



# วิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วน  
สำหรับแบบจำลองหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า

**PARTIAL DISCHARGE ANALYSIS  
FOR POWER DISTRIBUTION TRANSFORMER MODEL**

นางสาวอุไรรัตน์ เฟื่องสูงเนิน

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551



# ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การวิเคราะห์ดีเอสอาร์จบางส่วนสำหรับแบบจำลองหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า

Partial Discharge Analysis For Power Distribution Transformer Model

นามผู้วิจัย นางสาวอุไรรัตน์ เฟื่องสูงเนิน

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( อาจารย์วิทยุ พุกกะวัน, Dr.Ing. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( รองศาสตราจารย์สันติ อัสวศรีพงษ์ศรี, M.Eng. Sc. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( รองศาสตราจารย์เกียรติยศ กวีญาณ, Ph.D. )

หัวหน้าภาควิชา

( รองศาสตราจารย์มงคล รักษาพัชรวงษ์, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 21 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2551

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วนสำหรับแบบจำลองหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า

Partial Discharge Analysis For Power Distribution Transformer Model

โดย

นางสาวอุไรรัตน์ เฟื่องสูงเนิน

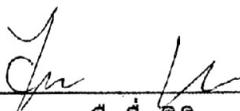
เสนอ

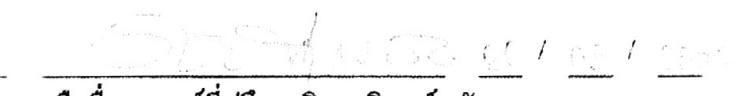
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2551

อุไรรัตน์ เฟื่องสูงเนิน 2551: การวิเคราะห์ดีเอสอาร์บางส่วนสำหรับแบบจำลองหม้อ  
แปลงจำหน่ายไฟฟ้า ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)  
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:  
อาจารย์วินัย พงศ์ชะวัน, Dr.Ing. 107 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์การเกิดดีเอสอาร์บางส่วน (Partial Discharge, PD) ในหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าขนาดเล็กและทำการทดสอบวัดค่าดีเอสอาร์บางส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 แบบ คือ หม้อแปลงไฟฟ้าจำลองดินแบบ หม้อแปลงเก่าและหม้อแปลงทดสอบ เพื่อหาวิธีการลดระดับการเกิดดีเอสอาร์บางส่วนในหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยได้ใช้มาตรฐาน IEC 60276-3 เป็นมาตรฐานในการทดสอบวัดค่า PD ซึ่งค่ามาตรฐานการทดสอบวัดค่า PD ต้องมีค่าไม่เกิน 100 pC เมื่อป้อนแรงดันทดสอบตามที่กำหนด จากการศึกษาการเกิดดีเอสอาร์บางส่วนพบว่าวิธีการตัดมุมทั้งสองข้างของแกนเหล็กให้มีลักษณะมนทำให้เกิดค่าดีเอสอาร์บางส่วนน้อยกว่าแกนเหล็กที่ไม่ได้ตัดมุม

  
ลายมือชื่อนิสิต

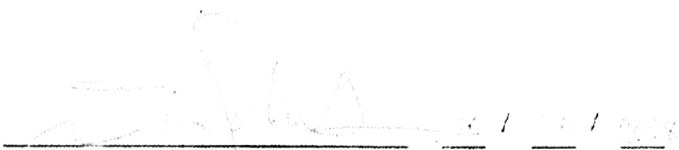
  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Urairat Fuangsoongnern 2008: Partial Discharge Analysis For Power Distribution Transformer Model. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Mr. Winai Plucksawan, Dr. Ing. 107 pages.

This thesis presents an analysis of partial discharge in small-size power distribution transformer and a test of partial discharge in three types of transformer, which are a model distribution transformer, an old distribution transformer and a testing distribution transformer, to seek the way to reduce partial discharge in small size distribution transformer. IEC 60276-3 has been used to be the standard for a measurement of PD value. The standard specifies a PD value not to exceed 100 pC when a certain voltage has been input. The study shows that by rounding two corners of a metal core of the transformer, the PD value can be reduced.

U. Fuangsoongnern

Student's signature



Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ดร.วินัย พุกกะวัน ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
หลัก รศ.สันติ อัสวศรีพงษ์ธร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม และ รศ.ดร.เกียรติยศ กวีญาณ  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจ  
แก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบคุณ อาจารย์พร้อมศักดิ์ อภินิติกุล อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.ราชภัฏจันทรบุรี ที่ให้ความช่วยเหลืองานวิจัยในด้านเทคนิคต่าง ๆ ใน  
ห้องทดลอง ตลอดจนให้คำแนะนำ เพื่อให้การทดลองบรรลุผลสำเร็จด้วยดี ที่อนุเคราะห์ให้ใช้ห้อง  
ทดสอบไฟฟ้าแรงสูง และ ขอขอบคุณกลุ่มนักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
ม.ราชภัฏจันทรบุรี ที่ช่วยในการทดสอบ

สุดท้าย กราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ผู้ให้ความช่วยเหลือ เป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ให้แก่  
ข้าพเจ้า และให้การสนับสนุนข้าพเจ้าเสมอมา

อุไรรัตน์ เฟื่องสูงเนิน

พฤษภาคม 2551

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	24
อุปกรณ์	24
วิธีการ	24
ผลและวิจารณ์	30
ผล	30
วิจารณ์	61
สรุปและข้อเสนอแนะ	64
สรุป	64
ข้อเสนอแนะ	70
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	71
ภาคผนวก	72
ภาคผนวก ก รายละเอียดของลวดทองแดงและการพันขดลวด	73
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบแรงดันทะลุผ่านของกระดาษฉนวน	76
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบน้ำมันหม้อแปลงบริษัท น้ำมันอพอลโล (ไทย) จำกัด	78
ภาคผนวก ง ชิ้นส่วนของตัวถังหม้อแปลงไฟฟ้า	82
ภาคผนวก จ Test Report Partial Discharge	86
ภาคผนวก ช การวิเคราะห์หาสมการถดถอยโดยใช้โปรแกรม	
SPSS 13.0 for Windows	90

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่ากำหนดของพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ	14
2	คุณสมบัติของแกนเหล็กซิลิกอน 23RGH090 ความหนา 0.23 mm.	18
3	ขนาดของกระดาษฉนวนแรงดันต่ำ	21
4	ขนาดของกระดาษฉนวนแรงดันสูง	21
5	ค่าของ PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบที่ปริมาณน้ำมันในหม้อแปลง ต่างๆกัน	32
6	ค่าของ PD ในหม้อแปลงเก่า พิกัด 220 V/19 kV, 10 kVA, 50 Hz.	36
7	ค่าของ PD ในหม้อแปลงทดสอบ พิกัด 220V/100 kV, 5 kVA, 50 Hz.	38
8	ค่าของ PD ที่ได้จากการ Simulate ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อไม่ได้ตัดมุมแกนเหล็ก)	45
9	ค่าของ PD ที่ได้จากการ Simulate ในหม้อแปลงไฟฟ้า (เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 4 เซนติเมตร)	49
10	ค่าของ PD ที่ได้จากการ Simulate ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 15 เซนติเมตร)	53
11	แสดงค่าการคำนวณพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ	65
12	แสดงค่าการคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก ( $P_{Fe}$ ) และ ค่ากระแส สูญเสียกำลังไฟฟ้าในแกนเหล็ก ( $I_R$ )	66
13	แสดงค่าการคำนวณหาค่าเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก ( $\phi$ ), ค่าของความ หนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) และหาค่าพื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็ก	68
14	แสดงค่าการคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าด้าน Primary และแรงดันไฟฟ้าด้าน Secondary เมื่อตัดมุมแกนเหล็ก	70

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก1	รายละเอียดของลวดทองแดงและการพันขดลวด	77
ข1	ผลการทดสอบกระดาศยฉนวน PUCARO	80
ข2	ผลการทดสอบกระดาศยฉนวน WEIDMANN	80
ข3	ผลการทดสอบกระดาศยฉนวน ปลอกกระดาศยชั้น	80
จ1	ผลการทดสอบกระดาศยฉนวน ปลอกกระดาศยชั้น	90
จ2	Transformer 30 MVA single Phase 50 Hz. 220V/19 kV ลูกที่ 1	91
จ3	Transformer 30 MVA single Phase 50 Hz. 220V/19 kV ลูกที่ 2	91
จ4	Transformer 30 MVA single Phase 50 Hz. 220V/19 kV ลูกที่ 3	92
จ5	Transformer 30 MVA single Phase 50 Hz. 220V/19 kV ลูกที่ 4	92
ช1	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการ ถดถอยในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อ หม้อแปลงมีน้ำมันหม้อแปลงเต็มถึง	94
ช2	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อ หม้อแปลงมีน้ำมันหม้อแปลงเต็มถึง	94
ช3	สัมประสิทธิ์การถดถอยในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อ หม้อแปลงมีน้ำมันหม้อแปลงเต็มถึง	95
ช4	การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร (ANOVA) ในหม้อแปลงไฟฟ้า จำลองต้นแบบเมื่อหม้อแปลงมีน้ำมันหม้อแปลงเต็มถึง	95
ช5	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการ ถดถอยในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อ ถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกครึ่งถึง	96
ช6	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อ ถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกครึ่งถึง	96
ช7	การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร (ANOVA) ในหม้อแปลงไฟฟ้า จำลองต้นแบบเมื่อถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกครึ่งถึง	97

## สารบัญญัตินี้ (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ช8	สัมประสิทธิ์การถดถอยในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อ ถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกครั้งถึง	97
ช9	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการ ถดถอยในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออก หมดถึง	98
ช10	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อ ถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกหมดถึง	98
ช11	การวิเคราะห์ความสัมพัทธ์ระหว่างตัวแปร (ANOVA) ในหม้อแปลงไฟฟ้า จำลองต้นแบบเมื่อถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกครั้งถึง	99
ช12	สัมประสิทธิ์การถดถอยในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อ ถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกหมดถึง	99
ช13	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการ ถดถอยในหม้อแปลงเก่า	100
ช14	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในหม้อแปลงเก่า	100
ช15	การวิเคราะห์ความสัมพัทธ์ระหว่างตัวแปร (ANOVA) ในหม้อแปลงเก่า	100
ช16	สัมประสิทธิ์การถดถอยในหม้อแปลงเก่า	101
ช17	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการ ถดถอยในหม้อแปลงทดสอบ	102
ช18	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในหม้อแปลงทดสอบ	102
ช19	การวิเคราะห์ความสัมพัทธ์ระหว่างตัวแปร (ANOVA) ในหม้อแปลง ทดสอบ	102
ช20	สัมประสิทธิ์การถดถอยในหม้อแปลงทดสอบ	103
ช21	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการ ถดถอยในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อไม่ได้ตัดมุมแกนเหล็ก)	104
ช22	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อไม่ได้ตัดมุมแกนเหล็ก)	104

### สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ช23	การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร (ANOVA) ในหม้อแปลงไฟฟ้า จำลองต้นแบบ (เมื่อไม่ได้ตัดมุมแกนเหล็ก)	105
ช24	สัมประสิทธิ์การถดถอยในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อไม่ได้ตัดมุมแกนเหล็ก)	105
ช25	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการ ถดถอยในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 4 เซนติเมตร)	106
ช26	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 4 เซนติเมตร)	106
ช27	การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร (ANOVA) ในหม้อแปลงไฟฟ้า จำลองต้นแบบ(เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ4 เซนติเมตร)	107
ช28	สัมประสิทธิ์การถดถอยในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 4 เซนติเมตร)	107
ช29	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการ ถดถอยในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 15 เซนติเมตร)	108
ช30	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 15 เซนติเมตร)	108
ช31	การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร (ANOVA) ในหม้อแปลงไฟฟ้า จำลองต้นแบบ(เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ15 เซนติเมตร)	109
ช32	สัมประสิทธิ์การถดถอยในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 15 เซนติเมตร)	109

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โคโรนาดีสชาร์จ	3
2	อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการทดลองโคโรนาดีสชาร์จ	4
3	ลักษณะโคโรนาดีสชาร์จ	4
4	รูปแบบการเกิดโคโรนาในก๊าซ เช่น อากาศ และ ก๊าซ SF6	4
5	ดีสชาร์จตามผิว	5
6	รูปแบบการเกิดดีสชาร์จตามผิว	5
7	ดีสชาร์จภายใน	6
8	รูปแบบการเกิดดีสชาร์จภายใน	6
9	แรงดันคร่อมแกปและกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ขณะเกิด PD	7
10	การเกิด PD ชั่ว	8
11	ลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในทางทฤษฎีสำหรับแกปเล็กๆ	9
12	วงจรพื้นฐานการวัด PD	9
13	รูปคลื่นกระแสและแรงดันทดสอบของ PD	10
14	วงจรทดสอบตรวจจับ PD แบบตรง	11
15	การแสดงผลของ PD	12
16	กราฟ Core Loss Curve 23RGH090	15
17	ภาคตัดขวางเป็นแบบสี่เหลี่ยม 6 ชั้น	16
18	รูปร่างและภาคตัดขวางแกนเหล็ก	17
19	แสดงการผันขดลวดด้านแรงต่ำและแรงสูง	20
20	การวางกระดาษฉนวนด้านแรงดันต่ำ	20
21	วงจรการวัดค่าพาสซีวดีสชาร์จ	25
22	การต่อวงจร Calibration setup for Transformer	26
23	การต่อวงจร Partial Discharge for Transformer	26
24	Distribution Transformer PD Measuring Kit	28
25	วงจรการทดสอบวัดค่า PD ของหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบโดยใช้ PD Detector XDP	28

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
26	วงจรการทดสอบวัดค่า PD ของหม้อแปลงเก่าโดยใช้ PD Detector XDP	29
27	วงจรการทดสอบวัดค่า PD ของ Test Transformer โดยใช้ PD Detector XDP	29
28	วงจรการวัด PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อ หม้อแปลงมีน้ำมันหม้อแปลงเต็มถึง	30
29	วงจรการวัดค่า PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อ ถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกครึ่งถึง	30
30	วงจรการวัดค่า PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อ ถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกหมดถึง	31
31	กราฟแสดงค่าของ PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อ หม้อแปลงมีน้ำมันหม้อแปลงเต็มถึง	33
32	กราฟแสดงค่าของ PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อ ถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกครึ่งถึง	34
33	กราฟแสดงค่าของ PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อ ถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกหมดถึง	35
34	กราฟค่าของ PD ในน้ำมันหม้อแปลงเก่า พิกัด 220 V/19 kV, 10 kVA, 50 Hz.	37
35	กราฟค่าของ PD ในหม้อแปลงทดสอบ พิกัด 220V/100 kV, 5 kVA, 50 Hz.	39
36	E-field Plot	40
37	Peak electric field stress (V/m)	40
38	การต่อวงจรทดสอบในการ Simulation	41
39	การออกแบบหม้อแปลงเพื่อใช้ในการ Simulation	41
40	B Vector เมื่อ $t = 0.008$ sec	42
41	B Vector เมื่อ $t = 0.011$ sec	42
42	แสดงแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อไม่ได้ตัดมุมแกนเหล็ก)	43
43	วงจรวัดค่า PD ของหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อไม่ได้ตัดมุมแกนเหล็ก)	44

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
44	หม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อไม่ได้ตัดมุมแกนเหล็ก)	44
45	กราฟแสดงค่าของ PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อไม่ได้ตัดมุมแกนเหล็ก)	46
46	แสดงแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 4 เซนติเมตร)	47
47	วงจรวัดค่า PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 4 เซนติเมตร)	48
48	หม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 4 เซนติเมตร)	48
49	ค่าของ PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ ที่ทำการตัดมุมทั้งสองของแกนเหล็กด้านบนที่อยู่ใกล้กับขดลวด โดยการตัดแกนเหล็กออกด้านละ 4 เซนติเมตร ทำมุม 45 องศา	50
50	แสดงแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 15 เซนติเมตร)	51
51	วงจรวัดค่า PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 15 เซนติเมตร)	52
52	หม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 15 เซนติเมตร)	52
53	ค่าของ PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ ที่ทำการตัดมุมทั้งสองของแกนเหล็กด้านบนที่อยู่ใกล้กับขดลวด โดยการตัดแกนเหล็กออกด้านละ 15 เซนติเมตร ทำมุม 45 องศา	54
54	ส่วนบนของแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ	60
55	แกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ	60
56	การพันขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ	61
57	โครงสร้างของหม้อแปลงเก่า	61
58	หม้อแปลงเก่า พิกัด 220V/19 kV, 10 kVA, 50 Hz.	62

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
59	แกนเหล็กของหม้อแปลงทดสอบ	62
60	การพันขดลวดของหม้อแปลงทดสอบ	62
61	การนำอุปกรณ์ของแกนเหล็กที่ทำการพันขดลวดลงประกอบในตัวถังหม้อแปลง ทดสอบ	63
62	หม้อแปลงทดสอบ พิกัด 220V/100 kV, 5 kVA, 50 Hz.	63

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ช1	กราฟแสดงการวิเคราะห์ความถดถอยที่ Y และ X มีความสัมพันธ์ในรูปแบบต่างๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อหม้อแปลงมีน้ำมันหม้อแปลงเต็มถึง	95
ช2	กราฟแสดงการวิเคราะห์ความถดถอยที่ Y และ X มีความสัมพันธ์ในรูปแบบต่างๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกครึ่งถึง	97
ช3	กราฟแสดงการวิเคราะห์ความถดถอยที่ Y และ X มีความสัมพันธ์ในรูปแบบต่างๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ เมื่อถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกหมดถึง	99
ช4	กราฟแสดงการวิเคราะห์ความถดถอยที่ Y และ X มีความสัมพันธ์ในรูปแบบต่างๆ ของผลการ Simulate ค่า PD ในหม้อแปลงเก่า	101
ช5	กราฟแสดงการวิเคราะห์ความถดถอยที่ Y และ X มีความสัมพันธ์ในรูปแบบต่างๆ ของผลการ Simulate ค่า PD ในหม้อแปลงทดสอบ	103
ช6	กราฟแสดงการวิเคราะห์ความถดถอยที่ Y และ X มีความสัมพันธ์ในรูปแบบต่างๆ ของผลการ Simulate ค่า PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อไม่ได้ตัดมุมแกนเหล็ก)	105
ช7	กราฟแสดงการวิเคราะห์ความถดถอยที่ Y และ X มีความสัมพันธ์ในรูปแบบต่างๆ ของผลการ Simulate ค่า PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 4 เซนติเมตร)	107
ช8	กราฟแสดงการวิเคราะห์ความถดถอยที่ Y และ X มีความสัมพันธ์ในรูปแบบต่างๆ ของผลการ Simulate ค่า PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 15 เซนติเมตร)	109

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$\phi$	=	เส้นแรงแม่เหล็ก
$A$	=	พื้นที่หน้าตัดของขดลวด
$A_c$	=	พื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็ก
$A_{Total}$	=	พื้นที่หน้าตัดรวมของแกนเหล็ก
$B_c$	=	ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก
$B_m$	=	ความหนาแน่นสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็ก
$C$	=	ตัวเก็บประจุไฟฟ้า
$C_F$	=	ค่าฟอร์มแฟกเตอร์ของหม้อแปลง
$C_0$	=	ตัวเก็บประจุไฟฟ้าระหว่างแท่งอิเล็กโตรด
$C_c$	=	ตัวเก็บประจุของโพรงก๊าซ
$C_d$	=	ตัวเก็บประจุของพื้นผิว
$C_k$	=	ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว
$C_t$	=	ค่าเก็บประจุของวัสดุทดสอบ
CD	=	อุปกรณ์คาบเกี่ยว
CC	=	เคเบิลวัด
$E$	=	แรงดันไฟฟ้า
$E_b$	=	ค่าความคงทนต่อแรงดัน
$E_c$	=	ความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต
$E_t$	=	ความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิว
$E_1$	=	แรงดันไฟฟ้าด้าน Primary
$E_2$	=	แรงดันไฟฟ้าด้าน Secondary
$F$	=	ตัวกรองความถี่
$F_c$	=	แฟกเตอร์พื้นที่แกนเหล็กในวงกลม
$I$	=	กระแสไฟฟ้า
$I_1$	=	กระแสป้อนเข้า
$I_2$	=	กระแสที่จ่ายออก
$I_R$	=	ค่ากระแสกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก
$J$	=	ความหนาแน่นกระแสของขดลวด

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$L_{ave}$	=	ความยาวรอบเฉลี่ย
$N$	=	จำนวนรอบที่พันบนแกนเหล็ก
$N_1$	=	จำนวนรอบของขดลวดด้านแรงดันต่ำ
$N_2$	=	จำนวนรอบของขดลวดด้านแรงดันสูง
$M_i$	=	PD Detector XDP
$P_c$	=	ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย
$P_{Fe}$	=	กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก
$Q$	=	ประจุที่ปรากฏของ PD
$R_m$	=	ค่าความต้านทานการวัด
$S$	=	ค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลง
$U$	=	แรงสูงตัวจ่าย
$U_1$	=	แรงดันป้อนเข้า
$U_2$	=	แรงดันจ่ายออก
$V_1$	=	แรงดันไฟฟ้าคร่อมขั้วของอุปกรณ์
$V_a$	=	แรงดันเริ่มต้นคิซซาร์จบางส่วน (rms)
$V_b$	=	แรงดันเบรกคาวน์ของโพรงอากาศหรือแกป
$V_r$	=	แรงดันหลังการเกิดเบรกคาวน์ของโพรงอากาศหรือแกป
$V_v$	=	ค่ายอดของแรงดันคร่อมโพรงอากาศ
$W$	=	พลังงานคิซซาร์จ
$Y$	=	แรงดันใดๆ ซึ่งมีค่า $0 \leq Y \leq (V_b - V_r)$
$Z$	=	ค่าอิมพีแดนซ์
$Z_{mi}$	=	อิมพีแดนซ์ป้อนเข้าของระบบ
$e$	=	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
$f$	=	ความถี่ไฟฟ้า
$i$	=	กระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์
$i_k$	=	กระแสที่ป้อนกับวัสดุทดสอบ $C_t$
$i_q(t)$	=	กระแสพัลส์คิซซาร์จบางส่วนที่วัดได้
$i_t$	=	กระแสที่จ่ายให้กับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว $C_k$

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$n$	=	จำนวนครั้งการเกิด PD ต่อครั้งคาบเวลา
$t$	=	เวลา
$w$	=	น้ำหนักของขดลวด
$u_i$	=	แรงดันที่ป้อน

# การวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วนสำหรับแบบจำลองหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า

