนิยามตามสมการข้างล่างนี้

$$R_s = \frac{(t_2 - t_1)}{\frac{1}{2}(W_1 + W_2)} \quad (2.30)$$

หรือ

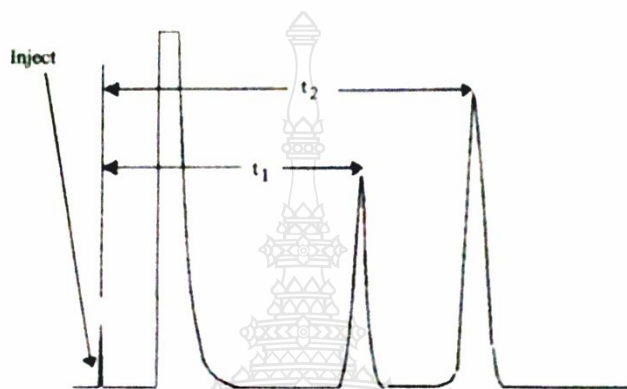
$$R_s = \frac{\Delta Z}{4\sigma} \quad (2.31)$$

โดย  $t_1$  และ  $t_2$  คือเวลาที่สารตัวที่ 1 และ 2 ะออกจากคอลัมน์ (ในภาพที่ 2.26)

$W_1$  และ  $W_2$  คือความกว้างของโซน หรือพีก (Peak) ของสารตัวที่ 1 และ ตัวที่ 2 ในหน่วยเวลาเช่นกัน (มีค่าประมาณ  $4\sigma$ )

$\Delta Z$  คือ ผลต่างของ  $t_1$  และ  $t_2$

ที่  $R_s$  เท่ากับ 1.5 พีคของสารทั้งสองจะแยกออกจากกันจนถึงเส้นฐาน และหากปริมาณสารในทั้งสองเท่ากัน โครมาโตกราฟีจะแยกสารแต่ละตัวได้บริสุทธิ์ถึงร้อยละ 99.9 ที่ค่า  $R_s$  เท่ากับ 1.0 สารแต่ละตัวในพีคทั้งสองจะแยกกลับคืน (Recovery) ได้ร้อยละ 98 โดยแยกสาร ได้บริสุทธิ์ร้อยละ 97 และที่  $R_s$  เท่ากับ 0.8 สารแต่ละตัวในพีคทั้งสองจะแยกกลับคืนได้ร้อยละ 96 โดยความบริสุทธิ์เพียงร้อยละ 95 ซึ่งถือเป็นค่าต่ำสุดที่จะยอมรับในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ

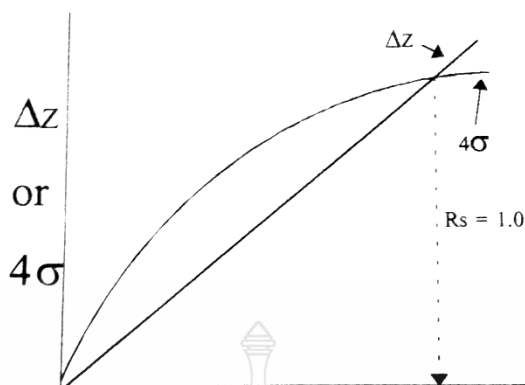


ภาพที่ 2.26 การแยกตัวของสาร 1 และ 2 ในโครมาโตกราฟี

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $4\sigma$  และ  $\Delta Z$  กับความยาวของคอลัมน์ ( $L$ ) โดยให้  $L$  อยู่บนแกน  $X$  จะได้กราฟดังภาพที่ 2.27

ถ้าคอลัมน์ยาวเป็น  $2L$  จำนวนการแยกจะสูงขึ้นเป็น 1.414 (หรือ  $\sqrt{2}$ ) เท่า หรือหากลดความยาวของคอลัมน์ลงมาเหลือเพียงครึ่งหนึ่งจำนวนการแยกจะเหลือเพียง 0.707 เท่าของจำนวนการแยกเดิมนั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ถ้าคอลัมน์ยาวเท่ากับ  $L$  สามารถแยกสารสองตัวออกจากกันเพียง  $R_s$  เท่ากับ 0.7 แล้วจะต้องเพิ่มความยาวของคอลัมน์เป็น  $2L$  จึงจะสามารถแยกสารทั้งสองออกจากกันได้  $R_s$  เท่ากับ 1.0





ภาพที่ 2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของคอลัมน์กับ  $4\sigma$  และ  $\Delta z$

ในทางปฏิบัตินั้นนิยมใช้จำนวนเพลททฤษฎี (Theoretical Plate) มากกว่า ความยาวคอลัมน์ เพราะในการบรรจุสารในคอลัมน์นั้น ค่า  $H$  อาจไม่แปรผันโดยตรงกับความยาวคอลัมน์เสมอไป เนื่องจากเทคนิคการบรรจุแต่ละครั้งอาจจะแตกต่างกัน ทำให้คุณภาพของคอลัมน์แต่ละอันไม่สม่ำเสมอ ความยาวของคอลัมน์จึงเป็นเพียงตัวเลขชี้บอกการแยกอย่างคร่าวๆ เท่านั้น แต่จำนวนเพลททางทฤษฎีจะเป็นการชี้บ่งถึงอำนาจการแยกได้แน่ชัดกว่า

ถ้ากำหนดให้  $N =$  จำนวนเพลททฤษฎี

$$N = \frac{L}{H} \quad (2.32)$$

หรือ

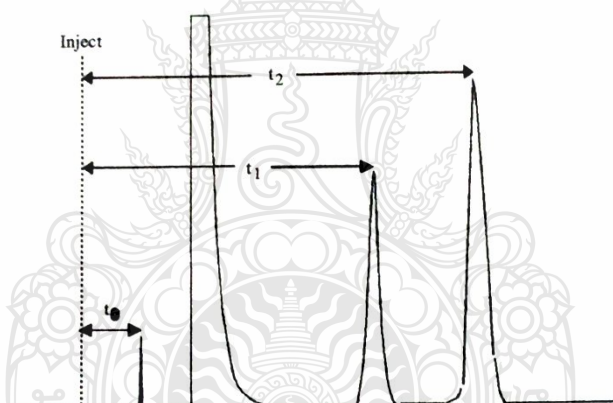
$$N \propto L \quad (2.33)$$

ดังนั้นกราฟในภาพที่ 2.27 นั้นจะใช้  $N$  แทนค่า  $L$  ในแกน X ก็ได้ นั่นอาจจะแสดงออกเป็นจำนวนเท่าของจำนวนเพลททางทฤษฎีก็จะให้ผลการคำนวณเช่นเดียวกัน เช่น คอลัมน์ที่มีจำนวนเพลทเท่ากับ 5,000 สามารถแยกสารผสมสองตัวออกจากกันได้เพียง  $R_s$  เท่ากับ 0.7 ถ้าต้องการให้สารสองตัวแยกออกจากกันให้ได้  $R_s$  เท่ากับ 1.0 พอดี จะต้องเพิ่มจำนวนเพลทเป็น 10,000

### 2.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอำนาจการแยกสารและพารามิเตอร์ต่างๆ ของคอลัมน์

ความสัมพันธ์ระหว่างอำนาจการแยกสารและความยาวของคอลัมน์ เมื่อความยาวคอลัมน์เปลี่ยนไปจะทำให้จำนวนเพลทของคอลัมน์เพิ่มหรือลดไปด้วย การเพิ่มหรือลดจำนวนเพลทอาจจะทำได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนความยาวของคอลัมน์ แต่ทำโดยปรับอัตราการไหลของแก๊สตัวพาซึ่งกระทำได้สะดวกกว่า ทว่าการเพิ่มจำนวนเพลทของคอลัมน์ด้วยวิธีนี้มีขีดจำกัดคือ ที่อัตราการไหลที่เหมาะสม (Pptimum Flow Rate) จำนวนเพลทจะมีค่าสูงสุด และไม่อาจเพิ่มสูงขึ้นไปกว่านี้ได้ การปรับอัตราการไหลของแก๊สตัวพาให้สูงขึ้นจำนวนเพลทจะลดลง

เพอร์เนลล์ (Purnell) ได้โยงความสัมพันธ์ระหว่างอำนาจการแยกสารกับพารามิเตอร์ของคอลัมน์ เช่น ตัวประกอบความจุ (Capacity Factor,  $K'$ ) เวลาชะสัมพันธ์ (Relative Retention) และจำนวนเพลทไว้ ตัวประกอบความจุเป็นอัตราส่วนของเวลาชะของสารกับเวลาชะของอากาศ หากค่าได้จากโครมาโตแกรมภาพที่ 2.28



ภาพที่ 2.28 ค่าเวลาชะต่างๆ

$$k' \text{ (ของสารตัวที่ 1)} = \frac{t_1 - t_0}{t_0} \quad (3.34)$$

โดย  $t_1$  = เวลาชะของสารตัวที่ 1

$t_0$  = เวลาชะของอากาศ หรือสารอื่นๆ ที่ไม่ละลายเข้าไปในวัฏภาคหนึ่ง

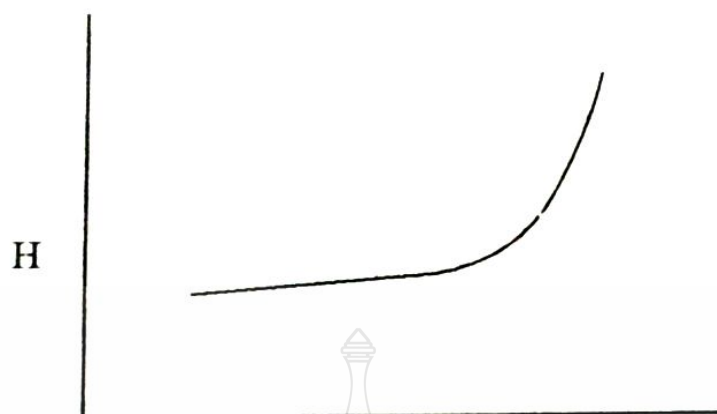
โดยทั่วไปการรายงานค่าเวลาจะมักจะทำให้เป็นค่าของ  $t_1$ ,  $t_2$  หรือ  $t_n$  ค่า  $t$  นี้ วัดได้ค่อนข้างสะดวก แต่จะมีข้อเสียคือ ถ้าอัตราการไหลของแก๊สตัวพาเปลี่ยนไปค่า  $t$  จะเปลี่ยนไปด้วย แต่ถ้ารายงานเป็นค่า  $k'$  แล้วค่านี้จะคงที่ ค่า  $k'$  นี้ นอกจากจะแสดงออกในรูปของสมการที่ 3.34 แล้วมันยังสามารถแสดงออกในรูปอื่น (แต่วัดหาค่าไม่ได้ในทางปฏิบัติ)

จะบ่งบอกถึงการเลือกละลายสารของวัฏภาคหนึ่ง ถ้าค่า  $\alpha=1$  หมายถึงวัฏภาคหนึ่งเลือกละลายสารผสมทั้งสองได้ดีเท่ากัน เพราะสารทั้งสองจะไม่สามารถแยกออกจากกัน ถ้าค่า  $\alpha$  ยิ่งสูงการแยกสารจะเกิดได้ง่ายและรวดเร็ว ความสัมพันธ์ระหว่างอำนาจการแยกสารกับจำนวนเพลท ดังนั้นหากต้องการแยกสารผสมสองตัวออกจากกัน ( $R_s = 1$ ) พอดีนั้นอาจเปลี่ยนแปลงจำนวนเพลท ในทางปฏิบัติอาจทำได้โดยการลดหรือเพิ่มความยาวของคอลัมน์ หรือเพิ่มหรือลดอัตราการไหลของแก๊สตัวพา เป็นต้น นอกจากนี้แล้ว การเปลี่ยนอุณหภูมิจะมีผลต่อค่า  $k'$  และการเปลี่ยนชนิดของวัฏภาคหนึ่งจะมีผลต่อค่า  $\alpha$  ซึ่งจะให้อำนาจการแยกลดลงหรือเพิ่มขึ้น

### 2.3.6 การทำโครมาโตกราฟีเพื่อให้ได้อำนาจการแยกสูงสุด

การทำโครมาโตกราฟีทุกๆ ไป ผู้ใช้พยายามที่จะให้อำนาจการแยกสารอยู่ในสภาวะสูงสุด นอกเสียจากสารผสมจะแยกออกจากกันได้ง่าย ผู้ใช้จึงยอมลดอำนาจการแยกของคอลัมน์ไปบ้างเพื่อลดเวลาการทำโครมาโตกราฟีให้สั้นลง แต่ก็มียกข้อยกเว้นที่การทำโครมาโตกราฟีในสภาวะที่พอเหมาะแล้ว สารผสมยังสามารถแยกออกจากกันหรือแยกออกได้แต่เพียงบางส่วนเท่านั้น ดังนั้น เทคนิคการทำโครมาโตกราฟีต่อไปนี้อาจจะช่วยให้แก้ปัญหาการแยกดีขึ้น

1) ปริมาณของสารผสมที่ต้องการแยก การใส่สารครั้งละมากๆ ลงในคอลัมน์มันจะกระจายไปบนสารดูดซับหรือวัฏภาคหนึ่งมาก ดังนั้น โชนเริ่มต้นจะกว้างเมื่อบวกกับการขยายของโชน ขณะที่สารเคลื่อนที่ไปตามคอลัมน์จะทำให้โชนสุดท้ายยิ่งกว้างขึ้น จำนวนเพลทน้อยลง ดังนั้น การใส่สารแต่ละครั้งในคอลัมน์จึงควรใส่ให้น้อยที่สุดเท่าที่เครื่องตรวจวัดจะตรวจวิเคราะห์ และทำทวนซ้ำ (Reproducible) ได้ด้วย การเพิ่มปริมาณสารตัวอย่างอาจเพิ่มได้ถึงระดับหนึ่งที่ยังคงให้ค่า  $H$  คงที่ แต่ถ้าเพิ่มสูงกว่านี้ ค่า  $N$  หรือประสิทธิภาพของคอลัมน์จะลดลงอย่างมาก ดังภาพที่ 2.29



ภาพที่ 2.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง H และปริมาณสารตัวอย่าง

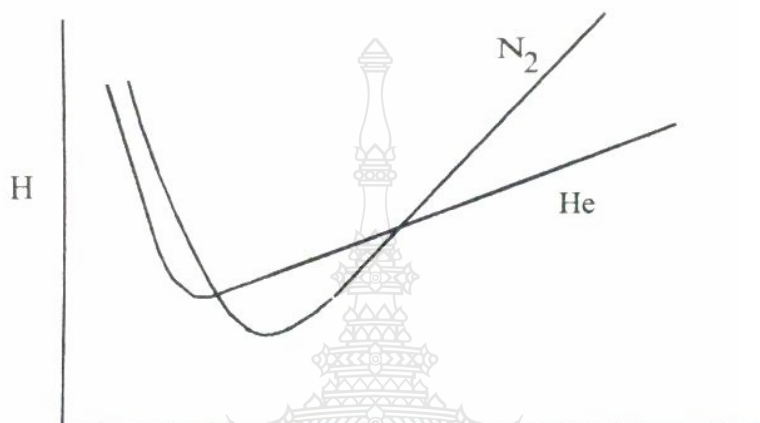
2) ปริมาตรตาย (Dead Volume) เป็นช่องว่างภายในคอลัมน์และที่ปลายคอลัมน์ถึงเครื่องตรวจวัด ปริมาตรตายเป็นองค์ประกอบสำคัญที่มักถูกลืมบ่อยๆ ช่องว่างภายในคอลัมน์และที่ปลายคอลัมน์ถึงเครื่องตรวจวัดจะมีน้อยที่สุด ช่องว่างเหล่านี้จะทำให้ค่า H สูงขึ้น และอาจทำให้สารที่แยกออกเกิดการผสมกัน (Remixing)

3) ความยาวของคอลัมน์ ความสัมพันธ์ของความยาวของคอลัมน์กับอำนาจ การแยกนั้น แสดงไว้ในสมการที่ 2.33 คือ คอลัมน์ที่ยาวอำนาจการแยกจะเพิ่มขึ้นเป็นรากที่สองของความยาวเดิม ตราบเท่าที่จะสามารถรักษาอัตราการความเร็วของวัฏภาคเคลื่อนที่ให้คงที่ไว้ได้ ในทางปฏิบัติการใช้คอลัมน์ยาวมากๆ มักประสบปัญหาการควบคุมอัตราการความเร็วของวัฏภาคเคลื่อนที่ให้สม่ำเสมอ เนื่องจากความดันตก เนื่องจากความดันตก (Pressure Drop) ภายในคอลัมน์ ดังนั้น อัตราความเร็วของวัฏภาคเคลื่อนที่ที่จะเปลี่ยนไปตามระยะทางทำให้มีเพียงช่วงหนึ่งของคอลัมน์เท่านั้นที่มีอัตราการความเร็วพอเหมาะ อัตราการไหลนอกเหนือจากอัตรานี้จะทำให้เกิดการกระจายของโซนมาก นั่นคือ ถ้าความยาวมากเกินไปอาจทำให้อำนาจการแยกลดต่ำลง (Diminishing Return) และระยะเวลาของการวิเคราะห์ยาวนานขึ้นด้วย

4) อัตราความเร็วของวัฏภาคเคลื่อนที่ อัตราความเร็วของวัฏภาคเคลื่อนที่ได้กล่าวไปในข้อ 3 ข้างต้นแล้ว

5) ชนิดของวัฏภาคเคลื่อนที่ แก๊สตัวพา หรือวัฏภาคเคลื่อนที่ต่างกันจะให้ค่า  $H_{min}$  ต่างกัน แก๊สที่สามารถกระจายได้สูง หรือมีความหนืดต่ำจะสามารถพาสารตัวอย่างไปได้เร็วและถ่ายเทมวลได้รวดเร็ว การแพร่กระจายของโซนเกิดจากความไม่สมดุลเฉพาะจุดที่ต่ำ ในทางตรงกันข้าม การ

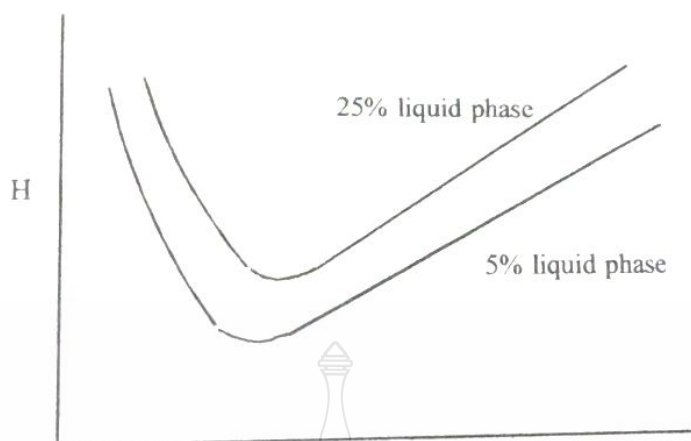
แพร่กระจายของสารตัวอย่างในวัฏภาคเคลื่อนที่จะสูง ภาพที่ 2.30 แสดงค่า  $H$  กับอัตราการไหลของแก๊สในโตรเจนและฮีเลียม ซึ่งนิยมใช้เป็นแก๊สตัวพาในแก๊สโครมาโตกราฟีกันมาก แก๊สในโตรเจนซึ่งมีค่าความหนืดสูงจะให้ค่า  $H_{\text{min}}$  ต่ำกว่าของฮีเลียมเล็กน้อยที่อัตราการไหลพอเหมาะหรือต่ำกว่า แต่ที่อัตราความเร็วสูงฮีเลียมจะให้ค่า  $H$  ที่เพิ่มขึ้นช้าและมีค่าต่ำกว่าค่า  $H$  ของแก๊สในโตรเจน



ภาพที่ 2.30 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของวัฏภาคเคลื่อนที่ต่างๆ กับค่า  $H$

6) ขนาดของวัสดุรองรับ ( $d_p$ ) ค่า  $d_p$  เป็นตัวทำให้เกิดการแพร่ขยายของโซนแบบวน  $d_p$  ยิ่งเล็กการแพร่ขยายของโซนจะต่ำแต่ถ้า  $d_p$  เล็กมากๆ มันจะทำให้อัตราความเร็วของวัฏภาคเคลื่อนที่ต่ำ นอกจากนี้การบรรจุสารที่มีอนุภาคเล็กๆ เหล่านี้ในคอลัมน์ให้มีความสม่ำเสมอขึ้นทำได้ยาก อาจเกิดการรวมตัวเกาะกันเป็นก้อนทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น และ  $d_p$  ที่แท้จริง จะสูงขึ้นตามไปด้วย

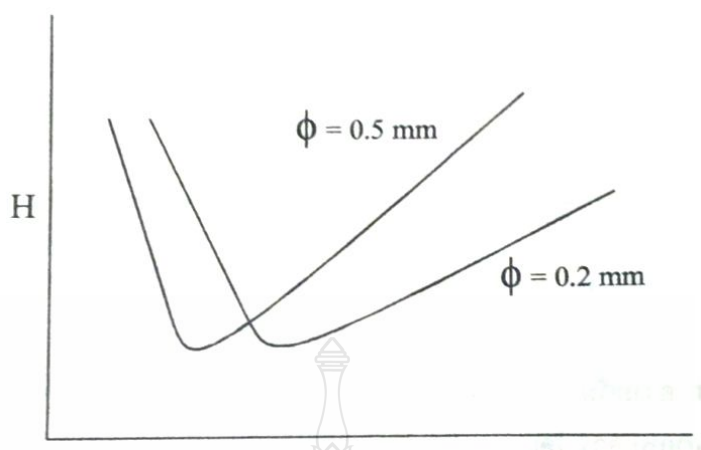
7) ปริมาณวัฏภาคนิ่ง อัตราร้อยละของวัฏภาคนิ่งที่เคลือบบนวัสดุรองรับมีผลอย่างมากต่อค่า  $H$  ปริมาณวัฏภาคนิ่งสูงขึ้น การถ่ายเทมวลระหว่างวัฏภาคนิ่งและวัฏภาคเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้น เวลาที่จะถึงจุดสมดุลจะยาวนานขึ้น ประสิทธิภาพของคอลัมน์จะลดลง ภาพที่ 2.31 เปรียบเทียบคอลัมน์ที่บรรจุวัสดุรองรับที่เคลือบด้วยวัฏภาคนิ่งปริมาณต่างกัน อัตราการแพร่กระจายของโซน หรือค่า  $H$  ของคอลัมน์ที่มีวัฏภาคนิ่งมากจะสูงกว่าคอลัมน์ที่มีวัฏภาคนิ่งน้อย



ภาพที่ 2.31 ปริมาณวัฏภาคหนึ่งต่างกันจะให้ผลต่อ H ต่างกัน

8) ความดัน ความดันของวัฏภาคเคลื่อนที่ มีผลต่อค่า H มากพอควร โดยเฉพาะในแก๊สโครมาโตกราฟี เมื่อความดันสูงๆ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายจะลดลง แต่ใน HPLC นั้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายในของเหลวมีค่าต่ำอยู่แล้วความดันจะมีผลน้อยมาก

9) เส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ ขนาดของคอลัมน์นี้ไม่ปรากฏในสมการใดๆ แต่เป็นที่ทราบกันดีว่าถ้าใช้คอลัมน์ใหญ่ๆ เช่น ในโครมาโตกราฟีเพื่อการเตรียมสาร (Preparative Chromatography) อำนาจการแยกสารจะต่ำ จากการศึกษาถึงขนาดของคอลัมน์ที่เหมาะสม พบว่าอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดูดซับอยู่ในช่วง 5 – 50 และอัตราความเร็วของวัฏภาคเคลื่อนที่ที่เหมาะสม จะไม่ทำให้อำนาจการแยกลดลง แต่ถ้าอัตราส่วนนี้สูงเกินกว่า 50 อำนาจการแยกของคอลัมน์จะลดลงดังนั้นการเลือกคอลัมน์จึงควรเลือกขนาดของคอลัมน์ให้เล็กที่สุดเท่าที่จะกระทำได้ แต่คอลัมน์เล็กมากนั้นก็อาจมีปัญหาการบรรจุวัสดูดซับในคอลัมน์ นอกจากนี้แล้ว ปริมาณสารตัวอย่างที่จะวิเคราะห์จะน้อยลงด้วย เครื่องตรวจวัดจะต้องมีความไวตอบสนองสูง ในทางปฏิบัติ คอลัมน์อาจมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก 0.3 เซนติเมตร (1/8 นิ้ว) สำหรับคอลัมน์แบบแพค และ 0.1 มิลลิเมตร สำหรับคอลัมน์แบบแคปิลลารี ภาพที่ 2.32 แสดงค่า H กับ F ของคอลัมน์แบบแคปิลลารีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.01 เซนติเมตร และ 0.05 เซนติเมตร ที่ขนาดความยาวเท่ากัน ที่อัตราการไหลของวัฏภาคเคลื่อนที่สูง คอลัมน์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กจะมีอัตราการเพิ่มของค่า H ช้ากว่าคอลัมน์ขนาดใหญ่

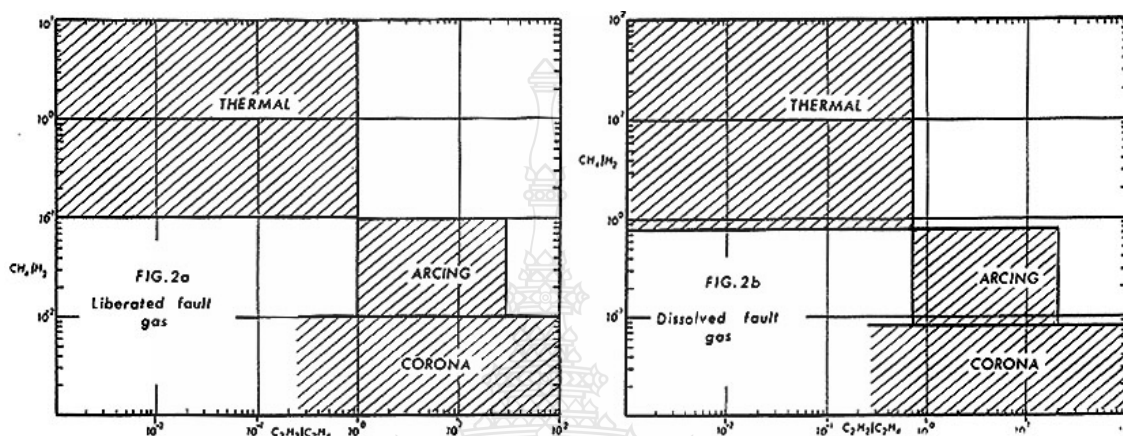


ภาพที่ 2.32 ค่า  $H$  กับอัตราการไหลของแก๊สตัวพาจากคอลัมน์

10) อุณหภูมิ อุณหภูมิที่มีผลต่อค่า  $K$  และค่า  $R$  ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นตามสมการที่ 2.21 นอกจากนี้แล้วอุณหภูมิยังมีผลต่อค่า  $H$  ในทางอ้อมอีกด้วยคือ ที่อุณหภูมิสูงขึ้น สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของสารจะสูงขึ้น และมีผลทำให้ค่า  $H$  สูงขึ้น แต่สารจะถูกชะออกจากคอลัมน์ได้เร็วขึ้น ดังนั้น เวลาในการทำโครมาโตกราฟีสั้นลง การกระจายตัวของโซนโดยรวมจะลดลง หรือพีคของโครมาโตแกรมจะแคบลง แต่อำนาจการแยกสารจะลดลง เนื่องจากโมเลกุลจะใช้เวลาในวัฏภาคเคลื่อนที่มากขึ้นซึ่งไม่มีผลในการแยกสาร

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ Dörnenberg [1] เป็นการวิเคราะห์เชิงอัตราส่วน ซึ่งใช้อัตราส่วนของ มีเทนต่อไฮโดรเจน ( $\text{CH}_4/\text{H}_2$ ) และ อะเซทิลีนต่อเอทิลีน ( $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ ) มาพล็อตกราฟกำหนดขอบเขตของปัญหาในรูปแบบต่างๆ สามารถนำผลการทดสอบมากำหนดจุดในภาพที่ 2.33 เพื่อแปลผลได้ทันที



ภาพที่ 2.33 กราฟกำหนดขอบเขตปัญหาของ Dörnenberg

งานวิจัยของ R.R. Rogers (CEGB Fault Gas Ratios) [1] มองปัญหาที่เกิดขึ้นจากอัตราส่วนของก๊าซ  $\text{CH}_4/\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$  และ  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{CO}_2/\text{CO}$  แต่ละชุดเป็นอัตราส่วนของก๊าซเกิดที่อุณหภูมิสูงต่อก๊าซเกิดที่อุณหภูมิต่ำถัดลงมา ทำเพื่อดูว่าอุณหภูมิของปัญหาอยู่ในช่วงกึ่งศตวรรษตัวอย่างเช่น Slight Overheating 150 – 200 องศา Arc with Power Follow Through, Partial Discharge with Tracking อัตราส่วนเหล่านี้จะถูกนำมาแปลงเป็น Code 0, 1, 2 และ 5 แล้วจึงนำ Code ทั้งสี่มาแปลผล การแปล Code จะทำต่อเมื่อได้พิจารณา Gas Limits and Warning Level แล้วเท่านั้น ต้องรับทราบอยู่เสมอว่าการใช้งานอัตราส่วนจากก๊าซสองชนิดที่มีปริมาณน้อยกว่าเกณฑ์จะทำให้การแปลผลผิดพลาด