## Partial Discharge Analysis For Power Distribution Transformer Model

### คำนำ

พลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาอุตสาหกรรม ซึ่งประเทศไทยเป็นประเทศที่กำลังพัฒนาด้านการผลิตและส่งจ่ายไฟฟ้าให้เพียงพอกับความต้องการของผู้ใช้และการกระจายไปทั่วถึงทุกตำบลในพื้นที่กว้างใหญ่ ซึ่งจำเป็นต้องใช้ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูง ผู้วิจัยจึงได้มีวัตถุประสงค์ในการทดสอบอุปกรณ์ทางด้านระบบจำหน่ายแรงสูง ซึ่งจะทำการวัดค่าการคายประจุบางส่วนของฉนวนไฟฟ้าที่เรียกว่า การวัดค่าดีสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge, PD) เป็นการทดสอบความคงทนไดอิเล็กตริกของฉนวนที่ใช้กับ ตัวอย่างพารามิเตอร์หม้อแปลงไฟฟ้าจำลอง ต้นแบบ 1 เฟสขนาดพิกัด 230 V/22kV, 30kVA, 50 Hz. หม้อแปลงเก่า พิกัด 220 V/19 kV, 10 kVA, 50 Hz. และหม้อแปลงทดสอบ พิกัด 220V/100 kV, 5 kVA, 50 Hz. การตรวจจับค่าดีสชาร์จบางส่วน เป็นส่วนหนึ่งที่อาจบ่งบอกได้ถึงมาตรฐานของระดับความคงทนของฉนวนที่ใช้งานอยู่ ซึ่งการศึกษาการเกิดดีสชาร์จบางส่วนกับอุปกรณ์ฉนวนที่ใช้ในระบบจำหน่ายนี้ปัจจุบันได้มีการนำอุปกรณ์ฉนวนที่ใช้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูงตรวจสอบความสมบูรณ์ของอุปกรณ์ฉนวนและความเสียหายของอุปกรณ์ฉนวนนั้นก่อนนำไปติดตั้งเพื่อเป็นการวิเคราะห์ความคงทนของฉนวนการวัดค่าดีสชาร์จบางส่วน โดยใช้เครื่องวัดดีสชาร์จบางส่วน ในการตรวจจับการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ฉนวนและประมวลผลด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ และทำการวิเคราะห์ผลการเกิดดีสชาร์จบางส่วนออกมาเป็นรูปกราฟแสดงผ่านหน้าจอ ซึ่งผลที่ได้นี้นั้นเราจะนำมาวิเคราะห์และเป็นแนวทางในการพัฒนาหาค่าความเสี่ยงของการเกิดดีสชาร์จบางส่วน ของอุปกรณ์ฉนวนในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูงต่อไป

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อทำการทดสอบวัดค่า Partial Discharge ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ, หม้อแปลงเก่าและหม้อแปลงทดสอบ
2. ศึกษาหาสาเหตุของการเกิดคิซาร์จบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบโดยการ Simulation
3. สร้างแบบจำลองหม้อแปลงเพื่อศึกษาการเกิดคิซาร์จบางส่วน โดยการตัดมุมทั้งสองข้างของแกนเหล็กให้มีลักษณะมน
4. ศึกษาหาวิธีการเกี่ยวกับเรื่องการลดระดับ Partial Discharge ของ Distribution Transformer
5. เพื่อวิเคราะห์หาระดับของ Partial Discharge ของ Distribution Transformer ขนาดเล็ก ว่าค่ามาตรฐานในการวัดควรมีค่าเท่าไร และเพื่อกำหนดมาตรฐานในการวัด Partial Discharge

## ขอบเขตของงานวิจัย

ในการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ ได้กำหนดขอบเขตของงานวิจัยออกเป็นข้อดังนี้

1. ศึกษาระบบตรวจจับคิซาร์จบางส่วนสำหรับหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า
2. ทำการทดสอบวัดค่า Partial Discharge ของตัวอย่างพารามิเตอร์หม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ 1 เฟสขนาดพิกัด 230 V/22kV, 30kVA, 50 Hz. หม้อแปลงเก่า พิกัด 220 V/19 kV, 10 kVA, 50 Hz. และหม้อแปลงทดสอบ พิกัด 220V/100 kV, 5 kVA, 50 Hz. ในห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง
3. ทำการวิเคราะห์ค่า Partial Discharge เพื่อนำผลการวัดค่า Partial Discharge มาศึกษาหาวิธีการเกี่ยวกับเรื่องการลดระดับ Partial Discharge ของ Distribution Transformer

## การตรวจเอกสาร

### ทฤษฎีเบื้องต้นของการเกิดดีสชาร์จบางส่วน

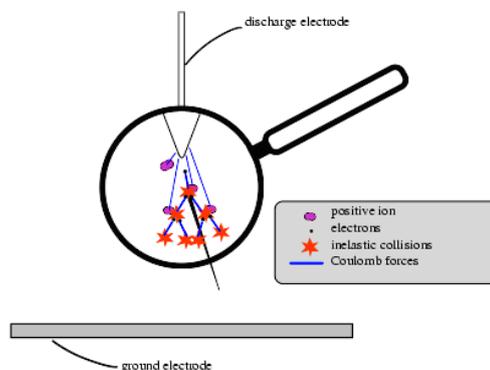
#### 1. ดีสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge (PD))

ดีสชาร์จบางส่วน คือ ดีสชาร์จเบรกดาวน์ที่ไม่สมบูรณ์ พลังงานที่ทำให้เกิดดีสชาร์จนั้นไม่มากพอที่จะทำให้ฉนวนเปลี่ยนสภาพไปเป็นสภาพนำไฟฟ้าได้ตลอดแนวอิเล็กโตรด จึงเรียกว่าดีสชาร์จบางส่วน เพราะฉนวนของอิเล็กโตรดด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้าน ซึ่งอาจเป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ ยังเป็นฉนวนที่สมบูรณ์มั่นคงอยู่ Kreuger ได้ให้คำอธิบายไว้ว่า “ดีสชาร์จบางส่วนเป็นดีสชาร์จทางไฟฟ้าที่ไม่เชื่อมโยงถึงกันระหว่างอิเล็กโตรด” (สำรวย, 2528; พร้อมศักดิ์, 2545)

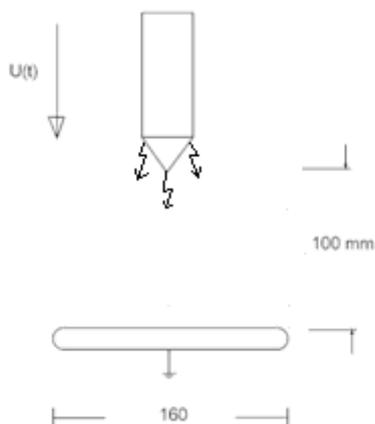
#### 2. ลักษณะการเกิดดีสชาร์จบางส่วน

##### 2.1 โครนาดีสชาร์จ

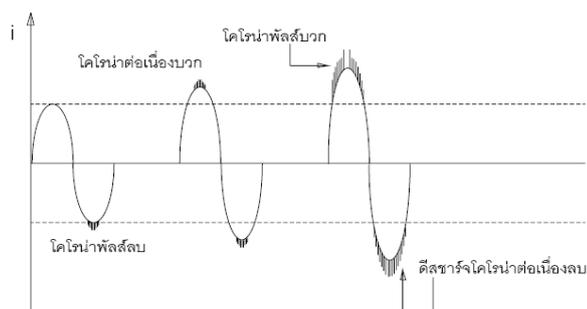
เป็นดีสชาร์จในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง จะเกิดตรงบริเวณรอบๆปลายอิเล็กโตรดแหลม หรือก๊าซความดันปกติ หรือขอบคมที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่นแสดงการเกิดโครนาดีสชาร์จดังภาพที่ 1 การทดลองเพื่อศึกษาการเกิดโครนาดีสชาร์จในอากาศเริ่มต้นโดยใช้อิเล็กโตรดปลายแหลมกับระนาบดังภาพที่ 2 และผลการวัดรูปคลื่นแรงดันจากออสซิลโลสโคปแสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 1 โครนาดีสชาร์จ

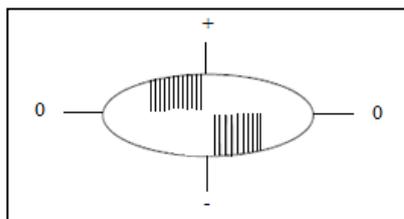


ภาพที่ 2 อิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองโคโรนาดิสชาร์จ



ภาพที่ 3 ลักษณะโคโรนาดิสชาร์จ

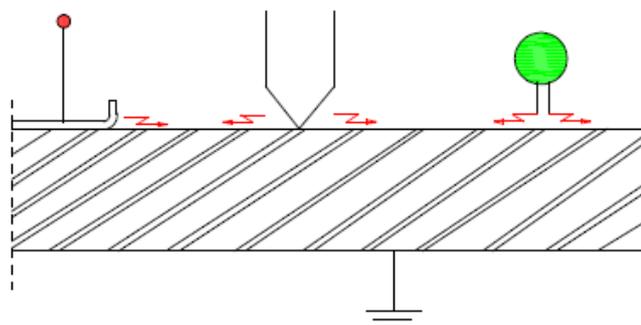
รูปแบบ PD ของการเกิดโคโรนาจะแสดงดังรูปที่ 4 ถ้าดีสชาร์จปรากฏทางด้านลบของรูปคลื่นแสดงว่าเกิดโคโรนาทางด้านแรงสูง แต่ถ้าดีสชาร์จปรากฏทางด้านบวกของรูปคลื่นแสดงว่าเกิดโคโรนาทางด้าน Ground ลักษณะของโคโรนาทางด้านแรงสูงที่แสดงบนฐานเวลารูปวงรี PD จะเกิดในช่วงมุมเฟส 270 องศา สำหรับในกรณีแรงดันเริ่มต้น และเมื่อแรงดันสูงขึ้น PD จะเกิดในช่วง 90 องศาด้วย โดยขนาดของ PD จะมีค่าใกล้เคียง



ภาพที่ 4 รูปแบบการเกิดโคโรนาในก๊าซ เช่น อากาศ และ ก๊าซ SF<sub>6</sub>

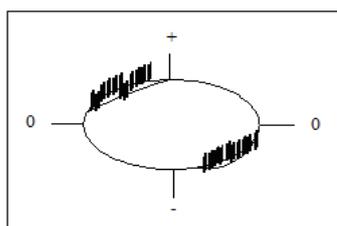
## 2.2 ดิสชาร์จตามผิว (Surface Discharge)

ในสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอก็ตามจนวนแข็งมีส่วนทำให้สนามไฟฟ้าในส่วนที่มีเปอร์มิตติวิตีต่ำดังในภาพที่ 5 เช่น ก๊าซหรืออากาศมีความเครียดสูงขึ้นจนเป็นผลให้เกิดดิสชาร์จขึ้นในส่วนที่เป็นอากาศ ดิสชาร์จตามผิวเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวจนวน (Tangential Field ( $E_t$ )) มีค่าสูงถึงค่าวิกฤต ( $E_c$ )



ภาพที่ 5 ดิสชาร์จตามผิว

รูปแบบ PD แบบดิสชาร์จตามผิว จะแสดงดังภาพที่ 6 ลักษณะของดิสชาร์จตามผิวที่แสดงบนฐานเวลาวงรี PD จะเกิดในช่วงมุมเฟสระหว่าง 0 – 90 องศา และ 180 – 270 องศา

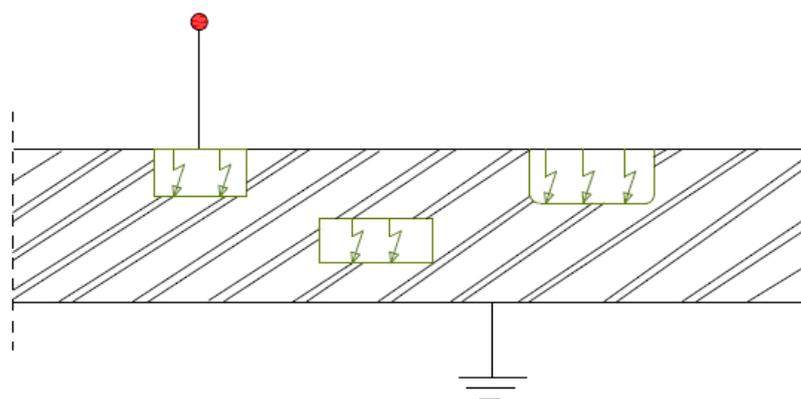


ภาพที่ 6 รูปแบบการเกิดดิสชาร์จตามผิว

## 2.2 ดิสชาร์จบางส่วนภายใน

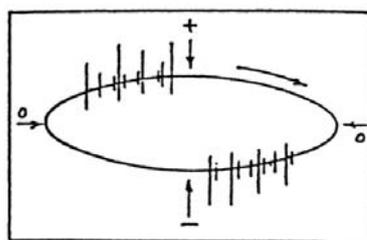
ดิสชาร์จบางส่วนภายใน หมายถึง ดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในเนื้อจนวนแข็งหรือจนวนเหลว ที่ซึ่งมีโพรงหรือฟองก๊าซ หรือสิ่งเจือปนแปลกปลอมที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีต่ำกว่าในเนื้อจนวนหลัก อันทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงหรือสิ่งเจือปนดังกล่าวมีค่าสูงกว่าจนวน

รอบๆ ซึ่งอาจพิสูจน์ได้จากการวิเคราะห์ที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีต่างกันวางซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ เมื่อชั้นฉนวนซ้อนกันได้รับแรงดันถึงระดับหนึ่งแล้วจะทำให้ฉนวนโดยรอบเสียหายเกิดการกัดกร่อน การฉนวนเสื่อมสภาพ อายุการใช้งานจะสั้นลงและในบางกรณีอาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ได้ในที่สุดแสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ดิสชาร์จภายใน

รูปแบบ PD ของการดิสชาร์จภายในจะแสดงดังภาพที่ 8 ลักษณะของดิสชาร์จภายในที่แสดงบนฐานเวลารูปวงรี PD จะเกิดในช่วงมุมเฟสระหว่าง 0 – 90 องศา และ 180 – 270 องศา



ภาพที่ 8 รูปแบบการเกิดดิสชาร์จภายใน

### 3. ผลกระทบของดิสชาร์จบางส่วน

ดิสชาร์จบางส่วนแต่ละครั้งจะเกิดการไอออนในเซชันที่มีไอออนบวก ไอออนลบ และอิเล็กตรอนอย่างหนาแน่นที่เกิดการชน มีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวฉนวนในลักษณะชนกระแทก

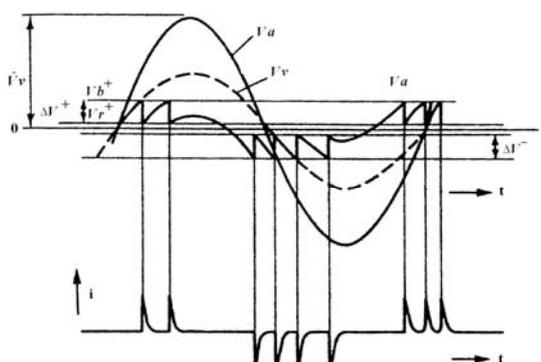
เป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุด ทำให้ฉนวนเสียเป็นจุดๆ เกิดผิวดพร่องขยายตัวมากขึ้น และอาจนำไปสู่การเกิดเบรคควาน์อย่างสมบูรณ์ได้ทำให้ฉนวนเสียหาย อายุการใช้งานของฉนวนจะสั้นลง

ฉะนั้นเพื่อให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงใช้งานได้ยาวนาน การออกแบบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าจะต้องมีคุณภาพดีพอ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันใช้งานปกติจะต้องต่ำกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของฉนวน และจะต้องไม่มีดีสิซาร์จบางส่วน

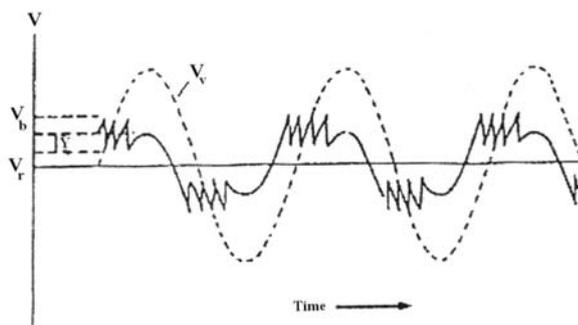
### ธรรมชาติพัลส์ของดีสิซาร์จบางส่วน

#### 1. การเกิดดีสิซาร์จซ้ำ

ในทางปฏิบัติ PD อาจเกิดซ้ำๆ ได้หลายครั้งในแต่ละคาบเวลา ดังภาพที่ 9 โดยที่  $V_a$  คือแรงดันคร่อมขั้วของอุปกรณ์  $V_v$  คือแรงดันเบรคควาน์ของโพรงอากาศหรือแก๊ป  $V_r$  คือแรงดันหลังการเบรคควาน์โพรงอากาศหรือแก๊ป  $V_v$  คือแรงดันคร่อมโพรงอากาศหรือแก๊ปถ้าไม่มีการเกิด PD เลย และ  $i$  คือกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ (สำรวย, 2528; พร้อมศักดิ์, 2545)



ภาพที่ 9 แรงดันคร่อมแก๊ปและกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ขณะเกิด PD



ภาพที่ 10 การเกิด PD ซ้ำ

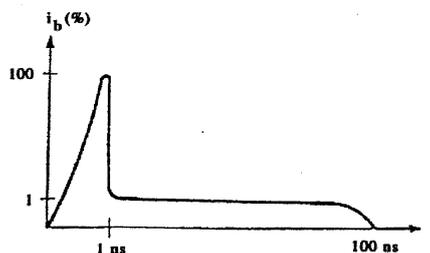
จำนวนครั้งการเกิด PD สามารถคำนวณได้ โดยสมมติว่า PD เกิดแบบสมมาตรกับแกนเวลา ดังนั้นจำนวนครั้งที่เกิด PD ต่อครึ่งคาบเวลา  $n$  คำนวณดังนี้

$$n = \frac{[(V_v - V_r) - Y]}{V_b - V_r} \quad \text{ครึ่ง/ครึ่งคาบเวลา} \quad (1)$$

- โดยที่
- $n$  คือ จำนวนครั้งการเกิด PD ต่อครึ่งคาบเวลา
  - $V_b$  คือ แรงดันเบรกดาวน์ของโพรงอากาศหรือแก๊ส
  - $V_r$  คือ แรงดันหลังการเบรกดาวน์ของโพรงอากาศหรือแก๊ส
  - $V_v$  คือ ค่ายอดของแรงดันคร่อมโพรงอากาศหรือแก๊สถ้าไม่มีการเกิด PD
  - $Y$  คือ แรงดันใดๆ ซึ่งมีค่า  $0 \leq Y \leq (V_b - V_r)$

## 2. ลักษณะรูปร่างของกระแสไอซาร์จบางส่วน

ลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในแก๊สหรือโพรงก๊าซเล็กๆ ในทางทฤษฎีแสดงดังภาพที่ 11 ขณะเกิด PD กระแสที่ไหลผ่านแก๊สจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ซึ่งเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าไอออนบวกผ่านแก๊สสั้นๆ เมื่ออิเล็กตรอนไหลผ่านแก๊สหมด กระแสจะลดลงอย่างรวดเร็ว และกระแสที่ลดลงนี้จะยังคงไหลต่อไปอีกเนื่องจากการเคลื่อนที่ของไอออนบวก

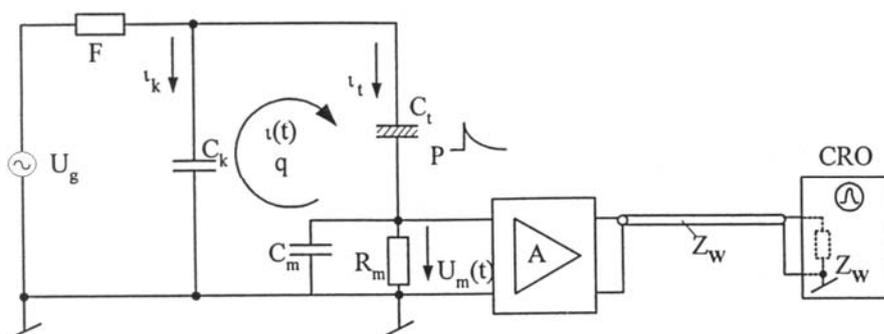


ภาพที่ 11 ลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในทางทฤษฎีสำหรับแกปเล็กๆ

### หลักการตรวจจับ PD

#### 1. วงจรพื้นฐานการวัด PD

วงจรพื้นฐานสำหรับวัดดีสชาร์จบางส่วน PD จะประกอบด้วยตัวจ่ายแรงดันทดสอบ  $U_g$  คือหม้อแปลงทดสอบป้อนแรงดันให้กับวัสดุทดสอบ และตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว  $C_k$  ผ่านตัวกรองความถี่สูง  $F$  ดังวงจรในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 วงจรพื้นฐานการวัด PD

$U_g$  คือ ตัวจ่ายแรงดันสูงกระแสสลับป้อนให้กับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว  $C_k$  และวัสดุทดสอบ  $P$

$F$  คือ ตัวกรองประกอบด้วยอิมพีแดนซ์มีค่าที่ความถี่สูง นั่นคือ ตัวกรองจะทำหน้าที่มิให้คลื่นรบกวนความถี่สูงจากตัวจ่ายเข้าไปรบกวนในวงจรทดสอบ แต่ยอมให้กระแสทดสอบความถี่

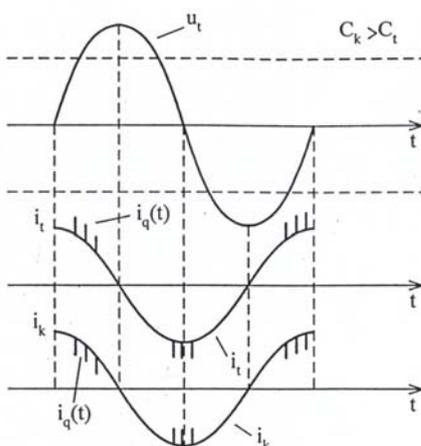
ต่ำไหลผ่านไปได้ในเวลาเดียวกัน F จะทำหน้าที่กันมิให้สัญญาณคิสซาร์จบางส่วน (PD) จากวัสดุทดสอบไหลหนีออกไปทางตัวจ่ายแรงดันได้ ตัวกรองนี้อาจประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ L หรือประกอบด้วยตัวเก็บประจุ C เป็นวงจรก็ได้

$C_k$  คือ ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว มีค่าความจุไฟฟ้าประมาณเท่าๆ กับค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบหรือใหญ่กว่าในเชิงปฏิบัติ  $C_k$  จะมีค่าความจุไฟฟ้าประมาณ 1000 pF เพื่อให้มีค่าอิมพีแดนซ์พอสที่ จะทำให้กระแสคิสซาร์จบางส่วน  $i(t)$  ซึ่งมีค่า  $< 100 \mu A$  และเป็นพัลส์แคบๆ ไหลได้ครบวงจรเป็นกระแสที่วัดได้

การวัดที่ถูกต้อง ค่าความต้านทานวัด  $R_m$  ดังรูปที่ 12 จะต้องสมคู่กัน (match) กับเคเบิลวัด ที่มี  $Z_w$  แรงดันที่วัดที่ CRO หรือเครื่องบันทึกทรานเซียนด์ ก็คือ

$$U_m(t) = \frac{(i_t + i)Z_w R_m}{(R_m + Z_w)} \quad \text{kV} \quad (2)$$

ถ้าค่าเก็บประจวัสดุทดสอบน้อย แรงดันที่ได้จากกระแส PD นี้  $i(t)$  จะจำแนกจากกระแสประจุ  $i(t)$  ได้ชัดเจน



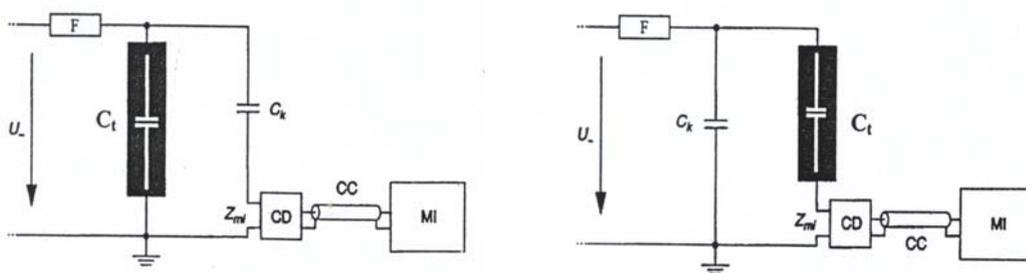
ภาพที่ 13 รูปคลื่นกระแสและแรงดันทดสอบของ PD

- $u_t$  คือ แรงดันที่ป้อน  
 $i_t$  คือ กระแสที่ป้อนกับวัสดุทดสอบ  $C_t$   
 $i_k$  คือ กระแสที่จ่ายให้กับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว  $C_k$   
 $i_q(t)$  คือ กระแสพัลส์ดีสชาร์จบางส่วน (PD) ที่วัดได้

กระแสพัลส์ PD คือ  $i(t)$  ในแต่ละครั้งไซเคิลของแรงดันที่ป้อนจะมีจำนวนพัลส์เล็กน้อย ขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันทดสอบ และลักษณะตำแหน่งของการเกิดผิพร่อง ถ้าวัสดุทดสอบมีจุดผิพร่องหลายแห่ง จำนวนพัลส์ PD จะมีมากขึ้น ซึ่งมีช่วงห่างระหว่างพัลส์เป็น  $\mu\text{s}$  หรือเร็วกว่านั้น โดยทั่วไปจะสังเกตเห็นอัตราการเกิดดีสชาร์จ มีค่าสูงมากที่สุดเมื่ออัตราการแลกเปลี่ยนของแรงดัน  $\frac{dU_t}{dt}$  มีค่าสูงสุด ฉะนั้น ขั้วของพัลส์จะไม่ขึ้นอยู่กับขั้วของแรงดันทดสอบ  $U_t$  แต่ขึ้นอยู่กับเครื่องหมายการเปลี่ยนแปลง  $\frac{dU_t}{dt}$  ตรงกันข้าม ในกรณีดีสชาร์จโคโรนา ซึ่งเป็นดีสชาร์จบางส่วน เกิดภายนอก จะเกิดที่ขั้วของแรงดันทดสอบ และเครื่องหมายของพัลส์ PD จะสอดคล้องกับเครื่องหมาย(ขั้ว) ของแรงดันทดสอบที่ป้อน

## 2. การต่อวงจรระบบวัด PD ในวงจรทดสอบ

การต่อวงจรระบบวัด PD ในวงจรทดสอบ จะมีความแตกต่างตรงที่การต่ออิมพีแดนซ์วัด  $Z_m$  ซึ่งมีมาตรฐานการวัด PD ฉบับใหม่คือ IEC 60270 เรียกว่าอุปกรณ์คาบเกี่ยว (coupling device) CD ประกอบเป็นอิมพีแดนซ์วัด  $Z_{mi}$  ต่อที่ต้นระบบวัดแบ่งเป็น 2 แบบดังในภาพที่ 14



ก) CD ต่ออนุกรมกับ  $C_k$

ข) CD ต่ออนุกรมกับ  $C_t$

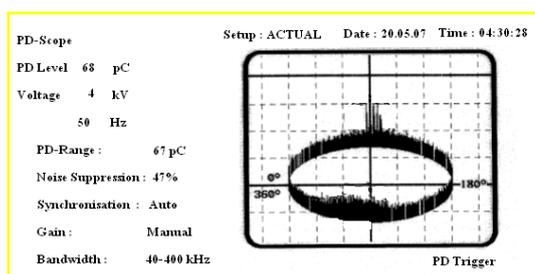
ภาพที่ 14 วงจรทดสอบตรวจวัด PD แบบตรง

U	: แรงสูงตัวจ่าย	F	: ตัวกรองความถี่
$Z_{mi}$	: อิมพีแดนซ์ป้อนเข้าของระบบ	CC	: เคเบิลวัด
$C_t$	: ค่าเก็บประจุวัสดุทดสอบ	$C_k$	: ค่าเก็บประจุคาบเกี่ยว
CD	: อุปกรณ์คาบเกี่ยว		

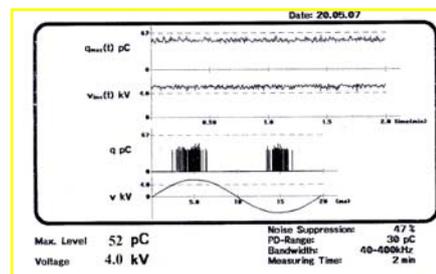
ความแตกต่างของวงจรแบบ ก) และแบบ ข) คือ แบบ ก) ตัวคาบเกี่ยว CD ต่ออนุกรมกับ  $C_k$  ที่มีสัคย์เป็นดิน เป็นแบบที่ใช้กันมากในทางปฏิบัติ ไม่เสี่ยงต่อการเกิดเบรกดาวน์ เพราะทราบค่าแรงดันที่กำหนดของ  $C_k$  แต่ความไวในการวัดจะน้อยกว่าแบบ ข) เพราะ PD ที่เกิดขึ้นนั้นจะเกิดขึ้นในวัสดุทดสอบ  $C_t$  แบบ ข) จะมีความไวสูงกว่า เพราะตัวคาบเกี่ยว CD ต่ออนุกรมโดยตรงกับวัสดุทดสอบ  $C_t$  ค่าเก็บประจุทั้งด้านแรงสูงกับดินจะเพิ่มค่า  $C_k$  ทำให้ความไวของวงจร PD สูงขึ้น แต่มีข้อเสียที่เสี่ยงต่อการเกิดเบรกดาวน์ที่วัสดุทดสอบจะทำให้เครื่องวัด PD เสียหายได้

### 3. การแสดงผลคิซาร์จบางส่วน

การวัดค่า PD อาจวัดด้วยมิเตอร์ความถี่สูงออกมาเป็น micro - volt ( $\mu V$ ) หรือ picoCoulomb (pC) ได้ แต่จะทราบเพียงขนาดของ PD เท่านั้น วิธีที่นิยมใช้แสดงผลวัด PD ในปัจจุบัน คือ การแสดงผลบนจอออสซิลโลสโคป ซึ่งอาจแสดงได้ 2 แบบ คือ ให้รูปพัลส์ของ PD ปรากฏบนฐานเวลารูปอิลิปส์ ซึ่งมีเครื่องหมายแสดงตำแหน่งยอดบวก ยอดลบ และตำแหน่งศูนย์ของรูปแรงดันทดสอบ ดังภาพที่ 15



ก) ตัวอย่าง PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์



ข) ตัวอย่าง PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์

ภาพที่ 15 การแสดงผลของ PD

## โครงสร้างและพารามิเตอร์ของหม้อแปลงทดสอบที่ใช้ในการทดสอบหาค่า Partial Discharge

หม้อแปลงทดสอบมีลักษณะคล้ายกับหม้อแปลงจ่ายกำลังเฟสเดียวต่างกันตรงที่แกนเหล็กที่ใช้ทำหม้อแปลงทดสอบจะมีขนาดเล็กกว่าของหม้อแปลงจ่ายกำลัง เพื่อลดความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กทำให้กระแสสร้างสนามแม่เหล็กมีค่าต่ำลง อีกทั้งยังช่วยลดกระแสฮาร์มอนิกส์ ลักษณะโครงสร้างทั่วไปของหม้อแปลงทดสอบทางด้านไฟฟ้าแรงสูง ในทางปฏิบัติการสร้างแรงดันทดสอบที่มีขนาดพิกัดแรงดันสูงมากๆ การใช้หม้อแปลงทดสอบเพียงตัวเดียวไม่สามารถทำได้เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านเทคนิควิศวกรรม (ณัฐพงษ์ และ ไชยพร, 2548)

### 1. ลักษณะมิติโครงสร้างของขดลวดและแกนเหล็ก

หม้อแปลงทดสอบที่จัดสร้างขึ้นนี้ประกอบด้วยขดลวดแรงต่ำ, ขดลวดแรงสูง และขดลวดต่อควบ การพันขดลวดทั้งหมดจะเป็นแบบทรงกระบอกจำนวน 2 ชุด ส่วนแกนเหล็กเป็นแบบคอร์ (Core Type)

### 2. ลักษณะตัวถังหม้อแปลง

ลักษณะตัวถังหม้อแปลง ขนาดของตัวถังจะถูกกำหนดโดยขนาดความกว้างของแกนเหล็กและเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดที่นำมาประกอบกัน ตัวถังหม้อแปลงต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 520 mm. และสูงไม่น้อยกว่า 580 mm. แต่ในทางปฏิบัติต้องมีการเผื่อระยะการฉนวนเพื่อความปลอดภัย รวมทั้งให้สามารถใส่แกนเหล็กและขดลวดลงไปในตัวถังได้ จึงเลือกใช้ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 600 mm.

### 3. การประกอบสร้างหม้อแปลงทดสอบ

หลังจากที่ประกอบหม้อแปลงในตัวถังเรียบร้อยแล้ว จากนั้นก็นำหม้อแปลงไปผ่านการอบในตู้อบที่อุณหภูมิ  $20^{\circ}\text{C}$  เพื่อไล่ความชื้นออกจากชุดขดลวด หลังจากนั้นจึงนำชิ้นส่วนที่เหลือมาประกอบเข้าด้วยกันแล้วนำหม้อแปลงไปทำสุญญากาศ (Vacuum) พร้อมกับเติมน้ำมันหม้อแปลงลงไป น้ำมันที่ใช้ต้องผ่านการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าก่อนด้วยเครื่องทดสอบน้ำมันมาตรฐาน IEC 156, 1963

#### 4. การทดสอบและประเมินผล

หม้อแปลงทดสอบที่จัดสร้างขึ้น มีการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60076-1, 2000 และมาตรฐาน IEC 60060 – 1, 1989 กำหนดดังนี้

- การทดสอบหาค่ากำลังสูญเสียเมื่อมีโหลดและไม่มีโหลด
- การทดสอบอัตราส่วนแรงดัน
- การทดสอบความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดัน
- การทดสอบที่แรงดันพิกัด

#### หม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ

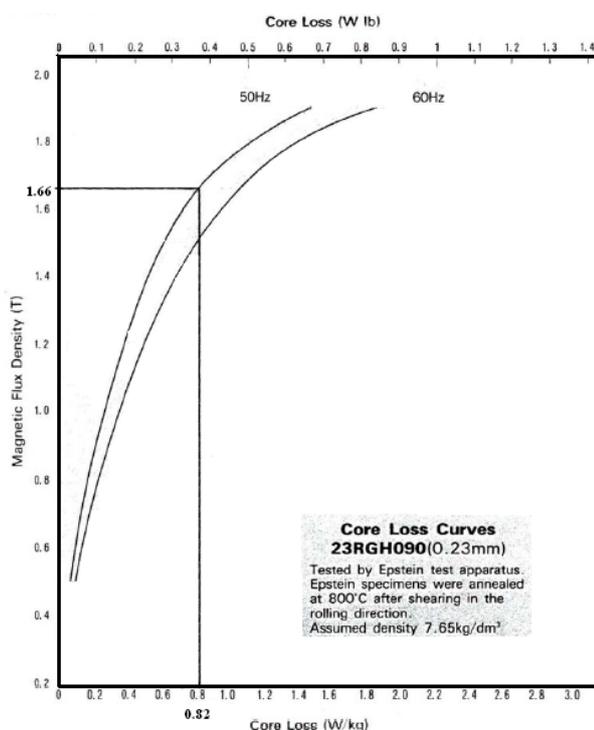
หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นหม้อแปลง 1 เฟส ขนาด 230V/23 kV, 30 kVA, 50 Hz. มีขดลวด 2 ชุด คือ ชุดขดลวดแรงต่ำ ชุดขดลวดแรงสูง ซึ่งมีค่ากำหนดดังนี้

**ตารางที่ 1** ค่ากำหนดของพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ

ค่ากำหนดของพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ			
ข้อมูล	ค่าออกแบบ	ค่าจริง	หน่วย
กำลังไฟฟ้า S	30	30	kVA
แรงดันป้อนเข้า (แรงดันต่ำ) $U_1$	230	230	V
แรงดันจ่ายออก (แรงดันสูง) $U_2$	23	23.1	kV
กระแสป้อนเข้า $I_1$	130	130.435	A
กระแสจ่ายออก $I_2$	1.3	1.3	A
จำนวนเฟส	1	1	$\phi$
ความถี่	50	50	Hz.
เปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าลัดวงจร	2	2	%

### 1. ลักษณะของแกนเหล็ก

เนื่องจากแรงดันทดสอบต้องใกล้เคียงรูปคลื่น sine มากที่สุด ดังนั้นค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B_c$ ) จะต้องอยู่ในย่านเชิงเส้น จากกราฟ Core Loss Curve 23RGH090 (เหล็กซิลิกอน) ในภาพที่ 16 ในการออกแบบจึงเลือกใช้ค่า  $B_c$  เท่ากับ 1.66 T เพราะฉะนั้นค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย ( $P_c$ ) มีค่าเท่ากับ 0.82 W/kg. ในที่นี้จะเพิ่มค่าความสูญเสียในการประกอบอีกประมาณ 20 % ค่า  $P_c$  จึงมีค่าเท่ากับ 0.984 W/kg.



ภาพที่ 16 กราฟ Core Loss Curve 23RGH090

เนื่องจากค่า  $B_c$  มีความเป็นเชิงเส้นสูงที่สุด ซึ่งพื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็กสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$A_c = C_{PF} \times \sqrt{\left( \frac{S}{(ph \times f)} \right)} \quad \text{cm}^2 \quad (3)$$

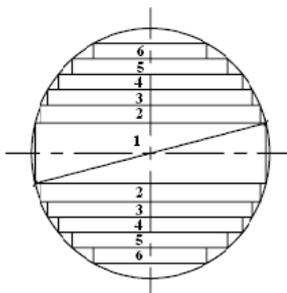
$A_c$  คือ พื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็ก ( $\text{cm}^2$ )  
 $S$  คือ ค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลง (kVA)

$f$	คือ	ค่าความถี่ (Hz.)
$ph$	คือ	จำนวนเฟส
$C_{PF}$	คือ	ค่าฟอร์มแฟกเตอร์ของหม้อแปลง ( $m^2 J^{1/2}$ )

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น} \quad A_c &= 4.69 \times 10^{-4} \times \sqrt{(30 \times 10^3)/(1 \times 50)} \\
 &= 11.49 \times 10^{-3} \text{ m}^2. \\
 &= 114.9 \text{ cm}^2.
 \end{aligned}$$

เมื่อ  $C_{PF}$  คือ ค่าฟอร์มแฟกเตอร์ของหม้อแปลง สำหรับหม้อแปลงแบบแกนเหล็กจุ่มในน้ำมัน บริษัทผู้ผลิตใช้  $4.69 \times 10^{-4} \text{ m}^2 J^{1/2}$

แกนเหล็กเป็นแบบคอร์ (core type) มีพื้นที่ภาคตัดขวางเป็นแบบสี่เหลี่ยม 6 ชั้น บรรจุอยู่ในวงกลม



ภาพที่ 17 ภาคตัดขวางเป็นแบบสี่เหลี่ยม 6 ชั้น

แกนเหล็กแบบ 6 ชั้นนี้จะให้ค่าแฟกเตอร์พื้นที่แกนเหล็กในวงกลม ( $F_C$ ) ดังนี้

$$F_C = 89.43 \%$$

เส้นผ่านศูนย์กลางของภาคตัดขวางของแกนเหล็ก ( $D$ ):(cm.) หาได้จากสมการ

$$\begin{aligned}
 D &= \sqrt{(A_c \times 4)/(\pi \times F_C \times P_C)} \\
 &= \sqrt{(11.49 \times 4)/(3.14 \times 0.8943 \times 0.984)}
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$= 0.129 \text{ m.}$$

$$= 12.9 \text{ cm.}$$

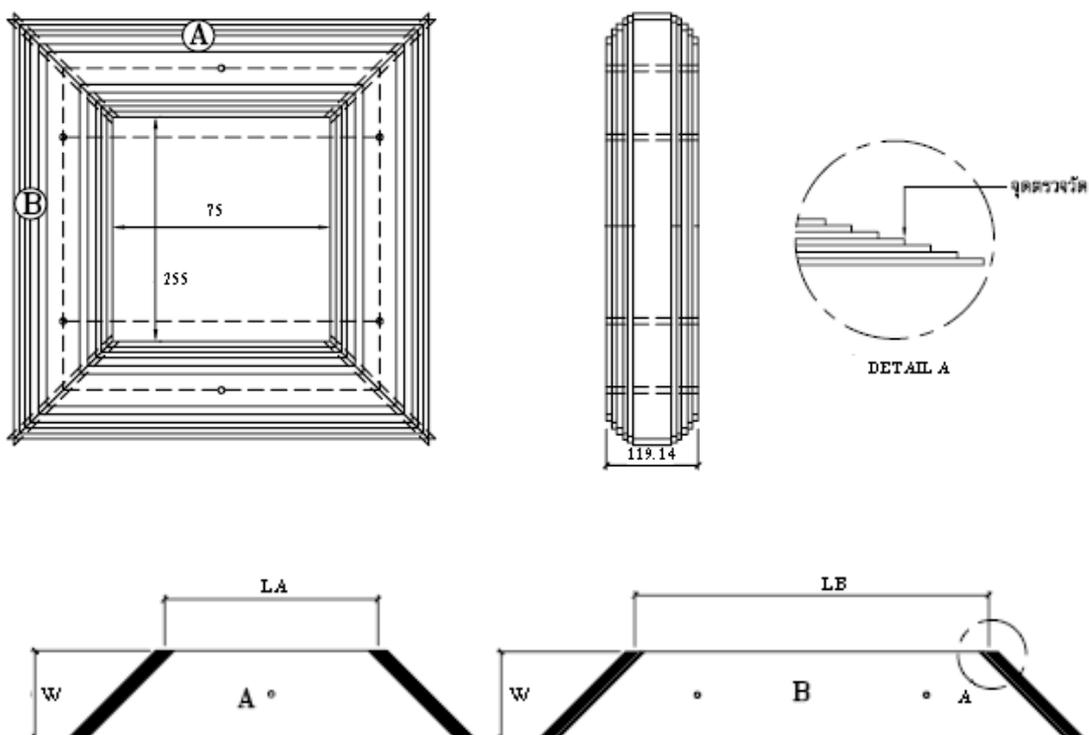
เส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก ( $\phi$ )

$$\phi = B_c \times A_c \quad (5)$$

$$= 1.66 \times 11.49 \times 10^{-3}$$

$$= 0.019 \text{ Wb}$$

การออกแบบแกนเหล็กจะใช้เหล็กซิลิกอน 23RGH090 ความหนา 0.23 mm โดยนำแต่ละแผ่นมาวางซ้อนกันดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 รูปร่างและภาคตัดขวางแกนเหล็ก

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของแกนเหล็กซิลิกอน 23RGH090 ความหนา 0.23 mm.

Step No.	Width (W)	LA	LB	Cycles	Thickness	Net Mass/Unit
1	12	75	255	24	38.64	40.44
2	11	85	265	16	25.76	24.74
3	10	95	275	8	12.88	11.23
4	9	105	285	8	12.88	10.11
5	7	125	305	10	16.10	9.83
6	5	145	325	8	12.88	5.62
					119.14	101.97

## 2. ลักษณะของขดลวด

จำนวนรอบของขดลวด คำนวณได้จากสมการ

$$E = 4.44 f N B_c A_c$$

$$N = \frac{E}{4.44 f B_c A_c} \quad \text{รอบ} \quad (6)$$

เมื่อ	$N$	คือ	จำนวนรอบของขดลวด (รอบ)
	$E$	คือ	แรงดันไฟฟ้า (kV)
	$f$	คือ	ความถี่ (Hz.)
	$B_c$	คือ	ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (T)
	$A_c$	คือ	พื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็ก (cm <sup>2</sup> )

จำนวนรอบของขดลวดด้านแรงดันต่ำ ( $N_1$ )

$$N_1 = \frac{230}{4.44 \times 50 \times 0.019}$$

$$\begin{aligned}
 &= 55 \text{ รอบ} \\
 \text{Volt / Turn} &= 230 / 55 \\
 &= 4.18 \text{ V/T}
 \end{aligned}$$

จำนวนรอบของขดลวดด้านแรงดันสูง( $N_2$ )

$$\begin{aligned}
 N_2 &= \frac{23000}{4.44 \times 50 \times 0.019} \\
 &= 5453 \text{ รอบ} \\
 \text{Volt / Turn} &= 23000 / 5453 \\
 &= 4.22 \text{ V/T}
 \end{aligned}$$

การคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของขดลวด หาได้จากสมการ

$$A = \frac{I}{J} \quad \text{mm}^2. \quad (7)$$

เมื่อ	A	คือ	พื้นที่หน้าตัดของขดลวด ( $\text{mm}^2$ )
	I	คือ	กระแสป้อนเข้าของหม้อแปลงในแต่ละด้าน (A)
	J	คือ	Current Density ของลวด ( $\text{A}/\text{cm}^2$ )

การคำนวณหาน้ำหนักของขดลวดหาได้จากสมการ

$$w = N \times A \times L_{ave} \times S_g \quad \text{kg.} \quad (8)$$

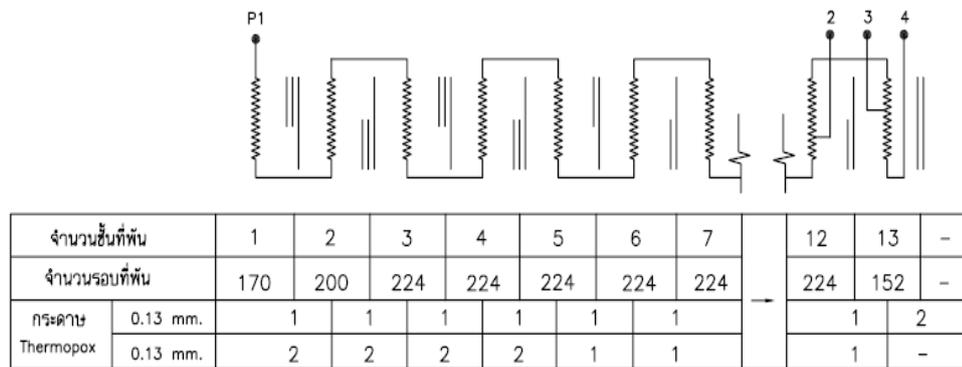
เมื่อ	w	คือ	น้ำหนักของขดลวด (kg.)
	N	คือ	จำนวนรอบ (รอบ)
	A	คือ	พื้นที่ภาคตัดขวาง ( $\text{cm}^2$ )
	$L_{ave}$	คือ	ความยาวรอบเฉลี่ย (cm.)
	$S_g$	คือ	$8.89 \times 10^{-3} \text{ kg./cm}^3$ . (Specific Gravity)

การออกแบบขดลวดด้านแรงดันต่ำ ออกแบบให้มีขดลวด 2 ชุด ขนานกัน โดยความหนาแน่นกระแสกำหนดไว้ที่  $272 \text{ A/cm}^2$ .