ตารางที่ 2.4 เกณฑ์การตัดสินใจของ CEGB

CEGB Fault Gas Ratios			CEGB Fault Gas Diagnostics				
Ratio	Range	Code	Code				Diagnosis
CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>	≤ 0.1	5	0	0	0	0	ปกติ
	> 0.1 < 1	0	5	0	0	0	คิสซาร์จบางส่วน
	≥ 1 < 3	1	1,2	0	0	0	พบบริเวณความร้อนเกิน < 150°C
	≥ 3	2	1,2	1	0	0	พบบริเวณความร้อนเกิน 150 - 200°C
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> /CH <sub>4</sub>	≤ 1	0	0	1	0	0	พบบริเวณความร้อนเกิน 200 - 300°C
	≥ 1	1	0	0	1	0	ความร้อนเกินบนตัวนำ
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	< 1	0	1	0	1	0	กระแสไหลวนในขดลวด
	≥ 1 < 3	1	1	0	2	0	กระแสไหลวนในแกนเหล็กและตัวถัง ความร้อนเกินบนจุดต่อ
	≥ 3	2	0	0	0	1	แฟลชโอเวอร์ไม่มีพลังงานไหลตาม
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	≤ 0.5	0	0	0	1,2	1,2	อาร์ค มีพลังงานไหลตาม
	≥ 0.5 < 3	1	0	0	2	2	การสเปคต่อเนื่องจากมีจุดความเครียด ไฟฟ้าสูง
	≥ 3	2	5	0	0	1,2	คิสซาร์จบางส่วนแบบมีรอยไหม้ ปรากฏ (ให้ดูปริมาณ CO ประกอบ)
			CO/CO <sub>2</sub> > 11				อุณหภูมิบนฉนวนสูงเกินปกติ

งานวิจัยของ California State University-Sacramento Guidelines (Key Gases) [1] บอกอาการคร่าวๆ เช่น Corona, Arcing, Local Overheat เป็นต้น โดยใช้ปริมาณก๊าซแต่ละชนิดมาแปลโดยตรง ผลจากก๊าซแต่ละชนิดไม่มีความเกี่ยวข้องกับก๊าซอื่นเลย ซึ่งใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนและเชื่อมโยง CEGB Fault Gas Ratios และ Gas Limits and Warning Level ให้มีความถูกต้องยิ่งขึ้น

ตารางที่ 2.5 เกณฑ์การตัดสินใจของ California State University-Sacramento Guidelines

C. S. U. S. Guidelines			
ก๊าซ	ปกติ (<)	ผิดปกติ (>)	แปลผล
Hydrogen	150 ppm	1000 ppm	โคโรน่า อาร์ก
Methane	25	80	สปาร์ก
Ethane	10	35	บริเวณความร้อนเกิน
Ethylene	20	150	ความร้อนเกินรุนแรง
Acetylene	15	70	อาร์ก
Carbon Monoxide	500	1000	ความร้อนเกินรุนแรง
Carbon Dioxide	10,000	15,000	ความร้อนเกินรุนแรง
Total Combustibles	0.03 %	0.5 %	-

มาตรฐาน IEEE Std C57.104-1991 (Gas Limits and Warning Level) [1] เป็นข้อมูลสำคัญ เพื่อเตือนระดับความปลอดภัยของหม้อแปลง และเป็นเกณฑ์พิจารณาการทำ CEGB Fault Gas Ratios เกณฑ์ดังกล่าวไม่แจ้งอาการที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลง แต่จะเน้นในด้านระดับความปลอดภัย อัตราความเร็วของปัญหา การคาดคะเนเวลาที่เหลือ เวลาที่ควรเก็บตัวอย่างครั้งต่อไป เป็นต้น

ตารางที่ 2.6 เกณฑ์การตัดสินใจของ IEEE Std C57.104-1991

	L1	L2	L3	R1	R2	Q1	M1
H <sub>2</sub>	100	700	1800	1.39	4.17	60	0
CH <sub>4</sub>	120	400	1000	1.67	5	25	0
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	65	100	150	0.9	2.71	25	0
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	50	100	200	0.69	2.08	20	0
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	35	50	80	0.49	1.46	5	0
CO	350	570	1400	4.86	14.58	50	0
TDCG	720	1920	4630	10	30		0
CO <sub>2</sub>	2500	4000	10000	35	100		0
Water	35	50					
CO/CO <sub>2</sub>	Min	3					
	Max	10					
ช่วงเวลาเก็บตัวอย่างครั้งต่อไป (วัน)							
นานสุด 365	90	30	7	1	0 เร็วสุด		

L1 คือ ระดับความผิดปกติขั้นเริ่มต้นที่ต้องตรวจวิเคราะห์

L2 คือ ระดับความผิดปกติอย่างมาก ที่ต้องระวังและจับตามองอย่างใกล้ชิด

L3 คือ ระดับความผิดปกติขั้นฉุกเฉิน ต้องแก้ไขด้วยความระมัดระวังอย่างที่สุด

M1 คือ ค่าปรับแต่งระดับก๊าซให้เพิ่มขึ้นได้เล็กน้อย เพื่อสอดคล้องกับอายุของหม้อแปลง

R1 คือ อัตราการเกิดก๊าซที่ถือว่าอยู่ในระดับสูง

R2 คือ อัตราการเกิดก๊าซที่ถือว่าอยู่ในระดับสูงมาก

Q1 คือ อัตราส่วนปริมาณก๊าซคาร์บอนนอกไซค์ต่อปริมาณรวมของก๊าซคิดไฟได้

(กรณีของก๊าซอื่น Q1 คืออัตราส่วนของก๊าซนั้นต่อปริมาณรวมของก๊าซไฮโดรคาร์บอน)

M1 เลขปรับค่าตามอายุ

Duval Triangle [1] เป็นการศึกษาตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงกว่า 10,000 ตัวอย่างเหมือนวิธีของ Rogers แต่แทนที่จะทำอัตราส่วน กลับใช้วิธีพล็อตกราฟของสามก๊าซได้แก่ มีเทน เอทิลีน และ

อะเซทิลีน เป็นสามเหลี่ยมดังภาพที่ 2.34 แต่ละด้านของสามเหลี่ยมแสดงปริมาณก๊าซหนึ่งต่อปริมาณ ทั้งสามก๊าซรวมกัน มีวิธีคำนวณดังนี้

อะเซทิลีน คือ X เอทิลีน คือ Y มีเทน คือ Z

$$\% \text{ อะเซทิลีน} = 100X / (X+Y+Z)$$

$$\% \text{ เอทิลีน} = 100Y / (X+Y+Z)$$

$$\% \text{ มีเทน} = 100Z / (X+Y+Z)$$

พื้นที่สีในสามเหลี่ยมมีความหมายดังนี้

PD = Partial Discharge

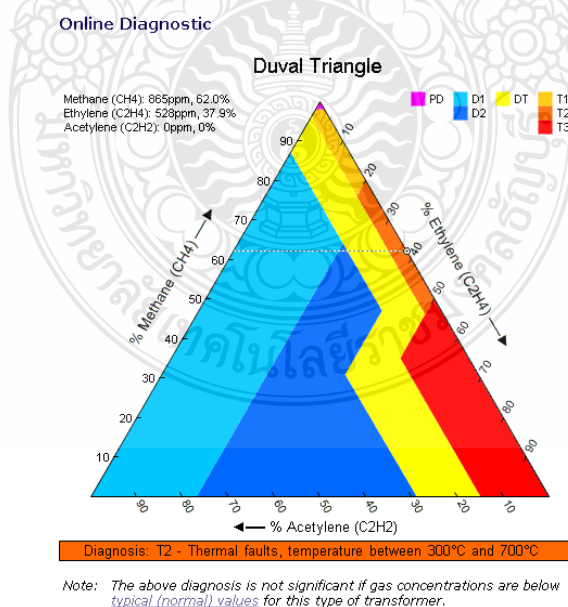
D1 = การดีสชาร์จพลังงานต่ำ

D2 = การดีสชาร์จพลังงานสูง

T1 = ปัญหาความร้อน อุณหภูมิต่ำกว่า 300°C

T2 = ปัญหาความร้อน อุณหภูมิ 300-700°C

T3 = ปัญหาความร้อน อุณหภูมิสูงกว่า 700°C



ภาพที่ 2.34 กราฟกำหนดขอบเขตปัญหาของ Duval Triangle

## 2.5 สรุปทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ศึกษาส่วนประกอบและหลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า รวมถึงคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง ศึกษามาตรฐานการตรวจวัดก๊าซบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงตาม IEC 60270 Third Edition, (2000) ส่วนประกอบและหลักการทำงานของวงจรการตรวจวัดก๊าซบางส่วน ศึกษาหลักการของโครมาโตกราฟี และศึกษาวิธีการวิเคราะห์ก๊าซในน้ำมันหม้อแปลงทั้ง 5 วิธี ได้แก่ Dörnenberg Ratio, CEGB Fault Gas Ratio, California State University-Sacramento Guidelines (Key Gas), IEEE Std C57.104-1991 (Gas Limits and Warning Level) และ Duval Triangle เป็นการเตรียมความพร้อมเพื่อการทำวิทยานิพนธ์ในบทต่อไป



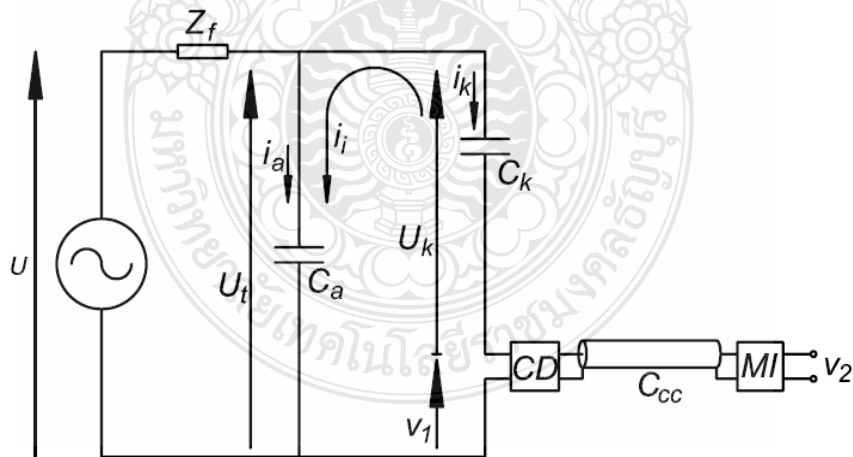
### บทที่ 3

## วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ นำเสนอการวิเคราะห์ก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง เพื่อหาแนวโน้มความรุนแรงของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนก่อนยกระดับพลังงานการดิสชาร์จ โดยการจำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลง ตามวงจรสมมูลการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนตามข้อกำหนดในมาตรฐานสากล IEC 60270 Third Edition, (2000) [3] และนำตัวอย่างน้ำมันที่ได้ไปทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง (Dissolved Gas Analysis, DGA)

### 3.1 การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลง

ใช้วิธีวิเคราะห์จากวงจรสมมูลการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนตามข้อกำหนดในมาตรฐานสากล IEC 60270 Third Edition, (2000) ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง  $U$  ตัวกรองสัญญาณ (Filter) จากแหล่งจ่าย  $Z_f$  วัสดุทดสอบ (Test Object,  $C_a$ ) ตัวเก็บประจุคัปปลิง (Coupling Capacitor,  $C_k$ ) อุปกรณ์รับสัญญาณ (Coupling Device,  $CD$ ) สายนำสัญญาณ (Connecting Cable,  $CC$ ) และเครื่องมือวัด  $MI$  ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 วงจรสมมูลการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน

หน้าที่การทำงานและคุณสมบัติสำคัญของอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรทดสอบเป็นดังนี้

1) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูง  $U$  ใช้ในการจ่ายแรงดันให้วงจรทดสอบและมีขนาดพิกัดเพียงพอที่จะจ่ายโหลดได้ ในงานวิจัยนี้ใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 60 kVAC 10 mA โดยแหล่งจ่ายดังกล่าวมีการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายในตัวเองต่ำมาก ตามภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูง  $U$

2) ตัวกรองสัญญาณหรืออิมพีแดนซ์  $Z_f$  ใช้ในการกรองสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่าย เช่น ฮาร์มอนิกส์ และดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดภายในหม้อแปลงทดสอบเองที่ใช้เป็นแหล่งจ่าย เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ใช้ไม่ใช่ตัวกรอง  $Z_f$  เพราะพิสูจน์แล้วว่า แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูงเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายในตัวเองต่ำมาก และใช้ตัวกรองด้านแรงดันต่ำแทน เพื่อกรองฮาร์มอนิกส์ ที่จะรบกวนเครื่องวัด

3) ตัวเก็บประจุคัปปลิง  $C_k$  ใช้เป็นส่วนเชื่อมต่อหรือคัปปลิงสัญญาณความถี่สูงให้ครบวงจรระหว่าง  $C_a$ ,  $C_k$  และ  $CD$  ดังนั้นตัวเก็บประจุคัปปลิงต้องเป็นชนิดที่มีค่าความเหนี่ยวนำภายใน (Stray Inductance) ต่ำ ทนแรงดันได้โดยปราศจากดิสชาร์จบางส่วนที่แรงดันทดสอบ อาจเรียกว่า “Blocking Capacitor” (อังกฤษ) ในงานวิจัยนี้ใช้ 340 pF 45 kV ตามภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 ตัวเก็บประจุคัปปลิง  $C_k$  และอุปกรณ์รับสัญญาณ  $CD$

4) อุปกรณ์รับสัญญาณ  $CD$  และเครื่องมือวัด  $MI$  อุปกรณ์ทั้งสองส่วนนี้จะทำงานร่วมกันคือทำหน้าที่อินทิเกรต (Integrate) กระแสพัลส์  $i_i$  ที่ไหลในวงจรทดสอบเนื่องจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วน โดยมีสายนำสัญญาณ  $CC$  เป็นสายที่เชื่อมต่อระหว่าง  $CD$  และ  $MI$  อุปกรณ์รับสัญญาณ จะทำหน้าที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือเป็นตัวกรองกระแสความถี่ต่ำ (50 ถึง 400 เฮิร์ตซ์) ในงานวิจัยนี้ใช้ NDB. XDP II ตามภาพที่ 3.3 และ 3.4





ภาพที่ 3.4 เครื่องมือวัด MI

หลักการการทำงานของวงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับดิสฮาร์โมนิกบางส่วน เริ่มจากการค่อยๆ ป้อนแรงดันทดสอบจากแหล่งจ่าย  $U$  ผ่านตัวกรอง  $Z_f$  ให้กับวงจรทดสอบจนกระทั่งเกิดดิสฮาร์โมนิกบางส่วนที่วัสดุทดสอบ  $C_a$  ทำให้เกิดแรงดันตกที่ขั้วของ  $C_a$  และ  $C_k$  จะดิสฮาร์โมนิกประจุไปที่  $C_a$  เพื่อชดเชยแรงดันตก ผลดังกล่าวทำให้เกิดกระแสพัลส์  $i_i$  ไหลวนครบวงจรระหว่าง  $C_a$ ,  $C_k$  และ  $CD$

ดังนั้น  $CD$  และ  $MI$  วัดประจุไฟฟ้าที่ถ่ายเทระหว่าง  $C_a$  และ  $C_k$  โดยการอินทิเกรตกระแสพัลส์  $i_i$  เพื่อนำไปแสดงผลต่อไป

### 3.2 ภาชนะทดสอบน้ำมันหม้อแปลง

จากวงจรสมมูลการตรวจจับดิสฮาร์โมนิกบางส่วนภาพที่ 3.1 ภาชนะทดสอบน้ำมันหม้อแปลง  $C_a$  ได้เทียบเคียงภาชนะทดสอบน้ำมันหม้อแปลงกับมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบค่าความคงทนฉนวนน้ำมันหม้อแปลง IEC 156 Second Edition, (1995-07) [4] ในเรื่องปริมาณตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ในการทดสอบ คือ 600 ml ซึ่งเป็นปริมาณที่เพียงพอกับการทดสอบ DGA ที่ต้องการตัวอย่างน้ำมันเพียง 150 ml ได้ออกแบบและจัดทำขึ้นตามภาพที่ 3.5 และ 3.6



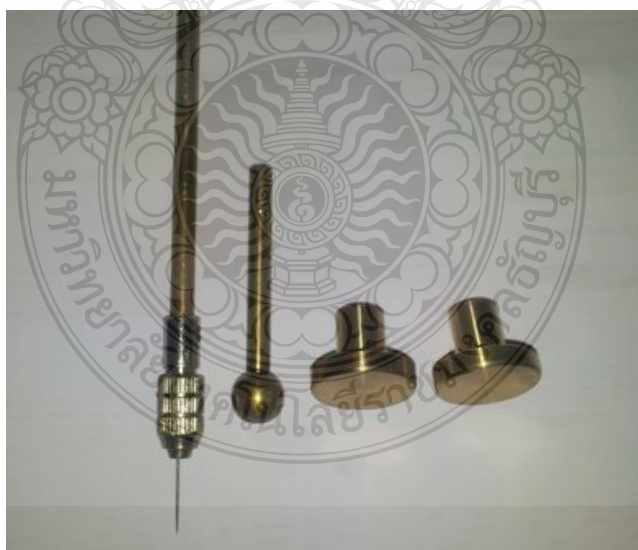
### 3.3 อิเล็กโตรด

#### 3.3.1 คุณสมบัติของโลหะ

ในการออกแบบชุดอิเล็กโตรดสำหรับใช้ในงานวิจัยนี้ วัสดุที่สามารถนำมาใช้ทำอิเล็กโตรดได้มีหลายชนิด แต่ละชนิดมีคุณสมบัติแตกต่างกันดังนี้

- 1) ทองแดง เป็นโลหะค่อนข้างอ่อน สามารถตีแผ่และดึงให้เป็นเส้นได้ นำความร้อนและไฟฟ้าได้ดี มีจุดหลอมเหลวค่อนข้างสูง
- 2) สังกะสี ไม่นิยมใช้ในงานวิศวกรรมไฟฟ้า เพราะการนำไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ
- 3) อลูมิเนียม เป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ การนำไฟฟ้าอยู่ในระปานกลาง แต่สามารถนำความร้อนได้ดี ไม่ทนต่อการกัดกร่อน
- 4) เงิน เป็นโลหะที่นำไฟฟ้าดีที่สุด แต่มีราคาสูง
- 5) ทองเหลือง เป็นโลหะผสมระหว่างทองแดงกับสังกะสี อัตราส่วนทั่วไป ทองแดง 60 เปอร์เซ็นต์ และสังกะสี 40 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ทองเหลืองทนแรงดึงและมีความเหนียวสูงขึ้น มีความแข็งมากกว่าทองแดง

จากคุณสมบัติข้างต้น ทองเหลืองจึงมีคุณสมบัติเหมาะสม คือ มีความแข็ง นำไฟฟ้าได้ดี ราคาถูก ในงานวิจัยนี้จึงใช้ทองเหลืองเป็นอิเล็กโตรด ดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 อิเล็กโตรดแบบต่างๆ

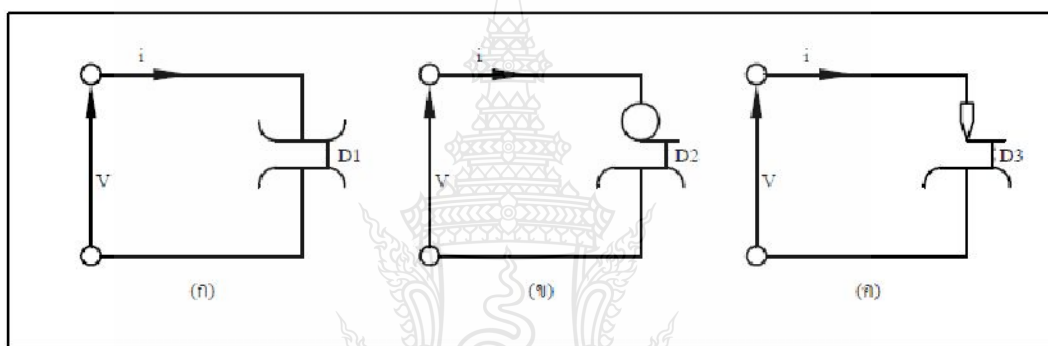
### 3.4 สนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์

ในงานวิจัยนี้ทดสอบภายใต้สนามไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ ดังภาพที่ 3.8

1) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform Field) คืออิเล็กทรอนิกส์ ระบาย กับ ระบาย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร ดังภาพ 3.7 และ 3.8 (ก)

2) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly Non-uniform Field) คืออิเล็กทรอนิกส์ ทรงกลม กับ ระบาย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม 13 มิลลิเมตร ดังภาพ 3.7 และ 3.8 (ข)

3) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly Non-uniform Field) คืออิเล็กทรอนิกส์ ปลายแหลม กับ ระบาย ดังภาพ 3.7 และ 3.8 (ค)



ภาพที่ 3.8 สนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์

เมื่อป้อนแรงดันให้กับอิเล็กทรอนิกส์ในลักษณะต่างๆ ดังรูปที่ 3.8 จะพบว่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์จะไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าจะมีระยะ  $D_1$ ,  $D_2$  และ  $D_3$  เท่ากันก็ตาม

### 3.5 น้ำมันหม้อแปลง

น้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ในการทดลอง เป็นน้ำมันหม้อแปลงใหม่ ชนิด Mineral Oil ซึ่งเป็นน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้กันแพร่หลายมากที่สุด มีค่าจากการทดสอบตั้งต้นดังนี้ ความชื้น 14 ppm [5] ค่าความคงทนฉนวน 67 kV [4] และปริมาณก๊าซดังตารางที่ 3.1 ค่า CO และ  $CO_2$  มีอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงตามธรรมชาติ ใช้เป็นตัวชี้วัดคุณภาพการจัดเก็บน้ำมันหม้อแปลง

ตารางที่ 3.1 ปริมาณก๊าซตั้งต้นก่อนการทดสอบ (ppm)

ก๊าซ	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
DGA	0	0	0	0	0	2	517

### 3.6 เครื่องทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง แบบแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography, GC) รุ่น Myrkos - Portable DGA MicroGC ของ Morgan Schaffer เป็นรุ่นที่ทดสอบได้มาตรฐาน ASTM D 3612 และ IEC 60567 คือวิเคราะห์ก๊าซได้ 7 ก๊าซ ได้แก่ ไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีเทน (CH<sub>4</sub>) อีเทน (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) เอทิลีน (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) และอะเซทิลีน (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) ดังภาพที่ 3.9

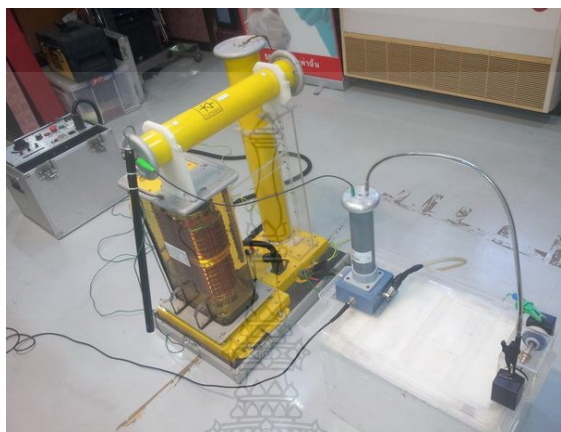


ภาพที่ 3.9 เครื่องทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง



### 3.7 ขั้นตอนการทดลอง

1) ต้องวงจรการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนตามข้อกำหนดในมาตรฐานสากล IEC 60270 Third Edition, (2000) [3] ตามวงจรสมมูลภาพที่ 3.1 จะได้ตามภาพที่ 3.10



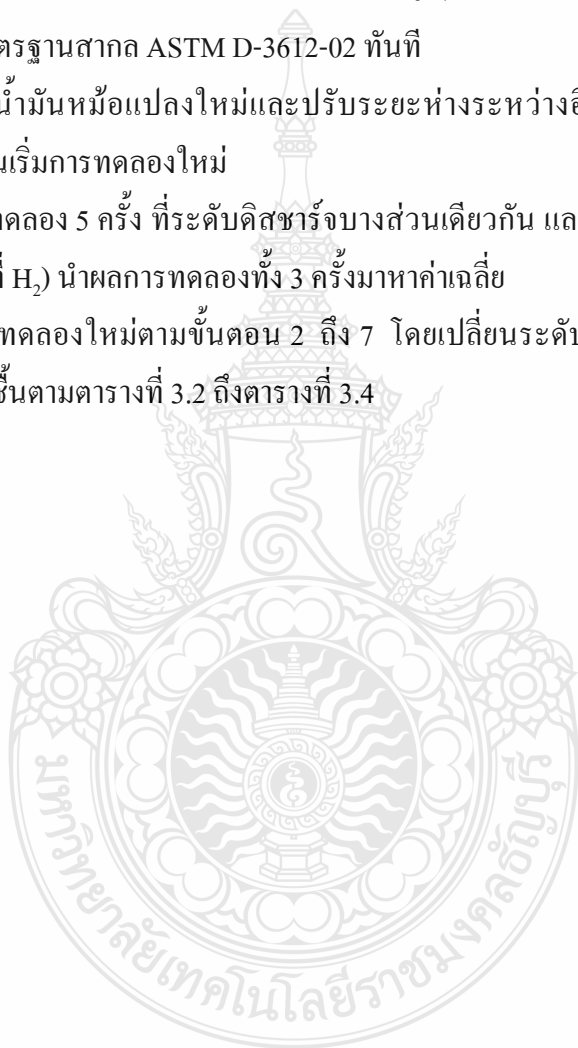
ภาพที่ 3.10 วงจรการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน

2) ติดตั้งอิเล็กโตรดแบบระนาบ กับ ระนาบ เข้ากับ Test Cell และปรับระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด ให้เท่ากับ 5.00 มิลลิเมตร โดยใช้แผ่นเหล็ก เรียกว่า แก๊ปเกจ (Gap Gauge) ซึ่งระยะห่างนี้ได้จากการทดลอง เป็นระยะห่างน้อยที่สุด ที่ทนต่อแรงดันทดสอบโดยไม่ให้เกิดเบรกดาวน์ ที่ระดับแรงดัน 50 kV ตามภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 การปรับระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด

- 3) เติมน้ำมันหม้อแปลงใหม่ในภาชนะทดสอบจำนวน 600 ml และทิ้งไว้ 5 นาที ก่อนเริ่มทดสอบเพื่อไม่ให้มีฟองก๊าซ ภายใต้ห้องที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น
- 4) ค่อยๆ ป้อนแรงดันทดสอบจากแหล่งจ่าย  $U$  ให้กับวงจรทดสอบจนกระทั่งเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่น้ำมันหม้อแปลงตามค่าที่กำหนด คงค่าดิสชาร์จบางส่วนไว้ 15 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่มากพอให้เกิดก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง
- 5) ค่อยๆ ปรับระดับแรงดันทดสอบลงให้เป็น 0 V และเก็บตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงไปทดสอบ DGA ตามมาตรฐานสากล ASTM D-3612-02 ทันที
- 6) เปลี่ยนน้ำมันหม้อแปลงใหม่และปรับระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด ให้เท่ากับ 5.00 มิลลิเมตร ทุกครั้ง ก่อนเริ่มการทดลองใหม่
- 7) ทำการทดลอง 5 ครั้ง ที่ระดับดิสชาร์จบางส่วนเดียวกัน และตัดผลการทดลองต่ำที่สุดและมากที่สุดออก (คูที่  $H_2$ ) นำผลการทดลองทั้ง 3 ครั้งมาหาค่าเฉลี่ย
- 8) เริ่มการทดลองใหม่ตามขั้นตอน 2 ถึง 7 โดยเปลี่ยนระดับดิสชาร์จบางส่วน รูปทรงอิเล็กโตรด และความชื้นตามตารางที่ 3.2 ถึงตารางที่ 3.4



ตารางที่ 3.2 แนวทางการทดลองภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