การออกแบบขดลวดด้านแรงดันสูง ออกแบบให้มีขดลวด 2 ชุด อนุกรมกัน โดยความหนาแน่นกระแส กำหนดไว้ที่  $258.25 \text{ A/cm}^2$ .

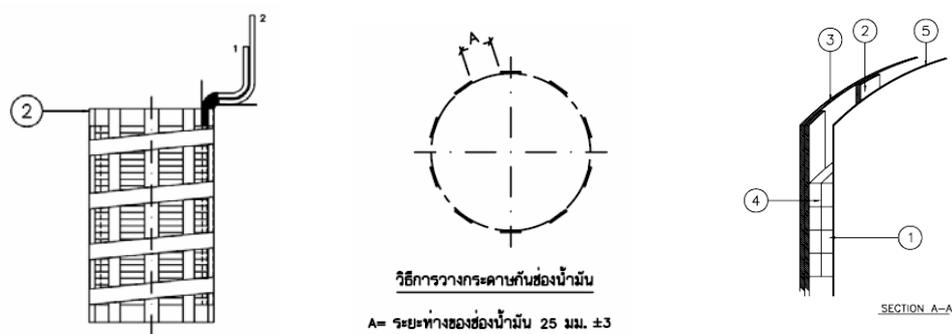
### 3. ลักษณะการพันขดลวด

ขดลวดแรงดันต่ำ แรงดันสูง เป็นขดลวดชนิด 1 PVF พันแบบขดลวดชั้นทรงกระบอก



ภาพที่ 19 แสดงการพันขดลวดด้านแรงต่ำและแรงสูง

### 4. ลักษณะการวางกระดาษฉนวน



ภาพที่ 20 การวางกระดาษฉนวนด้านแรงดันต่ำ

ตารางที่ 3 ขนาดของกระดาษด้านแรงดันต่ำ

No.	Part name	Size
1	ลวดทองแดงหุ้มกระดาษ	3×8 mm.
2	กระดาษกันช่องนำมัน	1.6 mm.
3	กระดาษกันแรงสูง แรงต่ำ	1.6 mm.
4	กระดาษฉนวนรองชั้น	0.18 mm.
5	กระดาษกันแม่เหล็ก	0.80 mm.

ตารางที่ 4 ขนาดของกระดาษด้านแรงดันสูง

No.	Part Name	Size
1	ลวดทองแดงอาบน้ำยา PVF#21	$\phi$ 0.8 mm.
2	กระดาษ(รองแบบ)	0.5 mm.
3	กระดาษฉนวนรองชั้น ( Thermopox )	0.13 mm.

### สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลนี้เป็นการวิเคราะห์ที่เรียกว่าการวิเคราะห์ถดถอย(Regression Analysis) เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างของตัวแปร 2 ตัวแปร โดยให้ตัวแปรหนึ่งเป็นตัวแปรอิสระ 1 ตัว หรือมากกว่า และอีกตัวแปรหนึ่งเป็นตัวแปรตาม จะใช้เทคนิคของการวิเคราะห์ความถดถอย ทำให้สามารถพยากรณ์ค่าของตัวแปรตามเมื่อทราบค่าของตัวแปรอิสระ (วิยะดา, 2546)

โดยเริ่มพิจารณาว่าตัวแปรตามและตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กันในลักษณะใด สร้างรูปแบบการถดถอยเพื่อแทนลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและสร้างสมการถดถอย (Regression Equation) จากรูปแบบที่กำหนดนั้น โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method) สมการถดถอยที่สร้างขึ้นจะเป็นสมการที่เหมาะสมหรือไม่นั้นสามารถพิจารณาได้จากค่าสถิติและการทดสอบสมมติฐาน ค่าสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination,  $R^2$ ) ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับแล้ว (Adjusted Coefficient of Determination)

ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Error Mean of Square) เป็นต้น ส่วนการทดสอบสมมติฐานเป็นการพิจารณาว่าค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยบางค่าเท่ากับ 0 หรือไม่

รูปแบบสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ PD ในตัวอย่างพารามิเตอร์หม้อแปลง (มีหน่วยเป็น pC) กับ แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (มีหน่วยเป็น kV) ด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอย โดยใช้โปรแกรม SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) for Windows Version 13.0 ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ที่ไม่แน่ใจว่าความสัมพันธ์อยู่ในรูปใดจะใช้คำสั่ง Curve Estimation ซึ่งเป็นคำสั่งย่อยของ Regression ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความถดถอยที่ Y และ X มีความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้วิเคราะห์หาสมการความถดถอยต่างๆ ดังนี้

$$\text{สมการ Linear} \quad : \quad Y = b_0 + b_1 X \quad (9)$$

$$\text{สมการ Logarithmic} \quad : \quad Y = b_0 + b_1 \ln(X) \quad (10)$$

$$\text{สมการ Inverse} \quad : \quad Y = b_0 + b_1 \ln(X) \quad (11)$$

$$\text{สมการ Quadratic} \quad : \quad Y = b_0 + b_1 X + b_2 X^2 \quad (12)$$

$$\text{สมการ Cubic} \quad : \quad Y = b_0 + b_1 X + b_2 X^2 + b_3 X^3 \quad (13)$$

$$\text{สมการ Compound} \quad : \quad Y = b_0 (b_1)^X \quad (14)$$

$$\text{สมการ Power} \quad : \quad Y = b_0 (X)^{b_1} \quad (15)$$

$$\text{สมการ S} \quad : \quad Y = e^{(b_0 + b_1 \frac{1}{X})} \quad (16)$$

$$\text{สมการ Growth} \quad : \quad Y = e^{(b_0 + b_1 X)} \quad (17)$$

$$\text{สมการ Exponential} \quad : \quad Y = b_0 (e^{b_1 X}) \quad (18)$$

สมการ Logistic : 
$$Y = \frac{1}{\frac{1}{u} + b_0(b_1)^x} \quad (19)$$

โดย

$X$	คือ	แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (มีหน่วยเป็น kV)
$Y$	คือ	ค่าของ PD ในตัวอย่างพารามิเตอร์หม้อแปลง (มีหน่วยเป็น pC)
$b_0$	คือ	ค่าคงที่
$b_1, b_2, b_3$	คือ	สัมประสิทธิ์การถดถอย
$u$	คือ	ค่าขอบเขตบนของรูปแบบโลจิสติก
$\ln$	คือ	log ฐาน e

การเลือกรูปแบบสมการถดถอยนั้น จะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ  
(Coefficient of Determination)

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

1. Variable Transformer 0 to 120%, 120 Volt or 240 Volt
2. PD Detector XDP
3. XDP-021 Line filter
4. XDP-208 Line filter cable
5. หม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ 1 เฟส พิกัด 230 V/23 kV, 30 kVA, 50Hz.
6. หม้อแปลงเก๋า พิกัด 220 V/19 kV, 10 kVA, 50 Hz.
7. หม้อแปลงทดสอบ พิกัด 220V/100 kV, 5 kVA, 50 Hz.
8. XDP-045 HV Capacitive Coupling 100 pF 100 kV
9. XDP-206 Grid plane
10. XDP-205 Integrator filter 0 dB 2 MHz
11. WIR-C-001 Coaxial cable
12. Calibrator in picoCoulomb
13. Control Desk
14. LV meter and HV meter
15. High voltage cable 2 feet

### วิธีการ

#### 1. ทำการวัดค่า PD

1.1 หม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ 1 เฟส พิกัด 230 V/23 kV, 30 kVA, 50 Hz.

- ทำการวัดค่า PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อหม้อแปลงมีน้ำมันหม้อแปลงเต็มถึง

- ทำการวัดค่า PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อถ่ายน้ำมันหม้อแปลง  
ออกครึ่งถัง

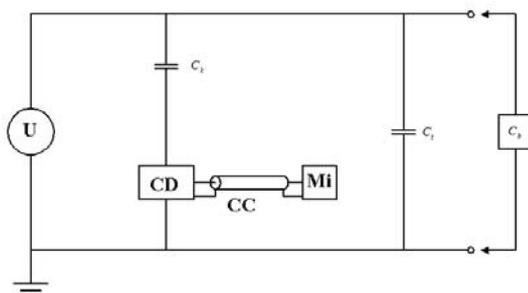
- ทำการวัดค่า PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อถ่ายน้ำมันหม้อแปลง  
ออกหมดถัง

1.2 หม้อแปลงเก่า พิกัด 220 V/19 kV, 10 kVA, 50 Hz.

1.3 หม้อแปลงทดสอบ พิกัด 220 V/100 kV, 5 kVA, 50 Hz.

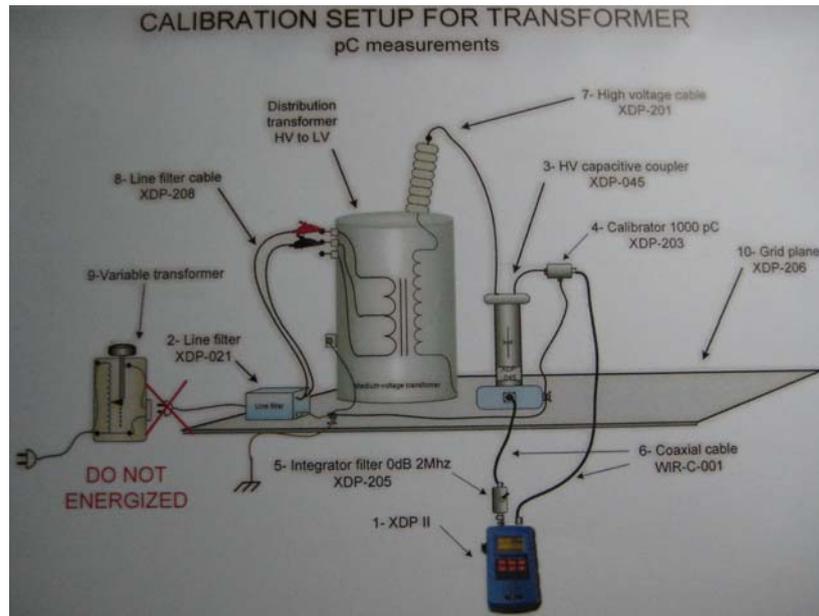
## 2. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

### วงจรการวัด PD

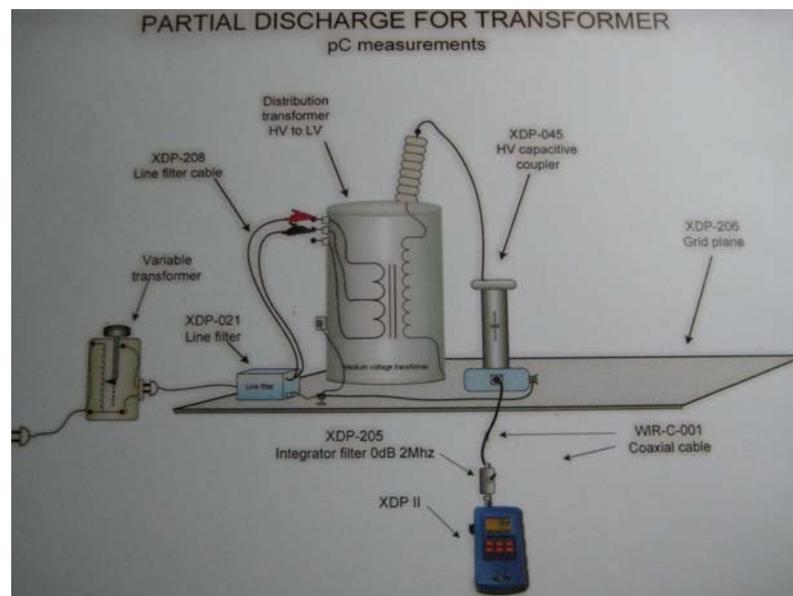


ภาพที่ 21 วงจรการวัดค่าพาเซิลดิสชาร์จ

เมื่อ	U	คือ	แรงดันที่ป้อนเข้าในวงจรทดสอบ
	$C_k$	คือ	Capacitive Coupler 100 pF 100 kV
	CD	คือ	XDP-021 Line filter
	CC	คือ	Conecting cable
	Mi	คือ	PD Detector XDP
	$C_b$	คือ	Calibrator in picoCoulomb
	$C_t$	คือ	หม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ 1 เฟส พิกัด 230 V/23 kV, 30 kVA, 50 Hz. หม้อแปลงเก่า พิกัด 220 V/19 kV, 10 kV, 50 Hz. และหม้อแปลงทดสอบ พิกัด 220V/100 kV, 5 kVA, 50 Hz.



ภาพที่ 22 การต่อวงจร Calibration setup for Transformer



ภาพที่ 23 การต่อวงจร Partial Discharge for Transformer

## ขั้นตอนการทดลอง

### ขั้นตอนเตรียมการทดสอบ Partial Discharge (PD)

เนื่องจากการทดสอบมีการปรับระดับแรงดันตั้งแต่ 0-22 kV (ระดับละ 1 kV) จึงจำเป็นต้องอ่านค่าแรงดันขณะทดสอบ แต่ Capacitive Voltage Divider มีค่าความถี่ประจุสูงเมื่อเทียบกับ HV Capacitive Coupler เพื่อป้องกันผลการทดสอบที่คลาดเคลื่อน ในการทดสอบจึงต้องปลด Capacitive Voltage Divider ออกจากระบบ

ในการทดสอบครั้งนี้จึงต้องวัดค่าด้านแรงดันสูงเทียบกับด้านแรงดันต่ำก่อนทำการทดสอบ โดยการปรับระดับแรงดัน 0-22 kV ระดับละ 1 kV ครอบคลุมค่าโดยไม่ใช้วิธีเทียบอัตราส่วน(Ratio) เพื่อป้องกันผลจากความแม่นยำในย่านต่ำและย่านสูงของเครื่องวัด(Accuracy & Linearity)

### ขั้นตอนการสอบเทียบ (Calibration)

การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในหน่วย picoCoulomb (pC) จำเป็นต้องสอบเทียบค่าของอุปกรณ์ที่ต่อรวมในระบบทดสอบก่อนเสมอ ในการทดสอบครั้งนี้มีขั้นตอนดังนี้

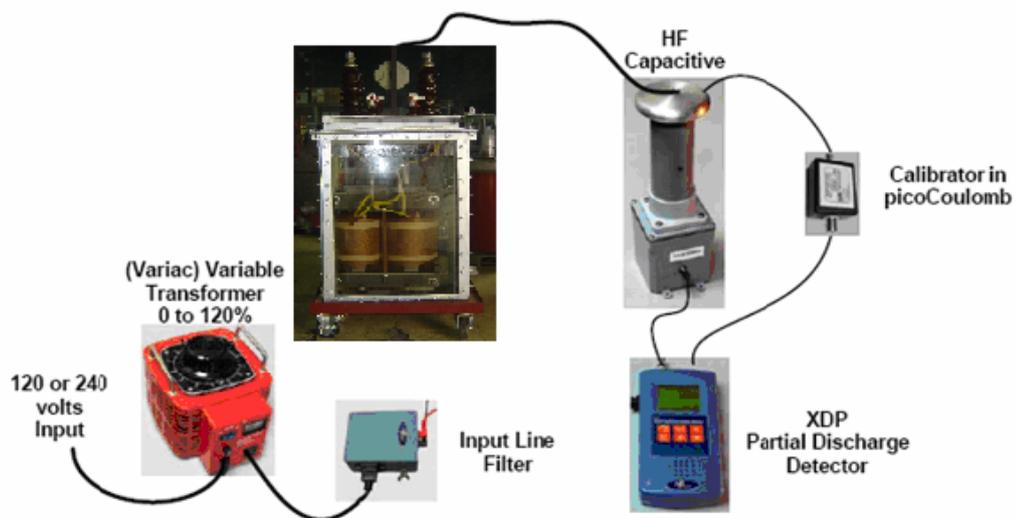
1. ทำการต่อวงจรสอบเทียบตามภาพที่ 22 โดยไม่ต่อ Variable Transformer เข้าระบบ
2. เข้าสู่ Mode Calibration ของ Partial Discharge Detector(XDP-II) เลือก Calibration เป็นที่ค่า 1000 pC, XDP-II ซึ่งจะสามารถจ่ายสัญญาณ 1000 pC ที่ HV Capacitive Coupler
3. จบขั้นตอนการสอบเทียบ

### ขั้นตอนการทดสอบ Partial Discharge (PD)

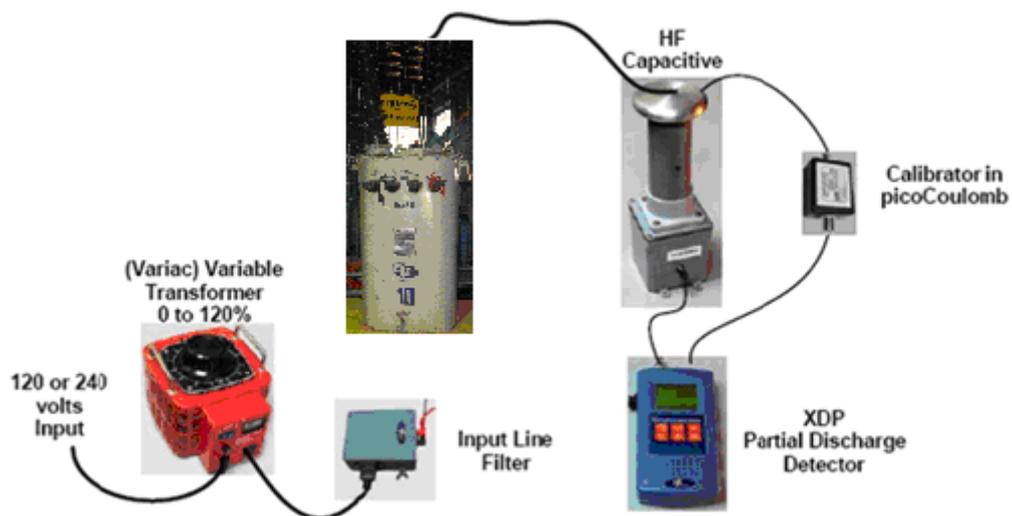
1. ทำการต่อวงจรสอบเทียบตามภาพที่ 23
2. ทำการปรับระดับแรงดันตั้งแต่ 0-22 kV ระดับละ 1 kV โดยอ่านค่าระดับแรงดันจาก LV Meter ให้ตรงกับระดับแรงดันข้างต้น
3. ทำการวัดค่า PD โดยการอ่านค่าจากเครื่อง XDP-II ซึ่งเครื่องนี้จะอ่านค่าดิสชาร์จบางส่วนอัตโนมัติตลอดเวลา โดยอาศัยการส่งผ่านความถี่สูงในย่าน PD ของ HV Capacitive Coupler



ภาพที่ 24 Distribution Transformer PD Measuring Kit



ภาพที่ 25 วงจรการทดสอบวัดค่า PD ของหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ โดยใช้ PD Detector XDP



ภาพที่ 26 วงจรการทดสอบวัดค่า PD ของหม้อแปลงเก่าโดยใช้ PD Detector XDP



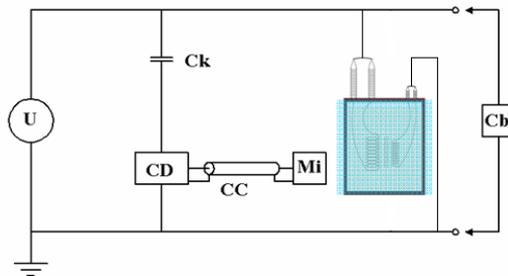
ภาพที่ 27 วงจรการทดสอบวัดค่า PD ของ Test Transformer โดยใช้ PD Detector XDP

## ผลและวิจารณ์

### ผล

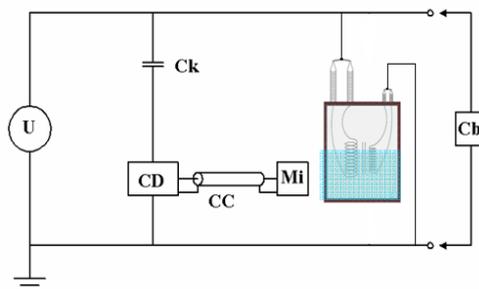
1. ผลการทดสอบการวัดค่า PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ 1 เฟส พิกัด 230V/23 kV, 30kVA, 50 Hz.

1.1 การทดสอบการวัดค่า PD ที่ค่าแรงดันต่างกัน ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ เมื่อหม้อแปลงมีน้ำมันหม้อแปลงเต็มถึง



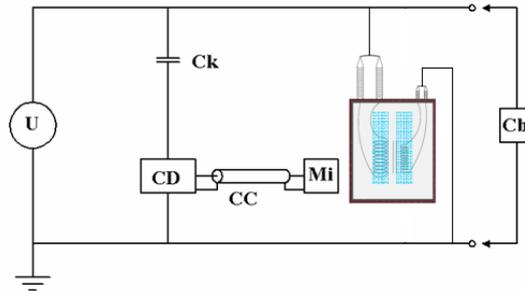
ภาพที่ 28 วงจรการวัด PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ เมื่อหม้อแปลงมีน้ำมันหม้อแปลงเต็มถึง

1.2 การทดสอบการวัดค่า PD ที่ค่าแรงดันต่างกัน ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ เมื่อถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกครึ่งถึง



ภาพที่ 29 วงจรการวัดค่า PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ เมื่อถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกครึ่งถึง

1.3 การทดสอบการวัดค่า PD ที่ค่าแรงดันต่างกัน ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ  
เมื่อถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกหมดถึง



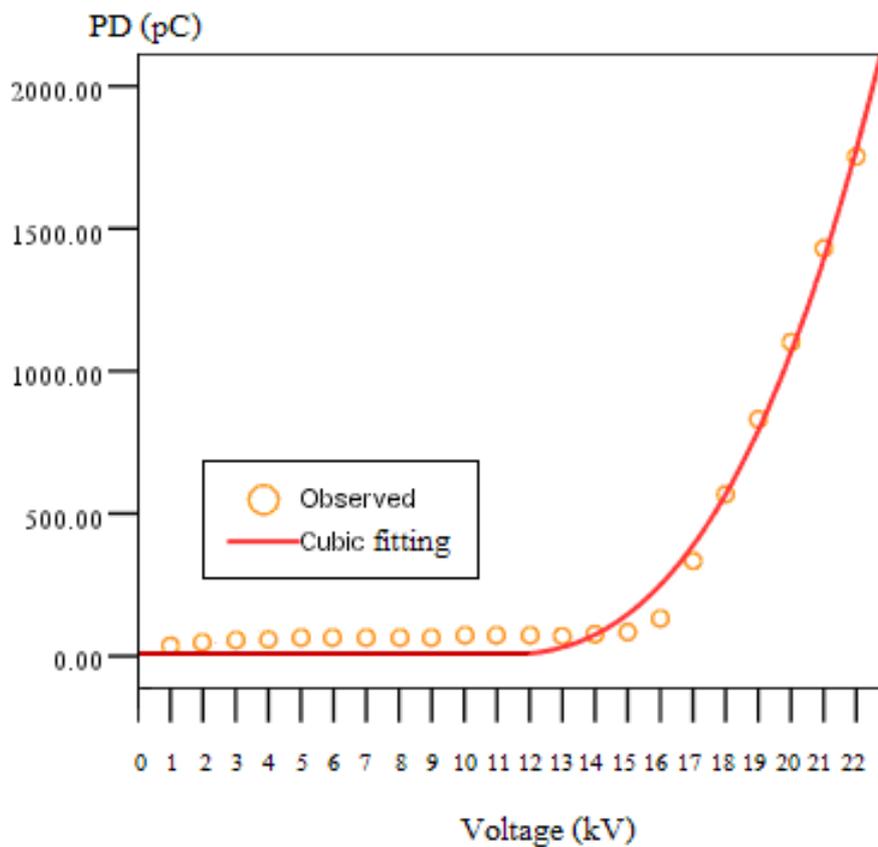
ภาพที่ 30 วงจรการวัดค่า PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ  
เมื่อถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกหมดถึง

ตารางที่ 5 ค่าของ PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบที่ปริมาณน้ำมันในหม้อแปลงต่างๆกัน

แรงดันทดสอบ (kV)	ผล PD ที่ได้ (pC)		
	น้ำมันเต็มถึง	ถ่ายน้ำมันออกครึ่งถึง	ไม่มีน้ำมันในถึง
1	36	48	57
2	39	52	59
3	45	63	65
4	58	63	72
5	61	68	78
6	66	71	81
7	66	75	84
8	66	75	84
9	66	75	84
10	67	76	85
11	68	77	86
12	68	78	88
13	70	79	93

ตารางที่ 5 ค่าของ PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบที่ปริมาณน้ำมันในหม้อแปลงต่างๆกัน  
(ต่อ)

แรงดันทดสอบ (kV)	ผล PD ที่ได้ (pC)		
	น้ำมันเต็มถัง	ถายน้ำมันออกครึ่งถัง	ไม่มีน้ำมันในถัง
14	77	88	109
15	84	99	120
16	132	263	312
17	334	521	671
18	568	849	939
19	831	1213	1398
20	1102	1768	2251
21	1431	2249	3162
22	1753	2831	4191



ภาพที่ 31 กราฟแสดงค่าของ PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ  
เมื่อหม้อแปลงมีน้ำมันหม้อแปลงเต็มถึง

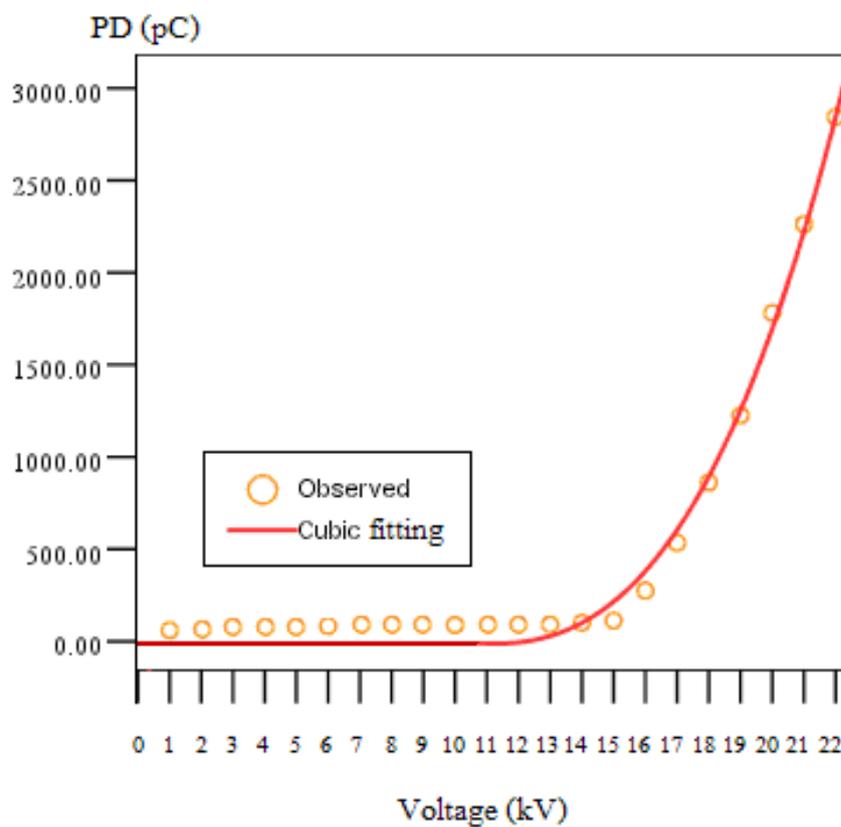
จาก 
$$Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 + b_3X^3 \quad (20)$$

เมื่อ  $X =$  แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (มีหน่วยเป็น kV)

$Y =$  ค่าของ PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อหม้อแปลงมี  
น้ำมันหม้อแปลงเต็มถึง (มีหน่วยเป็น pC)

จะได้สมการ

$$Y = -134.798 + 119.714X - 17.968X^2 + 0.749X^3 \quad (21)$$



ภาพที่ 32 กราฟแสดงค่าของ PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ เมื่อถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกครึ่งถัง

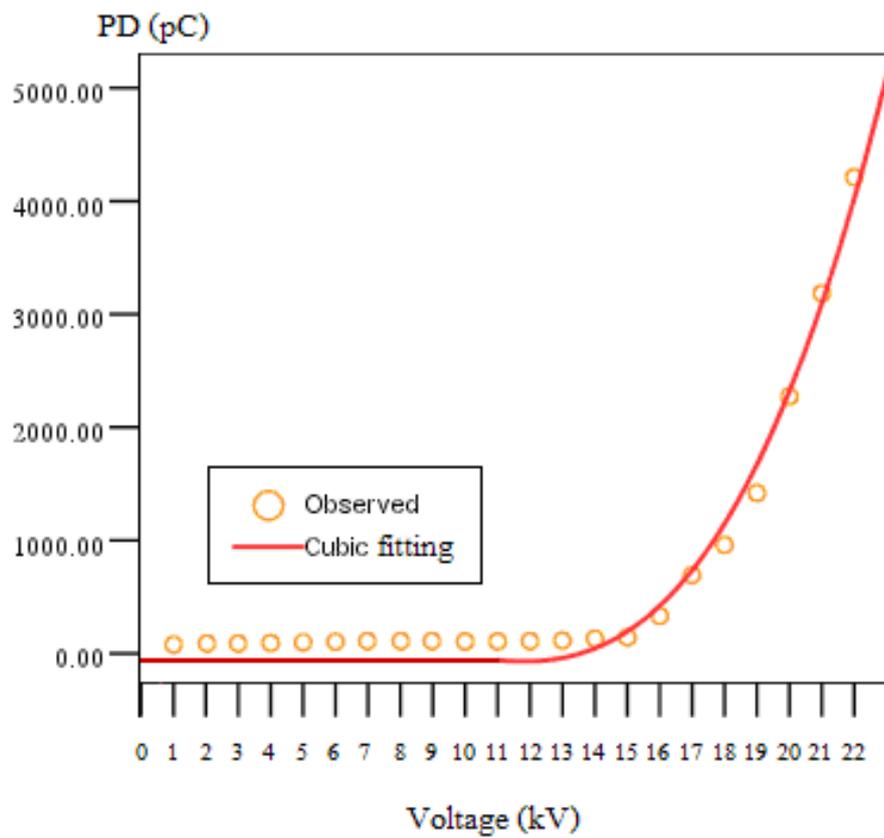
จาก 
$$Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$$

เมื่อ  $X =$  แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (มีหน่วยเป็น kV)

$Y =$  ค่าของ PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกครึ่งถัง (มีหน่วยเป็น pC)

จะได้สมการ

$$Y = -224.889 + 188.430X - 28.697X^2 + 1.202X^3 \quad (22)$$



ภาพที่ 33 กราฟแสดงค่าของ PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ  
เมื่อถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกหมดถึง

จาก 
$$Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$$

เมื่อ  $X =$  แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (มีหน่วยเป็น kV)

$Y =$  ค่าของ PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อถ่ายน้ำมันหม้อ  
แปลงออกหมดถึง (มีหน่วยเป็น pC)

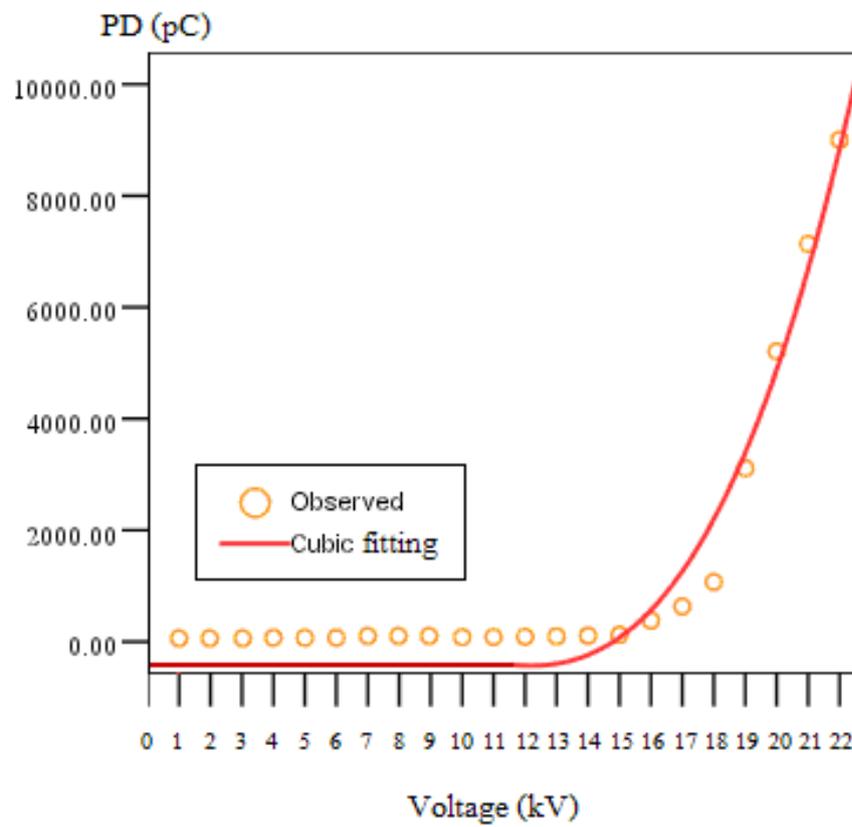
จะได้สมการ

$$Y = -442.850 + 325.658X - 47.590X^2 + 1.908X^3 \quad (23)$$

## 2. ผลการทดสอบการวัด PD ใน หม้อแปลงเก่า พิกัด 220 V/19 kV, 10 kVA, 50 Hz.

ตารางที่ 6 ค่าของ PD ในหม้อแปลงเก่าพิกัด 220 V/19 kV, 10 kVA, 50 Hz.

แรงดันทดสอบ (kV)	ค่าของ Partial Discharge (pC)
1	60
2	63
3	63
4	68
5	68
6	70
7	73
8	75
9	77
10	79
11	82
12	88
13	96
14	107
15	122
16	378
17	632
18	1071
19	3110
20	5208
21	7135
22	9003



ภาพที่ 34 กราฟค่าของ PD ในน้ำมันหม้อแปลงเก่า พิกัด 220 V/19 kV, 10 kVA, 50 Hz.

จาก  $Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$

เมื่อ  $X =$  แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (มีหน่วยเป็น kV)

$Y =$  ค่าของ PD ในน้ำมันหม้อแปลงเก่า (มีหน่วยเป็น pC)

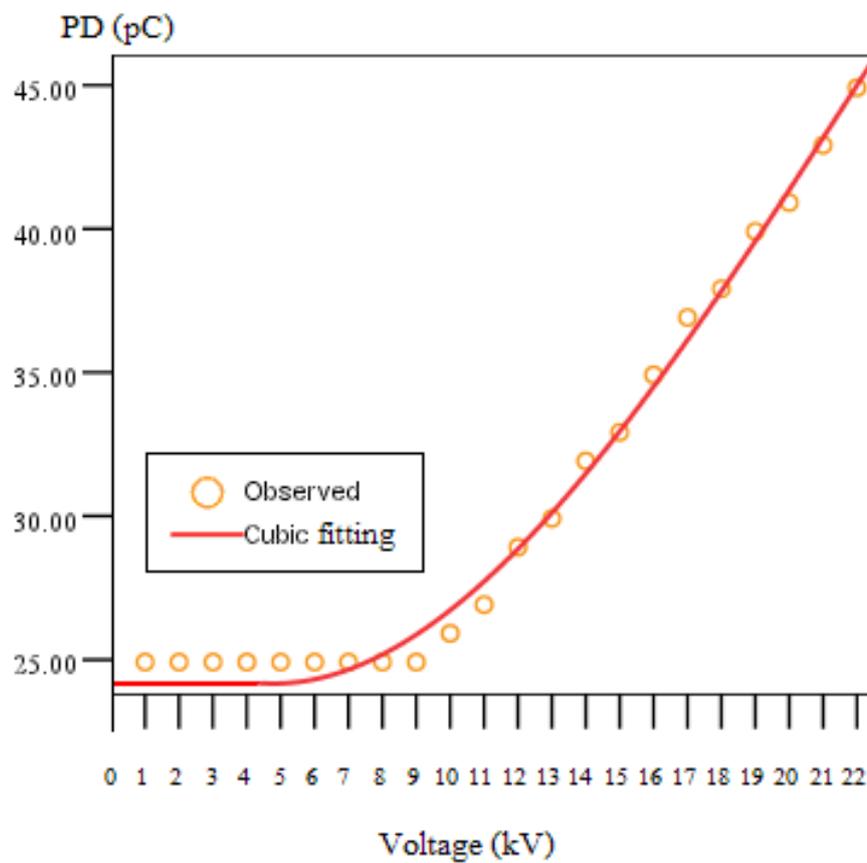
จะได้สมการ

$$Y = -1216.531 + 815.890X - 117.986X^2 + 4.622X^3 \quad (24)$$

## 3. ผลการทดสอบการวัด PD ของหม้อแปลงทดสอบ พิกัด 220V/100 kV, 5 kVA, 50 Hz.

ตารางที่ 7 ค่าของ PD ในหม้อแปลงทดสอบ พิกัด 220V/100 kV, 5 kVA, 50 Hz.

แรงดันทดสอบ (kV)	ค่าของ Partial Discharge (pC)
1	25
2	25
3	25
4	25
5	25
6	25
7	25
8	25
9	25
10	26
11	27
12	29
13	30
14	32
15	33
16	35
17	37
18	38
19	40
20	41
21	43
22	45



ภาพที่ 35 กราฟค่าของ PD ในหม้อแปลงทดสอบ พิกัด 220V/100 kV, 5 kVA, 50 Hz.

จาก 
$$Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$$

เมื่อ  $X =$  แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (มีหน่วยเป็น kV)

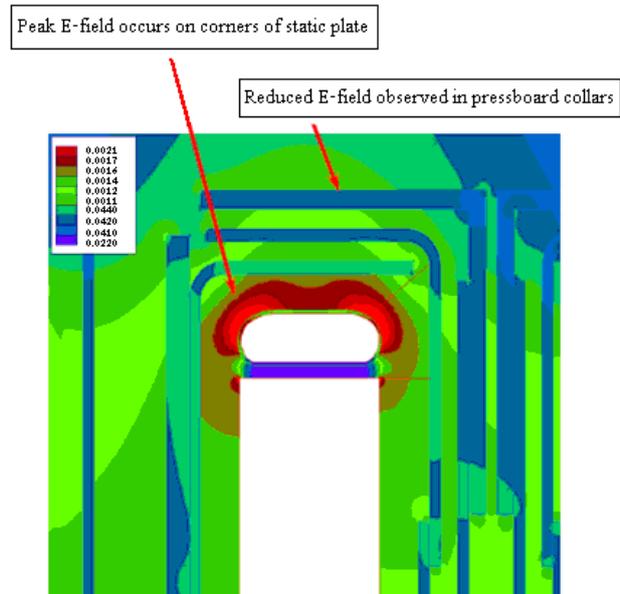
$Y =$  ค่าของ PD ในน้ำมันหม้อแปลงทดสอบ (มีหน่วยเป็น pC)

จะได้สมการ

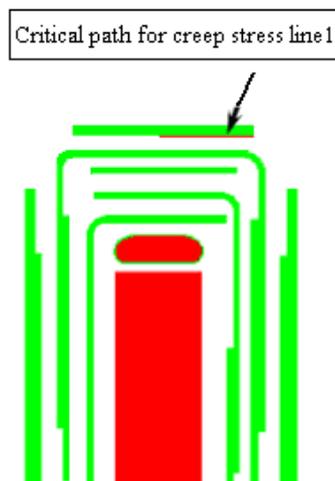
$$Y = 26.862 - 1.136X + 0.133X^2 - 0.002X^3 \quad (25)$$

#### 4. การ Simulate ค่า Partial Discharge ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ

##### Transformer Simulation 3D Transient with Schematic

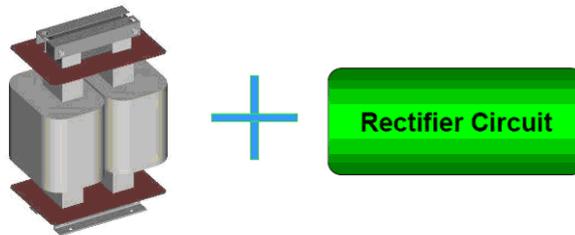
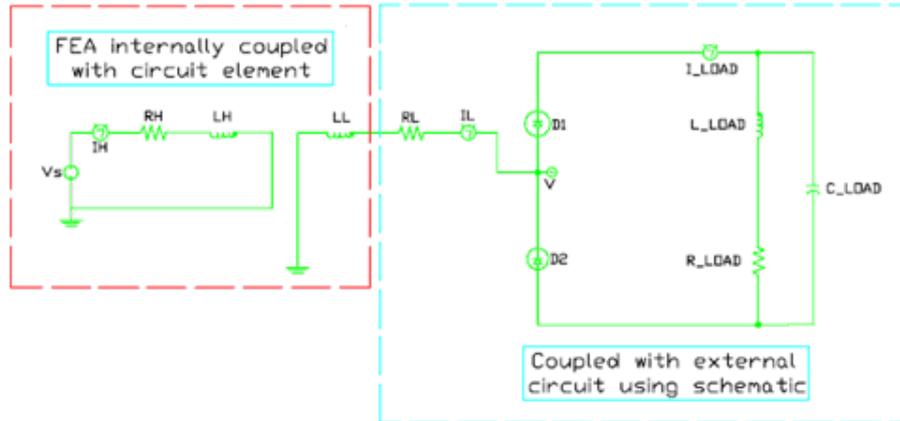


ภาพที่ 36 E-field Plot

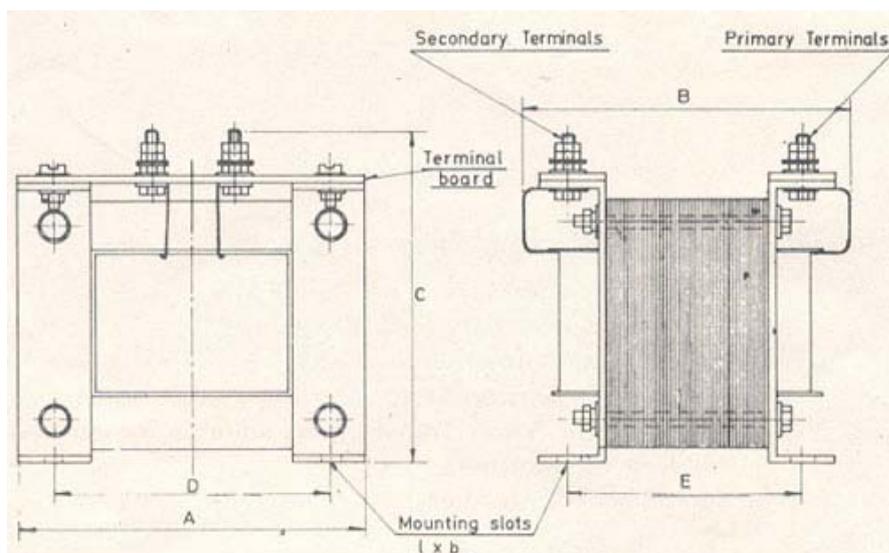


ภาพที่ 37 Peak electric field stress (V/m)

## Transformer Simulation 3D Transient with Schematic

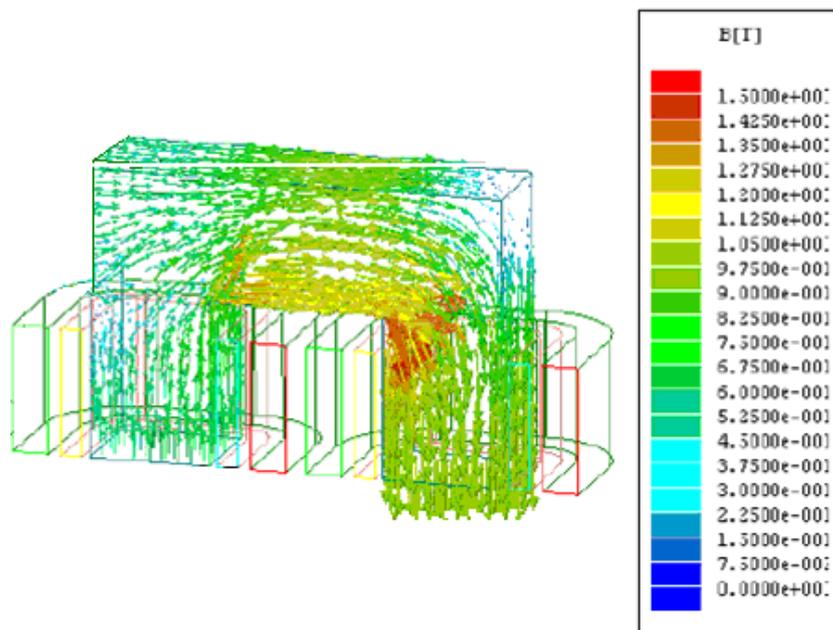


ภาพที่ 38 การต่อวงจรในการ Simulation

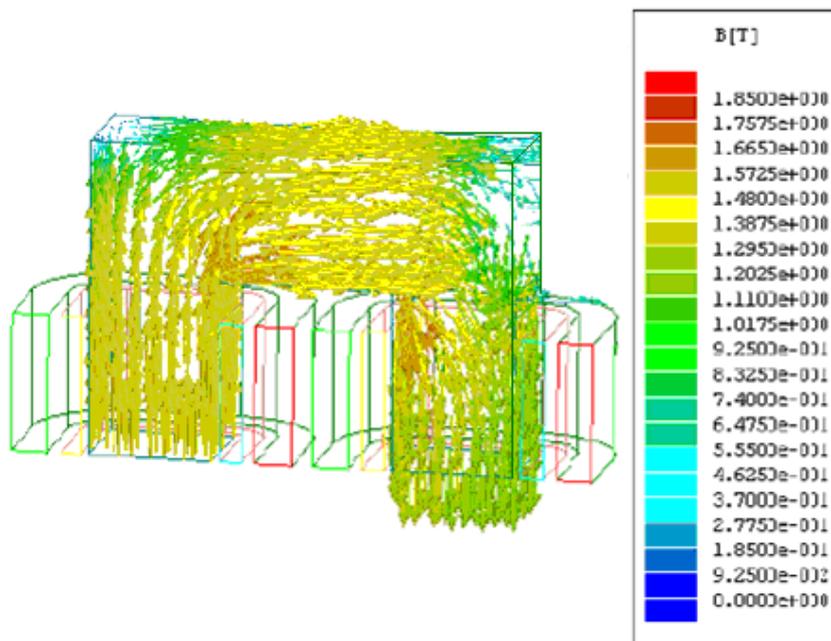


ภาพที่ 39 การออกแบบหม้อแปลงเพื่อใช้ในการ Simulation

ผลการ Simulation เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของหม้อแปลง