ลำดับ	ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง	ระดับดิสชาร์จบางส่วน
1	14-20 ppm	>200 pC in Oil
2	14-20 ppm	>500 pC in Oil
3	14-20 ppm	>1,000 pC in Oil
4	14-20 ppm	>5,000 pC in Oil
5	14-20 ppm	>10,000 pC in Oil
6	14-20 ppm	>20,000 pC in Oil
7	30-40 ppm	>200 pC in Oil
8	30-40 ppm	>500 pC in Oil
9	30-40 ppm	>1,000 pC in Oil
10	30-40 ppm	>5,000 pC in Oil
11	30-40 ppm	>10,000 pC in Oil
12	30-40 ppm	>20,000 pC in Oil
13	>50 ppm	>200 pC in Oil
14	>50 ppm	>500 pC in Oil
15	>50 ppm	>1,000 pC in Oil
16	>50 ppm	>5,000 pC in Oil
17	>50 ppm	>10,000 pC in Oil
18	>50 ppm	>20,000 pC in Oil



ตารางที่ 3.3 แนวทางการทดลองภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย

ลำดับ	ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง	ระดับดิสชาร์จบางส่วน
1	14-20 ppm	>200 pC in Oil
2	14-20 ppm	>500 pC in Oil
3	14-20 ppm	>1,000 pC in Oil
4	14-20 ppm	>5,000 pC in Oil
5	14-20 ppm	>10,000 pC in Oil
6	14-20 ppm	>20,000 pC in Oil
7	30-40 ppm	>200 pC in Oil
8	30-40 ppm	>500 pC in Oil
9	30-40 ppm	>1,000 pC in Oil
10	30-40 ppm	>5,000 pC in Oil
11	30-40 ppm	>10,000 pC in Oil
12	30-40 ppm	>20,000 pC in Oil
13	>50 ppm	>200 pC in Oil
14	>50 ppm	>500 pC in Oil
15	>50 ppm	>1,000 pC in Oil
16	>50 ppm	>5,000 pC in Oil
17	>50 ppm	>10,000 pC in Oil
18	>50 ppm	>20,000 pC in Oil

ตารางที่ 3.4 แนวทางการทดลองภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง

ลำดับ	ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง	ระดับดิสชาร์จบางส่วน
1	14-20 ppm	>200 pC in Oil
2	14-20 ppm	>500 pC in Oil
3	14-20 ppm	>1,000 pC in Oil
4	14-20 ppm	>5,000 pC in Oil
5	14-20 ppm	>10,000 pC in Oil
6	14-20 ppm	>20,000 pC in Oil
7	30-40 ppm	>200 pC in Oil
8	30-40 ppm	>500 pC in Oil
9	30-40 ppm	>1,000 pC in Oil
10	30-40 ppm	>5,000 pC in Oil
11	30-40 ppm	>10,000 pC in Oil
12	30-40 ppm	>20,000 pC in Oil
13	>50 ppm	>200 pC in Oil
14	>50 ppm	>500 pC in Oil
15	>50 ppm	>1,000 pC in Oil
16	>50 ppm	>5,000 pC in Oil
17	>50 ppm	>10,000 pC in Oil
18	>50 ppm	>20,000 pC in Oil

9) ตัดกระดาษฉนวนขนาด 70 x 75 มิลลิเมตร นำไปแทรกระหว่างอิเล็กโตรด ปรับอิเล็กโตรดให้ชนกระดาษฉนวน เริ่มการทดลองใหม่ตามขั้นตอน 3 ถึง 7 โดยเปลี่ยนระดับดิสชาร์จบางส่วน รูปทรงอิเล็กโตรด ตามภาพที่ 3.12 และ 3.13 และความชื้นตามตารางที่ 3.2 ถึงตารางที่ 3.4



ภาพที่ 3.12 กระดาษฉนวน



ภาพที่ 3.13 การแทรกกระดาษฉนวนระหว่างอิเล็กโตรด

### 3.8 สรุปวิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการเตรียมเครื่องมือ อุปกรณ์ และขั้นตอนการทดลอง สำหรับชุดทดสอบดิสซาร์จบางส่วนได้เตรียมครบถ้วนและเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60270 Third Edition, (2000) การออกแบบ การจัดสร้างภาชนะทดสอบน้ำมันหม้อแปลงและอิเล็กทรอนิกส์ ผลการจัดสร้างเป็นไปตามที่ออกแบบและสามารถใช้ทดสอบได้จริง การเตรียมน้ำมันหม้อแปลงใหม่จำนวน 200 ลิตร พร้อมสถานที่จัดเก็บ การเตรียมสถานที่และเครื่องทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลงเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 3612 พร้อมทั้งได้กำหนดขั้นตอนการทดลอง เงื่อนไขการทดลอง เพื่อให้ครอบคลุมครบถ้วนตามขอบเขตของการวิจัย ซึ่งจะนำส่วนต่างๆ ดังกล่าวไปใช้งานในบทต่อไป



## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์ก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง จากการทดสอบการเกิดดิซซาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลง ในขณะทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz ภายใต้การเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าโดยการเปลี่ยนรูปทรงอิเล็กโตรดและความชื้น นำผลการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยวิธีที่นิยมและเหมาะสมกับวิทยานิพนธ์นี้ คือ

1) วิเคราะห์ด้วยวิธี California State University-Sacramento Guidelines (Key Gases) ใช้ปริมาณก๊าซแต่ละชนิดมาแปลโดยตรง ผลจากก๊าซแต่ละชนิดไม่มีความเกี่ยวข้องกับก๊าซอื่นเลย ซึ่งใช้เป็นข้อมูลสนับสนุน CEGB Fault Gas Ratios และ Gas Limits and Warning Level ให้มีความถูกต้องยิ่งขึ้น

2) นำปริมาณก๊าซมาพิจารณา Gas Limits and Warning Level ตามมาตรฐาน IEEE Std C57.104-1991 ก่อนพิจารณาด้วยวิธีอัตราส่วน การใช้งานอัตราส่วนจากก๊าซสองชนิดที่มีปริมาณน้อยกว่าเกณฑ์จะทำให้การแปลผลผิดพลาด

3) วิเคราะห์ด้วยวิธี Dörnenberg Ratio เป็นวิธีวิเคราะห์จากอัตราส่วนของปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นในน้ำมันหม้อแปลง คือ  $CH_4/H_2$ ,  $C_2H_2/C_2H_4$ ,  $C_2H_2/CH_4$  และ  $C_2H_6/C_2H_2$  โดยพิจารณาให้ตรง 3 ใน 4 ค่าของอัตราส่วน

4) วิเคราะห์ด้วยวิธี R.R. Rogers (CEGB Fault Gas Ratios) วิเคราะห์จากอัตราส่วนของก๊าซ  $CH_4/H_2$ ,  $C_2H_6/CH_4$ ,  $C_2H_4/C_2H_6$  และ  $C_2H_2/C_2H_4$ ,  $CO_2/CO$  แต่ละชุดเป็นอัตราส่วนของก๊าซเกิดที่อุณหภูมิสูงต่อก๊าซเกิดที่อุณหภูมิต่ำถัดลงมา อัตราส่วนเหล่านี้จะถูกนำมาแปลเป็น code 0, 1, 2 และ 5 แล้วจึงนำ Code ทั้งสี่มาแปลผล

5) วิธี Duval Triangle ใช้วิธีพล็อตกราฟของสามก๊าซได้แก่ มีเทน เอทิลีน และอะเซทิลีนเป็นสามเหลี่ยม ตามภาพที่ 2.34

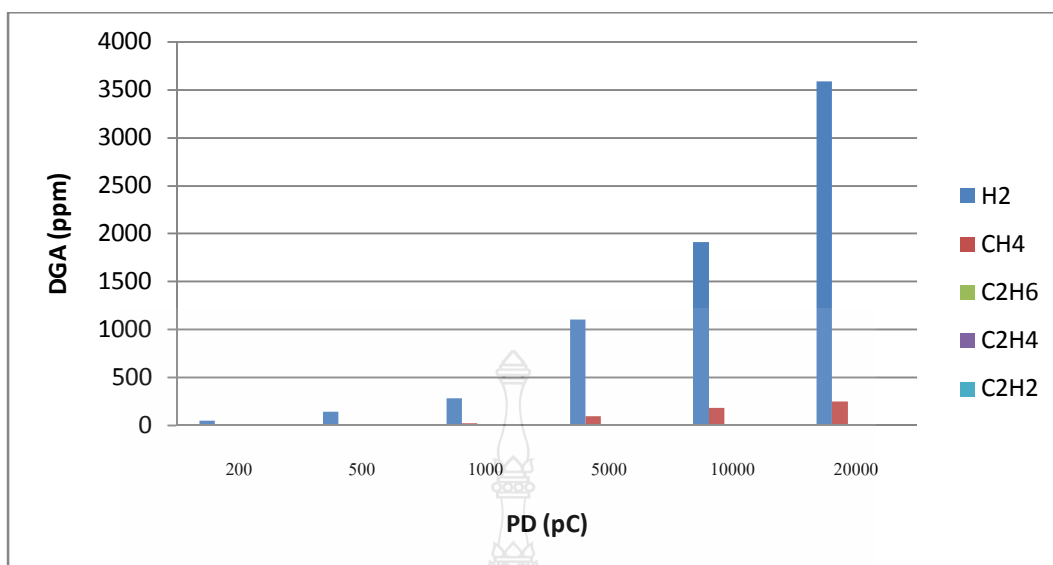
#### 4.1 ผลการทดลองภายใต้สนามไฟฟ้าสม่่าเสมอ

การทดลองภายใต้สนามไฟฟ้าสม่่าเสมอ โดยใช้อิเล็กโตรดแบบระนาบ กับ ระนาบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดคองที่ 5.00 มิลลิเมตร ที่ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง 14-20 ppm แสดงดังตารางที่ 4.1 ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง 30-40 ppm แสดงดังตารางที่ 4.3 ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงมากกว่า 50 ppm แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่่าเสมอ ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง 14-20 ppm

ลำดับ	ระดับดิสชาร์จ บางส่วน	H <sub>2</sub> (ppm)	CH <sub>4</sub> (ppm)	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (ppm)	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (ppm)	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (ppm)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (ppm)
1	>200 pC in Oil	55	4	0	0	0	2	529
2	>500 pC in Oil	149	13	0	0	0	4	514
3	>1,000 pC in Oil	287	22	0	0	0	2	532
4	>5,000 pC in Oil	1106	98	3	1	0	2	537
5	>10,000 pC in Oil	1913	185	7	1	0	3	552
6	>20,000 pC in Oil	3589	253	13	2	0	4	548

การวิเคราะห์ DGA เชิงแนวโน้มพบว่า สามารถเฝ้าระวังดิสชาร์จบางส่วนตั้งแต่ระดับ 200 pC และยกระดับพลังงานดิสชาร์จอย่างต่อเนื่องจนเบรกดาวน์ที่ระดับ 20,000 pC ดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง 14-20 ppm

จากตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.1 นำมาวิเคราะห์ตามวิธีวิเคราะห์ข้างต้นดังนี้

1) วิเคราะห์ด้วยวิธี California State University-Sacramento Guidelines (Key Gases) การทดลองที่ระดับคิซาร์จบางส่วนมากกว่า 5000 pC ขึ้นไป ปริมาณก๊าซ  $H_2$  อยู่ในระดับผิดปกติอาจเกิดโคโรน่าหรืออาร์ก และปริมาณก๊าซ  $CH_2$  อยู่ในระดับผิดปกติอาจเกิดสปาร์ก นอกจากนั้นอยู่ในระดับปกติ

2) วิเคราะห์ตามมาตรฐาน IEEE Std C57.104-1991, Gas Limits and Warning Level วิเคราะห์ได้ดังตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า ปริมาณก๊าซ  $H_2$  ผิดปกติระดับเริ่มต้นตั้งแต่ระดับคิซาร์จบางส่วนมากกว่า 500 pC และเข้าระดับฉุกเฉินตั้งแต่ระดับคิซาร์จบางส่วนมากกว่า 10000 pC

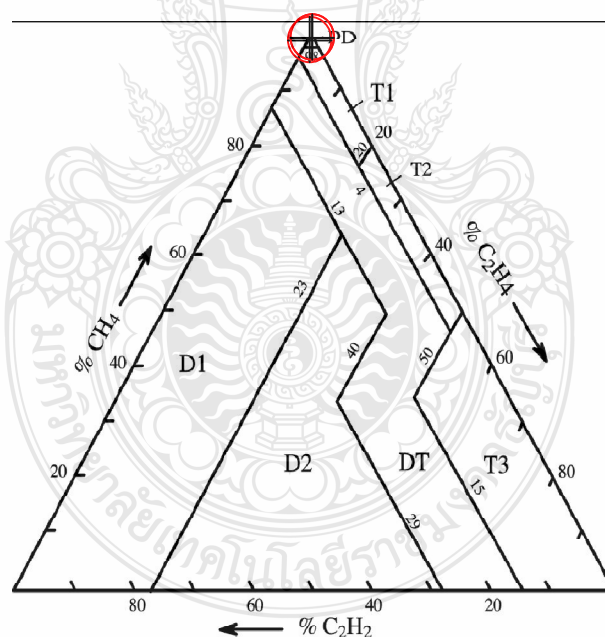
3) วิเคราะห์ด้วยวิธี Dörnenberg Ratio เริ่มวิเคราะห์จากการทดลองที่ระดับ Gas Limits and Warning Level ผิดปกติ พบว่าอาจเกิดโคโรน่าในน้ำมันหม้อแปลง ในการทดลองคิซาร์จบางส่วนทุกระดับ

4) วิเคราะห์ด้วยวิธี R.R. Rogers (CEGB Fault Gas Ratios) เริ่มวิเคราะห์จากการทดลองที่ระดับ Gas Limits and Warning Level ผิดปกติ พบว่าอาจเกิดคิซาร์จบางส่วน ในการทดลองคิซาร์จบางส่วนทุกระดับ

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ตามมาตรฐาน IEEE Std C57.104-1991 จากผลการทดลองในตารางที่ 4.1

ลำดับ	ระดับดิสชาร์จ บางส่วน	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
1	>200 pC in Oil	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
2	>500 pC in Oil	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
3	>1,000 pC in Oil	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
4	>5,000 pC in Oil	L2	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
5	>10,000 pC in Oil	L3	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
6	>20,000 pC in Oil	L3	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ

5) วิเคราะห์ด้วยวิธี Duval Triangle พบว่าอาจเกิดดิสชาร์จบางส่วน ในการทดลองดิสชาร์จบางส่วนทุกระดับ แสดงผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 4.2



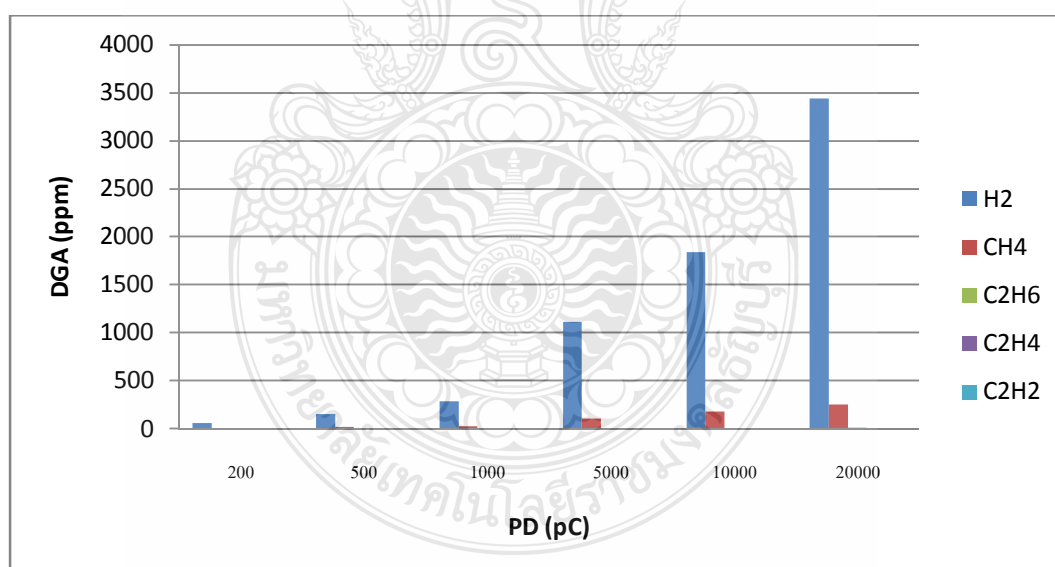
ภาพที่ 4.2 วิเคราะห์ด้วยวิธี Duval Triangle จากผลการทดลองในตารางที่ 4.1



ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง 30-40 ppm

ลำดับ	ระดับดิสชาร์จ บางส่วน	H <sub>2</sub> (ppm)	CH <sub>4</sub> (ppm)	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (ppm)	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (ppm)	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (ppm)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (ppm)
1	>200 pC in Oil	57	3	0	0	0	3	634
2	>500 pC in Oil	153	15	0	0	0	3	637
3	>1,000 pC in Oil	285	23	0	0	0	4	636
4	>5,000 pC in Oil	1112	102	1	0	0	3	640
5	>10,000 pC in Oil	1843	176	5	1	0	3	635
6	>20,000 pC in Oil	3443	250	11	1	0	3	635

การวิเคราะห์ DGA เชิงแนวโน้มพบว่า สามารถเฝ้าระวังดิสชาร์จบางส่วนตั้งแต่ระดับ 200 pC และยกระดับพลังงานดิสชาร์จอย่างต่อเนื่องจนเบรกดาวน์ที่ระดับ 20,000 pC ดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง 30-40 ppm

จากตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.3 นำมาวิเคราะห์ตามวิธีวิเคราะห์ข้างต้นดังนี้

1) วิเคราะห์ด้วยวิธี California State University-Sacramento Guidelines (Key Gases) การทดลองที่ระดับดิสชาร์จบางส่วนมากกว่า 5000 pC ขึ้นไป ปริมาณก๊าซ  $H_2$  อยู่ในระดับผิดปกติอาจเกิดโคโรน่าหรืออาร์ก และปริมาณก๊าซ  $CH_4$  อยู่ในระดับผิดปกติอาจเกิดสปาร์ก นอกจากนั้นอยู่ในระดับปกติ

2) วิเคราะห์ตามมาตรฐาน IEEE Std C57.104-1991, Gas Limits and Warning Level วิเคราะห์ได้ดังตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่า ปริมาณก๊าซ  $H_2$  ผิดปกติระดับเริ่มต้นตั้งแต่ระดับดิสชาร์จบางส่วนมากกว่า 500 pC และเข้าระดับฉุกเฉินตั้งแต่ระดับดิสชาร์จบางส่วนมากกว่า 10000 pC

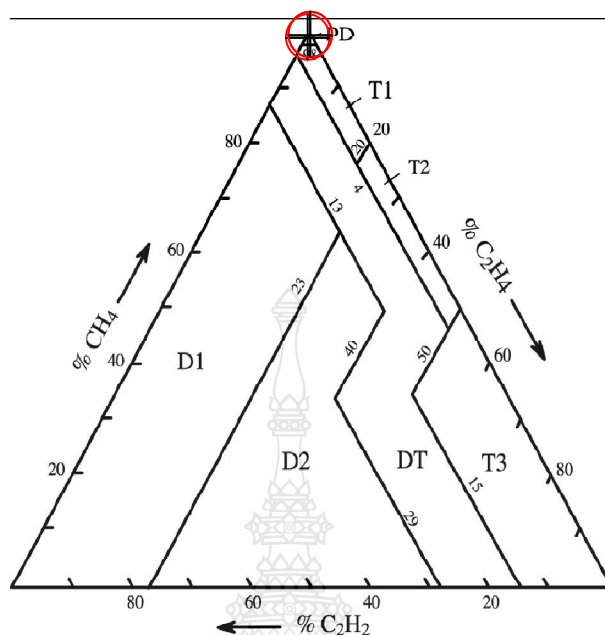
3) วิเคราะห์ด้วยวิธี Dörnenberg Ratio เริ่มวิเคราะห์จากการทดลองที่ระดับ Gas Limits and Warning Level ผิดปกติ พบว่าอาจเกิดโคโรน่าในน้ำมันหม้อแปลง ในการทดลองดิสชาร์จบางส่วนทุกระดับ

4) วิเคราะห์ด้วยวิธี R.R. Rogers (CEGB Fault Gas Ratios) เริ่มวิเคราะห์จากการทดลองที่ระดับ Gas Limits and Warning Level ผิดปกติ พบว่าอาจเกิดดิสชาร์จบางส่วน ในการทดลองดิสชาร์จบางส่วนทุกระดับ

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ตามมาตรฐาน IEEE Std C57.104-1991 จากผลการทดลองในตารางที่ 4.3

ลำดับ	ระดับดิสชาร์จ บางส่วน	$H_2$	$CH_4$	$C_2H_6$	$C_2H_4$	$C_2H_2$	CO	$CO_2$
1	>200 pC in Oil	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
2	>500 pC in Oil	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
3	>1,000 pC in Oil	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
4	>5,000 pC in Oil	L2	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
5	>10,000 pC in Oil	L3	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
6	>20,000 pC in Oil	L3	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ

5) วิเคราะห์ด้วยวิธี Duval Triangle พบว่าอาจเกิดดิสชาร์จบางส่วน ในการทดลองดิสชาร์จบางส่วนทุกระดับ แสดงผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 4.4

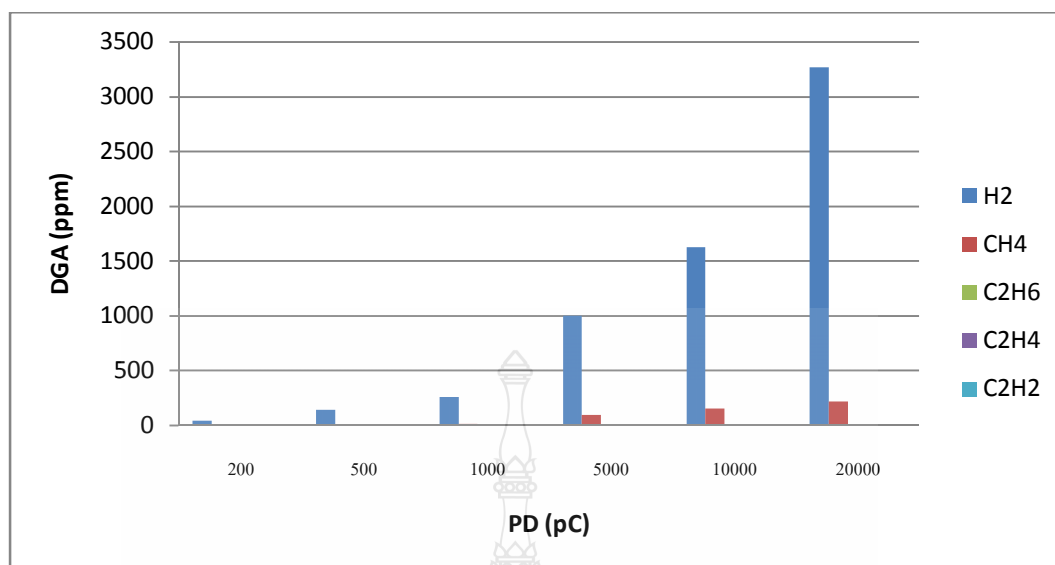


ภาพที่ 4.4 วิเคราะห์ด้วยวิธี Duval Triangle จากผลการทดลองในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงมากกว่า 50 ppm

ลำดับ	ระดับดิสชาร์จ บางส่วน	H <sub>2</sub> (ppm)	CH <sub>4</sub> (ppm)	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (ppm)	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (ppm)	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (ppm)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (ppm)
1	>200 pC in Oil	45	1	0	0	0	3	634
2	>500 pC in Oil	148	9	0	0	0	4	635
3	>1,000 pC in Oil	261	17	0	0	0	4	635
4	>5,000 pC in Oil	1003	98	0	0	0	3	642
5	>10,000 pC in Oil	1625	156	3	0	0	3	635
6	>20,000 pC in Oil	3265	221	7	0	0	4	637

การวิเคราะห์ DGA เชิงแนวโน้มพบว่า สามารถเฝ้าระวังดิสชาร์จบางส่วนตั้งแต่ระดับ 200 pC และยกระดับพลังงานดิสชาร์จอย่างต่อเนื่องจนเบรกดาวน์ที่ระดับ 20,000 pC ดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงมากกว่า 50 ppm

จากตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.5 นำมาวิเคราะห์ตามวิธีวิเคราะห์ข้างต้นดังนี้

1) วิเคราะห์ด้วยวิธี California State University-Sacramento Guidelines (Key Gases) การทดลองที่ระดับดิสชาร์จบางส่วนมากกว่า 5000 pC ขึ้นไป ปริมาณก๊าซ  $H_2$  อยู่ในระดับผิดปกติอาจเกิดโคโรน่าหรืออาร์ค และปริมาณก๊าซ  $CH_2$  อยู่ในระดับผิดปกติอาจเกิดสปาร์ค นอกจากนั้นอยู่ในระดับปกติ

2) วิเคราะห์ตามมาตรฐาน IEEE Std C57.104-1991, Gas Limits and Warning Level วิเคราะห์ได้ดังตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่า ปริมาณก๊าซ  $H_2$  ผิดปกติระดับเริ่มต้นตั้งแต่ระดับดิสชาร์จบางส่วนมากกว่า 500 pC และเข้าระดับฉุกเฉินตั้งแต่ระดับดิสชาร์จบางส่วนมากกว่า 20000 pC

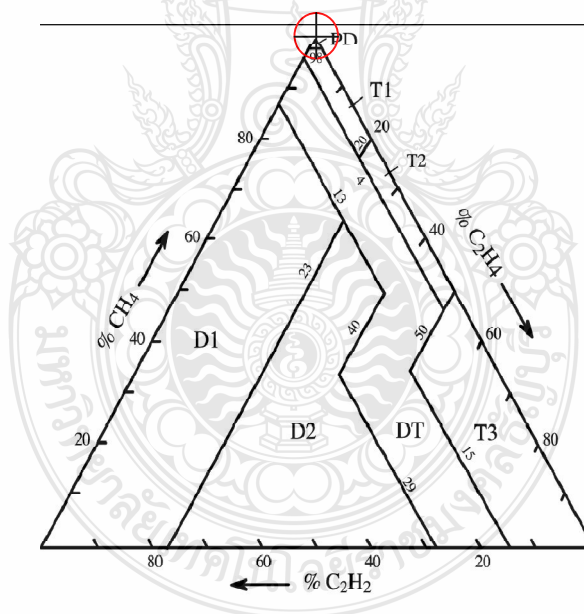
3) วิเคราะห์ด้วยวิธี Dörnenberg Ratio เริ่มวิเคราะห์จากการทดลองที่ระดับ Gas Limits and Warning Level ผิดปกติ พบว่าอาจเกิดโคโรน่าในน้ำมันหม้อแปลง ในการทดลองดิสชาร์จบางส่วนทุกระดับ

4) วิเคราะห์ด้วยวิธี R.R. Rogers (CEGB Fault Gas Ratios) เริ่มวิเคราะห์จากการทดลองที่ระดับ Gas Limits and Warning Level ผิดปกติ พบว่าอาจเกิดดิสชาร์จบางส่วน ในการทดลองดิสชาร์จบางส่วนทุกระดับ

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ตามมาตรฐาน IEEE Std C57.104-1991 จากผลการทดลองในตารางที่ 4.5

ลำดับ	ระดับดิสชาร์จ บางส่วน	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
1	>200 pC in Oil	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
2	>500 pC in Oil	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
3	>1,000 pC in Oil	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
4	>5,000 pC in Oil	L2	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
5	>10,000 pC in Oil	L2	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
6	>20,000 pC in Oil	L3	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ

5) วิเคราะห์ด้วยวิธี Duval Triangle พบว่าอาจเกิดดิสชาร์จบางส่วน ในการทดลองดิสชาร์จ บางส่วนทุกระดับ แสดงผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 วิเคราะห์ด้วยวิธี Duval Triangle จากผลการทดลองในตารางที่ 4.5

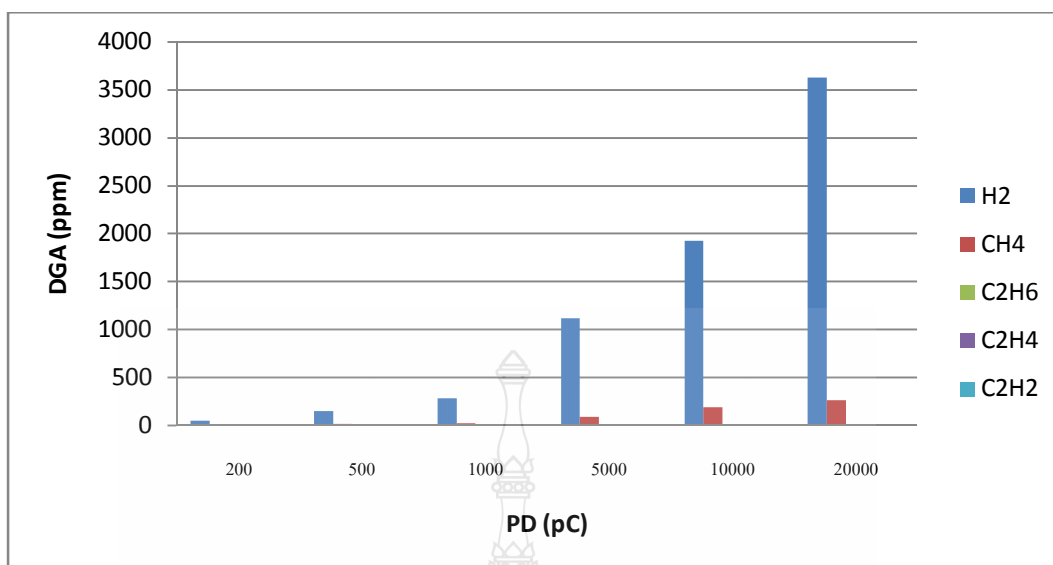
#### 4.2 ผลการทดลองภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย

การทดลองภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย โดยใช้อิเล็กโตรดแบบทรงกลม กับ ระบาย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดคงที่ 5.00 มิลลิเมตร ที่ ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง 14-20 ppm แสดงดังตารางที่ 4.7 ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง 30-40 ppm แสดงดังตารางที่ 4.9 ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงมากกว่า 50 ppm แสดงดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง 14-20 ppm

ลำดับ	ระดับดิสชาร์จ บางส่วน	H <sub>2</sub> (ppm)	CH <sub>4</sub> (ppm)	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (ppm)	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (ppm)	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (ppm)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (ppm)
1	>200 pC in Oil	56	4	0	0	0	3	559
2	>500 pC in Oil	151	15	0	0	0	3	565
3	>1,000 pC in Oil	288	24	0	0	0	4	577
4	>5,000 pC in Oil	1121	93	4	1	0	4	575
5	>10,000 pC in Oil	1924	189	7	1	0	3	562
6	>20,000 pC in Oil	3628	261	12	1	0	3	555

การวิเคราะห์ DGA เชิงแนวโน้มพบว่า สามารถเฝ้าระวังดิสชาร์จบางส่วนตั้งแต่ระดับ 200 pC และยกระดับพลังงานดิสชาร์จอย่างต่อเนื่องจนเบรกดาวน์ที่ระดับ 20,000 pC ดังภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง 14-20 ppm

จากตารางที่ 4.7 และภาพที่ 4.7 นำมาวิเคราะห์ตามวิธีวิเคราะห์ข้างต้นดังนี้

1) วิเคราะห์ด้วยวิธี California State University-Sacramento Guidelines (Key Gases) การทดลองที่ระดับดิสชาร์จบางส่วนมากกว่า 5000 pC ขึ้นไป ปริมาณก๊าซ  $H_2$  อยู่ในระดับผิดปกติอาจเกิดโคโรน่าหรืออาร์ค และปริมาณก๊าซ  $CH_2$  อยู่ในระดับผิดปกติอาจเกิดสปาร์ค นอกจากนั้นอยู่ในระดับปกติ

2) วิเคราะห์ตามมาตรฐาน IEEE Std C57.104-1991, Gas Limits and Warning Level วิเคราะห์ได้ดังตารางที่ 4.8 จะเห็นได้ว่า ปริมาณก๊าซ  $H_2$  ผิดปกติระดับเริ่มต้นตั้งแต่ระดับดิสชาร์จบางส่วนมากกว่า 500 pC และเข้าระดับฉุกเฉินตั้งแต่ระดับดิสชาร์จบางส่วนมากกว่า 10000 pC

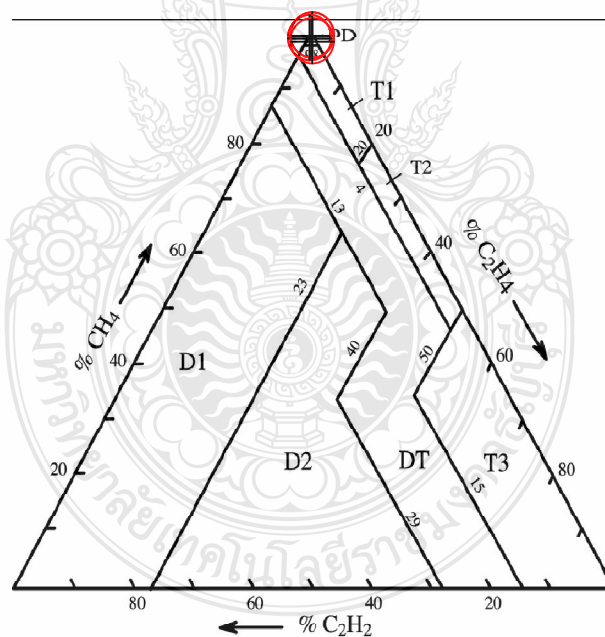
3) วิเคราะห์ด้วยวิธี Dörnenberg Ratio เริ่มวิเคราะห์จากการทดลองที่ระดับ Gas Limits and Warning Level ผิดปกติ พบว่าอาจเกิดโคโรน่าในน้ำมันหม้อแปลง ในการทดลองดิสชาร์จบางส่วนทุกระดับ

4) วิเคราะห์ด้วยวิธี R.R. Rogers (CEGB Fault Gas Ratios) เริ่มวิเคราะห์จากการทดลองที่ระดับ Gas Limits and Warning Level ผิดปกติ พบว่าอาจเกิดดิสชาร์จบางส่วน ในการทดลองดิสชาร์จบางส่วนทุกระดับ

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ตามมาตรฐาน IEEE Std C57.104-1991 จากผลการทดลองในตารางที่ 4.7

ลำดับ	ระดับดิสชาร์จ บางส่วน	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
1	>200 pC in Oil	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
2	>500 pC in Oil	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
3	>1,000 pC in Oil	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
4	>5,000 pC in Oil	L2	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
5	>10,000 pC in Oil	L3	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
6	>20,000 pC in Oil	L3	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ

5) วิเคราะห์ด้วยวิธี Duval Triangle พบว่าอาจเกิดดิสชาร์จบางส่วน ในการทดลองดิสชาร์จ บางส่วนทุกระดับ แสดงผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 4.8



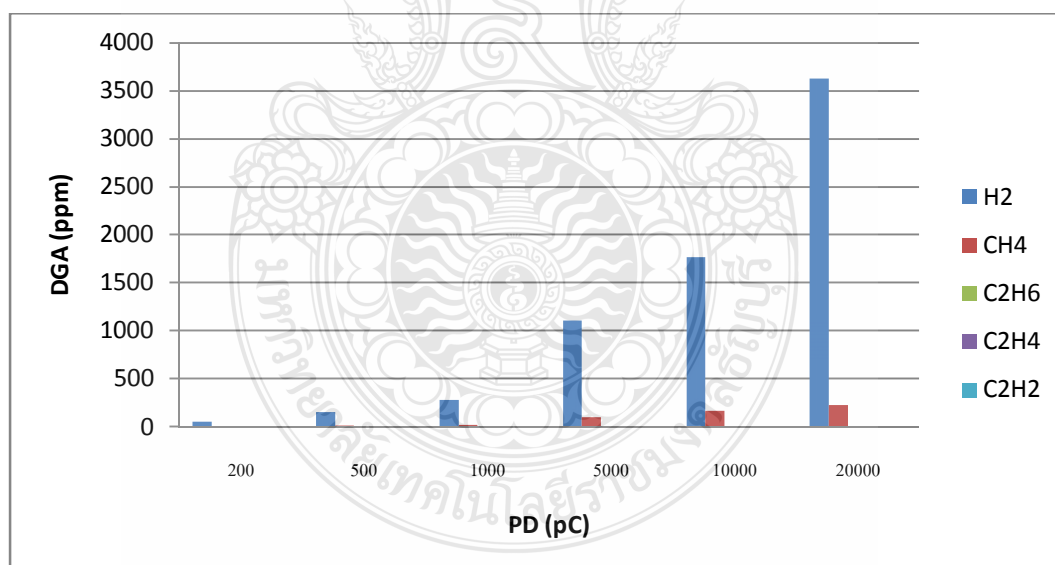
ภาพที่ 4.8 วิเคราะห์ด้วยวิธี Duval Triangle จากผลการทดลองในตารางที่ 4.7



ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง 30-40 ppm

ลำดับ	ระดับดิสชาร์จ บางส่วน	H <sub>2</sub> (ppm)	CH <sub>4</sub> (ppm)	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (ppm)	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (ppm)	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (ppm)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (ppm)
1	>200 pC in Oil	54	2	0	0	0	2	656
2	>500 pC in Oil	156	16	0	0	0	3	672
3	>1,000 pC in Oil	277	21	0	0	0	3	645
4	>5,000 pC in Oil	1110	100	1	1	0	4	662
5	>10,000 pC in Oil	1765	171	4	2	0	3	636
6	>20,000 pC in Oil	3624	231	9	1	0	4	651

การวิเคราะห์ DGA เชิงแนวโน้มพบว่า สามารถเฝ้าระวังดิสชาร์จบางส่วนตั้งแต่ระดับ 200 pC และยกระดับพลังงานดิสชาร์จอย่างต่อเนื่องจนเบรกดาวน์ที่ระดับ 20,000 pC ดังภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.9 ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง 30-40 ppm

จากตารางที่ 4.9 และภาพที่ 4.9 นำมาวิเคราะห์ตามวิธีวิเคราะห์ข้างต้นดังนี้

1) วิเคราะห์ด้วยวิธี California State University-Sacramento Guidelines (Key Gases) การทดลองที่ระดับดิสชาร์จบางส่วนมากกว่า 5000 pC ขึ้นไป ปริมาณก๊าซ  $H_2$  อยู่ในระดับผิดปกติอาจเกิดโคโรน่าหรืออาร์ก และปริมาณก๊าซ  $CH_4$  อยู่ในระดับผิดปกติอาจเกิดสปาร์ค นอกจากนั้นอยู่ในระดับปกติ

2) วิเคราะห์ตามมาตรฐาน IEEE Std C57.104-1991, Gas Limits and Warning Level วิเคราะห์ได้ดังตารางที่ 4.10 จะเห็นได้ว่า ปริมาณก๊าซ  $H_2$  ผิดปกติระดับเริ่มต้นตั้งแต่ระดับดิสชาร์จบางส่วนมากกว่า 500 pC และเข้าระดับฉุกเฉินตั้งแต่ระดับดิสชาร์จบางส่วนมากกว่า 20000 pC

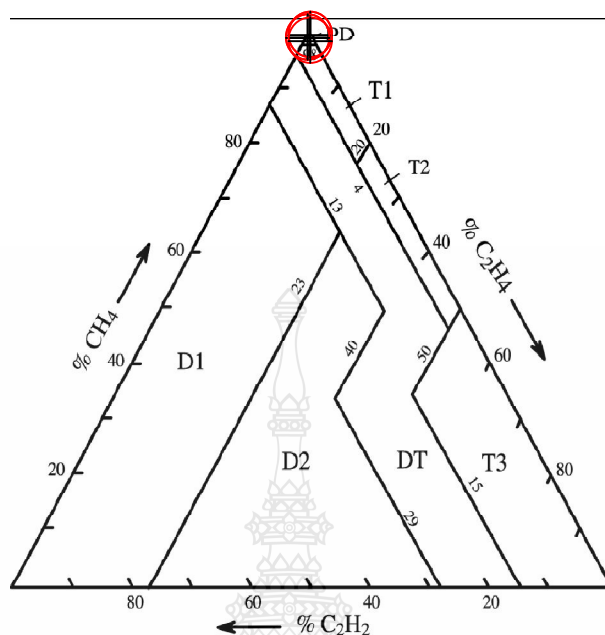
3) วิเคราะห์ด้วยวิธี Dörnenberg Ratio เริ่มวิเคราะห์จากการทดลองที่ระดับ Gas Limits and Warning Level ผิดปกติ พบว่าอาจเกิดโคโรน่าในน้ำมันหม้อแปลง ในการทดลองดิสชาร์จบางส่วนทุกระดับ

4) วิเคราะห์ด้วยวิธี R.R. Rogers (CEGB Fault Gas Ratios) เริ่มวิเคราะห์จากการทดลองที่ระดับ Gas Limits and Warning Level ผิดปกติ พบว่าอาจเกิดดิสชาร์จบางส่วน ในการทดลองดิสชาร์จบางส่วนทุกระดับ ยกเว้นการทดลองที่ดิสชาร์จบางส่วนมากกว่า 5000 pC ไม่ตรงเงื่อนไข (ลำดับที่ 4) ได้ Code 5-0-1-0 ไม่สามารถวิเคราะห์ได้

ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ตามมาตรฐาน IEEE Std C57.104-1991 จากผลการทดลองในตารางที่ 4.9

ลำดับ	ระดับดิสชาร์จ บางส่วน	$H_2$	$CH_4$	$C_2H_6$	$C_2H_4$	$C_2H_2$	CO	$CO_2$
1	>200 pC in Oil	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
2	>500 pC in Oil	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
3	>1,000 pC in Oil	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
4	>5,000 pC in Oil	L2	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
5	>10,000 pC in Oil	L2	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
6	>20,000 pC in Oil	L3	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ

5) วิเคราะห์ด้วยวิธี Duval Triangle พบว่าอาจเกิดดิสชาร์จบางส่วน ในการทดลองดิสชาร์จบางส่วนทุกระดับ แสดงผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 4.10

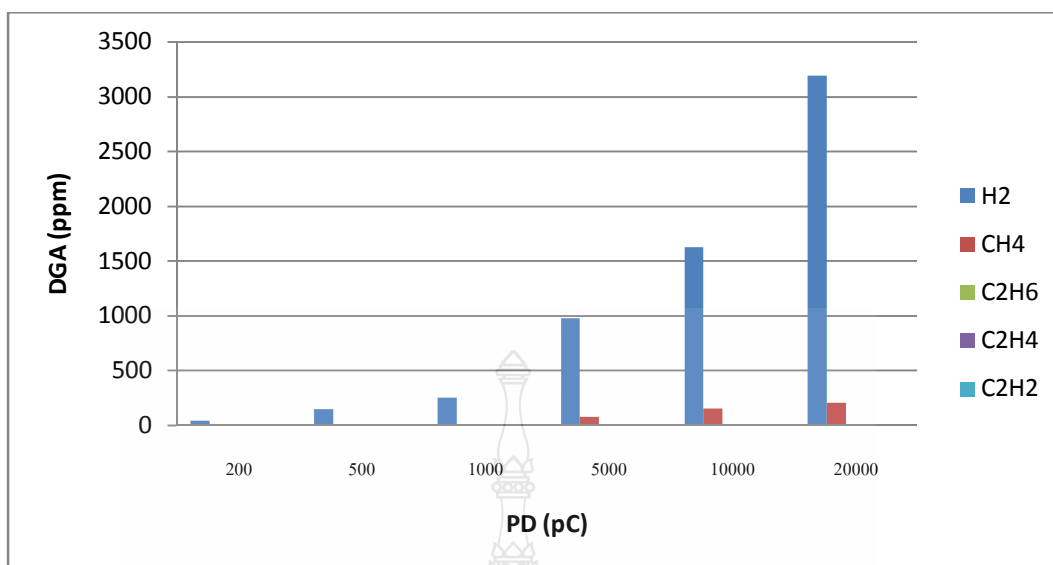


ภาพที่ 4.10 วิเคราะห์ด้วยวิธี Duval Triangle จากผลการทดลองในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงมากกว่า 50 ppm

ลำดับ	ระดับดิสชาร์จ บางส่วน	H <sub>2</sub> (ppm)	CH <sub>4</sub> (ppm)	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (ppm)	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (ppm)	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (ppm)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (ppm)
1	>200 pC in Oil	46	1	0	0	0	4	712
2	>500 pC in Oil	150	11	0	0	0	4	674
3	>1,000 pC in Oil	256	15	0	0	0	3	689
4	>5,000 pC in Oil	980	82	0	0	0	4	687
5	>10,000 pC in Oil	1630	161	2	0	0	4	692
6	>20,000 pC in Oil	3188	210	7	0	0	4	690

การวิเคราะห์ DGA เชิงแนวโน้มพบว่า สามารถเฝ้าระวังดิสชาร์จบางส่วนตั้งแต่ระดับ 200 pC และยกระดับพลังงานดิสชาร์จอย่างต่อเนื่องจนเบรกดาวน์ที่ระดับ 20,000 pC ดังภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงมากกว่า 50 ppm

จากตารางที่ 4.11 และภาพที่ 4.11 นำมาวิเคราะห์ตามวิธีวิเคราะห์ข้างต้นดังนี้

1) วิเคราะห์ด้วยวิธี California State University-Sacramento Guidelines (Key Gases) การทดลองที่ระดับดิสชาร์จบางส่วนมากกว่า 10000 pC ขึ้นไป ปริมาณก๊าซ H<sub>2</sub> อยู่ในระดับผิดปกติอาจเกิดโคโรนาหรืออาร์ค และที่ระดับดิสชาร์จบางส่วนมากกว่า 5000 pC ขึ้นไป ปริมาณก๊าซ CH<sub>2</sub> อยู่ในระดับผิดปกติอาจเกิดสปาร์ค นอกจากนั้นอยู่ในระดับปกติ

2) วิเคราะห์ตามมาตรฐาน IEEE Std C57.104-1991, Gas Limits and Warning Level วิเคราะห์ได้ดังตารางที่ 4.12 จะเห็นได้ว่า ปริมาณก๊าซ H<sub>2</sub> ผิดปกติระดับเริ่มต้นตั้งแต่ระดับดิสชาร์จบางส่วนมากกว่า 500 pC และเข้าระดับฉุกเฉินตั้งแต่ระดับดิสชาร์จบางส่วนมากกว่า 20000 pC

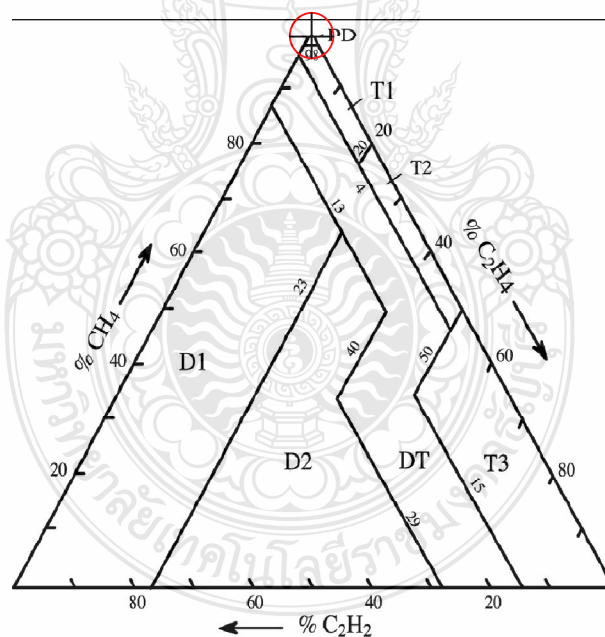
3) วิเคราะห์ด้วยวิธี Dörnenberg Ratio เริ่มวิเคราะห์จากการทดลองที่ระดับ Gas Limits and Warning Level ผิดปกติ พบว่าอาจเกิดโคโรนาในน้ำมันหม้อแปลง ในการทดลองดิสชาร์จบางส่วนทุกระดับ

4) วิเคราะห์ด้วยวิธี R.R. Rogers (CEGB Fault Gas Ratios) เริ่มวิเคราะห์จากการทดลองที่ระดับ Gas Limits and Warning Level ผิดปกติ พบว่าอาจเกิดดิสชาร์จบางส่วน ในการทดลองดิสชาร์จบางส่วนทุกระดับ

ตารางที่ 4.12 การวิเคราะห์ตามมาตรฐาน IEEE Std C57.104-1991 จากผลการทดลองในตารางที่ 4.11

ลำดับ	ระดับคิสซาร์จ บางส่วน	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
1	>200 pC in Oil	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
2	>500 pC in Oil	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
3	>1,000 pC in Oil	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
4	>5,000 pC in Oil	L2	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
5	>10,000 pC in Oil	L2	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
6	>20,000 pC in Oil	L3	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ

5) วิเคราะห์ด้วยวิธี Duval Triangle พบว่าอาจเกิดคิสซาร์จบางส่วน ในการทดลองคิสซาร์จบางส่วนทุกระดับ แสดงผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 วิเคราะห์ด้วยวิธี Duval Triangle จากผลการทดลองในตารางที่ 4.11

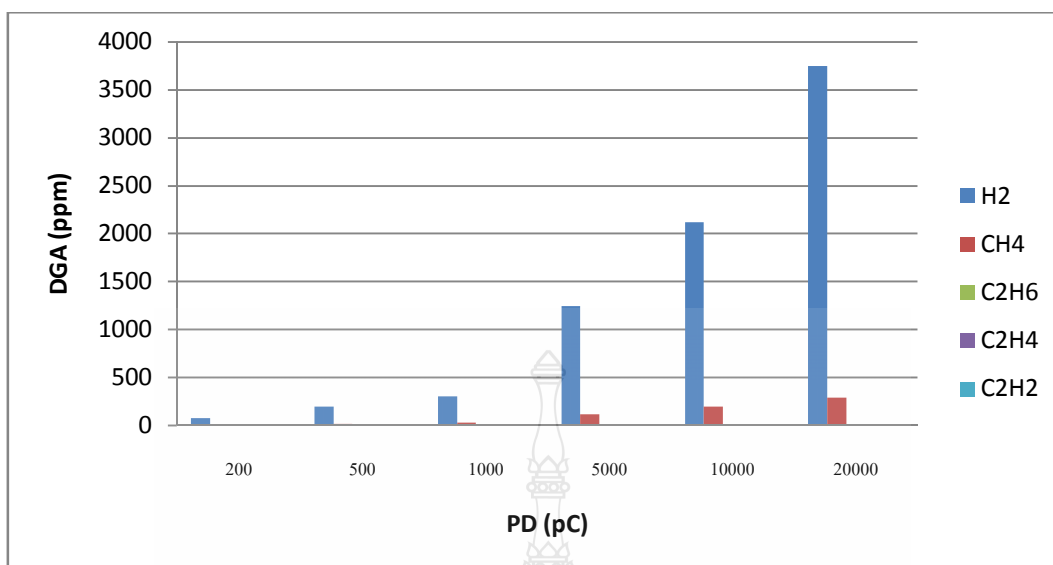
### 4.3 ผลการทดลองภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง

การทดลองภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง โดยใช้อิเล็กโตรดแบบปลายแหลม กับ ระบาย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดคองที่ 5.00 มิลลิเมตร ที่ ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง 14-20 ppm แสดงดังตารางที่ 4.13 ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง 30-40 ppm แสดงดังตารางที่ 4.15 ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงมากกว่า 50 ppm แสดงดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ความชื้นใน น้ำมันหม้อแปลง 14-20 ppm

ลำดับ	ระดับดิสชาร์จ บางส่วน	H <sub>2</sub> (ppm)	CH <sub>4</sub> (ppm)	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (ppm)	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (ppm)	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (ppm)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (ppm)
1	>200 pC in Oil	80	6	0	0	0	3	560
2	>500 pC in Oil	197	18	0	0	0	2	533
3	>1,000 pC in Oil	305	33	0	0	0	3	543
4	>5,000 pC in Oil	1250	122	2	0	0	3	578
5	>10,000 pC in Oil	2121	198	6	0	0	4	528
6	>20,000 pC in Oil	3744	290	10	0	0	4	550

การวิเคราะห์ DGA เชิงแนวโน้มพบว่า สามารถเฝ้าระวังดิสชาร์จบางส่วนตั้งแต่ระดับ 200 pC และยกระดับพลังงานดิสชาร์จอย่างต่อเนื่องจนเบรกดาวน์ที่ระดับ 20,000 pC ดังภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.13 ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง 14-20 ppm

จากตารางที่ 4.13 และภาพที่ 4.13 นำมาวิเคราะห์ตามวิธีวิเคราะห์ข้างต้นดังนี้

1) วิเคราะห์ด้วยวิธี California State University-Sacramento Guidelines (Key Gases) การทดลองที่ระดับคิซาร์จบางส่วนมากกว่า 5000 pC ขึ้นไป ปริมาณก๊าซ H<sub>2</sub> อยู่ในระดับผิดปกติอาจเกิดโคโรน่าหรืออาร์ค และปริมาณก๊าซ CH<sub>2</sub> อยู่ในระดับผิดปกติอาจเกิดสปาร์ค นอกจากนั้นอยู่ในระดับปกติ

2) วิเคราะห์ตามมาตรฐาน IEEE Std C57.104-1991, Gas Limits and Warning Level วิเคราะห์ที่ได้ดังตารางที่ 4.14 จะเห็นได้ว่า ปริมาณก๊าซ H<sub>2</sub> ผิดปกติระดับเริ่มต้นตั้งแต่ระดับคิซาร์จบางส่วนมากกว่า 500 pC และเข้าระดับฉุกเฉินตั้งแต่ระดับคิซาร์จบางส่วนมากกว่า 10000 pC

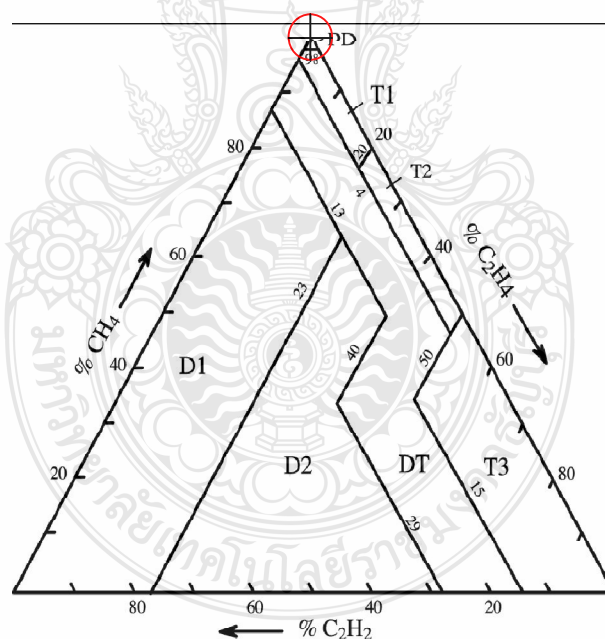
3) วิเคราะห์ด้วยวิธี Dörnenberg Ratio เริ่มวิเคราะห์จากการทดลองที่ระดับ Gas Limits and Warning Level ผิดปกติ พบว่าอาจเกิดโคโรน่าในน้ำมันหม้อแปลง ในการทดลองคิซาร์จบางส่วนทุกระดับ ยกเว้นการทดลองที่คิซาร์จบางส่วนมากกว่า 1000 pC ไม่ตรงเงื่อนไข (ลำดับที่ 3)

4) วิเคราะห์ด้วยวิธี R.R. Rogers (CEGB Fault Gas Ratios) เริ่มวิเคราะห์จากการทดลองที่ระดับ Gas Limits and Warning Level ผิดปกติ พบว่าอาจเกิดคิซาร์จบางส่วน ในการทดลองคิซาร์จบางส่วนทุกระดับ ยกเว้นการทดลองที่คิซาร์จบางส่วนมากกว่า 1000 pC ไม่ตรงเงื่อนไข (ลำดับที่ 3)

ตารางที่ 4.14 การวิเคราะห์ตามมาตรฐาน IEEE Std C57.104-1991 จากผลการทดลองในตารางที่ 4.13

ลำดับ	ระดับคิสซาร์จ บางส่วน	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
1	>200 pC in Oil	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
2	>500 pC in Oil	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
3	>1,000 pC in Oil	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
4	>5,000 pC in Oil	L2	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
5	>10,000 pC in Oil	L3	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
6	>20,000 pC in Oil	L3	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ

5) วิเคราะห์ด้วยวิธี Duval Triangle พบว่าอาจเกิดคิสซาร์จบางส่วน ในการทดลองคิสซาร์จบางส่วนทุกระดับ แสดงผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 4.14



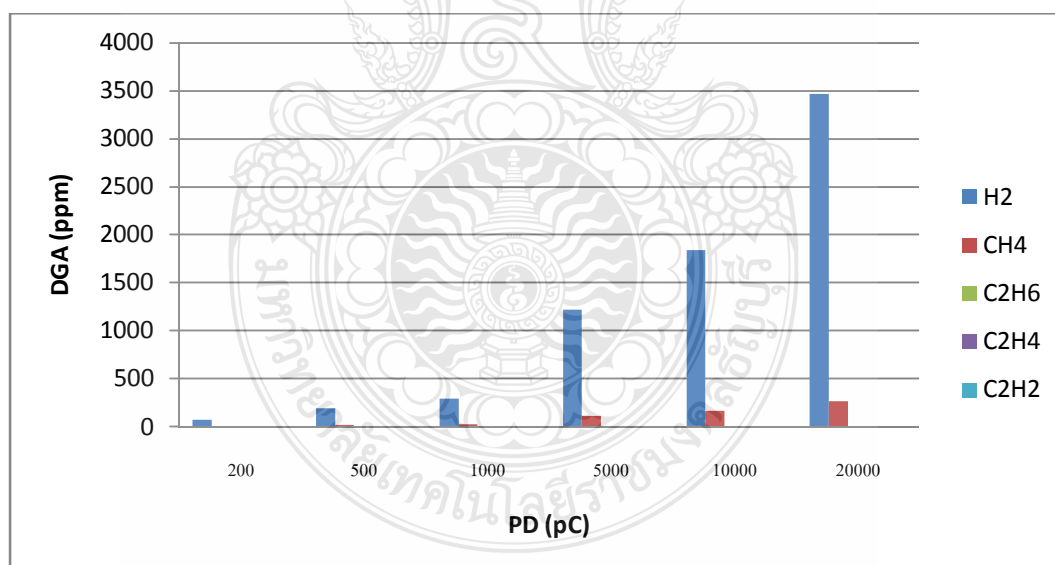
ภาพที่ 4.14 วิเคราะห์ด้วยวิธี Duval Triangle จากผลการทดลองในตารางที่ 4.13



ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง 30-40 ppm

ลำดับ	ระดับดิสชาร์จ บางส่วน	H <sub>2</sub> (ppm)	CH <sub>4</sub> (ppm)	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (ppm)	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (ppm)	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (ppm)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (ppm)
1	>200 pC in Oil	74	6	0	0	0	4	712
2	>500 pC in Oil	195	16	0	0	0	4	654
3	>1,000 pC in Oil	296	27	0	0	0	4	720
4	>5,000 pC in Oil	1223	114	2	0	0	3	785
5	>10,000 pC in Oil	1840	166	5	1	0	4	668
6	>20,000 pC in Oil	3466	265	11	1	0	3	773

การวิเคราะห์ DGA เชิงแนวโน้มพบว่า สามารถเฝ้าระวังดิสชาร์จบางส่วนตั้งแต่ระดับ 200 pC และยกระดับพลังงานดิสชาร์จอย่างต่อเนื่องจนเบรกดาวน์ที่ระดับ 20,000 pC ดังภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.15 ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง 30-40 ppm

จากตารางที่ 4.15 และภาพที่ 4.15 นำมาวิเคราะห์ตามวิธีวิเคราะห์ข้างต้นดังนี้

1) วิเคราะห์ด้วยวิธี California State University-Sacramento Guidelines (Key Gases) การทดลองที่ระดับดิสชาร์จบางส่วนมากกว่า 5000 pC ขึ้นไป ปริมาณก๊าซ  $H_2$  อยู่ในระดับผิดปกติอาจเกิดโคโรน่าหรืออาร์ก และปริมาณก๊าซ  $CH_4$  อยู่ในระดับผิดปกติอาจเกิดสปาร์ก นอกจากนั้นอยู่ในระดับปกติ

2) วิเคราะห์ตามมาตรฐาน IEEE Std C57.104-1991, Gas Limits and Warning Level วิเคราะห์ได้ดังตารางที่ 4.16 จะเห็นได้ว่า ปริมาณก๊าซ  $H_2$  ผิดปกติระดับเริ่มต้นตั้งแต่ระดับดิสชาร์จบางส่วนมากกว่า 500 pC และเข้าระดับฉุกเฉินตั้งแต่ระดับดิสชาร์จบางส่วนมากกว่า 10000 pC

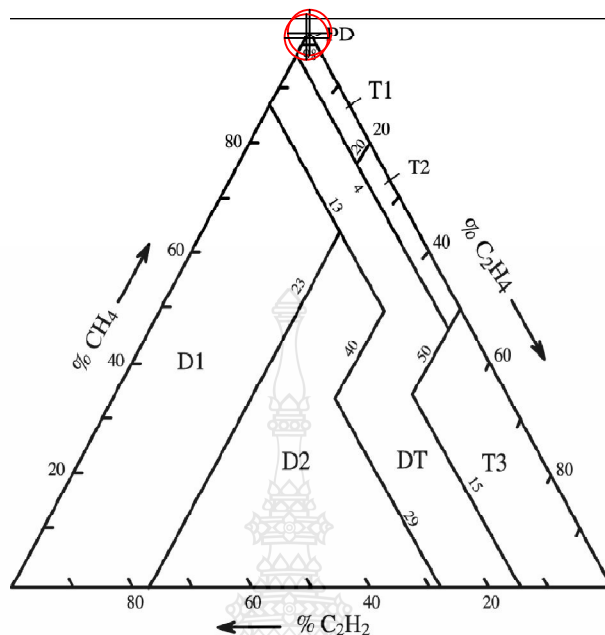
3) วิเคราะห์ด้วยวิธี Dörnenberg Ratio เริ่มวิเคราะห์จากการทดลองที่ระดับ Gas Limits and Warning Level ผิดปกติ พบว่าอาจเกิดโคโรน่าในน้ำมันหม้อแปลง ในการทดลองดิสชาร์จบางส่วนทุกระดับ

4) วิเคราะห์ด้วยวิธี R.R. Rogers (CEGB Fault Gas Ratios) เริ่มวิเคราะห์จากการทดลองที่ระดับ Gas Limits and Warning Level ผิดปกติ พบว่าอาจเกิดดิสชาร์จบางส่วน ในการทดลองดิสชาร์จบางส่วนทุกระดับ

**ตารางที่ 4.16** การวิเคราะห์ตามมาตรฐาน IEEE Std C57.104-1991 จากผลการทดลองในตารางที่ 4.15

ลำดับ	ระดับดิสชาร์จ บางส่วน	$H_2$	$CH_4$	$C_2H_6$	$C_2H_4$	$C_2H_2$	CO	$CO_2$
1	>200 pC in Oil	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
2	>500 pC in Oil	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
3	>1,000 pC in Oil	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
4	>5,000 pC in Oil	L2	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
5	>10,000 pC in Oil	L3	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
6	>20,000 pC in Oil	L3	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ

5) วิเคราะห์ด้วยวิธี Duval Triangle พบว่าอาจเกิดดิสชาร์จบางส่วน ในการทดลองดิสชาร์จบางส่วนทุกระดับ แสดงผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 4.16

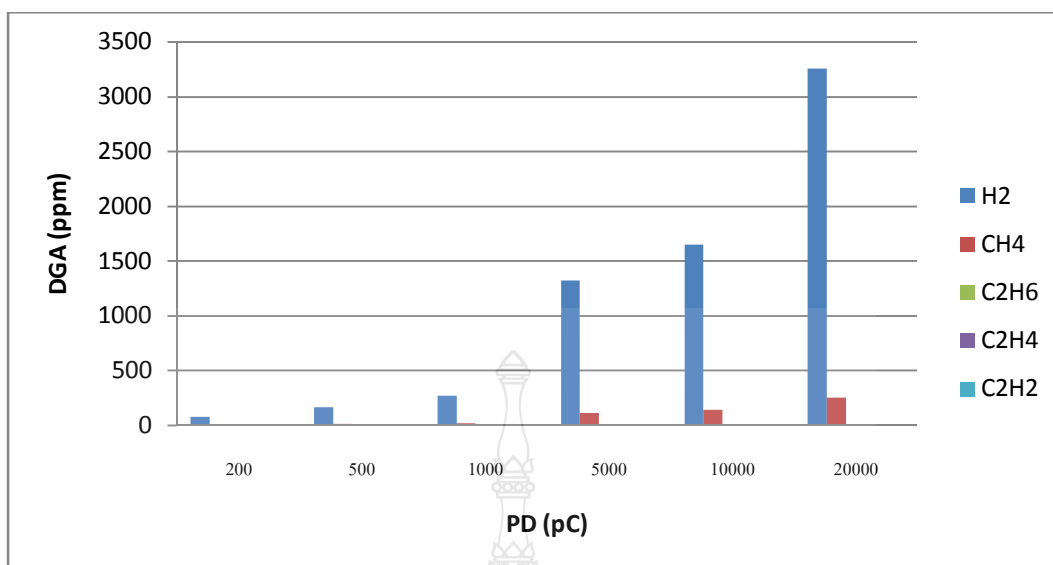


ภาพที่ 4.16 วิเคราะห์ด้วยวิธี Duval Triangle จากผลการทดลองในตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงมากกว่า 50 ppm

ลำดับ	ระดับดิสชาร์จ บางส่วน	H <sub>2</sub> (ppm)	CH <sub>4</sub> (ppm)	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (ppm)	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (ppm)	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (ppm)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (ppm)
1	>200 pC in Oil	82	6	0	0	0	3	646
2	>500 pC in Oil	168	15	0	0	0	3	762
3	>1,000 pC in Oil	274	25	0	0	0	4	685
4	>5,000 pC in Oil	1322	116	1	0	0	3	661
5	>10,000 pC in Oil	1650	144	3	0	0	3	640
6	>20,000 pC in Oil	3255	254	6	1	0	3	783

การวิเคราะห์ DGA เชิงแนวโน้มพบว่า สามารถเฝ้าระวังดิสชาร์จบางส่วนตั้งแต่ระดับ 200 pC และยกระดับพลังงานดิสชาร์จอย่างต่อเนื่องจนเบรกดาวน์ที่ระดับ 20,000 pC ดังภาพที่ 4.17



ภาพที่ 4.17 ผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงมากกว่า 50 ppm

จากตารางที่ 4.17 และภาพที่ 4.17 นำมาวิเคราะห์ตามวิธีวิเคราะห์ข้างต้นดังนี้

1) วิเคราะห์ด้วยวิธี California State University-Sacramento Guidelines (Key Gases) การทดลองที่ระดับดิสชาร์จบางส่วนมากกว่า 5000 pC ขึ้นไป ปริมาณก๊าซ  $H_2$  อยู่ในระดับผิดปกติอาจเกิดโคโรน่าหรืออาร์ก และปริมาณก๊าซ  $CH_2$  อยู่ในระดับผิดปกติอาจเกิดสปาร์ก นอกจากนั้นอยู่ในระดับปกติ

2) วิเคราะห์ตามมาตรฐาน IEEE Std C57.104-1991, Gas Limits and Warning Level วิเคราะห์ที่ได้ดังตารางที่ 4.18 จะเห็นได้ว่า ปริมาณก๊าซ  $H_2$  ผิดปกติระดับเริ่มต้นตั้งแต่ระดับดิสชาร์จบางส่วนมากกว่า 500 pC และเข้าระดับฉุกเฉินตั้งแต่ระดับดิสชาร์จบางส่วนมากกว่า 20000 pC

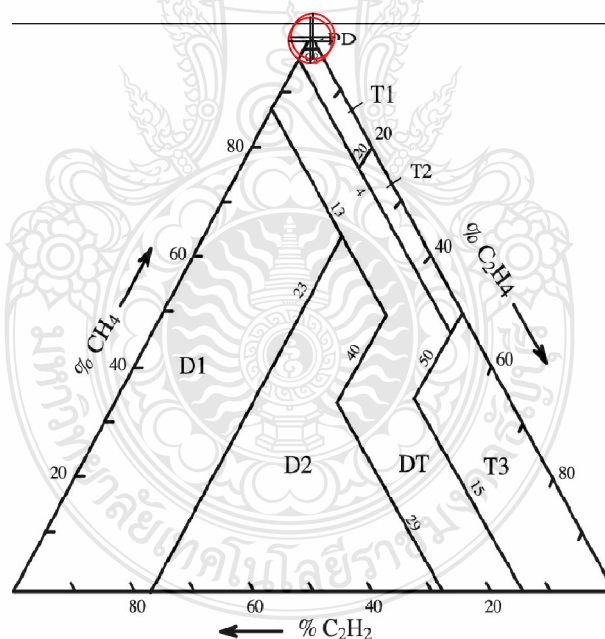
3) วิเคราะห์ด้วยวิธี Dörnenberg Ratio เริ่มวิเคราะห์จากการทดลองที่ระดับ Gas Limits and Warning Level ผิดปกติ พบว่าอาจเกิดโคโรน่าในน้ำมันหม้อแปลง ในการทดลองดิสชาร์จบางส่วนทุกระดับ

4) วิเคราะห์ด้วยวิธี R.R. Rogers (CEGB Fault Gas Ratios) เริ่มวิเคราะห์จากการทดลองที่ระดับ Gas Limits and Warning Level ผิดปกติ พบว่าอาจเกิดดิสชาร์จบางส่วน ในการทดลองดิสชาร์จบางส่วนทุกระดับ

ตารางที่ 4.18 การวิเคราะห์ตามมาตรฐาน IEEE Std C57.104-1991 จากผลการทดลองในตารางที่ 4.17

ลำดับ	ระดับดิสชาร์จ บางส่วน	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
1	>200 pC in Oil	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
2	>500 pC in Oil	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
3	>1,000 pC in Oil	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
4	>5,000 pC in Oil	L2	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
5	>10,000 pC in Oil	L2	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
6	>20,000 pC in Oil	L3	L1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ

5) วิเคราะห์ด้วยวิธี Duval Triangle พบว่าอาจเกิดดิสชาร์จบางส่วน ในการทดลองดิสชาร์จ บางส่วนทุกระดับ แสดงผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 4.18



ภาพที่ 4.18 วิเคราะห์ด้วยวิธี Duval Triangle จากผลการทดลองในตารางที่ 4.17

#### 4.4 ผลการทดลอง แบบมีกระดาดชนวนแทรกระหว่างอิเล็กโตรด

ทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในกระดาดชนวนในสถานะทดสอบบรรจุน้ำมันหม้อแปลง ภายใต้การเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าโดยการเปลี่ยนรูปทรงอิเล็กโตรดและความชื้น ทำการทดสอบโดยการนำกระดาดชนวนความหนา 0.13 มิลลิเมตร ตัดเป็นสี่เหลี่ยมขนาด 70 x 75 มิลลิเมตร นำไปแทรกระหว่างอิเล็กโตรด ปรับอิเล็กโตรดให้ชนกระดาดชนวน และเริ่มการทดสอบ โดยหาแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่เกิดเบรกดาวน เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบ เกิดเบรกดาวนที่กระดาดชนวนด้วยแรงดันเพียง 1.2 kV ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำมาก ผู้วิจัยจึงเพิ่มจำนวนแผ่นกระดาดชนวนเป็น 7 แผ่น ไม่เกิดเบรกดาวนที่กระดาดชนวนและน้ำมันหม้อแปลง แต่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูง ตัดวงจร (ทริป) ด้วยแรงดันเพียง 3.2 kV และได้เพิ่มจำนวนแผ่นกระดาดชนวนเป็น 15 แผ่น แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูง ตัดวงจร (ทริป) ด้วยแรงดันเพียง 5.4 kV ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าทดสอบที่ไม่สามารถควบคุมให้คงที่ได้ ผู้วิจัยจึงหาข้อมูลเพิ่มเติมจากบริษัทผู้ผลิตหม้อแปลงไฟฟ้า เกี่ยวกับเทคนิคการใช้กระดาดชนวนที่ไม่มีระบุในเอกสารคุณสมบัติเฉพาะ กล่าวคือ การนำกระดาดชนวนไปใช้งานต้องอบในห้องสุญญากาศเป็นเวลาอย่างน้อย 48 ชั่วโมง และหลังออกจากห้องอบต้องนำกระดาดชนวนไปใช้งานทันที ดังนั้นจึงขอสรุปเงื่อนไขการใช้งานกระดาดชนวนในการทดลองดังนี้

- 1) กระดาดชนวนใหม่ต้องผ่านการอบในห้องสุญญากาศเป็นเวลาอย่างน้อย 48 ชั่วโมง จึงจะนำมาใช้ในการทดลองได้
- 2) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูง ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอได้ต่อเนื่อง
- 3) ไม่ได้รับอนุญาตให้เคลื่อนย้ายเครื่องมือทดสอบออกจากห้องปฏิบัติ
- 4) ไม่สามารถสร้างห้องอบใหม่ เพื่อใช้กับวิทยานิพนธ์นี้ได้ เนื่องจากงบประมาณไม่เพียงพอ

ด้วยข้อจำกัดดังกล่าว วิทยานิพนธ์นี้จึงไม่สามารถจำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในกระดาดชนวนในสถานะทดสอบบรรจุน้ำมันหม้อแปลงได้

#### 4.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

ในวิทยานิพนธ์นี้ไม่ได้กล่าวถึงค่าระดับแรงดันไฟฟ้าทดสอบ ใช้การกำหนดระดับดิสชาร์จบางส่วนแทน ทั้งนี้เพื่อไม่ให้สับสน เนื่องจากที่ระดับดิสชาร์จบางส่วนเดียวกัน ทดสอบภายใต้สนามไฟฟ้าต่างกัน จะใช้ระดับแรงดันไฟฟ้าทดสอบไม่เท่ากัน กล่าวคือ การทดสอบภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง จะเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่ระดับแรงดันไฟฟ้าทดสอบน้อยกว่าแบบอื่น

จากผลการทดลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลง ในสถานะทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz ภายใต้การเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้า โดยการเปลี่ยนรูปทรงอิเล็กโตรดและความชื้น จากการทดลองสังเกตได้ว่า เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าทดสอบให้สูงขึ้น ในทุกเงื่อนไขการทดสอบ จะเกิดก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) และมีเทน ( $CH_4$ ) ตั้งแต่ระดับเริ่มต้นของปัญหา และเพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าทดสอบ แสดงดังกราฟในภาพที่ 4.1, 4.3, 4.5, 4.7, 4.9, 4.11, 4.13, 4.15 และ 4.17 และพบว่าเมื่อระดับดิสชาร์จบางส่วนมากกว่า 20,000 pC จะเกิดเบรกควาน์ในบางครั้ง



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอการตรวจสอบดิสชาร์จบางส่วนภายในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยการวิเคราะห์ก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ได้จำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลง เพื่อวิเคราะห์หาแนวโน้มความเสียหายขั้นรุนแรง ในระดับที่เป็นอันตรายต่อหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อเป็นแนวทางในการบำรุงรักษาและป้องกันความเสียหายนั้นได้ทัน่วงที

#### 5.1 สรุปผลการออกแบบ

ภาชนะทดสอบน้ำมันหม้อแปลง (Test Cell) เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยใหม่ จึงได้เทียบเคียงภาชนะทดสอบน้ำมันหม้อแปลงกับมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบค่าความคงทนฉนวน น้ำมันหม้อแปลง IEC 156 Second Edition, (1995-07) ในเรื่องปริมาณตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ในการทดสอบ คือ 600 ml ซึ่งเป็นปริมาณที่เพียงพอกับการทดสอบ DGA ที่ต้องการตัวอย่างน้ำมันเพียง 150 ml และมีค่าแรงดันวาบไฟตามผิว (Flashover) สูงกว่า 60 kVAC ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบค่าความคงทนฉนวนน้ำมันหม้อแปลง ตัวถ้วยใส่น้ำมันหม้อแปลงเป็นวัสดุฉนวน อะคริลิกใส และ อิเล็กโตรด ใช้ทองเหลือง ซึ่งมีคุณสมบัติเหมาะสม คือ มีความแข็งแรง ทนการกัดกร่อนได้ดี นำไฟฟ้าได้ดี ราคาถูก

#### 5.2 สรุปผลการวิจัย

การทดสอบน้ำมันหม้อแปลงใหม่ ชนิด Mineral Oil โดยการจำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลง และนำตัวอย่างน้ำมันที่ได้ไปทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง เพื่อหาแนวโน้มความรุนแรงของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนก่อนยกกระดบพลังงานการดิสชาร์จ ให้สามารถแจ้งเตือนล่วงหน้าได้ โดยศึกษาผลของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายใต้สนามไฟฟ้าต่างกัน 3 แบบ และความชื้นในน้ำมันต่างกัน 3 ระดับ ซึ่งผลการวิจัยสรุปได้ดังนี้

1) การทดสอบภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง มีลักษณะการเกิดก๊าซที่เจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงเหมือนกัน กล่าวคือ



ลักษณะสนามไฟฟ้าไม่ส่งผลต่อค่าก๊าซที่เจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง ที่ระดับดิสชาร์จบางส่วนเดียวกัน

2) จากการทดสอบผ่านได้น้ำมันไฟฟ้าสม่ำเสมอ อิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดคงที่ 5.00 มิลลิเมตร พบว่าสามารถควบคุมปริมาณการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลงได้ง่ายที่สุด กล่าวคือ การทดสอบผ่านได้น้ำมันไฟฟ้าสม่ำเสมอ ค่าดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลงมีค่าแกว่งตัวน้อยที่สุด นั่นคือมีความถูกต้องของข้อมูลมากที่สุด

3) จากการทดสอบการปรับค่าความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง พบว่า ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง ไม่ส่งผลต่อปริมาณการเกิดก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ที่ระดับดิสชาร์จบางส่วนเดียวกัน กล่าวคือความชื้นในน้ำมันหม้อแปลง ไม่ทำให้ผลการวิเคราะห์ก๊าซที่เจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงผิดพลาด

4) การทดสอบที่ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงต่ำ สามารถควบคุมปริมาณการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลงได้ง่ายที่สุด กล่าวคือ การทดสอบที่ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงต่ำ ค่าดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลงมีค่าแกว่งตัวน้อยที่สุด นั่นคือมีความถูกต้องของข้อมูลมากที่สุด

5) การวิเคราะห์ด้วยวิธี California State University-Sacramento Guidelines (Key Gases) ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ไม่สามารถบ่งชี้ถึงความผิดปกติของปริมาณก๊าซในน้ำมันหม้อแปลงในระดับเริ่มต้นได้ ยกตัวอย่างผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลงในตารางที่ 4.1 บ่งชี้ถึงความผิดปกติของปริมาณก๊าซในน้ำมันหม้อแปลงที่ระดับดิสชาร์จบางส่วนมากกว่า 5000 pC ขึ้นไป

6) การวิเคราะห์ตามมาตรฐาน IEEE Std C57.104-1991, Gas Limits and Warning Level สามารถบ่งชี้ถึงความผิดปกติของปริมาณก๊าซในน้ำมันหม้อแปลงได้ตั้งแต่ระดับเริ่มต้น แต่ไม่สามารถระบุชนิดของความผิดปกติได้

7) การวิเคราะห์ด้วยวิธี Dörmenberg Ratio และ วิธี R.R. Rogers (CEGB Fault Gas Ratios) เริ่มวิเคราะห์จากการปริมาณก๊าซในน้ำมันหม้อแปลงที่ระดับ Gas Limits and Warning Level ผิดปกติ แต่ในบางกรณีไม่สามารถวิเคราะห์ได้ เนื่องจากไม่ตรงตามเงื่อนไข ยกตัวอย่างผลการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลงในตารางที่ 4.13 ที่ระดับดิสชาร์จบางส่วนมากกว่า 1000 pC ไม่ตรงเงื่อนไข

8) การวิเคราะห์ด้วยวิธี Duval Triangle สามารถบ่งชี้ถึงความผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ตั้งแต่ระดับเริ่มต้น และสามารถระบุชนิดของความผิดปกติได้ แต่ไม่สามารถระบุความรุนแรงของความผิดปกติแต่ละชนิดได้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซในน้ำมันหม้อแปลงเชิงแนวโน้ม แสดงดังกราฟในภาพที่ 4.1, 4.3, 4.5, 4.7, 4.9, 4.11, 4.13 และ 4.15 จะเห็นได้ว่าสามารถตรวจพบความผิดปกติของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ได้ตั้งแต่ระดับเริ่มต้น จากการทดลองพบว่าเมื่อเกิดดิสชาร์จบางส่วน จะเกิดก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) และมีเทน ( $CH_4$ ) ตั้งแต่ระดับเริ่มต้นของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน และเพิ่มขึ้นตามความรุนแรงตลอดช่วงของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน และที่ระดับดิสชาร์จบางส่วนมากกว่า 20,000 pC จะเกิดเบรกดาวน์ในบางครั้ง (ยกเว้นระดับพลังงานดิสชาร์จจากดิสชาร์จบางส่วนเป็นเบรกดาวน์) กล่าวคือสามารถเฝ้าระวังการยกระดับพลังงานดิสชาร์จได้โดยการวิเคราะห์หาแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปริมาณก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง และใช้อัตราความเร็วในการเพิ่มขึ้นของปริมาณก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ในการวางแผนบำรุงรักษาและป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าเสียหายได้ตรงตามวัตถุประสงค์การทดลอง

การวิเคราะห์ปริมาณก๊าซในน้ำมันหม้อแปลงเชิงแนวโน้ม จะมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นหากพิจารณา ร่วมกับการวิเคราะห์วิธีอื่นๆ และมีการทดสอบก๊าซในน้ำมันหม้อแปลงเป็นประจำอย่างต่อเนื่อง

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาหรือพัฒนางานวิจัยครั้งต่อไป ควรคำนึงถึงองค์ประกอบต่างๆ ดังนี้

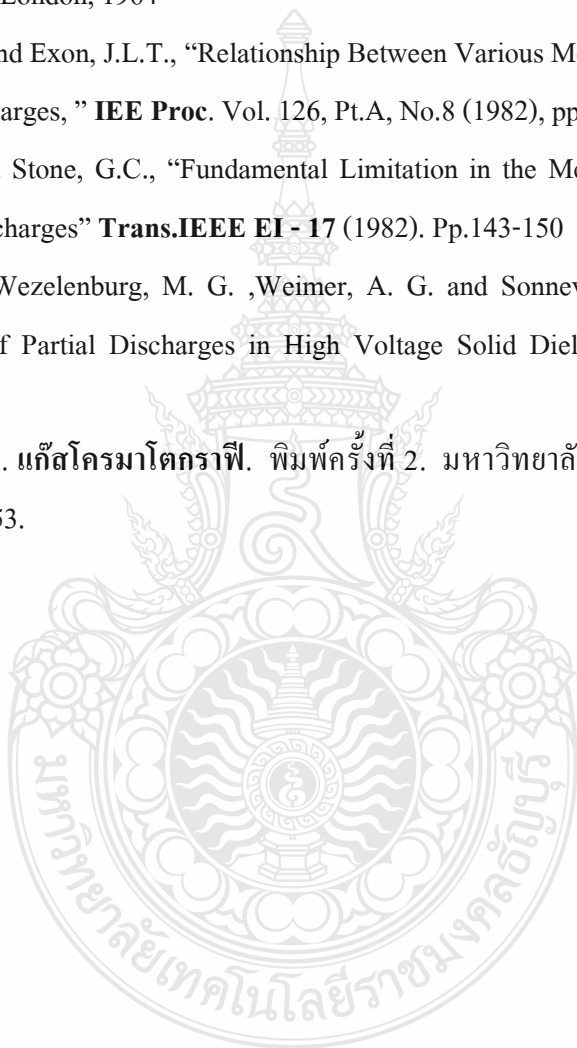
- 1) การเก็บรักษาน้ำมันหม้อแปลง ควรเก็บในภาชนะที่มิดชิด สามารถป้องกันอากาศเข้าออกได้ ไม่ควรให้น้ำมันหม้อแปลงถูกแสงแดด
- 2) ชุดอิเล็กทรอนิกส์ ต้องตรวจสอบบ่อยๆ เนื่องจากเมื่อเกิดเบรกดาวน์ จะทำให้ฟิวส์อิเล็กทรอนิกส์เกิดการกั๊กก่อน มีผลต่อสภาพสนามไฟฟ้าได้ จึงควรชุดอิเล็กทรอนิกส์คลุม เงามาวอยู่เสมอ
- 3) ชนิดของฉนวนที่นำมาสร้าง Testcell ควรใช้วัสดุที่มีค่าความคงทนทางไฟฟ้าสูง ไม่กักเก็บความชื้นหรือสิ่งสกปรก

ผู้วิจัยทำงานด้วยความตั้งใจ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จักเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจ

## รายการอ้างอิง

- [1] IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, **IEEE Standard C57.104-1991**, 1992
- [2] ชนพงศ์ สุวรรณศรี แคททรียา สุวรรณศรี. 2551. การพัฒนาโปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบน้ำมันหม้อแปลงด้วยวิธีวิเคราะห์ก๊าซที่เจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31 นครนายก ประเทศไทย 29-31 ตุลาคม 2551: 153-156.
- [3] High-voltage Test Techniques Partial Discharge Measurements, **IEC Standard 60270** Third Edition 2000-12, 2000
- [4] Insulating liquids-Determination of the Breakdown Voltage at Power Frequency-Test Method, **IEC Standard 156** Second Edition 1995-07, 1995
- [5] Standard Test Method for Water in Insulating Liquids by Coulometric Karl Fischer Titration, **ASTM Standard D 1533-00**, 2005
- [6] Standard Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oil by Gas Chromatography, **ASTM Standard D 3612 – 02**, 2009
- [7] M. Wang, A.J. Vandermaar, and K.D. Srivastava, "Review of condition assessment of power transformer in service," **Electrical Insulation Magazine**, IEEE vol.18, pp.12-25, Nov.-Dec.2002
- [8] ชวรัตน์ เก่งธรรมกิจ, การออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาที่เหมาะสมโดยใช้เงินเติกอัลกอริทึม, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546.
- [9] ไสว ฐานีพานิชสกุล, หม้อแปลง. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: หจก. ฟีนี พับบลิชซิ่ง 2525.
- [10] S.A. Stigant and A. C. Franklin. **The J & P Transformer Book** London. U. K. Butterworth., 1973.
- [11] สัมพันธ์ หาญชเล, เครื่องกลไฟฟ้า 1. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร. 2535.
- [12] บุญเลิศ สี่เฉย. การออกแบบและการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่าย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร. ธันวาคม พ.ศ. 2548.