ภาพที่ 40 B Vector Plot เมื่อ  $t = 0.008$  s



ภาพที่ 41 B Vector Plot เมื่อ  $t = 0.011$  s

การ Simulation ค่า Partial Discharge ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ

จากกรณีที่ทำกร Simulate เพื่อหาค่า Partial Discharge ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ เมื่อทำการตัดมุมทั้งสองข้างของแกนเหล็กออกนั้น เราสามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆในแกนเหล็ก ได้เพื่อกำหนดขอบเขตในการตัดมุมทั้งสองข้างของแกนเหล็ก โดยได้ทำการค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กและค่ากระแสที่ไหลในแกนเหล็กดังนี้

สมการหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก ( $P_{Fe}$ )

$$P_{Fe} = \text{กำลังไฟฟ้าสูญเสียต่อน้ำหนัก} \times \text{น้ำหนักรวมของแกนเหล็ก} \quad (\text{W}) \quad (26)$$

สมการหาค่ากระแสสูญเสียกำลังไฟฟ้าในแกนเหล็ก ( $I_R$ )

$$I_R = \frac{P_{Fe}}{U} \quad (\text{A}) \quad (27)$$

ตารางที่ 8 แสดงค่าการคำนวณพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ

แกนเหล็กของหม้อแปลงจำลองต้นแบบ	ความยาวเฉลี่ยแกนเหล็ก (cm.)	น้ำหนักแกนเหล็กรวม (kg.)
1. เมื่อไม่ได้ตัดมุมแกนเหล็ก	114.0	101.970
2. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 1 cm.	113.6	101.582
3. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 2 cm.	113.2	101.224
4. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 3 cm.	112.8	100.884
5. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 4 cm.	112.4	100.509
6. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 5 cm.	112.0	100.151
7. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 6 cm.	111.6	99.794
8. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 7 cm.	111.2	99.436
9. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 8 cm.	110.8	99.078
10. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 9 cm.	110.4	98.720

ตารางที่ 8 แสดงค่าการคำนวณพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (ต่อ)

แกนเหล็กของหม้อแปลงจำลองต้นแบบ	ความยาวเฉลี่ยแกนเหล็ก (cm.)	น้ำหนักแกนเหล็กรวม (kg.)
11. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 10 cm.	110.0	98.363
12. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 11 cm.	109.6	98.005
13. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 12 cm.	109.2	97.646
14. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 13 cm.	108.8	97.289
15. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 14 cm.	108.4	96.932
16. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 15 cm.	108.0	96.575

จากตารางที่ 8 สามารถคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก ( $P_{Fe}$ ) และค่ากระแสสูญเสียกำลังไฟฟ้าในแกนเหล็ก ( $I_R$ ) ซึ่งกำหนดให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียต่อน้ำหนักมีค่าเท่ากับ 0.82 และได้แสดงการคำนวณดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 แสดงค่าการคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก ( $P_{Fe}$ ) และ ค่ากระแสสูญเสียกำลังไฟฟ้าในแกนเหล็ก ( $I_R$ )

แกนเหล็กของหม้อแปลงจำลองต้นแบบ	ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก ( $P_{Fe}$ ): (W)	ค่ากระแสสูญเสียกำลังไฟฟ้าในแกนเหล็ก ( $I_R$ ): (A)
1. เมื่อไม่ได้ตัดมุมแกนเหล็ก	83.615	0.3635
2. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 1 cm.	83.297	0.3622
3. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 2 cm.	83.004	0.3609
4. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 3 cm.	82.725	0.3597
5. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 4 cm.	82.417	0.3583
6. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 5 cm.	82.124	0.3571
7. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 6 cm.	81.831	0.3558
8. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 7 cm.	81.538	0.3545
9. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 8 cm.	81.244	0.3532

ตารางที่ 9 แสดงค่าการคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก ( $P_{Fe}$ ) และ ค่ากระแสสูญเสียกำลังไฟฟ้าในแกนเหล็ก ( $I_R$ ) (ต่อ)

แกนเหล็กของหม้อแปลงจำลองต้นแบบ	ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก ( $P_{Fe}$ ) : (W)	ค่ากระแสสูญเสียกำลังไฟฟ้าในแกนเหล็ก ( $I_R$ ) : (A)
10. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 9 cm.	80.951	0.3519
11. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 10 cm.	80.658	0.3507
12. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 11 cm.	80.364	0.3494
13. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 12 cm.	80.069	0.3481
14. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 13 cm.	79.777	0.3469
15. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 14 cm.	79.484	0.3456
16. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 15 cm.	79.192	0.3443
17. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 20 cm.	77.725	0.3379

สมการหาค่าเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก ( $\phi$ )

$$\phi = B \times A \quad (\text{Wb}) \quad (28)$$

ค่าของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ได้จากสมการ

$$B = \frac{4\pi(N_2 I_R)}{2 \times 10^2} \quad (\text{T}) \quad (29)$$

เมื่อ

$B$  = ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (T)

$N_2$  = จำนวนรอบขดลวดด้านทุติยภูมิ (รอบ)

$I_R$  = กระแสสูญเสียกำลังไฟฟ้าในแกนเหล็ก (A)

และหาค่าพื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็กจากสมการ

$$A_c = I_{ave} \left( \frac{A_{Total}}{2} \right) \quad (\text{m}^2) \quad (30)$$

เมื่อ

$$A_c = \text{พื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็ก (m}^2\text{.)}$$

$$l_{ave} = \text{ความยาวเฉลี่ยของแกนเหล็ก (cm.)}$$

$$A_{Total} = \text{พื้นที่หน้าตัดรวมของแกนเหล็ก (m}^2\text{.)}$$

**ตารางที่ 10** แสดงค่าการคำนวณหาค่าเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก ( $\phi$ ) ค่าของความหนาแน่น  
เส้นแรงแม่เหล็ก (B) และหาค่าพื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็ก

แกนเหล็กของหม้อแปลงจำลอง ต้นแบบ	ความ หนาแน่นเส้น แรงแม่เหล็ก (B) : (T)	พื้นที่ภาคตัดขวาง ของแกนเหล็ก ( $A_c$ ) : (m <sup>2</sup> .)	เส้นแรงแม่เหล็ก ในแกนเหล็ก ( $\phi$ ) : (Wb)
1. เมื่อไม่ได้ตัดมุมแกนเหล็ก	1.251	0.006556	0.00820
2. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 1 cm.	1.246	0.006533	0.00814
3. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 2 cm.	1.242	0.006510	0.00809
4. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 3 cm.	1.238	0.006487	0.00803
5. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 4 cm.	1.233	0.006464	0.00797
6. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 5 cm.	1.229	0.006441	0.00792
7. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 6 cm.	1.224	0.006418	0.00786
8. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 7 cm.	1.219	0.006395	0.00779
9. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 8 cm.	1.215	0.006372	0.00774
10. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 9 cm.	1.211	0.006349	0.00769
11. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 10 cm.	1.207	0.006326	0.00764
12. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 11 cm.	1.202	0.006303	0.00758
13. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 12 cm.	1.198	0.006280	0.00752
14. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 13 cm.	1.194	0.006257	0.00747
15. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 14 cm.	1.189	0.006234	0.00741
16. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 15 cm.	1.185	0.006211	0.00736
17. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 20 cm.	1.163	0.006096	0.00709

เมื่อได้คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆครบแล้ว จากนั้นต้องทำการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ เนื่องจากทำการตัดแกนเหล็กออกแล้วค่าแรงดันไฟฟ้ายังมีค่าตามพิกัดของหม้อแปลงหรือไม่ และอีกเหตุผลที่ต้องทำการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้านั้นก็เนื่องมาจากต้องการกำหนดขอบเขตในการตัดแกนเหล็กว่าสามารถตัดแกนเหล็กออกได้ขนาดเท่าใดจึงสามารถยังคงได้แรงดันไฟฟ้าเท่าเดิม

ต้องทำการคำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดจากหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ ขณะที่ไม่ได้ทำการตัดแกนเหล็กเพื่อใช้ค่าจำนวนของขดลวดไปคำนวณหาค่าแรงดันเมื่อตัดแกนเหล็ก

สมการการคำนวณหาจำนวนรอบของขดลวด คือ

$$N = \frac{E}{4.44 f \phi} \quad (\text{รอบ}) \quad (31)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

จำนวนรอบของขดลวดด้านแรงต่ำ

$$N_1 = \frac{230}{4.44 \times 50 \times 0.00820}$$

$$\approx 130 \quad \text{Turn}$$

จำนวนรอบของขดลวดด้านแรงสูง

$$N_2 = \frac{23,000}{4.44 \times 50 \times 0.00820}$$

$$\approx 12,900 \quad \text{Turn}$$

จากการคำนวณหาค่าเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก ( $\phi$ ) ที่ทำการตัดมุมแกนเหล็กออกนั้น ต้องหาค่าแรงดันไฟฟ้าว่าได้ตรงตามพารามิเตอร์หม้อแปลงหรือไม่ คำนวณจากสมการ

$$E_1 = 4.44 f N_1 \phi \quad (\text{V}) \quad (32)$$

$$E_2 = 4.44 f N_2 \phi \quad (\text{kV}) \quad (33)$$

เมื่อ	$E_1$	คือ	แรงดันไฟฟ้าด้าน Primary (V)
	$E_2$	คือ	แรงดันไฟฟ้าด้าน Secondary (kV)
	$N_1$	คือ	จำนวนรอบของขดลวดด้านแรงต่ำ (รอบ)
	$N_2$	คือ	จำนวนรอบของขดลวดด้านแรงสูง (รอบ)
	$f$	คือ	ความถี่ (Hz.)

ตารางที่ 11 แสดงค่าการคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าด้าน Primary และแรงดันไฟฟ้าด้าน Secondary (เมื่อทำการตัดมุมแกนเหล็ก)

แกนเหล็กของหม้อแปลงจำลองต้นแบบ	แรงดันไฟฟ้าด้าน Primary ( $E_1$ ) : V	แรงดันไฟฟ้าด้าน Secondary ( $E_2$ ) : kV
1. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 1 cm.	234.9204	23.3113
2. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 2 cm.	233.4774	23.1681
3. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 3 cm.	231.7458	23.0091
4. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 4 cm.	230.0142	23.0000
5. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 5 cm.	228.5712	22.6813
6. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 6 cm.	226.8396	22.5095
7. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 7 cm.	224.8194	22.3090
8. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 8 cm.	223.3764	22.1658
9. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 9 cm.	221.9334	22.0226
10. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 10 cm.	220.4904	21.8794
11. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 11 cm.	218.7588	21.7076
12. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 12 cm.	217.0272	21.5358
13. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 13 cm.	215.5840	21.3926
14. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 14 cm.	213.8526	21.2208
15. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 15 cm.	212.4096	21.0776
16. ตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 20 cm.	204.6174	20.3043

4.1 การ Simulate ค่า Partial Discharge ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อไม่ได้ตัด มุมแกนเหล็ก)

Project: Test Partial Discharge

Page: 1

File name: Distribution Transformer

Date of Test: 04-28-2008

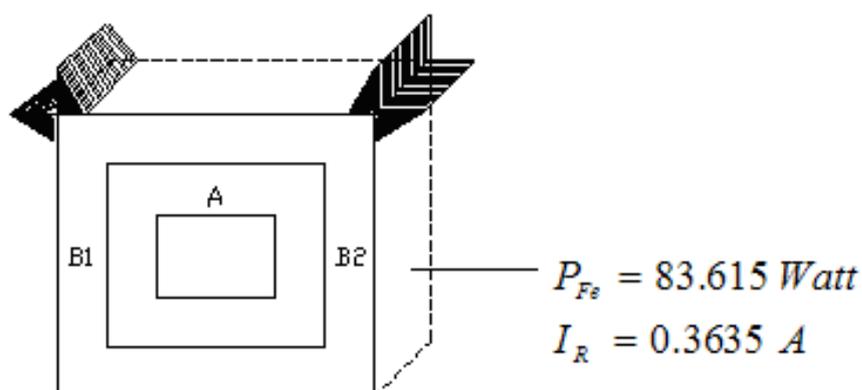
### MEASUREMENT OF PARTIAL DISCHARGE

Transformer Discharge: 230 V/2200 V Single Phase

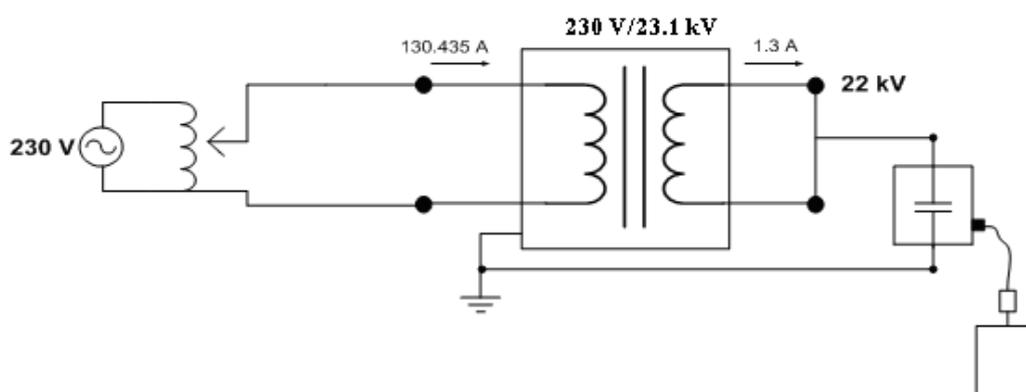
Rate: 30 kVA

Frequency: 50 Hz.

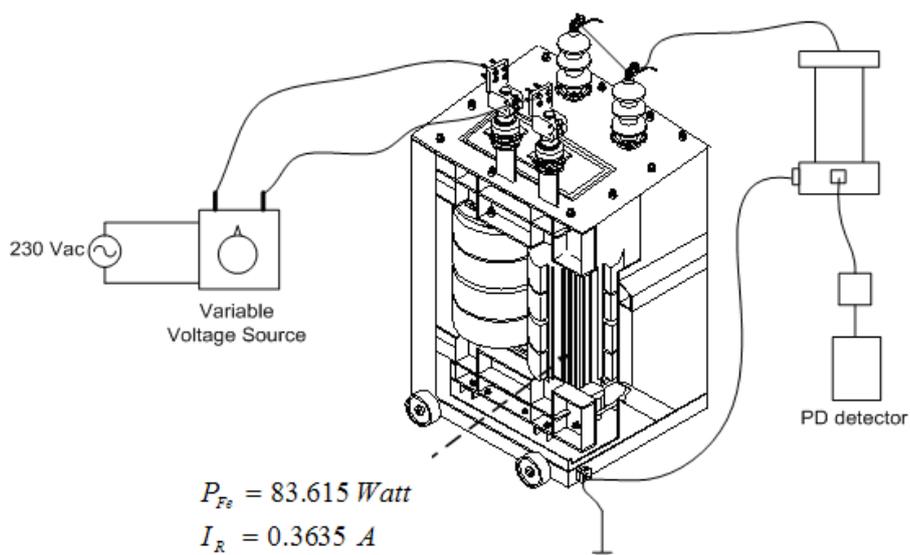
	Winding Under Test		Time Duration (min)	Results
	P-S, E	S-P, E		
Test Voltage (kV)	40	3	1	Satisfactory



ภาพที่ 42 แสดงแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อไม่ได้ตัดมุมแกนเหล็ก)

**CIRCUIT FOR SIMULATION**

ภาพที่ 43 วงจรวัดค่า PD ตัวอย่างพารามิเตอร์หม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ  
(เมื่อไม่ได้ตัดมุมแกนเหล็ก)



ภาพที่ 44 หม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อไม่ได้ตัดมุมแกนเหล็ก)

Project: Test Partial Discharge

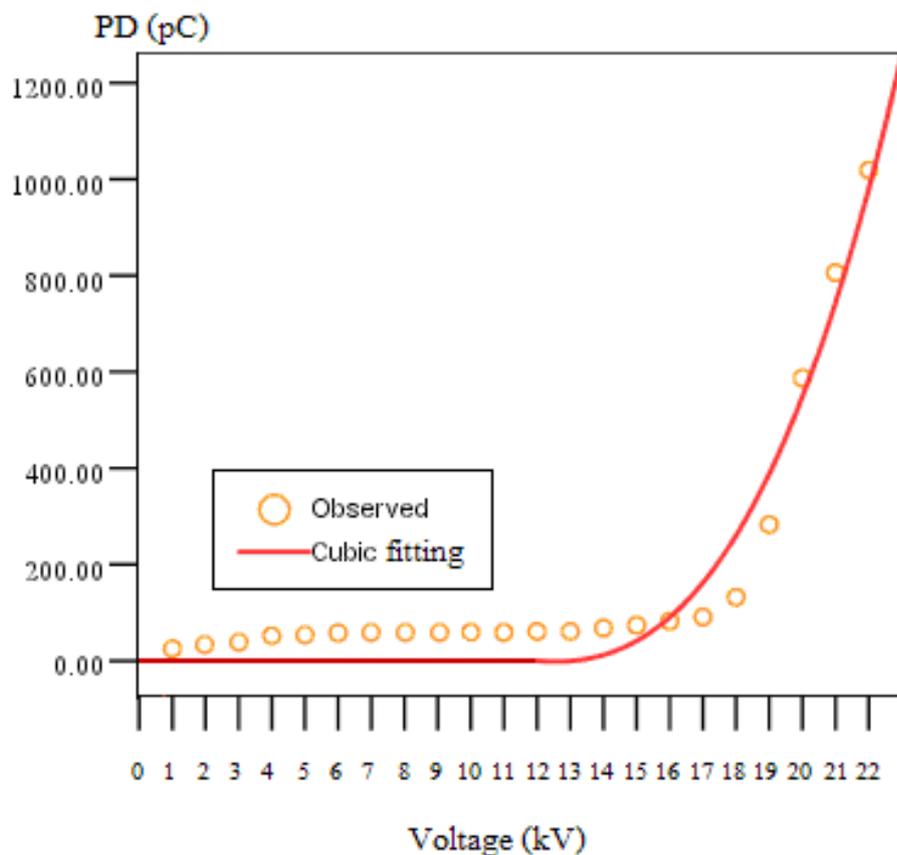
Page: 3

File name: Distribution Transformer

Date of Test: 04-28-2008

ตารางที่ 12 ค่า Partial Discharge ที่ได้จากการ Simulate ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ  
(เมื่อไม่ได้ตัดมุมแกนเหล็ก)

Test Voltage (kV)	Partial Discharge (pC)
1	30
2	35
3	41
4	57
5	59
6	63
7	63
8	63
9	64
10	64
11	64
12	66
13	66
14	73
15	79
16	87
17	96
18	137
19	288
20	592
21	811
22	1024



ภาพที่ 45 กราฟแสดงค่าของ PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อไม่ได้ตัดมุมแกนเหล็ก)

จาก 
$$Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$$

เมื่อ  $X =$  แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (มีหน่วยเป็น kV)

$Y =$  ค่าของ PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ(เมื่อไม่ได้ตัดมุมแกนเหล็ก) (มีหน่วยเป็น pC)

จะได้สมการ

$$Y = -134.977 + 107.370X - 14.465X^2 + 0.541X^3 \quad (26)$$

4.2 การ Simulate ค่า Partial Discharge ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 4 เซนติเมตร)

ทำการตัดมุมทั้งสองของแกนเหล็กด้านบนที่อยู่ใกล้กับขดลวด โดยการตัดแกนเหล็กออกข้างละ 4 เซนติเมตร ทำมุม 45 องศาที่ระนาบ

Project: Test Partial Discharge

Page: 1

File name: Distribution Transformer

Date of Test: 04-26-2008

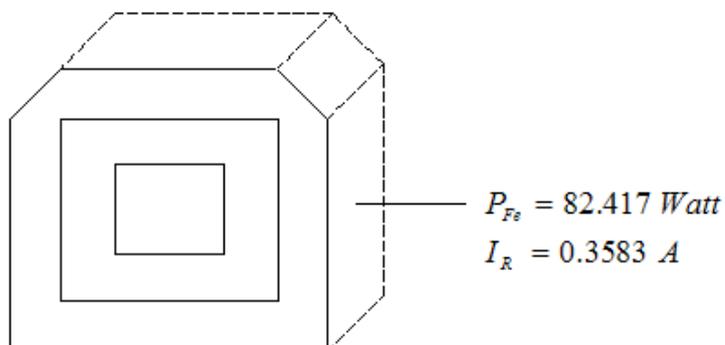
### MEASUREMENT OF PARTIAL DISCHARGE

Transformer Discharge: 230 V/2200 V Single Phase

Rate: 30 kVA

Frequency: 50 Hz.