- [13] S.V. Kulkarni,S. A. Khaparde. **Transformer Engineering Design and Practice**. New York Marcel Dekker, Inc., 2004.
- [14] Kuffel, E and Zaengl, W.S. **High Voltage Engineering** : Fundamental, pp.433-461., Pergamon Press Ltd., Oxford, 1st ed ,1984
- [15] Kreuger,F.H., **Discharge Detection in High Voltage Equipment**, pp.7-85. ,Temple Press Book Ltd., London, 1964
- [16] Burnley, K.G., and Exon, J.L.T., “Relationship Between Various Measurement Techniques for Viod Discharges, ” **IEE Proc.** Vol. 126, Pt.A, No.8 (1982), pp. 593-606
- [17] Boggs, S.A. and Stone, G.C., “Fundamental Limitation in the Measurement of Colona and Partial Discharges” **Trans.IEEE EI - 17** (1982). Pp.143-150
- [18] Kreuger, F.H., Wezelenburg, M. G. ,Weimer, A. G. and Sonneveld, W. A. “Error in the Location of Partial Discharges in High Voltage Solid Dielectric Cable” **IEEE EI-6** (1983)
- [19] คณิต กฤษณ์งกูร. แก๊สโครมาโตกราฟี. พิมพ์ครั้งที่ 2. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2553.




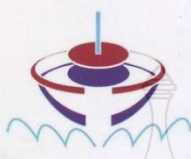

ภาคผนวก









ภาคผนวก ก

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่




**PEC-9**

Faculty of Engineering  
 Prince of Songkla University

**การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 9**  
**The 9<sup>th</sup> PSU-Engineering Conference**  
**2-3 พฤษภาคม 2554**

ณ โรงแรมเมอร์ลิน บีช รีสอร์ท (หาดไตรตรังค์) จังหวัดภูเก็ต

<http://www.pec.eng.psu.ac.th>

ผู้ให้การสนับสนุน |  | 





**ประกาศเกียรติคุณผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 9  
ระหว่างวันที่ 2 - 3 พฤษภาคม 2554  
ณ โรงแรมเมอร์สัน บีช รีสอร์ท (หาดโคตรตั้งค์) จังหวัดภูเก็ต**

ด้วยการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 9 (PEC-9) ได้รับความกรุณาจากผู้ทรงคุณวุฒิหลายท่าน จากหลายสถาบัน/หน่วยงานที่ได้ใช้ความรู้และประสบการณ์ทางวิชาการ ในการพิจารณาบทความที่ส่งเข้าร่วมการประชุมวิชาการ PEC-9 ด้วยความอุตสาหะยังผลให้การประชุมวิชาการ PEC-9 ดำเนินการไปด้วยความสมบูรณ์และมีคุณภาพ นอกจากนี้แล้วความร่วมมือจากผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านยังก่อให้เกิดคุณูปการทางวิชาการ อีกทั้งได้ร่วมสร้างบรรยากาศทางวิชาการ และเป็นการเผยแพร่ชื่อเสียงของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อีกด้วย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จึงใคร่ขอขอบพระคุณและประกาศเกียรติคุณผู้ทรงคุณวุฒิ ดังรายนามต่อไปนี้ ไว้ ณ ที่นี้ด้วย

**ก. ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกมหาวิทยาลัย**

**1. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี**

1. รศ.ดร.สมเกียรติ	ปรัชญาวารากร	คณะวิศวกรรมศาสตร์
2. ดร.เตือนใจ	สมบูรณ์วิวัฒน์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
3. ดร.ศุภกิตต์	โชติโก	คณะวิศวกรรมศาสตร์

**2. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ**

1. รศ.ดร.อรรถกร	เก่งพล	คณะวิศวกรรมศาสตร์
2. ผศ.ดร.สมพร	สิริสำราญนุกูล	คณะวิศวกรรมศาสตร์
3. ผศ.ดร.สมศักดิ์	อรรถทิมากุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์

**3. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์**

1. ผศ.ดร.วาทิต	ภักดี	คณะวิศวกรรมศาสตร์
2. ดร.จิรวรรณ	คล้ายภยันต์	คณะวิศวกรรมศาสตร์

**4. มหาวิทยาลัยมหิดล**

1. รศ.ดร.ดวงพรรณ	ศฤงคารินทร์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
2. รศ.ดร.จิตต์ลัดดา	ศักดิ์ภาณีชัย	คณะวิทยาศาสตร์

**5. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย**

1. ผศ.ดร.ประเสริฐ	เรียบร้อยเจริญ	คณะวิทยาศาสตร์
2. ดร.เกริก	ภิรมย์โสภา	คณะวิศวกรรมศาสตร์
3. ดร.ปวีณา	เชาวลิตวงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์





6. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

- |                |         |                   |
|----------------|---------|-------------------|
| 1. รศ.ดร.โมไนย | ไกรฤกษ์ | คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| 2. ผศ.ดร.พิเชฐ | ม่วงนวล | คณะวิศวกรรมศาสตร์ |

7. มหาวิทยาลัยขอนแก่น

- |                   |               |                   |
|-------------------|---------------|-------------------|
| 1. รศ.ดร.พรเทพ    | ขอขจายเกียรติ | คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| 2. ผศ.ดร.ชาญณรงค์ | สายแก้ว       | คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| 3. ผศ.อนันต์      | เจ้าสกุล      | คณะวิศวกรรมศาสตร์ |

8. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

- |                 |             |                   |
|-----------------|-------------|-------------------|
| 1. ผศ.ดร.สมบัติ | สินธุเชาวน์ | คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
|-----------------|-------------|-------------------|

9. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

- |                |         |                   |
|----------------|---------|-------------------|
| 1. ผศ.ดร.นิวิท | เจริญใจ | คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
|----------------|---------|-------------------|

10. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

- |                 |             |                   |
|-----------------|-------------|-------------------|
| 1. รศ.ดร.สุวิมล | สัจจวานิชย์ | คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
|-----------------|-------------|-------------------|

11. มหาวิทยาลัยเอเซียอาคเนย์

- |               |        |                   |
|---------------|--------|-------------------|
| 1. ผศ.สิริวิษ | ทัตสวน | คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
|---------------|--------|-------------------|

12. มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

- |               |          |                                    |
|---------------|----------|------------------------------------|
| 1. ผศ.วิจิตรา | เพ็ชรกิจ | สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และทรัพยากร |
|---------------|----------|------------------------------------|

13. มหาวิทยาลัยทักษิณ

- |                |             |                |
|----------------|-------------|----------------|
| 1. ผศ.ดร.นุกุล | อินทระสังขา | คณะวิทยาศาสตร์ |
|----------------|-------------|----------------|

14. มหาวิทยาลัยรังสิต

- |             |          |                   |
|-------------|----------|-------------------|
| 1. ดร.พิษณุ | มนัสปิติ | คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
|-------------|----------|-------------------|

ข. ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกมหาวิทยาลัย

1. คณะวิศวกรรมศาสตร์

- |                   |                |                      |
|-------------------|----------------|----------------------|
| 1. รศ.บุญเจริญ    | วงศ์กิตติศึกษา | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า |
| 2. รศ.ดร.เกริกชัย | ทองหนู         | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า |
| 3. ผศ.ดร.ณัฐธา    | จินดาเพ็ชร     | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า |



4. ผศ.ดร.วิกรม	ธีรภาพจรเดช	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
5. ผศ.ดร.พรชัย	พฤษภัทรานนท์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
6. ดร.ไพโรจน์	วุ่นชุม	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
7. อ.กิตติคุณ	ทองพูล	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
8. ผศ.ปริพนธ์	พัฒนสัตยวงศ์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
9. ผศ.สุนทร	ปิยรัตน์วงศ์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
10. รศ.ดร.จรัญ	บุญกาญจน์	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
11. รศ.ดร.ชาคริต	ทองอุไร	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
12. ผศ.ดร.กุลชนานู	ประเสริฐสิทธิ์	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
13. ผศ.ดร.ผกามาศ	เจษฎ์พัฒนานนท์	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
14. รศ.ดร.นิกร	ศิริวงศ์ไพศาล	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
15. รศ.วินิตา	รัตนมณี	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
16. ผศ.ดร.นภิสพร	มีมงคล	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
17. ผศ.ดร.รัญชนา	สินธวาลัย	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
18. ผศ.ดร.ธเนศ	รัตนวิไล	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
19. ผศ.ดร.อรุณ	สังขพงศ์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
20. ผศ.ดร.กลางเดือน	โพชนา	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
21. ผศ.สงวน	ตั้งโพธิธรรม	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
22. ผศ.เจริญ	เจตวิจิตร	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
23. ผศ.พีเชฐ	ตระการชัยศิริ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
24. รศ.กัลยาณี	คุปตานนท์	ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ
25. รศ.ดร.دنุพล	ตันนโยภาส	ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ
26. ผศ.ดร.รัชชัย	ปลุกผล	ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ
27. ผศ.ดร.เจษฎา	วรรณสินธุ์	ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ
28. ผศ.ดร.วีรวรรณ	สุทธิศรีปก	ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ
29. รศ.ดร.ชนิด	เฉลิมยานนท์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
30. รศ.สรารุช	จรีดงาม	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
31. ผศ.ดร.ธนิยา	เกาศล	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
32. ผศ.ดร.จรงค์พันธ์	มุสิกวงค์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
33. ผศ.ดร.วรพจน์	ประชาเสรี	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
34. ผศ.ดร.ชัยศรี	สุขสาโรจน์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
35. รศ.ดร.พรทิพย์	ศรีแดง	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
36. ผศ.จวีรัตน์	สกุลรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
37. ดร.ธนนท์	ชูปอุปการ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
38. อ.วิวัฒน์	สุทธิวิภากร	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
39. รศ.กำพล	ประทีปชัยกูร	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
40. รศ.ปัญญาธิกร	งามศรีตระกูล	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล



- |                      |                 |  |
|----------------------|-----------------|--|
| 41. รศ.ดร.วรวุฑ      | วิสุทธิเมธางกูล | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล   |
| 42. รศ.ดร.พฤทธิกร    | สมิตไมตรี       | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล   |
| 43. ผศ.ดร.เจริญยุทธ  | เดชวายุกุล      | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล   |
| 44. ผศ.ดร.ธีระยุทธ   | หลิวจิตร        | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล   |
| 45. ดร.ฐานันดรศักดิ์ | เทพญา           | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล   |
| 46. ดร.กิตติพันธ์    | มลิวรรณ         | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล   |
| 47. รศ.ดร.มิตรชัย    | จงเขียวชำนาญ    | ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์   |
| 48. ผศ.ดร.ธเนศ       | เคารพพงศ์       | ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์   |
| 49. ผศ.ดร.สุนทร      | วิทุสรพจน์      | ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์   |
| 50. ผศ.ดร.พิชญา      | ตันทัยย์        | ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์   |
| 51. ดร.นิคม          | สุวรรณวร        | ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์   |
| 52. ดร.แสงสุรีย์     | วสุพงศ์อัยยะ    | ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์   |
| 53. ดร.อนันท์        | ชกสุรวงศ์       | ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์   |
| 54. ดร.สมชัย         | หลิมศิโรรัตน์   | ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์   |
| 55. ดร.วชรินทร์      | แก้วอภิชัย      | ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์   |
| 56. ดร.อารีย์        | ธีรภาพเสรี      | ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์   |
| 57. อ.ฉัตรชัย        | จันทร์พริ้ม     | ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์   |
| 58. ดร.วัชรวัล       | ตั้งคุปตานนท์   | หลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต<br>สาขาวิชาการจัดการเทคโนโลยีสารสนเทศ (MIT) |

## 2. คณะวิทยาศาสตร์

- |                 |                |                            |
|-----------------|----------------|----------------------------|
| 1. ผศ.ดร.ภัทร   | อัยรักษ์       | ภาควิชาฟิสิกส์             |
| 2. ผศ.ดร.วิภาดา | เวทย์ประสิทธิ์ | ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ |

ประกาศ ณ วันที่ 22 มีนาคม 2554

รองศาสตราจารย์ บุญเจริญ วงศ์กิตติศึกษา  
ประธานคณะกรรมการวิชาการและการประชุม PEC-9



## การตรวจสอบดิสชาร์จบางส่วนภายในหม้อแปลงกำลัง โดยการวิเคราะห์ก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง

### Partial Discharge Detection of Power Transformer by Dissolved Gas Analysis

จีระศักดิ์ บุญโชติ<sup>1\*</sup> จิตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล<sup>2</sup> ธนพงศ์ สุวรรณศรี<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

<sup>3</sup>บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติสิรินธร ไทย-เยอรมัน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร 10800

Jeerasak Boonchot<sup>1\*</sup> Chatchai Suppifaksakul<sup>2</sup> Thanapong Suwanasri<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thanyaburi, Pathumthani 12110

<sup>3</sup>The Sirindhorn International Thai-German Graduate School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Bangsue, Bangkok 10800

E-mail: jeerasak@yahoo.com\*, chatchai.s@en.mutt.ac.th

#### บทคัดย่อ

ปัจจุบันการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนภายในหม้อแปลงกำลังสามารถทำได้ด้วยการวิเคราะห์ก๊าซที่เจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง ซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนแทรกซึมและระบายความร้อน เมื่อน้ำมันหม้อแปลงสัมผัสความร้อนตามประเภทของความผิดปกติจะทำให้ห่วงโซ่ไฮโดรคาร์บอนแตกตัวออกเป็นก๊าซชนิดต่าง ๆ ซึ่งความสัมพันธ์ของการแตกตัวของก๊าซในน้ำมันหม้อแปลงกับระดับความร้อนสามารถนำไปวิเคราะห์ เพื่อใช้ในการประเมินระดับความรุนแรงของความผิดปกติของหม้อแปลงก่อนที่ฉนวนหม้อแปลงจะได้รับความเสียหายเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการบำรุงรักษาและป้องกันความเสียหายนั้นได้ทันทีที่งานวิจัยนี้เน้นการตรวจสอบดิสชาร์จบางส่วน ผลการทดลองพบว่าเมื่อเกิดดิสชาร์จบางส่วน จะเกิดก๊าซไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) และมีเทน (CH<sub>4</sub>) ตั้งแต่ระดับเริ่มต้นของปัญหา และเพิ่มขึ้นตามความรุนแรงตลอดช่วงของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

**คำหลัก** ดิสชาร์จบางส่วน, ก๊าซที่เจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง,

#### Abstract

Recently, Dissolved Gas Analysis (DGA) technique is a method for detecting Partial Discharge (PD) in power transformers. As the transformer oil under thermal stress according to types of the disorder, the Hydrocarbon chain will liberate gases which relates to level of heat in the transformer oil. The analysis of this relationship can be used to assess severity of abnormalities within the first transformer insulation

transformer has been severely affected. Approach to maintenance and damage prevention is timely. This study focuses on partial discharge monitoring because some damage to the majority of the insulation within the transformer due to voltage durability. As the results, it is shown that the hydrogen (H<sub>2</sub>) and methane (CH<sub>4</sub>) tend to be increased severity during the partial discharge occurred.

**Keywords:** Partial Discharge, Dissolved Gas Analysis, DGA

#### 1. บทนำ

ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังได้ว่า หม้อแปลงกำลังเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญและมีราคาสูงมาก หากหม้อแปลงเกิดความเสียหายจะส่งผลกระทบต่อผู้ผลิตและผู้ใช้ไฟฟ้า ปัจจุบันมีวิธีตรวจสอบมากมายเพื่อแจ้งเตือนล่วงหน้าก่อนปัญหาลุกลามใหญ่โต การวิเคราะห์ก๊าซที่เจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง (Dissolved Gas Analysis, DGA) [1] เป็นวิธีหนึ่งที่มีความนิยมอย่างมาก เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถตรวจหาความผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องดับไฟหรือปลดโหลด งานวิจัยนี้ได้จำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลง เพื่อวิเคราะห์หาแนวโน้มความเสียหายขั้นรุนแรงในระดับที่เป็นอันตรายต่อหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อเป็นแนวทางในการบำรุงรักษาและป้องกันความเสียหายนั้นได้ทันทีที่

## 2. หลักการและทฤษฎี

การวิเคราะห์ก๊าซที่เจือปนอยู่ในน้ำมันเป็นมาตรฐานอุตสาหกรรมสำหรับการค้นหาและการตัดสินความผิดปกติในหม้อแปลงมานานกว่า 30 ปี [2] ซึ่งเป็นวิธีที่คิดค้นขึ้นมาเพื่อการบำรุงรักษาโดยการวิเคราะห์ก๊าซที่เจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง โดยทั่วไปน้ำมันหม้อแปลงทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าและระบายความร้อนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง น้ำมันหม้อแปลงที่อยู่ใกล้จุดเสียหายจะสลายตัวเกิดเป็นก๊าซที่สามารถติดไฟได้และก๊าซที่ไม่ติดไฟ ก๊าซเหล่านี้จะเจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงซึ่งอัตราการเกิดก๊าซและประเภทของก๊าซขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ในการทดสอบทางไฟฟ้าของหม้อแปลงต้องปลดหม้อแปลงออกจากระบบ แต่วิธีวิเคราะห์ก๊าซที่เจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงยังสามารถจ่ายโหลดได้ ถ้ามีการทดสอบเป็นวาระจะทำให้รู้ปริมาณก๊าซตั้งแต่เริ่มแรก อัตราการเพิ่มขึ้นของก๊าซต่อเวลาทำให้สามารถป้องกันความเสียหายที่จะเกิดได้

### 2.1 วิธีการตรวจวัดก๊าซ

การตรวจวัดที่นิยมทำกันในปัจจุบันมีอยู่ 3 วิธี คือ [1]

1) Total combustible gas (TCG) เป็นการวัดปริมาณก๊าซที่ติดไฟที่เกิดขึ้นในตัวหม้อแปลง คือ มีเทน, อีเทน, เอทิลีน, อะเซทิลีน, คาร์บอนมอนอกไซด์ และ ไฮโดรเจน เป็นวิธีที่ใช้กับหม้อแปลงชนิดที่มี gas blanket ซึ่งมีช่องว่างเหนือน้ำมัน และไม่สามารถใช้กับหม้อแปลงที่ใช้ conservator ซึ่งมีน้ำมันเต็มถึงได้ ก๊าซที่ได้จะลอยอยู่เหนือน้ำมันโดยมี gas blanket ป้องกันไม่ให้ไหลเข้าออกภายนอกได้ ข้อดีของการตรวจวัดชนิดนี้คือ ง่าย ให้ผลรวมของก๊าซออกมาเป็นค่าเดียว ส่วนข้อเสียคือ ไม่แสดงถึงก๊าซที่แสดงปัญหาอื่นๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์, ไนโตรเจน, ออกซิเจน และเนื่องจากก๊าซที่เกิดในน้ำมันต้องใช้เวลาแพร่ขึ้นสู่อากาศ ดังนั้นจึงมีความล่าช้าของการแสดงปัญหาค่อนข้างมาก นอกจากนี้แล้วผลตรวจวัดไม่สามารถกลับไปสู่ประเภทของปัญหาได้

2) การเก็บตัวอย่างก๊าซบริเวณ Head space และนำมาวิเคราะห์แบบแยกชนิด ข้อดีของการตรวจวัดชนิดนี้คือ ทราบปริมาณก๊าซแยกชนิดและกลับไปสู่ประเภทของปัญหาได้ ข้อเสียคือ วิธีการค่อนข้างซับซ้อน และต้องใช้กับหม้อแปลงชนิดที่มี gas blanket ซึ่งมีช่องว่างเหนือน้ำมันเท่านั้น

3) Dissolved gas analysis (DGA) เป็นการนำตัวอย่างน้ำมันมาแยกก๊าซเพื่อหาปริมาณของก๊าซแต่ละชนิด สามารถใช้ได้กับหม้อแปลงที่ใช้ น้ำมันเป็นฉนวนทุกประเภท ซึ่งมีข้อดีคือกลับไปสู่ประเภทของปัญหาได้ ข้อเสียคือ วิธีการค่อนข้างซับซ้อน

### 2.2 สภาวะหลักที่ทำให้เกิดก๊าซที่แสดงความผิดปกติ

สภาวะผิดปกติ (Abnormal Condition) แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มตามความร้อนของสภาวะผิดปกติ [1]

1) Corona หรือ Partial discharge สร้างความร้อนไม่สูงนัก เป็นปัญหาทางไฟฟ้าที่ส่งพลังงานต่ำๆ ออกมา ในน้ำมันจะพบไฮโดรเจนและมีเทนในปริมาณพอสมควร และสามารถพบอีเทนและเอทิลีนปริมาณน้อยอยู่ด้วย หากดีสชาร์จในกระดาษจะพบการ

เพิ่มปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์

2) การเผาไหม้หรือการเกิดความร้อนเกินปกติ สร้างความร้อนปานกลาง และเป็นปัญหาที่เกิดอย่างต่อเนื่อง ปริมาณก๊าซจะสะสมไปตามเวลา หากเกิดขึ้นในน้ำมันส่วนเดียว จะพบไฮโดรเจน, มีเทน, อีเทน และเอทิลีน ปริมาณของแต่ละก๊าซขึ้นกับความร้อนจากปัญหานั้นๆ หากมีความร้อนสูงมาก กรณีปัญหาเกิดขึ้นบริเวณกระดาษ จะพบคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ ในปริมาณมากอันสืบเนื่องมาจากการเสื่อมของกระดาษ

3) การอาร์ก เป็นปัญหารุนแรงที่สุด มีความร้อนสูงมาก เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลอย่างต่อเนื่องของกระแสสูง ในน้ำมันจะพบไฮโดรเจนและอะเซทิลีนปริมาณมาก ส่วนมีเทนและเอทิลีนเกิดขึ้นไม่มากนัก หากปัญหาเกิดให้ส่วนที่มีกระดาษมาเกี่ยวข้องจะพบคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์

ก๊าซที่เกิดขึ้นเนื่องจากสภาวะผิดปกติ (Abnormal Condition) ประกอบด้วยก๊าซ 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1) ก๊าซที่สามารถติดไฟได้ดังนี้ ไฮโดรเจน ( $H_2$ ) มีเทน ( $CH_4$ ) คาร์บอนมอนอกไซด์ ( $CO$ ) อีเทน ( $C_2H_6$ ) เอทิลีน ( $C_2H_4$ ) และอะเซทิลีน ( $C_2H_2$ )

2) ก๊าซกลุ่มอื่นๆ ดังนี้ ออกซิเจน ( $O_2$ ) ไนโตรเจน ( $N_2$ ) และ คาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ )

### 2.3 วิธีการวิเคราะห์ก๊าซที่เจือปนในน้ำมัน

ในการวิเคราะห์ก๊าซที่เจือปนในน้ำมัน จะแยกก๊าซออกจากน้ำมัน จากนั้นก๊าซที่ได้จะถูกส่งเข้าสู่เครื่อง Gas Chromatography (GC) เพื่อแยกชนิดและวัดปริมาณเป็น part per million (ppm) พอทราบปริมาณ จะนำมาแปลผล โดยวิธีแปลผลปริมาณก๊าซมีหลายแบบ ขอกล่าวถึงวิธีที่นิยมและเหมาะสมกับงานวิจัยนี้ คือ

1) วิธี Dömenberg ratio [1] เป็นวิธีวิเคราะห์จากอัตราส่วนของปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นในน้ำมันหม้อแปลง คือ  $CH_4/H_2$ ,  $C_2H_2/C_2H_4$ ,  $C_2H_2/CH_4$ ,  $C_2H_6/C_2H_2$  โดยพิจารณาให้ตรง 3 ใน 4 ค่าของอัตราส่วนในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนสำหรับวิธี Dömenberg Ratio [1]

$CH_4/H_2$	$C_2H_2/C_2H_4$	$C_2H_2/CH_4$	$C_2H_6/C_2H_2$	Abnormal Condition
>1.0	<0.75	<0.3	>0.4	Thermal Decomposition
<0.1	Not Significant	<0.3	>0.4	Corona (Low Intensity PD)
>0.1 - <1.0	>0.75	>0.3	<0.4	Arcing (High Intensity PD)

2) วิธี R.R. Rogers (CEGB Fault Gas Ratios) [1] วิเคราะห์จากอัตราส่วนของก๊าซ  $CH_4/H_2$ ,  $C_2H_6/CH_4$ ,  $C_2H_4/C_2H_6$  และ  $C_2H_2/C_2H_4$ ,  $CO_2/CO$  แต่ละชุดเป็นอัตราส่วนของก๊าซเกิดที่อุณหภูมิสูงต่อก๊าซเกิดที่อุณหภูมิต่ำถัดลงมา อัตราส่วนเหล่านี้จะ

ถูกนำมาแปลงเป็น Code 0, 1, 2, 5 ในตารางที่ 2 แล้วจึงนำ Code ทั้งสี่มาแปลงผล ในตารางที่ 3 การแปล Code จะทำต่อเมื่อได้พิจารณา Gas Limits and warning level [1] แล้วเท่านั้น ต้องรับทราบอยู่เสมอว่าการใช้งานอัตราส่วนจากก๊าซสองชนิดที่มีปริมาณน้อยกว่าเกณฑ์จะทำให้การแปลผลผิดพลาด

ตารางที่ 2 CEGB Fault Gas Ratios [1]

RATIO	RANGE	CODE
CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>	<= 0.1	5
	> 0.1 < 1	0
	>= 1 < 3	1
	>= 3	2
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> /CH <sub>4</sub>	< 1	0
	>= 1	1
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	< 1	0
	>= 1 < 3	1
	>= 3	2
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	< 0.5	0
	>= 0.5 < 3	1
	>= 3	2

ตารางที่ 3 CEGB Fault Gas Diagnostics [1]

CODE				DIAGNOSIS
0	0	0	0	ปกติ
5	0	0	0	Partial discharge
1,2	0	0	0	ความร้อนเกิน แต่ < 150 °C
1,2	1	0	0	ความร้อนเกิน แต่อยู่ในช่วง 150 – 200 °C
0	1	0	0	ความร้อนเกิน แต่อยู่ในช่วง 200 – 300 °C
0	0	1	0	ความร้อนเกินในส่วนของตัวนำไฟฟ้า
1	0	1	0	เกิดกระแสไหลวนในขดลวด
1	0	2	0	เกิดกระแสไหลวนในแกนเหล็กและตัวถัง, จุดต่อร้อน
0	0	0	1	แฟลชโอเวอร์แต่ไม่มีกระแสต่อเนื่อง
0	0	1,2	1,2	อาร์ก โดยมีพลังงานไหลอย่างต่อเนื่อง
0	0	2	2	สปาร์ตต่อเนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่ลอยอยู่
5	0	0	1,2	Partial Discharge แบบมีร่องรอยความเสียหาย (ดูจาก CO)
CO <sub>2</sub> / CO > 11				ฉนวนกระดาษมีอุณหภูมิสูงกว่าการทำงานปกติ

3) วิธี California State University-Sacramento Guidelines (Key Gases) [1] ใช้ปริมาณก๊าซแต่ละชนิดมาแปลโดยตรง ผลจากก๊าซแต่ละชนิดไม่มีความเกี่ยวข้องกับก๊าซอื่นเลยดังตารางที่ 4 ซึ่งใช้เป็นข้อมูลสนับสนุน CEGB Fault Gas Ratios และ Gas Limits and warning level ให้มีความถูกต้องยิ่งขึ้น

ตารางที่ 4 California State University-Sacramento Guidelines [1]

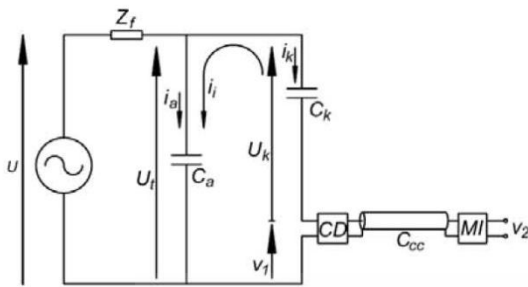
ก๊าซ	ปกติ (<)	ผิดปกติ (>)	แปลผล
Hydrogen	150 ppm	1000 ppm	โคโรน่า, อาร์ก
Methane	25	80	สปาร์ต
Ethane	10	35	บริเวณความร้อนเกิน
Ethylene	20	150	ความร้อนเกินรุนแรง
Acetylene	15	70	อาร์ก
Carbon monoxide	500	1000	ความร้อนเกินรุนแรง
Carbon dioxide	10,000	15,000	ความร้อนเกินรุนแรง
Total Combustibles	0.03 %	0.5 %	-

4) วิธี Key Gas [1] เป็นการหาคุณลักษณะของความผิดปกติแบ่งออกเป็น 4 ประเภทตามก๊าซหลัก 4 ชนิด คือ C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, CO, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> และ H<sub>2</sub>

#### 2.4 การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลง

ดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในน้ำมันหม้อแปลงที่มีโพรงหรือฟองก๊าซ หรือสิ่งเจือปนแปลกปลอมที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ที่ต่ำกว่าในน้ำมันหม้อแปลงหลัก ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงหรือสิ่งเจือปนดังกล่าวมีค่าสูงกว่าฉนวนรอบๆ ซึ่งอาจพิสูจน์ได้จากกราฟวิเคราะห์หาค่าที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ที่ต่างกันวางซ้อนกัน ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอชั้นฉนวนชั้นใดชั้นหนึ่งได้รับแรงดันถึงระดับหนึ่งแล้วจะทำให้โพรงก๊าซมีความเครียดสนามไฟฟ้าเกินค่าวิกฤต และเกิดเบรกดาวน์ในโพรงก๊าซเช่นนี้จะทำให้อิทธิพลโดยรอบเสียหาย การฉนวนเสื่อมสภาพ อายุการใช้งานจะสั้นลง และนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ได้ในที่สุด การวัดและประเมินค่าดิสชาร์จบางส่วนภายในน้ำมันหม้อแปลง จะใช้วิธีวิเคราะห์จากวงจรสมมูลการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนตามข้อกำหนดในมาตรฐานสากล IEC 60270 Third Edition, (2000) [3] ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง  $U$ , ตัวกรองสัญญาณ (Filter) จากแหล่งจ่าย  $Z_f$ , วัสดุทดสอบ (Test Object)  $C_t$ , ตัวเก็บประจุคัปปลิง (Coupling Capacitor)  $C_c$ , อุปกรณ์รับสัญญาณ (Coupling Device)  $CD$ , สายนำสัญญาณ (Connecting Cable)  $CC$ , และเครื่องมือวัด  $M$  ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 2 และวงจรจริงที่ใช้ในการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลงแสดงดังรูปที่ 3





รูปที่ 2 วงจรสมมูลการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน [3]



รูปที่ 3 วงจรจริงที่ใช้ทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลง

หน้าที่การทำงานและคุณสมบัติสำคัญของอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรทดสอบเป็นดังนี้

- 1) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูง  $U$  ใช้ในการจ่ายแรงดันให้วงจรทดสอบและมีขนาดพิกัดเพียงพอที่จะจ่ายโหลดได้
- 2) ตัวกรองสัญญาณหรืออิมพีแดนซ์  $Z_f$  ใช้ในการกรองสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่าย เช่น ฮาร์มอนิกส์ และดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดภายในหม้อแปลงทดสอบเองที่ใช้เป็นแหล่งจ่าย เป็นต้น และหน้าที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ ป้องกันดิสชาร์จบางส่วนจากวงจรทดสอบไหลย้อนลงกราวด์ผ่านทางแหล่งจ่ายตัวกรองดังกล่าวต้องทนแรงดันทดสอบได้และปราศจากดิสชาร์จบางส่วนที่แรงดันทดสอบ ดังนั้นในกรณีที่ใช้หม้อแปลงทดสอบปราศจากดิสชาร์จบางส่วนเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงอาจไม่จำเป็นต้องใช้ตัวกรอง เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงทดสอบมีคุณสมบัติเป็นตัวเหนี่ยวนำอยู่แล้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งหม้อแปลงทดสอบที่มีขนาดไม่ใหญ่มากนัก
- 3) ตัวเก็บประจุคัปปลิง  $C_b$  ใช้เป็นส่วนเชื่อมต่อหรือคัปปลิงสัญญาณความถี่สูงให้ครบวงจรระหว่าง  $C_a$ ,  $C_k$  และ  $CD$  ดังนั้นตัวเก็บประจุคัปปลิงต้องเป็นชนิดที่มีค่าความเหนี่ยวนำภายใน (Stray Inductance) ต่ำ ทนแรงดันได้โดยปราศจากดิสชาร์จบางส่วนที่แรงดันทดสอบ อาจเรียกว่า "Blocking Capacitor"
- 4) อุปกรณ์รับสัญญาณ  $CD$  และเครื่องมือวัด  $MI$  อุปกรณ์ทั้งสองส่วนนี้จะทำงานร่วมกันคือทำหน้าที่อินทิเกรต (Integrate) กระแสพัลส์  $i$  ที่ไหลในวงจรทดสอบเนื่องจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยมีสายนำสัญญาณ  $CC$  เป็นสายที่เชื่อมต่อระหว่าง  $CD$  และ  $MI$  อุปกรณ์รับสัญญาณ จะทำหน้าที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ

เป็นตัวกรองกระแสความถี่ต่ำ (50 ถึง 400 เฮิรตซ์) และฮาร์มอนิกส์ต่างๆ จากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่ให้เข้าไปที่เครื่องมือวัดได้ ส่วนเครื่องมือวัดดิสชาร์จบางส่วนจะทำหน้าที่สำคัญอีก 3 ประการคือ เป็นวงจรมอบสัญญาณ (Amplifier) เป็นวงจรกรองสัญญาณชนิดผ่านแถบ เพื่อลดสัญญาณรบกวนที่มาจากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบ และลดสัญญาณความถี่สูงที่มาจากคลื่นวิทยุและใช้ในการแสดงผลดิสชาร์จบางส่วน

หลักการการทำงานของวงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน เริ่มจากการค่อยๆ ป้อนแรงดันทดสอบจากแหล่งจ่าย  $U$  ผ่านตัวกรอง  $Z_f$  ให้กับวงจรทดสอบจนกระทั่งเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่วัสดุทดสอบ  $C_o$  ทำให้เกิดแรงดันตกที่ขั้วของ  $C_a$ ,  $C_k$  จะดิสชาร์จประจุไปที่  $C_b$  เพื่อชดเชยแรงดันตก ผลดังกล่าวทำให้เกิดกระแสพัลส์  $i$  ไหลวนครบวงจรระหว่าง  $C_a$ ,  $C_k$  และ  $CD$  ดังนั้น  $CD$  และ  $MI$  วัดประจุไฟฟ้าที่ถ่ายเทระหว่าง  $C_a$  และ  $C_k$  โดยการอินทิเกรตกระแสพัลส์  $i$  เพื่อนำไปแสดงผลต่อไป

### 3. ขั้นตอนการทดสอบ PD ในน้ำมันหม้อแปลง

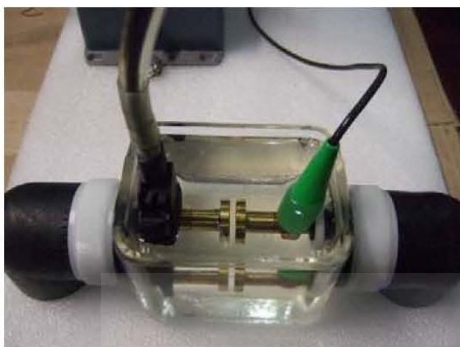
ขั้นตอนการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลง ได้แบ่งขั้นตอนการสอบเป็นหัวข้อต่อไปนี้

#### 3.1 การเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) ภาชนะทดสอบน้ำมันหม้อแปลง (Test Cell) ภาชนะทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลงยังไม่มีมาตรฐานสากลใดระบุ ผู้วิจัยจึงได้เทียบเคียงกับมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบค่าความคงทนของน้ำมันหม้อแปลง IEC 156 Second Edition, (1995-07) [4] ในเรื่องปริมาณตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ในการทดสอบ คือ 600 ml ซึ่งเป็นปริมาณที่เพียงพอกับการทดสอบ DGA ที่ต้องการตัวอย่างน้ำมันเพียง 150 ml ดังรูปที่ 4
- 2) อิเล็กโตรด เป็นการทดสอบภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ อิเล็กโตรดที่ใช้จึงเป็นแบบแผ่นระนาบขนาน ดังรูปที่ 4
- 3) น้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ในการทดสอบ เป็นน้ำมันหม้อแปลงใหม่ชนิด Mineral Oil ซึ่งเป็นน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้กันแพร่หลายมากที่สุด มีค่าจากการทดสอบดังตั้นดั่งนี้ ความชื้น 14 ppm [5] , ค่าความคงทนของ 67 kV [4] และปริมาณก๊าซดังตารางที่ 5
- 4) เครื่องมือวัดดิสชาร์จบางส่วน เป็นไปตามมาตรฐานสากล IEC 60270 Third Edition, (2000) [1] ดังรูปที่ 5
- 5) เครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง (Dissolved Gas Analysis, DGA) เป็นไปตามข้อกำหนดในมาตรฐานสากล ASTM D-3612-02 [6] ดังรูปที่ 6

ตารางที่ 5 ปริมาณก๊าซตั้งต้นก่อนการทดสอบ (ppm)

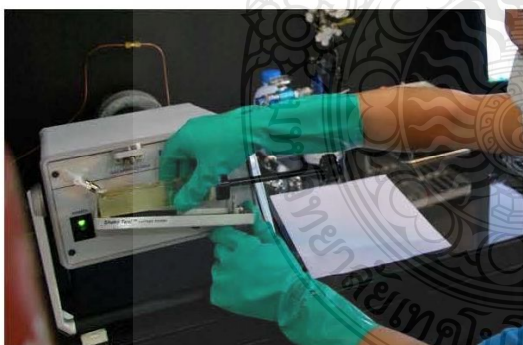
ก๊าซ	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
ปริมาณ	0	0	0	0	0	2	517



รูปที่ 4 ภาชนะทดสอบน้ำมันหม้อแปลง (Test Cell)



รูปที่ 5 เครื่องมือวัดดิสชาร์จบางส่วน



รูปที่ 6 เครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง

### 3.2 ขั้นตอนการทดสอบ

ทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลงตามรูปที่ 3 โดยปฏิบัติตามขั้นตอนดังนี้

- 1) ปรับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดตามที่กำหนด (ได้จากการทดสอบ)
- 2) เติมน้ำมันหม้อแปลงใหม่ในภาชนะทดสอบจำนวน 600 ml และทิ้งไว้ 5 นาที ก่อนเริ่มทดสอบเพื่อไม่ให้มีฟองก๊าซ

ภายใต้ห้องที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น

3) ค่อยๆ ป้อนแรงดันทดสอบจากแหล่งจ่าย  $U$  ให้กับวงจรทดสอบจนกระทั่งเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่น้ำมันหม้อแปลงตามค่าที่กำหนดในตารางที่ 6 คงค่าไว้ 15 นาที (เวลาได้จากการทดสอบ)

4) หยุดป้อนแรงดันและเก็บตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงไปทดสอบ DGA ตามมาตรฐานสากล ASTM D-3612-02 [6]

### 4. ผลการทดสอบ DGA

การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนที่น้อยกว่า 200 pC ซึ่งเป็นการดิสชาร์จที่มีพลังงานต่ำมาก ต้องใช้เวลาดูแลนานมากจึงจะทำให้ผล DGA เปลี่ยนแปลง จึงไม่ขอกล่าวถึงในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบ DGA ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่าเสมอ (หน่วย ppm)

No.	Description	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
1	>200 pC in oil	55	4	0	0	0	2	529
2	>500 pC in oil	149	13	0	0	0	4	514
3	>1,000 pC in oil	287	22	0	0	0	2	532
4	>5,000 pC in oil	1106	98	3	1	0	2	537
5	>10,000 pC in oil	1913	185	7	1	0	3	552
6	>20,000 pC in oil	3589	253	13	2	0	4	548

จากตารางที่ 6 ผลการทดสอบ DGA ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่าเสมอ อิเล็กโทรดแบบระนาบ-ระนาบ (Plane-to-Plane) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร ผลการทดสอบเป็นค่ากลางของการทดสอบ 5 ครั้ง โดยตัดค่าที่สูงสุดและต่ำสุดออก (ดูที่ H<sub>2</sub>) นำผลการทดลองมาวิเคราะห์ตามวิธีวิเคราะห์ในข้อ 2.3

วิเคราะห์โดยวิธี Dömenberg ratio [1] วิเคราะห์หว่าเกิดโคโรนาความรุนแรงต่ำ ในทุกระดับดิสชาร์จบางส่วน

วิเคราะห์โดยวิธี CEEB Fault Gas Ratios [1] ได้ Code (5 0 0 0) วิเคราะห์หว่าเกิดดิสชาร์จบางส่วน ในทุกระดับดิสชาร์จบางส่วน

วิเคราะห์โดยวิธี California State University-Sacramento Guidelines (Key Gases) [1] วิเคราะห์หว่าเกิดดิสชาร์จบางส่วนหรือมีสปาร์ก และผลการทดสอบที่มีดิสชาร์จบางส่วนน้อยกว่า 1000 pC วิธีนี้วิเคราะห์หว่าไม่มีความผิดปกติ

วิเคราะห์โดยวิธี Key Gas [1] พบว่าเกิดโคโรนาในน้ำมันหม้อแปลง

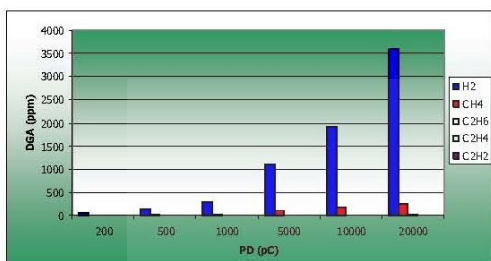
การวิเคราะห์ก๊าซที่เจือปนในน้ำมันหม้อแปลงในทุกวิธีที่อ้างถึงข้างต้น ไม่สามารถบอกระดับความรุนแรงของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้ ซึ่งจากการทดลองพบว่าระดับดิสชาร์จบางส่วนที่มากกว่า 20,000 pC จะเกิดเบรกดาวน์ในบางครั้ง

### 5. สรุป

จากการทดลองพบว่าเมื่อเกิดดิสชาร์จบางส่วน จะเกิดก๊าซไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) และมีเทน (CH<sub>4</sub>) ตั้งแต่ระดับเริ่มต้นของปัญหา



และเพิ่มขึ้นตามความรุนแรงตลอดช่วงของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน แสดงดังกราฟในรูปที่ 7 ผลการทดลองสามารถใช้วิเคราะห์หาแนวโน้มการเพิ่มความรุนแรงของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน เพื่อวางแผนบำรุงรักษาและป้องกันความเสียหายได้ทันทีที่ตรงตามวัตถุประสงค์การทดลอง



รูปที่ 7 กราฟแสดงผลการทดลอง

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเครื่องมือทดสอบดิสชาร์จบางส่วน (PD) และเครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง (DGA Analysis) จากบริษัท ดาดาเอ็นท์กรุ๊ป จำกัด และได้รับความอนุเคราะห์น้ำมันหม้อแปลงใหม่ที่ใช้ในงานวิจัยทั้งหมด จากบริษัท สุวรรณวงศ์ เอ็นจิเนียริง จำกัด

### เอกสารอ้างอิง

- [1] IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, IEEE Standard C57.104-1991, 1992
- [2] ธนพงศ์ สุวรรณศรี, แคททีเรีย สุวรรณศรี. 2551. การพัฒนาโปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบน้ำมันหม้อแปลงด้วยวิธีวิเคราะห์ก๊าซที่เจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31, นครนายก, 29-31 ตุลาคม 2551: 153-156.
- [3] High-voltage test techniques Partial discharge measurements, IEC Standard 60270 Third edition 2000-12, 2000
- [4] Insulating liquids-Determination of the breakdown voltage at power frequency-Test method, IEC Standard 156 Second edition 1995-07, 1995
- [5] Standard Test Method for Water in Insulating Liquids by Coulometric Karl Fischer Titration, ASTM Standard D 1533-00, 2005
- [6] Standard Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oil by Gas Chromatography, ASTM Standard D 3612 - 02, 2009



กลับสู่สารบัญหลัก

The 34<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-34)  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 34

*Volume I*

- ❖ ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- ❖ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- ❖ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

30 พฤศจิกายน - 2 ธันวาคม 2554  
ณ โรงแรมแอมบาสเดอร์ ซิตี้ จอมเทียน พัทยา จังหวัดชลบุรี  
ดำเนินการโดย ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม





รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 34

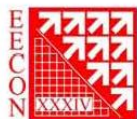
**Reviewers**

Akkarat Boonpoonga  
Amnart Suk Sri  
Amnoi Ruengwarce  
Amorn Jirasree-amornkun  
Anuchit Charcan  
Anupap Meesomboon  
Anuree Lorsawatsiri  
Anuwat Jangwanitlert  
Aphibul Pruksanubal  
Apichai Bhatranand  
Apichan Kanjanavapastit  
Apinunt Thanachayanont  
Apirada Namsang  
Apiwat Lek-uthai  
Arkhom Moungkhaodaeng  
Arkom Kaewrawang  
Arnon Isaramongkolrak  
Arporn Teeramongkonrasmee  
Arthit Sode-Yome  
Athikom Sarcephattananon  
Athapol Ngaopitakkul  
Banchara Burapattanasiri  
Benjamas Panomruttanarug  
Bongkoj Sookananta  
Boonchuay Supmonchai  
Boonruk Chipipop  
Boonsri Kaewkham-ai  
Boonyang Plangklang

**Affiliations**

King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
Khon Kaen University  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
Mahanakorn University of Technology  
Kasembundit University  
KhonKaen University  
Mahanakorn University of Technology  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
King Monkut's University of Technology Thonburi  
Mahanakorn University of Technology  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
Chulalongkorn University  
Srinakharinwirot University  
Khon Kaen University  
Mahanakorn University of Techonology  
Chulalongkorn university  
Siam University  
Eastern Asia University  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Kasembundit University  
King Monkut's University of Technology Thonburi  
Ubon Ratchathani University  
Chulalongkom Univeristy  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Chiang Mai University  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi





## รายชื่อผู้พิจารณาบทความ

### การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 34

#### Reviewers

Budhapon Sawetsakulanond

Cattareeya Suwanasri

Chai Chompoo-inwai

Chainarin Ekkaravarodome

Chainarong Klimance

Chaiwut Chat-uthai

Chaiyan Jettanasen

Chaiyaporn Khemapatapan

Chaiyaporn Lothongkam

Chaiyo Thammarat

Chaiyut Sumpavakup

Chanchai Thaijjiam

Chanchana Tangwongsan

Channarong Banmongkol

Chanchai Pluempitwiriyaewj

Charturong Tantibundhit

Chatchai Jantaraprim

Chatchai Suppitaksakul

Chirawat Wattapanich

Chiranut Sangiamsak

Chirasak Sinsukudomchai

Chirdpong Deelertpaiboon

Chow Chompoo-inwai

Chugiat Garagate

Chutipon Uyaisom

Chutthaval Jeraputra

David Banjerdpongchai

Decha Wilairat

#### Affiliations

Mahanakorn University of Technology

Naresuan University

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

King Mongkut's University of Technology North Bangkok

Srinakharinwirot University

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Dhurakij Pundit University

Mahanakorn University of Technology

South East Asia University

Mahanakorn University of Technology

Srinakharinwirot University

Chulalongkorn University

Chulalongkorn University

Chulalongkorn University

Thammasat University

Prince of Sonkla University

Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Walailak University

Khon Kaen University

South-East Asia University

King Mongkut's University of Technology North Bangkok

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Kasetsart University

Eastern Asia University

Mahidol University

Chulalongkorn University

Mahidol university



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 34

**Reviewers**

Denchai Worasawate  
Duang-arhit Srimoon  
Ekapon Siwapornsathain  
Issarachai Ngamroo  
Itarun Pitimon  
Ittipong Chaisayun  
Jakkree Srinonchat  
Jecrasuda Kosecyaporn  
Jirasak Chanwutitum  
Jirasuk Vilasdechanon  
Jitkomut Songsiri  
Jukkrit Tagapanij  
Kamon Jiraserecamornkul  
Kampol Woradit  
Kampree Thiravith  
Kanadit Chetpattananondh  
Kanat Poolsawasd  
Kanchana Silawarawet  
Kasem Utaikaifa  
Keerati Chayakulkheeree  
Khanittha Kaewdang  
Kiatiyuth Kveeyarn  
Kittiphong Meesawat  
Kittisak Tripipatpomchai  
Kittiwann Nimkerdphol  
Kobchai Dejhan  
Komsan Ifongesombut  
Komson Daroj

**Affiliations**

Kasetsart University  
Rangsit University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Rajamngala University of Technology Thanyaburi  
South-East Asia University  
Rajamngala University of Technology Thanyaburi  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
King Mongkuts University of Technology North Bangkok  
Chiang Mai University  
Chulalongkorn University  
Mahanakorn University of Technology  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Srinakharinwirot University  
Siam University  
Prince of Songkla University  
Mahidol University  
Siam University  
University of the Thai Chamber of Commerce  
Sripatum University  
Ubon Ratchathani University  
Kasetsart University  
Khon Kaen University  
Rangsit University  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Kasetsart University  
Ubonratchathani University



## รายชื่อผู้พิจารณาบทความ

### การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 34

#### Reviewers

Korpom Panyim  
 Kosin Chamnongthai  
 Krischonme Bhumkittipich  
 Krissada Asavaskulkeit  
 Krit Angkeaw  
 Kulyos Audomvongseree  
 Kunthphong Srisathit  
 Kusumal Chalermyanont  
 Mana Sriyudthsak  
 Manop Aorpimai  
 Mitchai Chongcheawchamnan  
 Miti Ruchanurucks  
 Monai Krairiksh  
 Mongkol Konghirun  
 Montree Siripruchyanun  
 Montree Kumngern  
 Montri Kamjanadecha  
 Montri Somdunyanok  
 Naeboon Hooncharon  
 Nalin Sidahao  
 Nalinrat Witsawakitti  
 Napat Sra-ium  
 Nararat Ruangchaijatupon  
 Narong Yoothanom  
 Narong Buabthong  
 Narongrit Sanajit  
 Nathabhat Phankong  
 Natham Koedsamang

#### Affiliations

Mahidol University  
 King Mongkut's University of Technology Thonburi  
 Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
 Mahidol University  
 King Mongkuts University of Technology North Bangkok  
 Chulalongkorn University  
 Mahanakorn Univeristy of Technology  
 Prince of Songkla University  
 Chulalongkorn University  
 Mahanakorn University of Technology  
 Prince of Songkla University  
 Kasetsart University  
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
 King Mongkut's University of Technology Thonburi  
 King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
 Prince of Songkla University  
 Siam University  
 Chulalongkorn University  
 Mahanakorn University of Technology  
 Siam University  
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
 Khon Kaen University  
 Sripatum University  
 Thammasat University  
 Mahankorn University of Technology  
 Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
 Kasembundit University



## รายชื่อผู้พิจารณาบทความ

### การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 34

#### Reviewers

Nattavut Chayavanich  
 Nattha Jindapetch  
 Natthaphob Nimpitiwan  
 Natthawuth Somakettarin  
 Nimit Boonpirom  
 Nipat Jongsawat  
 Nisachon Tangsangiumvisai  
 Nitipong Panklang  
 Norrarat Wattanamongkhoh  
 Norrarat Wattanamongkhoh  
 Nuntiya Chaiyabut  
 Opas Chutatape  
 Paitoon Rakluca  
 Pakit Suwat  
 Pakorn Kaewtrakulpong  
 Panavy Pookaiyaudom  
 Panthep Laohachai  
 Pasawee Srimode  
 Peerapol Jirapong  
 Peerapol Yuvapoositanon  
 Peerawut Yutthagowith  
 Peerayot Sanposh  
 Pennapa Pairodamonchai  
 Petch Nantivatana  
 Phaisan Ngamjanyaporn  
 Phaisarn Sutheebanjard  
 Phakkawat Jantrec  
 Phichet Moungnoul

#### Affiliations

King Mongkut's University of Technology Thonburi  
 Prince of Songkla University  
 Bangkok University  
 Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
 Sripatum University  
 Siam University  
 Chulalongkorn University  
 Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
 Chulalongkorn University  
 Chulalongkorn University  
 Bangkok University  
 Rangsit University  
 Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
 Siam University  
 King Mongkut's University of Technology Thonburi  
 Mahanakorn University of Technology  
 Dhurakij Pundit University  
 Sripatum University  
 Chiang Mai University  
 Mahanakorn University of Technology  
 King Monkut's Institute of Technology Ladkrabang  
 Kasetsart University  
 King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
 Sripatum University  
 Rangsit University  
 Siam University  
 Rajamangala University of Technology Suvamabhumi  
 King Monkut's Institute of Technology Ladkrabang





รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 34

**Reviewers**

Phumin Kirawanich  
Pichai Aree  
Pichet Wisartpong  
Pinit Jitjing  
Pinit Thepsatorn  
Pipat Prommee  
Pisit Vanichchanut  
Pisit Wisutmtheekorn  
Piya Warabuntaweekul  
Pongsawat Kotchapoom  
Pongsack Promwong  
Poonlap Lamsrichan  
Pornchai Phukpattaranont  
Prajuab Pawarangkoon  
Pramin Artrit  
Pranchalee Rattanasakornchai  
Prasopchok Hothongkham  
Prayoot Akkarackthalin  
Preecha Kocharoen  
Promsak Apiratikul  
Puangtip Phadungrot  
Punyaphat Phumiphak  
Punyawi Jamjareekul  
Rachu Punchalard  
Rangsipan Marukatat  
Rawid Banchuin  
Rungsimant Sitdhikorn  
Sakchai Thipchaksurat

**Affiliations**

Mahidol University  
Thammasat University  
Mahanakorn University of Technology  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
Srinakharinwirot University  
King Monkut's Institute of Technology Ladkrabang  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
Mahanakorn University of Technology  
Bangkok University  
Eastern Asia University  
Mahanakorn University of Technology  
Kasetsart University  
Prince of Songkla University  
Mahanakorn University of Technology  
Khonkaen University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Siam University  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
Sripatum University  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
Mahanakorn University of Technology  
Mahanakorn University of Technology  
Dhurakij Pundit University  
Mahanakorn University of Technology  
Mahidol University  
Siam University  
Mahanakorn university of Technology  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang





## รายชื่อผู้พิจารณาบทความ

### การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 34

#### Reviewers

Sakorn Po-ngam  
 Salitip Sinthusonthisat  
 Samphan Phrompichai  
 Samroeng Hintamai  
 Sanchai Dechanupaprittha  
 Sangsuree Vasupongayya  
 Sanun Srisuk  
 Sarawan Wongsa  
 Sawat Bunnjaweht  
 Seangrawee Buakaew  
 Semsak Uatrongjit  
 Sirichai Dangeam  
 Sirivit Tacchajedcadarungsri  
 Siriwich Tadsuan  
 Sittiporn Petchakit  
 Somboon Nuchprayoon  
 Somboon Sooksatra  
 Somchai Biansoongnern  
 Somchai Hiranvarodom  
 Somchat Jiriwibhakorn  
 Somkiat Piangprantong  
 Sommart Sang-Ngern  
 Somnida Bhatranand  
 Sompong Toomsawude  
 Somying Thainimit  
 Somyot Kaitwanidvilai  
 Songkran Kantawong  
 Songphol Kanjanachuchai

#### Affiliations

King Mongkut's University of Technology Thonburi  
 Mahanakorn University of Technology  
 Mahanakorn University of Technology  
 Sripatum University  
 Kasetsart University  
 Prince of Songkla University  
 Mahanakorn University of Technology  
 King Monkut's University of Technology Thonburi  
 Mahanakorn University of Technology  
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
 Chiang Mai University  
 Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
 Khon Kean University  
 South East Asia University  
 Siam University  
 Chiang Mai University  
 Rangsit University  
 Rajamangala university of technology Thanyaburi  
 Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
 South-East Asia University  
 Mahanakorn University of Technology  
 Mahidol University  
 Siam University  
 Kasetsart University  
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
 Bangkok University  
 Chulalongkorn University



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 34

**Reviewers**

Sorawat Chivapreecha  
Suchada Sitjongsataporn  
Suchart Yammen  
Suchin Trirongjitmoah  
Suksun Nungam  
Sumate Naetiladdanon  
Sumrit Hongsasutra  
Suncat Pranonsatit  
Supachai Voropojpisut  
Supannika Wattana  
Supatana Auehvekiat  
Supattana Nirukkanaporn  
Supawadee Swatdiponphallop  
Surachai Chaitusaney  
Surapan Airphaiboon  
Surapol Jantorn  
Surapong Suwankawin  
Suree Pumrin  
Suthee Rukkaphan  
Suwat Pattaramalai  
Thanapong Thanasaksiri  
Tanet Wonghong  
Tanin Duangjan  
Tasanee Chayavanich  
Tawan Phurat  
Thamvarit Singhavilai  
Thanadol Pritranan  
Thanakorn Namhormchan