	Winding Under Test		Time Duration (min)	Results
	P-S, E	S-P, E		
Test Voltage (kV)	40	3	1	Satisfactory



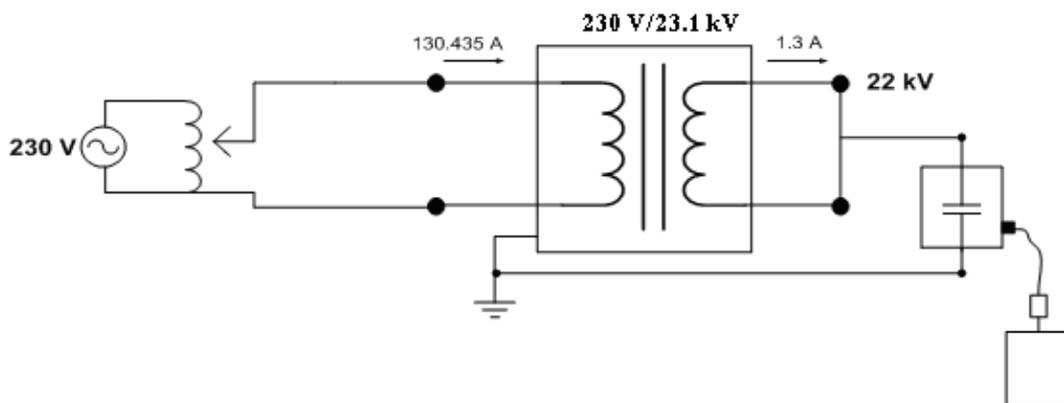
ภาพที่ 46 แสดงแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 4 เซนติเมตร)

Project: Test Partial Discharge

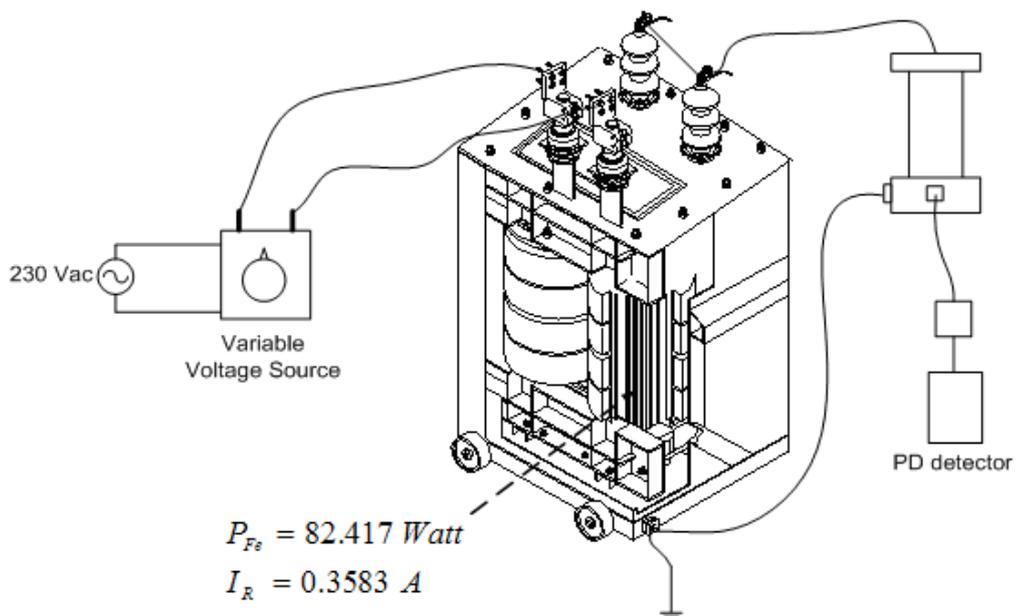
Page: 2

File name: Distribution Transformer

Date of Test: 04-26-2008

**CIRCUIT FOR SIMULATION**

ภาพที่ 47 วงจรวัดค่า PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ  
(เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 4 เซนติเมตร)



ภาพที่ 48 หม้อแปลงไฟฟ้าจำลอง (เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 4 เซนติเมตร)

Project: Test Partial Discharge

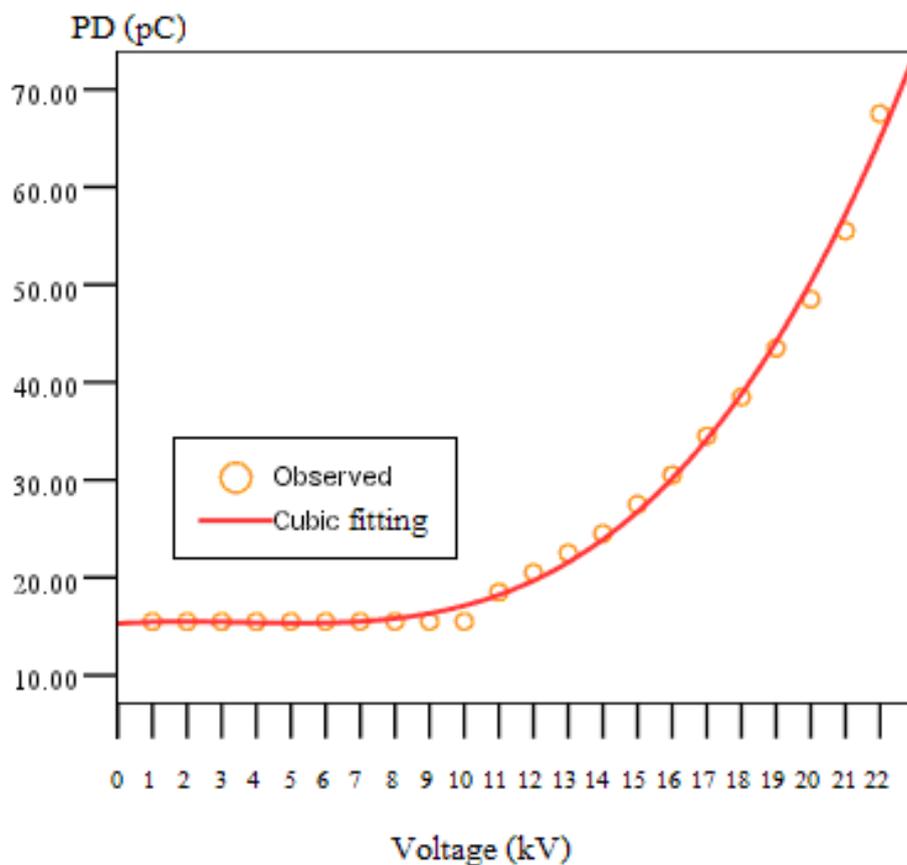
Page: 3

File name: Distribution Transformer

Date of Test: 04-26-2008

ตารางที่ 13 ค่า Partial Discharge ที่ได้จากการ Simulate ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ  
(เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 4 เซนติเมตร)

Test Voltage (kV)	Partial Discharge (pC)
1	15
2	15
3	15
4	15
5	15
6	15
7	15
8	15
9	15
10	15
11	18
12	20
13	22
14	24
15	27
16	30
17	34
18	38
19	43
20	48
21	55
22	67



ภาพที่ 49 ค่าของ PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบที่ตัดมุมทั้งสองของแกนเหล็ก ด้านบนที่อยู่ใกล้กับขดลวด โดยการตัดแกนเหล็กออกด้านละ 4 เซนติเมตร ทำมุม 45 องศา

จาก 
$$Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$$

เมื่อ  $X =$  แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (มีหน่วยเป็น kV)

$Y =$  ค่าของ PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 4 เซนติเมตร) (มีหน่วยเป็น pC)

จะได้สมการ

$$Y = 14.782 + 0.244X - 0.087X^2 + 0.008X^3 \quad (26)$$

4.3 การ Simulate ค่า Partial Discharge ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 15 เซนติเมตร)

ทำการตัดมุมทั้งสองของแกนเหล็กด้านบนที่อยู่ใกล้กับขดลวด โดยการตัดแกนเหล็กออกด้านละ 15 เซนติเมตร ทำมุม 45 องศาที่ระนาบ

Project: Test Partial Discharge

Page: 1

File name: Distribution Transformer

Date of Test: 04-25-2008

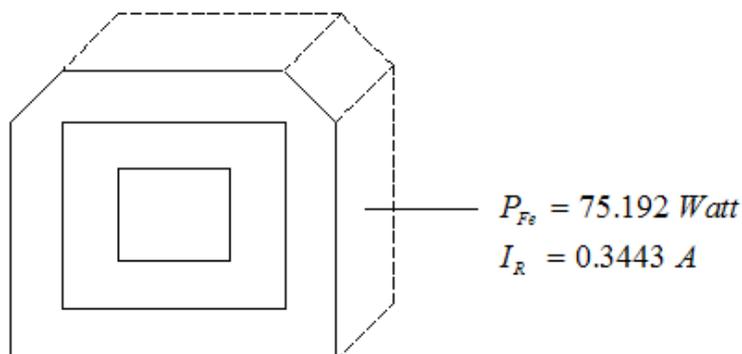
### MEASUREMENT OF PARTIAL DISCHARGE

Transformer Discharge: 230 V/2200 V Single Phase

Rate: 30 kVA

Frequency: 50 Hz.

	Winding Under Test		Time Duration (min)	Results
	P-S, E	S-P, E		
Test Voltage (kV)	40	3	1	Satisfactory



ภาพที่ 50 แสดงแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 15 เซนติเมตร)



Project: Test Partial Discharge

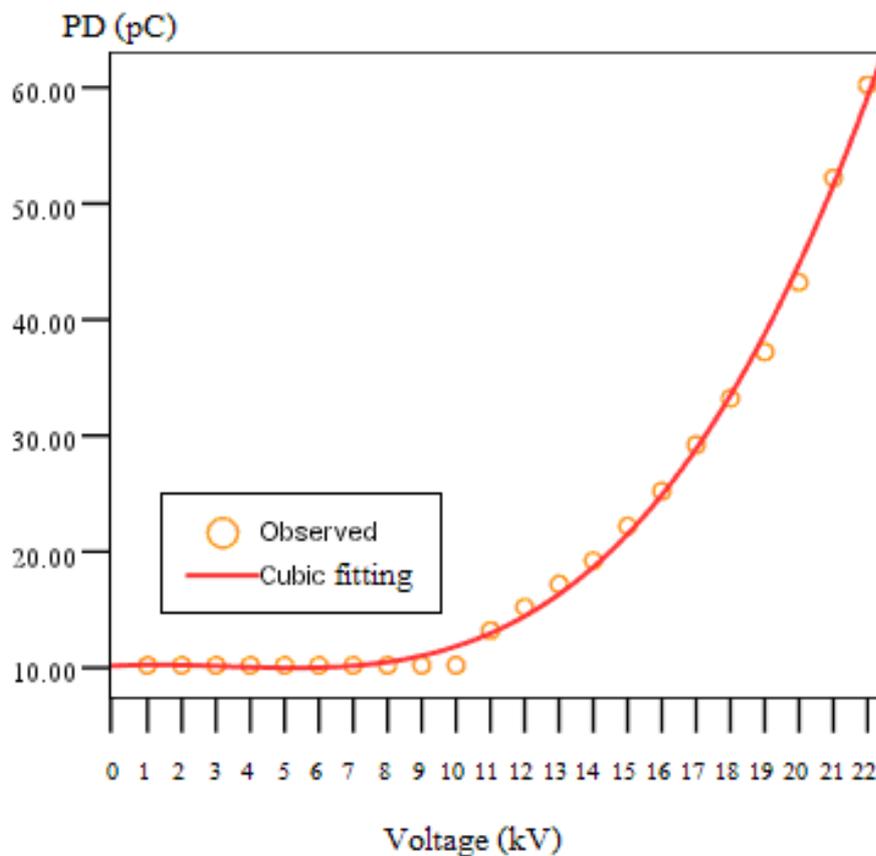
Page: 3

File name: Distribution Transformer

Date of Test: 04-25-2008

ตารางที่ 13 ค่า Partial Discharge ที่ได้จากการ Simulate ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ  
(เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 15 เซนติเมตร)

Test Voltage (kV)	Partial Discharge (pC)
1	10
2	10
3	10
4	10
5	10
6	10
7	10
8	10
9	10
10	10
11	13
12	15
13	17
14	19
15	22
16	25
17	29
18	33
19	37
20	43
21	52
22	60



ภาพที่ 53 ค่าของ PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบที่ตัดมุมทั้งสองของแกนเหล็กด้านบนที่อยู่ใกล้กับขดลวด โดยการตัดแกนเหล็กออกด้านละ 15 เซนติเมตร ทำมุม 45 องศา

จาก 
$$Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$$

เมื่อ  $X =$  แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (มีหน่วยเป็น kV)

$Y =$  ค่าของ PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 15 เซนติเมตร) (มีหน่วยเป็น pC)

จะได้สมการ

$$Y = 9.946 + 0.153X - 0.076X^2 + 0.008X^3 \quad (27)$$

## วิจารณ์

จากผลการทดลองได้ทำการศึกษาการเกิด PD ภายในฉนวนของหม้อแปลง ซึ่งได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชนิดของการทดลอง ดังนี้

1. ทำการทดสอบวัดค่า PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ 1 เฟส พิกัด 230 V/23 kV, 30 kVA, 50 Hz. ผู้วิจัยได้แบ่งการจำลองสถานะออกเป็น 3 กรณี ดังนี้

1.1 ทดสอบการวัดค่า PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อหม้อแปลงมีน้ำมันหม้อแปลงเต็มถึง

1.2 ทดสอบการวัดค่า PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกครึ่งถึง

1.3 ทดสอบการวัดค่า PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกหมดถึง

2. ทำการทดสอบวัดค่า PD ใน หม้อแปลงเก่า พิกัด 220 V/19 kV, 10 kVA, 50 Hz.

3. ทำการทดสอบวัดค่า PD ใน หม้อแปลงทดสอบ พิกัด 220V/100 kV, 5 kVA, 50 Hz.

ได้จำลองการ Simulate เพื่อหาค่า Partial Discharge ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ ดังนี้

1. การ Simulate เพื่อหาค่า Partial Discharge ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อไม่ได้ตัดมุมแกนเหล็ก)

2. การ Simulate เพื่อหาค่า Partial Discharge ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 4 เซนติเมตร)

3. การ Simulate เพื่อหาค่า Partial Discharge ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 15 เซนติเมตร)

ในการทดสอบวัดค่า PD นี้ ได้นำมาตรฐานการวัด PD ในหม้อแปลง โดยได้ใช้มาตรฐาน IEC 60076-3 ซึ่งได้สรุปค่ามาตรฐานการวัดค่า PD ต้องมีค่าไม่เกิน 100 pC วัดที่  $\frac{1.1U_m}{\sqrt{3}} \approx 14$  ในการทดสอบวัดค่า PD ในหม้อแปลงดังกล่าวนี้ ตามมาตรฐาน IEC ยังไม่ได้กำหนดมาตรฐานการวัดค่า PD ในหม้อแปลงขนาดเล็กนี้ไว้ชัดเจน จึงได้ทำการวิจัยเพื่อมีความประสงค์ให้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้กำหนดมาตรฐานการวัดค่า PD ในหม้อแปลงขนาดเล็กนี้ จากการทดสอบสามารถสรุปได้ตามกรณีต่างๆดังนี้

จากกราฟสามารถอธิบายได้ว่า กรณีการวัดค่า PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อหม้อแปลงมีน้ำมันหม้อแปลงเต็มถึง, กรณีการวัดค่า PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกครึ่งถึง, กรณีการวัดค่า PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกหมดถึง, กรณีการวัดค่า PD ในหม้อแปลงเก่าและกรณีการวัดค่า PD ในหม้อแปลงทดสอบ ค่า PD ที่วัดได้จะเพิ่มขึ้นตามแรงดันที่เพิ่มขึ้น จากการทดสอบค่า PD วัดที่  $\frac{1.1U_m}{\sqrt{3}} \approx 14$  kV ตามมาตรฐาน IEC 60076-3 เมื่อป้อนแรงดันที่ 1 kV ถึง 14 kV ค่า PD ที่วัดได้มีค่าไม่เกิน 100 pC ซึ่งอยู่ในมาตรฐาน ซึ่งช่วงที่ทำการจ่ายแรงดันที่ 1 kV ถึง 14 kV เป็นช่วงที่ไม่เกิด Partial Discharge เนื่องจากเป็นช่วงที่ไม่มีกระแสไหล กราฟจึงมีลักษณะคงที่ แต่เมื่อทำการป้อนแรงดันเพิ่มขึ้นที่ 15 kV ถึง 22 kV เมื่อสังเกตลักษณะของกราฟ กราฟจะมีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากเกิด Partial Discharge เกิดขึ้น ช่วงที่เกิด Partial Discharge นี้เป็นช่วงที่เกิดการนำของกระแสเกิดขึ้น กระแสที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงมากและเกือบจะไม่ขึ้นอยู่กับการแรงดันเลข ซึ่งเมื่อกระแสมีค่าสูงจะทำให้แกนเหล็กและขดลวดเกิดความร้อนเกิดขึ้น และเนื่องจากแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบมีลักษณะปลายแกนเหล็กมีลักษณะที่แหลม ซึ่งอาจก่อให้เกิดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าสูงและเกิด Eddy current loss ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าในแกนเหล็กมีค่าสูงและทำให้เกิดความร้อนเกิดขึ้น ซึ่งอาจจะมีการถ่ายเทความร้อนได้ไม่ดีพออาจส่งผลกระทบต่อให้หม้อแปลงเกิดความเสียหายโดยผลของความร้อนได้ และอาจทำให้เกิดโคโรนาดีสชาร์จได้มากขึ้น

จากกรณีที่ทำกร Simulate เพื่อหาค่า Partial Discharge ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ เมื่อไม่ได้ตัดมุมทั้งสองข้างของแกนเหล็กออกนั้น ค่า PD ที่ทำการ Simulate นั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันที่เพิ่มขึ้น จากการทดสอบค่า PD วัดที่  $\frac{1.1U_m}{\sqrt{3}} \approx 14$  ตามมาตรฐาน IEC 60076-3 ลักษณะของกราฟที่แสดง ซึ่งช่วงที่ทำการป้อนแรงดันเข้าไปโดยจ่ายแรงดันที่ 1 kV ถึง 14 kV เป็นช่วงที่ไม่

เกิด Partial Discharge เนื่องจากเป็นช่วงที่ไม่มีกระแสไหลบริเวณเส้นกราฟที่เกิดขึ้นจึงจะยังไม่ นำกระแส กราฟจึงมีลักษณะคงที่ทั้งนี้เพราะมีแรงดันอยู่บริเวณแกนเหล็กประมาณ 14 kV ซึ่งใน ความเป็นจริงแล้วค่าของแรงดันภายนอกจะต้องมีค่ามากกว่าค่าของแรงดัน ที่บริเวณแกนเหล็กจึง จะสามารถนำกระแสได้ แต่เมื่อทำการป้อนแรงดันเพิ่มขึ้นที่ 15 kV ถึง 22 kV เมื่อสังเกตลักษณะ ของเส้นกราฟ เส้นกราฟจะมีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากเกิด Partial Discharge เกิดขึ้นซึ่ง ช่วงที่เกิด Partial Discharge นี้เป็นช่วงที่เกิดการนำกระแสเกิดขึ้น จากที่เกิดสภาวะการ นำกระแสนี้จะเกิดการนำกระแสอย่างรวดเร็วซึ่งจะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์นวนของหม้อแปลง เกิดความเสียหายและส่งผลให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงสั้นลงด้วย และค่าความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดันกับค่า Partial Discharge จะมีลักษณะกราฟไม่เป็นเชิงเส้น

จากกรณีทำการ Simulate เพื่อหาค่า Partial Discharge ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ เมื่อทำการตัดมุมทั้งสองข้างของแกนเหล็กออก ข้างละ 4 เซนติเมตร และ 15 เซนติเมตร ตามลำดับ ในการ Simulate เพื่อหาค่า Partial Discharge นั้นได้ทำการตัดมุมทั้งสองของแกนเหล็กด้านบนที่อยู่ ใกล้กับขดลวดออก และบริเวณส่วนที่ตัดทำมุม 45 องศา กับระนาบ จากกราฟสามารถอธิบายได้ว่า ค่า PD ที่ทำการ Simulate นั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันที่เพิ่มขึ้น จากการทดสอบค่า PD วัดที่  $\frac{1.1U_m}{\sqrt{3}} \approx 14$  ตามมาตรฐาน IEC 60076-3 ลักษณะของกราฟช่วงที่ ทำการป้อนแรงดันเข้าไปโดย ป้อนแรงดันที่ 1 kV ถึง 14 kV เป็นช่วงที่ไม่เกิด Partial Discharge เนื่องจากเป็นช่วงที่ไม่มีกระแส ไหลบริเวณเส้นกราฟที่เกิดขึ้นจึงจะยังไม่นำกระแส กราฟจึงมีลักษณะคงที่ทั้งนี้เพราะมีแรงดันอยู่ บริเวณแกนเหล็กที่ทำการตัดแกนเหล็กให้มีลักษณะมนประมาณ 14 kV ซึ่งในความเป็นจริงแล้วค่า ของแรงดันภายนอกจะต้องมีค่ามากกว่าค่าของแรงดันที่บริเวณแกนเหล็กที่ทำการตัดแกนเหล็กให้มี ลักษณะมนจึงจะสามารถนำกระแสได้ แต่เมื่อทำการป้อนแรงดันเพิ่มขึ้นที่ 15 kV ถึง 22 kV เมื่อ สังเกตลักษณะของกราฟ กราฟจะมีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากเกิด Partial Discharge เกิดขึ้นซึ่งช่วงที่เกิด Partial Discharge นี้เป็นช่วงที่เกิดการนำกระแสเกิดขึ้น และค่าความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดันกับค่า Partial Discharge จะมีลักษณะกราฟไม่เป็นเชิงเส้นแต่ค่า PD ที่ได้จากการ Simulate นั้นจะมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับหม้อแปลงที่ไม่ได้ทำการตัดปลายทั้งสองข้าง ด้านบนที่ใกล้กับขดลวด

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

จากที่ได้ทำการวิจัยโดยได้แบ่งกรณีการวิจัยออกเป็นหัวข้อใหญ่ๆ 2 หัวข้อ ดังนี้

1. การทดสอบวัดค่า PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ 1 เฟส พิกัด 230 V/23 kV, 30 kVA, 50 Hz. หม้อแปลงเก่า พิกัด 220 V/19 kV, 10 kVA, 50 Hz. และ หม้อแปลงทดสอบ พิกัด 220V/100 kV, 5 kVA, 50 Hz.

2. การ Simulation ค่า Partial Discharge ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ กรณีที่ไม่ได้ตัดแกนเหล็กให้ปลายแกนเหล็กมีลักษณะมนกับการตัดแกนเหล็กหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ ให้ปลายทั้งสองข้างด้านบนของแกนเหล็กมีลักษณะมน

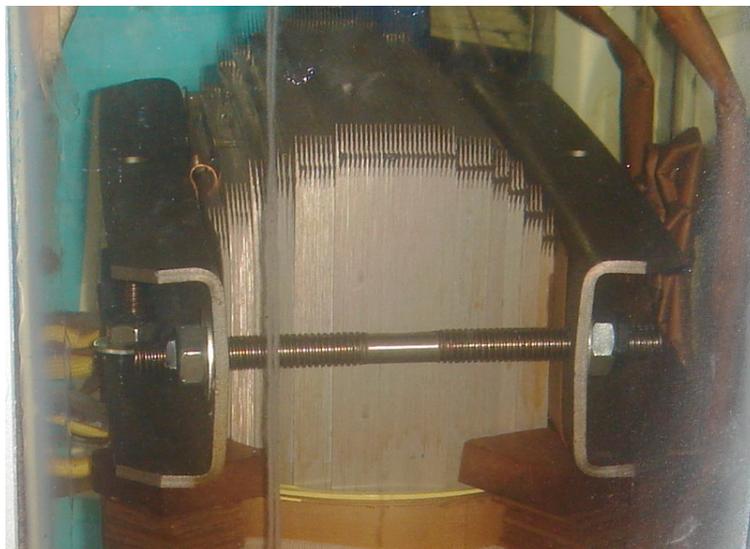
สรุปผลได้ดังนี้

หม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ 1 เฟส พิกัด 230 V/23.1 kV, 30 kVA, 50 Hz.