**Affiliations**

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Mahanakorn University of Technology  
Naresuan University  
Ubon Ratchathani University  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Khon Kaen University  
Kasetsart University  
Thammasat University  
Naresuan University  
Chulalongkorn University  
Rangsit University  
Khon Kaen University  
Chulalongkorn University  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Sripitum University  
Chulalongkorn University  
Chulalongkorn University  
Kasembundit University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Chiang Mai University  
Bangkok University  
Srinakharinwirot University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Siam University  
Mahidol University  
Mahidol University  
Eastern Asia University



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 34

**Reviewers**

Thanapat Promwattanapakdee  
 Thanathip Sum-Im  
 Thavatchai Tayjanant  
 Thecrapol Muankhaw  
 Thecrayod Wiangtong  
 Thecrayut Janjaem  
 Thidarat Tawsook  
 Thumrongrat Amornraksa  
 Toempong Phetchakul  
 Tomorn Soonthornnapa  
 Thaschagon Onboonuca  
 Tuchsanaï Ploysuwan  
 Ukrit Mankong  
 Veerachai Malyavej  
 Vichai Saelee  
 Vijit Kinnares  
 Vinai Silaruam  
 Viriya Pichetjamroen  
 Virote Pirajnanchai  
 Vladimir Buntilev  
 Vorapong Silaphan  
 Vuttipon Tarateeraseth  
 Vyapote Supabowornsation  
 Walisa Romsaiyud  
 Wanchai Chankaipol  
 Wanchai Chimhavee  
 Wanchai Pijitrojana  
 Wanchai Subsingha

**Affiliations**

Sripatum University  
 Srinakharinwirot University  
 Chulalongkorn University  
 Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
 Mahanakorn University of Technology  
 Kasembundit University  
 Bangkok University  
 King Mongkut's University of Technology Thonburi  
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
 Siam University  
 Eastern Asia University  
 Siam University  
 Chiang Mai University  
 Mahanakorn University of Technology  
 South-East Asia University  
 King Mongkut's Institute of Technology of Ladkrabang  
 Mahanakorn University of Technology  
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
 Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
 Mahidol University  
 Mahanakorn University of Technology  
 Srinakharinwirot University  
 Siam University  
 Siam University  
 Sripatum University  
 University of the Thai Chamber of Commerce  
 Thammasat University  
 Rajamangala University of Technology Thanyaburi



## รายชื่อผู้พิจารณาบทความ

### การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 34

#### Reviewers

Wanchak Lenwari  
 Wannarat Suntiamomtut  
 Warayut Kampeerawat  
 Watcharachai Wiriyasuttiwong  
 Watis Leclapatra  
 Wattanapong Kurdtongmee  
 Weerapun Rungsevijitprapa  
 Wekin Piyarat  
 Werachet Khan-ngern  
 Werapon Chiracharit  
 Wichit Krucasuk  
 Widhyakorn Asdornwised  
 Wijitra Petchakit  
 Wiklom Teerapabkajorndet  
 Wilaiporn Lee  
 Winyu Sawaengsinkasikit  
 Wipavan Narksarp  
 Worakarn Wongsachua  
 Worapol Pongpech  
 Wuthiporn Loetwassana  
 Yodchanan Wongsawat  
 Yongyuth Naras  
 Yotaka Chompusri  
 Youthana Kulvitit  
 Yutana Chongjarearn  
 Yuttana Kumsuwan  
 Yuttapong Jiraraksoapakun  
 Ong-Art Sadmai

#### Affiliations

King Mongkut's University of Technology Thonburi  
 Prince of Songkla University  
 Mahanakorn University of Technology  
 Srinakharinwirot University  
 Khon Kaen University  
 Walailak University  
 Chulalongkorn University  
 Srinakharinwirot University  
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
 King Mongkut's University of Technology Thonburi  
 Sripatum University  
 Chulalongkorn University  
 Walailak University  
 Prince of Songkla University  
 King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
 Kasembundit University  
 Siam University  
 Ubon Ratchathani University  
 Dhurakijpundit University  
 Mahanakorn University of Technology  
 Mahidol University  
 Siam University  
 King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
 Chulalongkorn University  
 Dhurakij Pundit University  
 Chiang Mai University  
 King Mongkut's University of Technology Thonburi  
 Rajamangala University of Technology Thanyaburi

## สารบัญ

PW045	การศึกษาการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กจากอาร์เอฟไอดีความถี่ 13.56 MHz ที่ส่งผลกระทบต่อหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ อัญชดี แสงดาววี และ कमกฤตย์ ชมสุวรรณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	181
PW046	การศึกษาผลของสนามไฟฟ้าแบบแผ่นฉนวนบางต่อการลดก๊าซมลพิษจากท่อไอเสียรถยนต์เครื่องเบนซิน กฤษณ์ กิจวัฒนา ศิริวัฒน์ โทธิเวชกุล และ สุธี ลีจิ่งเพิ่มพูน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	185
PW047	การวิเคราะห์ก๊าซในน้ำมันหม้อแปลงเพื่อตรวจสอบดิซซาร์บางส่วนในหม้อแปลงกำลัง จิรศักดิ์ บุญโชติ <sup>1</sup> นัทรชัช สุกพิทักษ์สกุล <sup>1</sup> และ ธนพงศ์ สุวรรณศรี <sup>2</sup> <sup>1</sup> มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี <sup>2</sup> มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	189
PW048	การจำลองอาร์คทฤษฎีในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้โปรแกรม Scilab/Xcos อัมพรชัย ภูผล และ อานันท์วัฒน์ คุณากร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	193
PW049	การกำจัดตะกรันโดยใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าหมุนความถี่แปรผันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ การใช้พลังงานในระบบทำความเย็น พีรพล จิราพงศ์ และ จิรวัฒน์ เจริญจรัส มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	197
PW050	ชุดทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนของกิโวลต์อวาร์มิเตอร์โดยใช้การบันทึกภาพวิดีโอที่งานหมูน สมชาย เปียนสูงเนิน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	201
PW051	การใช้วิธีที่เหมาะสมที่สุดเพื่อการสร้างโรกอฟสกีค้อยล์บนแผ่นวงจรพิมพ์ วรงค์ศักดิ์ แก้วแดง กิตติพงษ์ ตันมิตร และ อำนวย สุขศรี มหาวิทยาลัยขอนแก่น	205
PW052	การออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบใช้การอัดประจุสองขั้ว พีรวุฒติ ยุทธโกวิท อานันท์วัฒน์ คุณากร ปุณยวีร์ ฉายศิริ และ บุญยพล เพาพาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	209



## การวิเคราะห์ก๊าซในน้ำมันหม้อแปลงเพื่อตรวจสอบดิซชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงกำลัง Dissolved Gas Analysis for Partial Discharge Detection in Power Transformers

จิรศักดิ์ บุญโชติ<sup>1</sup> ฉัตรชัย สุขพิทักษ์สกุล<sup>1</sup> และ ธนพงษ์ สุวรรณศรี<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 0-2549-4990-2 E-Mail: en\_jeerasak@yahoo.com

<sup>2</sup>บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติสิรินธร ไทย-เยอรมัน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนนพหลโยธิน แขวงวงษ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800 โทรศัพท์ 02-913-2500 E-Mail: thanapongs@kmutnb.ac.th

### บทคัดย่อ

การตรวจวัดดิซชาร์จบางส่วนภายในหม้อแปลงกำลัง สามารถทำได้หลายวิธี การวิเคราะห์ก๊าซที่เจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงเป็นวิธีหนึ่งที่มีความนิยมอย่างมาก เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถตรวจหาความผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องดับไฟหรือปลดโหลด เมื่อน้ำมันหม้อแปลงสัมผัสความร้อน จะทำให้เกิดก๊าซชนิดต่างๆ ตามประเภทของความผิดปกติ ซึ่งความสัมพันธ์ของการแตกตัวของก๊าซในน้ำมันหม้อแปลงกับระดับความร้อน สามารถนำมาวิเคราะห์ เพื่อใช้ในการประเมินระดับความรุนแรงของความผิดปกติ ก่อนที่จำนวนหม้อแปลงไฟฟ้าจะได้รับความเสียหายรุนแรง งานวิจัยนี้เน้นการตรวจสอบดิซชาร์จบางส่วน ผลการทดลองพบว่าเมื่อเกิดดิซชาร์จบางส่วนมากกว่า 200pC จะเกิดก๊าซไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) และมีเทน (CH<sub>4</sub>) ตั้งแต่ระดับเริ่มต้นของปัญหา และเพิ่มขึ้นตามความรุนแรงตลอดช่วงของการเกิดดิซชาร์จบางส่วน

**คำสำคัญ:** ดิซชาร์จบางส่วน, ก๊าซที่เจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง

### Abstract

Various methods have been applied in detecting the Partial Discharge (PD) in the power transformers. Dissolved Gas Analysis (DGA) is one of the most useful techniques to detect incipient faults in the oil-filled transformers due to it can be used to detect fault without off-line or disconnecting load. As the transformer under the thermal stress, it cause of insulation oil decomposition to gases depend on the degree of thermal stress. Analysis of these relationships can be used to assess severity of abnormalities within the first transformer insulation transformer has been severely affected. Approach to maintenance and damage prevention is timely. This study focuses on partial discharge detection. As the experimental results, it is found that when the partial discharge occurred More than 200pC., the hydrogen (H<sub>2</sub>) and methane

(CH<sub>4</sub>) can be detected that will be the beginning of the problem and it will increase severity during the partial discharge.

**Keywords:** Partial Discharge, Dissolved Gas Analysis, DGA

### 1. บทนำ

ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า หากหม้อแปลงไฟฟ้าเกิดความเสียหายจะส่งผลกระทบต่ออย่างมากทั้งผู้ผลิตและผู้ใช้ไฟฟ้า ปัจจุบันมีวิธีตรวจสอบมากมายเพื่อแจ้งเตือนล่วงหน้าก่อนปัญหาลุกลามใหญ่โต การวิเคราะห์ก๊าซที่เจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง (Dissolved Gas Analysis, DGA) [1] เป็นวิธีหนึ่งที่มีความนิยมอย่างมาก งานวิจัยนี้ได้จำลองการเกิดดิซชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลง เพื่อวิเคราะห์หาแนวโน้มความเสียหายขั้นรุนแรงในระดับที่เป็นอันตรายต่อหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อเป็นแนวทางในการบำรุงรักษาและป้องกันความเสียหายนั้นได้ทันทั้งที่

### 2. หลักการและทฤษฎี

#### 2.1 วิธีการตรวจวัดก๊าซ

การตรวจวัดที่นิยมทำกันในปัจจุบันมีอยู่ 3 วิธี คือ [1]

1) Total combustible gas (TCG) เป็นการวัดปริมาณก๊าซที่คิดไฟที่เกิดขึ้นในตัวหม้อแปลง คือ มีเทน, อีเทน, เอทิลีน, อะเซทิลีน, คลอโรนมอนอกไซด์ และ ไฮโดรเจน เป็นวิธีที่ใช้กับหม้อแปลงชนิดที่มี gas blanket ซึ่งมีช่องว่างเหนือน้ำมัน และไม่สามารถใช้กับหม้อแปลงที่ใช้ conservator ซึ่งมีน้ำมันเต็มถังได้ ก๊าซที่ได้จะลอยอยู่บนน้ำมัน โดยมี gas blanket ปกป้องกันไม่ให้ไหลเข้าออกภายนอกได้

2) การเก็บตัวอย่างก๊าซบริเวณ head space และนำมาวิเคราะห์แบบแยกชนิด

3) Dissolved gas analysis (DGA) เป็นการนำตัวอย่างน้ำมันมาแยกก๊าซเพื่อหาปริมาณของก๊าซแต่ละชนิด สามารถใช้ได้กับหม้อแปลงที่ใช้น้ำมันเป็นฉนวนทุกประเภท ซึ่งมีข้อดีคือแปลกลับไปสู่ประเภทของปัญหาได้ ข้อเสียคือ วิธีการค่อนข้างซับซ้อน

## 2.2 สภาวะหลักที่ทำให้เกิดก๊าซที่แสดงความผิดปกติ

สภาวะผิดปกติ (Abnormal Condition) แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มตามความร้อนของสภาวะผิดปกติ [1]

1) Corona หรือ Partial discharge สร้างความร้อนไม่สูงนัก เป็นปัญหาทางไฟฟ้าที่ส่งพลังงานต่ำๆ ออกมา

2) การเผาไหม้หรือการเกิดความร้อนเกินปกติ สร้างความร้อนปานกลาง และเป็นปัญหาที่เกิดอย่างต่อเนื่อง ปริมาณก๊าซจะสะสมไปตามเวลา

3) การอาร์ก เป็นปัญหารุนแรงที่สุด มีความร้อนสูงมากเกิดขึ้นเนื่องจากการไหลอย่างด้อยของกระแสสูง

ก๊าซที่เกิดขึ้นเนื่องจากสภาวะผิดปกติ (Abnormal Condition) ประกอบด้วยก๊าซ 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

(1) ก๊าซที่สามารถติดไฟได้ดังนี้ ไฮโดรเจน ( $H_2$ ) มีเทน ( $CH_4$ ) คาร์บอนมอนอกไซด์ ( $CO$ ) เอทิลีน ( $C_2H_4$ ) และอะเซทิลีน ( $C_2H_2$ )

(2) ก๊าซกลุ่มอื่นๆ ดังนี้ ออกซิเจน ( $O_2$ ) ไนโตรเจน ( $N_2$ ) และ คาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ )

## 2.3 วิธีการวิเคราะห์ก๊าซที่เจือปนในน้ำมัน

ในการวิเคราะห์ก๊าซที่เจือปนในน้ำมัน จะแยกก๊าซออกจากน้ำมัน จากนั้นก๊าซที่ได้จะถูกส่งเข้าสู่เครื่อง Gas Chromatography (GC) เพื่อแยกชนิดและวัดปริมาณเป็น part per million (ppm) เมื่อทราบปริมาณก็นำมาแปลผลเพื่อใช้งาน วิธีแปลผลปริมาณก๊าซมีหลายแบบ ขอกล่าวถึงวิธีที่นิยมและเหมาะสมกับงานวิจัยนี้ คือ

1) วิธี Dömenberg ratio [1] เป็นวิธีวิเคราะห์จากอัตราส่วนของปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นในน้ำมันหม้อแปลง คือ  $CH_4/H_2$ ,  $C_2H_2/C_2H_4$ ,  $C_2H_2/CH_4$ ,  $C_2H_2/C_2H_6$  โดยพิจารณาให้ตรง 3 ใน 4 ค่าของอัตราส่วน

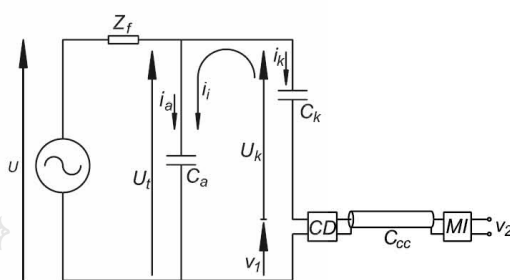
2) วิธี R.R. Rogers (CEGB Fault Gas Ratios) [1] วิเคราะห์จากอัตราส่วนของก๊าซ  $CH_4/H_2$ ,  $C_2H_4/CH_4$ ,  $C_2H_2/C_2H_4$  และ  $C_2H_2/C_2H_6$ ,  $CO_2/CO$  แต่ละชุดเป็นอัตราส่วนของก๊าซเกิดที่อุณหภูมิสูงต่อก๊าซเกิดที่อุณหภูมิต่ำถัดลงมา อัตราส่วนเหล่านี้จะถูกนำมาแปลผลเป็น code 0, 1, 2, 5 แล้วจึงนำ code ทั้งสี่มาแปลผล การแปล code จะทำต่อเมื่อได้พิจารณา Gas Limits and warning level [1] แล้วเท่านั้น

3) วิธี California State University-Sacramento Guidelines (Key Gases) [1] ใช้ปริมาณก๊าซแต่ละชนิดมาแปลโดยตรง ผลจากก๊าซแต่ละชนิดไม่มีความเกี่ยวข้องกับก๊าซอื่นเลย ซึ่งใช้เป็นข้อมูลสนับสนุน CEGB Fault Gas Ratios และ Gas Limits and warning level ให้มีความถูกต้องยิ่งขึ้น

4) วิธี Key Gas [1] เป็นการหาคุณลักษณะของความผิดปกติแบ่งออกเป็น 4 ประเภทตามก๊าซหลัก 4 ชนิด คือ  $C_2H_4$ ,  $CO$ ,  $C_2H_2$  และ  $H_2$

## 2.4 การทดสอบดิซชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลง

ใช้วิธีวิเคราะห์จากวงจรสมมูลการตรวจจับดิซชาร์จบางส่วนตามข้อกำหนดในมาตรฐานสากล IEC 60270 Third Edition,(2000) [3] ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง  $U$ , ตัวกรองสัญญาณ (Filter) จากแหล่งจ่าย  $Z_f$ , วัสดุทดสอบ (Test Object)  $C_o$ , ตัวเก็บประจุคัปปลิง (Coupling Capacitor)  $C_c$ , อุปกรณ์รับสัญญาณ (Coupling Device)  $CD$ , สายนำสัญญาณ (Connecting Cable)  $CC$ , และเครื่องมือวัด  $MI$  ตามลำดับแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 วงจรสมมูลการตรวจจับดิซชาร์จบางส่วน [3]

หน้าที่การทำงานและคุณสมบัติสำคัญของอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรทดสอบเป็นดังนี้

- 1) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูง  $U$  ใช้ในการจ่ายแรงดันให้วงจรทดสอบและมีขนาดที่คิดเพียงพอที่จะจ่ายโหลดได้
- 2) ตัวกรองสัญญาณหรืออิมพีแดนซ์  $Z_f$  ใช้ในการกรองสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่าย เช่น ฮาร์โมนิกส์ และดิซชาร์จบางส่วนที่เกิดภายในหม้อแปลงทดสอบเองที่ใช้เป็นแหล่งจ่าย เป็นต้น
- 3) ตัวเก็บประจุคัปปลิง  $C_c$  ใช้เป็นส่วนเชื่อมต่อหรือคัปปลิงสัญญาณความถี่สูงให้ครบวงจรระหว่าง  $C_o$ ,  $C_c$  และ  $CD$  ดังนั้นตัวเก็บประจุคัปปลิงต้องเป็นชนิดที่มีค่าความเหนี่ยวนำภายใน (Stray Inductance) ต่ำ ทนแรงดันได้โดยปราศจากดิซชาร์จบางส่วนที่แรงดันทดสอบ อาจเรียกว่า "Blocking Capacitor" (อังกฤษ)
- 4) อุปกรณ์รับสัญญาณ  $CD$  และเครื่องมือวัด  $MI$  อุปกรณ์ทั้งสองส่วนนี้จะทำงานร่วมกันคือทำหน้าที่อินทิเกรต (Integrate) กระแสพัลส์  $i_i$  ที่ไหลในวงจรทดสอบเนื่องจากการเกิดดิซชาร์จบางส่วน โดยมีสายนำสัญญาณ  $CC$  เป็นสายที่เชื่อมต่อระหว่าง  $CD$  และ  $MI$  อุปกรณ์รับสัญญาณจะทำหน้าที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือเป็นตัวกรองกระแสความถี่ต่ำ (50 ถึง 400 เฮิรตซ์)

หลักการทำงานของวงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับดิซชาร์จบางส่วน เริ่มจากการค่อยๆ ป้อนแรงดันทดสอบจากแหล่งจ่าย  $U$  ผ่านตัวกรอง  $Z_f$  ให้กับวงจรทดสอบจนกระทั่งเกิดดิซชาร์จบางส่วนที่วัสดุทดสอบ  $C_o$  ทำให้เกิดแรงดันตกที่ขั้วของ  $C_o$ ,  $C_c$  จะดิซชาร์จประจุไปที่  $C_c$

เพื่อชดเชยแรงดันตก ผลดังกล่าวทำให้เกิดกระแสพัลส์  $i_i$  ไหลวนครบวงจรระหว่าง  $C_x$ ,  $C_u$  และ  $CD$  ดังนั้น  $CD$  และ  $MI$  วัดประจุไฟฟ้าที่ถ่ายเทระหว่าง  $C_u$  และ  $C_x$  โดยการอินทิเกรตกระแสพัลส์  $i_i$  เพื่อนำไปแสดงผลต่อไป

### 3. ขั้นตอนการทดสอบ PD ในน้ำมันหม้อแปลง

ขั้นตอนการทดสอบคิสรารัจวงส่วนในน้ำมันหม้อแปลง ได้แบ่งขั้นตอนการสอบเป็นหัวข้อต่อไปนี้

#### 3.1 การเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) ภาชนะทดสอบน้ำมันหม้อแปลง (Test Cell) ผู้วิจัยจึงได้เทียบเคียงกับมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบค่าความคงทนของน้ำมันหม้อแปลง IEC 156 Second Edition,(1995-07) [4] ในเรื่องปริมาณตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ในการทดสอบ คือ 600 ml ซึ่งเป็นปริมาณที่เพียงพอกับการทดสอบ DGA ที่ต้องการตัวอย่างน้ำมันเพียง 150 ml
- 2) อิเล็กโตรด เป็นการใช้ทดสอบภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ อิเล็กโตรดที่ใช้จึงเป็นแบบแผ่นระนาบขนาน ดังรูปที่ 2
- 3) น้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ในการทดสอบ เป็นน้ำมันหม้อแปลงใหม่ชนิด Mineral Oil ซึ่งเป็นน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้กันแพร่หลายมากที่สุด มีค่าจากการทดสอบดังคั้งนี้ ความชื้น 14 ppm. [5] , ค่าความคงทนฉนวน 67 kV [4] และปริมาณก๊าซดังตารางที่ 1
- 4) เครื่องมือวัดคิสรารัจวงส่วน เป็นไปตามมาตรฐานสากล IEC 60270 Third Edition,(2000) [1] ดังรูปที่ 3
- 5) เครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง (Dissolved Gas Analysis, DGA) เป็นไปตามข้อกำหนดในมาตรฐานสากล ASTM D-3612-02 [6] ดังรูปที่ 4

ตารางที่ 1 ปริมาณก๊าซคั้งคั้งก่อนการทดสอบ (ppm.)

ก๊าซ	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
ปริมาณ	0	0	0	0	0	2	517



รูปที่ 2 อิเล็กโตรดแบบแผ่นระนาบขนาน



รูปที่ 3 เครื่องมือวัดคิสรารัจวงส่วน



รูปที่ 4 เครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง

#### 3.2 การเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) ปรับระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดตามที่กำหนด (ได้จากกรทดสอบ)
- 2) เติมน้ำมันหม้อแปลงใหม่ในภาชนะทดสอบจำนวน 600 ml และทิ้งไว้ 5 นาที ก่อนเริ่มทดสอบเพื่อไม่ให้มีฟองก๊าซ ภายใต้ห้องที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น
- 3) ค่อยๆ ป้อนแรงดันทดสอบจากแหล่งจ่าย  $V$  ให้กับวงจรทดสอบจนกระทั่งเกิดคิสรารัจวงส่วนที่น้ำมันหม้อแปลงตามค่าที่กำหนดในตารางที่ 2 คงค่าไว้ 15 นาที (เวลาได้จากการทดสอบ)
- 4) หยุดป้อนแรงดันและเก็บตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงไปทดสอบ DGA ตามมาตรฐานสากล ASTM D-3612-02 [6]



#### 4. ผลการทดสอบ DGA

การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนที่น้อยกว่า 200 pC ซึ่งเป็นการดิสชาร์จที่มีพลังงานต่ำมาก ต้องใช้เวลาทดสอบนานมากจึงจะทำให้ผล DGA เปลี่ยนแปลง จึงไม่ขอกล่าวถึงในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบ DGA ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (หน่วย ppm)

No.	Description	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
1	>200 pC in oil	55	4	0	0	0	2	529
2	>500 pC in oil	149	13	0	0	0	4	514
3	>1,000 pC in oil	287	22	0	0	0	2	532
4	>5,000 pC in oil	1106	98	3	1	0	2	537
5	>10,000 pC in oil	1913	185	7	1	0	3	552
6	>20,000 pC in oil	3589	253	13	2	0	4	548

จากตารางที่ 2 ผลการทดสอบ DGA ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ อิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ (Plane-to-Plane) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร ผลการทดสอบเป็นค่ากลางของการทดสอบ 5 ครั้ง โดยตัดค่าที่สูงสุดและต่ำสุดออก (คู่ที่ H<sub>2</sub>) นำผลการทดลองมาวิเคราะห์ตามวิธีวิเคราะห์ในข้อ 2.3

วิเคราะห์โดยวิธี Dömenberg ratio [1] วิเคราะห์ว่าเกิดโคโรนาคือความรุนแรงต่ำ ในทุกระดับดิสชาร์จบางส่วน

วิเคราะห์โดยวิธี CIEGB Fault Gas Ratios [1] ได้ Code {5 0 0 0}

วิเคราะห์ว่าเกิดดิสชาร์จบางส่วน ในทุกระดับดิสชาร์จบางส่วน

วิเคราะห์โดยวิธี California State University-Sacramento Guidelines (Key Gases) [1] วิเคราะห์ว่าเกิดดิสชาร์จบางส่วนหรือมีสปาร์ค และผลการทดสอบที่มีดิสชาร์จบางส่วนน้อยกว่า 1000 pC วิเคราะห์ว่าไม่มีความผิดปกติ

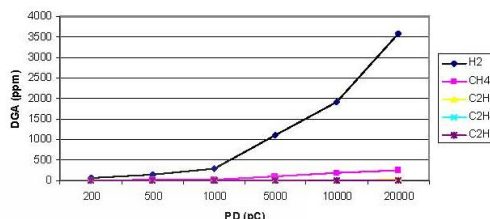
วิเคราะห์โดยวิธี Key Gas [1] พบว่าเกิดโคโรนาคือในน้ำมันหม้อแปลง

การวิเคราะห์ก๊าซที่เจือปนในน้ำมันหม้อแปลงในทุกวิธีที่อ้างถึงข้างต้น ไม่สามารถบอกระดับความรุนแรงของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้ ซึ่งจากการทดลองพบว่าระดับดิสชาร์จบางส่วนที่มากกว่า 20,000 pC จะเกิดเบรกดาวน์ในบางครั้ง

#### 5. สรุป

จากการทดลองพบว่าเมื่อเกิดดิสชาร์จบางส่วน จะเกิดก๊าซไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) และมีเทน (CH<sub>4</sub>) ตั้งแต่ระดับเริ่มต้นของปัญหา และเพิ่มขึ้นตามความรุนแรงตลอดช่วงของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน แสดงถึง

กราฟในรูปที่ 5 ผลการทดลองสามารถใช้วิเคราะห์หาแนวโน้มการเพิ่มความรุนแรงของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน เพื่อวางแผนบำรุงรักษาและป้องกันความเสียหายได้ทันทั่วทั้งที่ ตรงตามวัตถุประสงค์การทดลอง



รูปที่ 5 กราฟแสดงผลการทดลอง

#### 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเครื่องมือทดสอบดิสชาร์จบางส่วน (PD) และเครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง (DGA Analysis) จากบริษัท คาคีเอ็นทรีกรุ๊ป จำกัด และได้รับความอนุเคราะห์น้ำมันหม้อแปลงใหม่ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทั้งหมด จากบริษัท สุวรรณวงศ์ เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, IEEE Standard C57.104-1991, 1992
- [2] ธนพงศ์ สุวรรณศรี, แคททีรียา สุวรรณศรี. 2551. การพัฒนาโปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบน้ำมันหม้อแปลงด้วยวิธีวิเคราะห์ก๊าซที่เจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31, นครนายก, ประเทศไทย, 29-31 ตุลาคม 2551: 153-156.
- [3] High-voltage test techniques Partial discharge measurements, IEC Standard 60270 Third edition 2000-12, 2000
- [4] Insulating liquids-Determination of the breakdown voltage at power frequency-Test method, IEC Standard 156 Second edition 1995-07, 1995
- [5] Standard Test Method for Water in Insulating Liquids by Coulometric Karl Fischer Titration, ASTM Standard D 1533-00, 2005
- [6] Standard Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oil by Gas Chromatography, ASTM Standard D 3612 - 02, 2009

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – สกุล	นายจรัสศักดิ์ บุญโชติ
วัน เดือน ปีเกิด	10 พฤศจิกายน 2522
ที่อยู่	99/329 หมู่ 6 ตำบลบางรักพัฒนา อำเภอบางบัวทอง จังหวัดนนทบุรี 11110
การศึกษา	
พ.ศ. 2546	สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2546 – ปัจจุบัน	วิศวกรไฟฟ้า บริษัท ดาต้า เอ็นทรี กรุ๊ป จำกัด