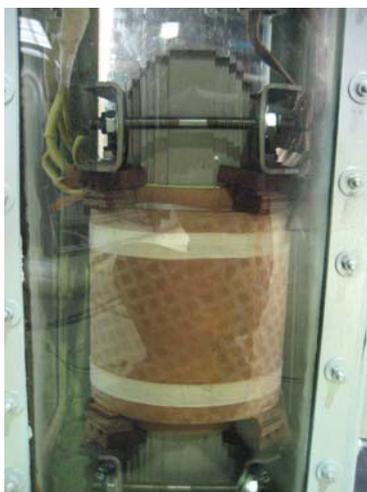
จากหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ ลักษณะของแกนเหล็กเป็นแบบ Core Type ซึ่งมีพื้นที่ภาคตัดขวางเป็นแบบสี่เหลี่ยม 6 ชั้น บรรจุอยู่ในวงกลม แกนเหล็กใช้เหล็กซิลิกอน 23 RGH090 หนา 0.23 mm. โดยการนำแต่ละแผ่นมาซ้อนกันและลักษณะการพันขดลวดจะทำการพันขดลวดชั้นทรงกระบอก

แกนเหล็กชนิดนี้จะมีพื้นที่หน้าตัด (Core Section) เป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือจัตุรัส หรือแบบข้อมุม (Stepped Core) นั้นขึ้นอยู่กับขนาดของ kVA ของหม้อแปลง โดยแกนเหล็กแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า และจัตุรัส จะเปลืองลวดพันคอยล์และมีค่า Loss มากกว่าแบบข้อมุม แกนเหล็กแบบนี้ เป็นเหล็กชนิด Low-Loss High-Grade Silicon Steel เช่นกัน และที่ผิวของแผ่นเหล็กจะเคลือบด้วยฉนวนที่มีค่าความต้านทานสูง เพื่อลดค่ากระแส Eddy Current Loss ให้มีค่าต่ำ ๆ บริเวณรอยต่อ

ของแกนเหล็ก จะใช้วิธีวางชั้นสลับและถูกอัดแน่นโดยใช้สลักเกลียว (Bolt) เพื่อลดการสั่นและลดเสียงรบกวน



ภาพที่ 54 ส่วนบนของแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ



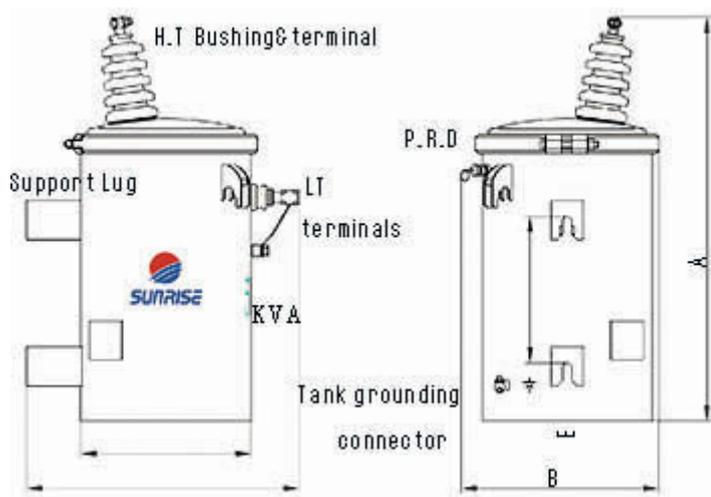
ภาพที่ 55 แกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ



ภาพที่ 56 การพันขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ

หม้อแปลงเก๋า พิกัด 220V/19 kV, 10 kVA, 50 Hz.

แกนเหล็กของหม้อแปลงเก๋าจะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า แกนเหล็กผลิตมาจากแผ่นเหล็กซิลิกอนรีดเย็นแบบจัดเรียงทิศทาง การพันขดลวดจะทำการพันขดลวดหลายๆรอบซ้อนกันเป็นชั้นๆ โดยใช้ลวดทองแดงชนิดอบน้ำยา



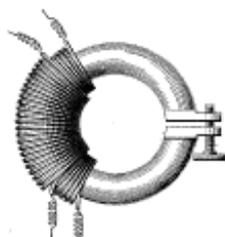
ภาพที่ 57 โครงสร้างของหม้อแปลงเก๋า



ภาพที่ 58 หม้อแปลงเก่า พิกัด 220V/19 kV, 10 kVA, 50 Hz.

หม้อแปลงทดสอบ พิกัด 220V/100 kV, 5 kVA, 50 Hz.

แกนเหล็กของหม้อแปลงทดสอบจะมีลักษณะเป็นทรงกลม แกนเหล็กทำมาจากซิลิกอน ซึ่งการวางตำแหน่งต่อกันของแผ่นเหล็กแต่ละแผ่นจะวางเหลื่อมกันและการพันขดลวดจะมีลักษณะการพันแบบรูปวงกลม



ภาพที่ 59 แกนเหล็กของหม้อแปลงทดสอบ



ภาพที่ 60 การพันขดลวดของหม้อแปลงทดสอบ



ภาพที่ 61 การนำอุปกรณ์ของแกนเหล็กที่ทำการพันขดลวดลงประกอบในตัวถังหม้อแปลงทดสอบ



ภาพที่ 62 หม้อแปลงทดสอบ พิกัด 220V/100 kV, 5 kVA, 50 Hz.

แกนเหล็กและการพันขดลวดทั้ง 3 กรณี มีลักษณะแตกต่างกัน โดยแกนเหล็กและการพันขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ และหม้อแปลงเก่า จะมีลักษณะคล้ายกันคือ แกนเหล็กมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมและการพันขดลวดจะพันแบบชั้นทรงกระบอก ส่วนแกนเหล็กและการพันขดลวดของหม้อแปลงทดสอบ นั้นแกนเหล็กจะมีลักษณะเป็นแบบวงกลมและทำการพันขดลวดแบบวงกลมหรือที่เราเรียกว่า โคนัท ซึ่งเมื่อนำการออกแบบแกนเหล็กและลักษณะการพันขดลวดมาใช้ในการเปรียบเทียบการทดสอบวัดค่า PD แล้ว ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ค่า PD ของหม้อแปลงที่ได้มีลักษณะแตกต่างกัน คือ ค่า PD ที่วัดได้ของหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ และหม้อแปลงเก่า มีค่ามากกว่า ค่า PD ที่วัดได้ของหม้อแปลงทดสอบ แต่มีค่า PD มากกว่าไม่มากนัก และค่า PD ที่วัดได้ของหม้อแปลงนั้นเมื่อทดสอบที่  $\frac{1.1U_m}{\sqrt{3}}$  ตามมาตรฐาน IEC 60076-3 ที่แรงดัน 1 kV ถึง 14 kV ค่า PD ก็ยังมีค่าไม่เกิน 100 pC ซึ่งยังอยู่ในมาตรฐานที่ได้นำมาอ้างอิง

จากการทดสอบวัดค่า Partial Discharge ในหม้อแปลงทั้ง 3 ลูก นั้น ค่า Partial Discharge มีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันที่เพิ่มขึ้น โดยการป้อนแรงดันที่ 1 kV ถึง 14 kV นั้นมีค่า Partial Discharge ที่วัดได้มีค่าไม่เกิน 100 pC ที่  $\frac{1.1U_m}{\sqrt{3}}$  ตามมาตรฐาน IEC 60076-3 แต่การวัด Partial Discharge ใน Distribution Transformer ขนาดเล็กนั้น ยังไม่มีการกำหนดมาตรฐานที่แน่ชัดว่าควรใช้มาตรฐานใดมาเป็นมาตรฐานในการอ้างอิงในการทดสอบค่า PD จึงได้ทำการวิจัยขึ้นเพื่อมีความประสงค์ให้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้กำหนดมาตรฐานการทดสอบวัดค่า PD ใน Distribution Transformer ขนาดเล็ก ทดสอบที่  $\frac{1.1U_m}{\sqrt{3}}$  ไร่ที่ไม่เกิน 100 pC เพื่อใช้ในการออกแบบ Distribution Transformer ขนาดเล็ก และให้ผู้ผลิตหม้อแปลงได้ทำการทดสอบวัดค่า PD ตามค่ามาตรฐานที่ได้กำหนดไว้

จากค่าที่ได้จากการคำนวณสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อทำการตัดมุมด้านบนของแกนเหล็กทั้งสองข้างออกส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก ( $P_{Fe}$ ) มีค่าลดลงและค่ากระแสสูญเสียกำลังไฟฟ้าในแกนเหล็ก ( $I_R$ ) ก็มีค่าลดลงเช่นเดียวกัน เนื่องจากเมื่อแกนเหล็กมีลักษณะที่มนไม่แหลมส่งผลให้ค่าของ Eddy current loss ที่ไหลในแกนเหล็กสามารถไหลผ่านบริเวณที่มีลักษณะมนผ่านไปและสามารถไหลได้รอบแกนเหล็กที่เป็นเช่นนั้นยังส่งผลให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในแกนเหล็กลดลงด้วยและเมื่อนำค่าในตารางที่ 9 และ ตารางที่ 10 นำมาหาค่าเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก ( $\phi$ ) ยังส่งผลให้ค่าเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กมีค่าลดลงดังที่ได้แสดงในตารางที่ 11

ดังนั้นการตัดมุมของแกนเหล็กสามารถลดระดับของ Partial Discharge เนื่องจากค่าความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณแกนเหล็กเมื่อทำการตัดแกนเหล็กให้มีลักษณะมนแล้วค่าความเครียดของสนามไฟฟ้ามีค่าลดลงเนื่องจาก ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก ( $P_{Fe}$ ) มีค่าลดลงและค่ากระแสสูญเสียกำลังไฟฟ้าในแกนเหล็ก ( $I_R$ ) และ ค่าเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก ( $\phi$ ) มีค่าลดลงซึ่งการตัดแกนเหล็กให้มีลักษณะมนยังสามารถป้องกันการเกิดโคโรนาดีสชาร์จได้ด้วยเช่นเดียวกัน และการประกอบแกนเหล็กควรยึดเข้าด้วยกันให้แน่นด้วย camp ที่มีการลบบวมให้เรียบมนเหมือนกัน เนื่องจากสามารถป้องกันการเกิดโคโรนาดีสชาร์จได้ จากนั้นก็ทำการเคลือบวานิช เพื่อป้องกันสนิม

ได้ทำการทดสอบวัดค่า PD เพิ่มเติม โดยได้ร่วมทำการทดสอบวัดค่า PD ร่วมกับผู้ผลิตหม้อแปลง ซึ่งได้ทำการทดสอบวัดค่า PD ใน Distribution Transformer ขนาดเล็กทั้งหมดจำนวน 5 ลูก โดยได้แบ่งหม้อแปลงออกเป็นสองจำพวกคือ หม้อแปลงชนิด 3 Phase และ หม้อแปลง Single

Phase นั้น ค่า PD ที่วัดได้ของหม้อแปลงดังกล่าวมีค่าน้อยกว่า 100 pC ทุกลูก โดยผู้เชี่ยวชาญในการทดสอบในห้องทดสอบของบริษัทผู้ผลิตได้ใช้มาตรฐานการทดสอบวัดค่า PD ตามมาตรฐาน IEC 60076-3 ซึ่งเป็นมาตรฐานการทดสอบวัดค่า PD ของ Power Transformer นั้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงขอเสนอให้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้กำหนดมาตรฐานการทดสอบค่า PD ที่  $\frac{1.1U_m}{\sqrt{3}}$  ค่า PD ต้องมีค่าไม่เกิน 100 pC ต่อไปเพื่อที่จะสามารถนำไปใช้ในการออกแบบ Distribution Transformer ขนาดเล็กได้

### ข้อเสนอแนะ

จากการทำการทดลองแล้วนั้นก่อนการทดสอบหม้อแปลงควรที่จะวางหม้อแปลงทิ้งไว้อย่างน้อย 4 ชม. เนื่องจากจะทำให้มีฟองอากาศขณะทดสอบซึ่งจะมีผลทำให้ค่า PD ที่ทำการวัดนั้นมีความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎีได้ ควรออกแบบสถานที่ในการทดลองให้มีระบบป้องกันสัญญาณรบกวนที่เข้ามาให้น้อยที่สุด ควรทำการคายประจุในวงจรทดสอบทุกครั้ง ก่อนเข้าไปปรับเปลี่ยนอุปกรณ์เนื่องอาจจะมีกระแสไฟฟ้าค้างอยู่ในอุปกรณ์ทดสอบ

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- ชำนาญ ห่อเกียรติ. 2532. **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ไชยพร หล่อทองคำ และ ณัฐพงษ์ ประพฤติ. 2548. หม้อแปลงทดสอบขนาดพิกัด 100 kV, 10kVA สำหรับห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง, น 473-476. ในรายงานการประชุมทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ชัยวุฒิ นัตระอุทัย และ ชีรพล โพธิ์พงษ์วิวัฒน์. 2544. การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก ประสิทธิภาพสูงโดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม, น 187-292. ในรายงานการประชุมทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- วิจิตร กินเรศ และ สุลี บรรจงจิตร. 2544. การทดสอบอุณหภูมิหม้อแปลงแบบแช่น้ำมันที่ภาระไม่เป็นเชิงเส้น, น 118-121. ในรายงานการประชุมทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ลำรวย สังข์สะอาด. 2528. **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์, กรุงเทพฯ.
- Kreuger, F. H. **Partial Discharge Detection High Voltage Equipment**. Temple Press 7 Ridgmount strest, London.
- \_\_\_\_\_. 1981. **IEC Partial Discharge Measurement**. IEC Std. 270-1981
- \_\_\_\_\_. 2000. **High-voltage test techniques – Partial discharge measurements 3<sup>rd</sup>**. IEC Std. 60270-2000.
- \_\_\_\_\_. 2000. **Power Transformers Part 3**. IEC Std. 60076-2000.

**ภาคผนวก**

**ภาคผนวก ก**

รายละเอียดของลวดทองแดงและการพันขดลวด

## ข้อมูลทางเทคนิค

## 1 PVF

ลวดทองแดงเคลือบน้ำยาชนิด โพลีไวนิลฟอร์มัลด์ (Polyvinyl Formal)

ตารางผนวกที่ ก1 รายละเอียดของลวดทองแดงและการพันขดลวด

ขนาดลวด		การเคลือบน้ำยา		ความต้านทาน ทางไฟฟ้าที่ 20°C AT 20°C	ความยืดตัว	ความทนต่อกระแส
เส้นผ่าน ศูนย์กลาง	ความคลาด เคลื่อน	ความหนาของ น้ำยาเคลือบ	เส้นผ่าน ศูนย์กลางรอบ นอก			
Dimeter (mm.)	Tolerance (mm.)	Film Thickness MIN (mm.)	Overall Diameter MAX (mm.)	Conduc Resis (Ohm / km.)	Elongation %	Breakdown Volt (Volt)
0.50	± 0.01	0.017	0.560	91.43	20.0	3050
0.55	± 0.02	0.017	0.620	78.15	20.0	3050
0.60	± 0.02	0.017	0.672	65.26	20.0	3050
0.65	± 0.02	0.017	0.724	55.31	20.0	3050
0.70	± 0.02	0.018	0.776	47.47	20.0	3050
0.75	± 0.02	0.019	0.830	41.19	20.0	3050
0.80	± 0.02	0.020	0.882	36.08	25.0	3400
0.85	± 0.02	0.021	0.934	31.87	25.0	3400
0.90	± 0.02	0.022	0.986	28.35	25.0	3400
0.95	± 0.02	0.023	1.038	25.38	25.0	3400
1.00	± 0.02	0.024	1.102	23.33	25.0	3400
1.10	± 0.03	0.025	1.204	19.17	25.0	3400
1.20	± 0.03	0.026	1.304	16.04	25.0	4150
1.30	± 0.03	0.026	1.408	13.61	25.0	4150
1.40	± 0.03	0.027	1.508	11.70	25.0	4150
1.50	± 0.03	0.027	1.612	10.16	25.0	4150

ตารางผนวกที่ ก1 รายละเอียดของลวดทองแดงและการพันขดลวด (ต่อ)

ขนาดลวด		การเคลือบน้ำยา		ความต้านทาน ทางไฟฟ้าที่ 20°C AT 20°C	ความยืดตัว	ความทนต่อกระแส
เส้นผ่าน ศูนย์กลาง	ความคลาด เคลื่อน	ความหนาของ น้ำยาเคลือบ	เส้นผ่าน ศูนย์กลางรอบ นอก			
Dimeter (mm.)	Tolerance (mm.)	Film Thickness MIN (mm.)	Overall Diameter MAX (mm.)	Conduc Resis (Ohm / km.)	Elongation %	Breakdown Volt (Volt)
1.60	± 0.03	0.028	1.712	8.906	25.0	4150
1.70	± 0.03	0.028	1.814	7.871	5.0	4150
1.80	± 0.03	0.029	1.914	7.007	25.0	4350
1.90	± 0.03	0.029	2.018	6.278	25.0	4350
2.00	± 0.03	0.030	2.118	5.656	30.0	4350
2.10	± 0.03	0.030	2.220	5.123	30.0	4350
2.20	± 0.03	0.031	2.322	4.662	30.0	4350
2.30	± 0.03	0.032	2.422	4.260	30.0	4350
2.40	± 0.03	0.033	2.526	3.908	30.0	4350
2.50	± 0.03	0.034	2.628	3.598	30.0	4350
2.60	± 0.03	0.034	2.728	3.324	30.0	4350
2.70	± 0.03	0.034	2.828	3.079	30.0	4350
2.80	± 0.03	0.034	2.928	2.861	30.0	4350
2.90	± 0.03	0.034	3.028	2.665	30.0	4350
3.00	± 0.03	0.034	3.128	2.489	30.0	4350
3.20	± 0.03	0.034	3.328	2.198	30.0	4350
	± 0.04					

**ภาคผนวก ข**

ผลการทดสอบแรงดันทะลุผ่านของกระดาษฉนวน

**ตารางผนวกที่ ข1 ผลการทดสอบกระดาศขนาด PUCARO**

No.	ความหนา Thermopox	Dielectric Breakdown (kV)				
		จำนวน 1 แผ่น	จำนวน 2 แผ่น	จำนวน 3 แผ่น	จำนวน 4 แผ่น	จำนวน 5 แผ่น
1	0.13	9.5	17.5	25	26	29
2	0.18	12	23	27	30	30
3	0.25	15.5	26	30.5	32	33.5

**ตารางผนวกที่ ข2 ผลการทดสอบกระดาศขนาด WEIDMANN**

No.	ความหนา Thermopox	Dielectric Breakdown (kV)				
		จำนวน 1 แผ่น	จำนวน 2 แผ่น	จำนวน 3 แผ่น	จำนวน 4 แผ่น	จำนวน 5 แผ่น
1	0.13	8.5	16	24.5	26.5	29
2	0.18	9	22	24	27	30
3	0.25	13	25.5	28.5	32.5	34

**ตารางผนวกที่ ข3 ผลการทดสอบกระดาศขนาด ปลอกกระดาศย่น**

ขนาดกระดาศย่น (mm.)	Dielectric Breakdown (kV)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
4 x 1	18	18	21.6	19.20
13 x 1.6	25	25	25.5	25.17
16 x 1.6	22.9	21.8	25	23.23
22 x 1.6	25.2	24.5	19.3	23.00
6 x 1	18.7	21.9	23.9	21.50
(0.08)14 ชั้น (ที่เจริญชัยเป็นผู้ม้วนเอง)	37.1	36.8	-	36.95

**ภาคผนวก ค**

ผลการทดสอบน้ำมันหม้อแปลงบริษัท น้ำมันอพลโล (ไทย) จำกัด

APOLLO (THAILAND) CO., LTD.

IDEMITSU TRANSFORMER OIL GROUP

### 1. Application

An insulation oil for ordinary transformer, oil circuit breakers, oil immersed transformer of high voltage and large capacity. These products are made from carefully selected base oils through elaborate refining process under strict quality control. It meet many performance.

Requirement of insulation oil.

### 2. Characteristic

1. Excellent electric insulating capability thanks to the removal of almost all impurities.
2. Greatly reduced corrosive effect on metals like copper and silver resulting from the reduction of active sulfur.
3. Superior stability against oxidation, making it possible to maintain its high-performance properties.
4. Extremely reduced possibility of electrostatic charging caused by oil flow.

### 3. Applicable Standard

JIS	:	Standard	Class1	No.2, No.4
ASTM	:	D-3487		Type 1
IEC	:	296	Class1	
BS	:	148	Class1	

บริษัท น้ำมันอพลโล (ไทย) จำกัด

APOLLO (THAILAND) CO., LTD.

#### 4. Typical Specifications

Testing		Guarantee	Typical	Test-method (ASTM)
Appearance :	Room Temp	-	Bright & Clear	Visual
Density :	15 °C	0.9100 Max	0.8883	D-1298
Color :	ASTM	0.5 Max	L 0.5	D-1500
	SAYBOLT	-	-	-
Flash point :	C.O.C. °C	145 Min	157	D-92
Viseosity : cSt.	@40 °C	12 Max	8.91	D-445
	@100 °C	3 Max	2.24	
Pour point	°C	- 40 Max	- 30	D-97
Total Acid Number :	MgKOH/g	0.03 Max	< 0.01	D-974
Dielectric Breakdown Voltage (2.5mm Gap.) KV		30 Max	48.2	D-877
Wat Content	ppm	35 Max	12	D-1533
Dissipation Factor 100°C ( Power Factor )	%	0.3 Max	0.115	D-924
Sulfur	140°C x 19 Hrs.	None	None	D-1275
Thermal Expansion	°C / ml.	0.0007- 0.0008	0.000753	D-1903

## CERTIFICATE OF ANALYSIS

Report Number APOLLO – 001805  
 Product name TRANSFORMER OIL (APPOLLO)  
 Batch / Lot No. RB480250  
 Purchase Order 19181  
 Client บ.เจริญชัยหม้อแปลงไฟฟ้า จำกัด

No.	Item	Method	Specification	Results	Unit
1	Apperance	VISUAL	Bright&Clear	Bright&Clear	-
2	Density @ 15°C	ASTM D4052	Report	0.8915	g/cm3
	Density @ 30°C	ASTM D4052	Report	0.8820	g/cm3
3	Kinematic Viscosity @ 15°C	ASTM D445	11.0 max	9.16	cSt.
	Kinematic Viscosity @ 100°C	ASTM D445	3.0 max	2.27	cSt.
4	ASTM Color	ASTM D1500	0.5 max	L0.5	-
5	Flash Point by COC	ASTM D92	145 max	162	°C
6	Flash Point by PMCC	ASTM D93	140 max	147	°C
7	Water Content by Karl Fisher	ASTM D1533	30.0 max	4.1	ppm
	Reaction				
8	Dielectric Breakdown Voltage	ASTM D877	30.0 max	42.8	kV
9	Dielectric Dissipation Factor	ASTM D924	0.3 max	0.138	%
	@ 100°C				

Conclusion : PASSED

The results in this report apply to the samples analyzed in accordance with the chain of custody document.

This analytical report must be reproduced in this entirety

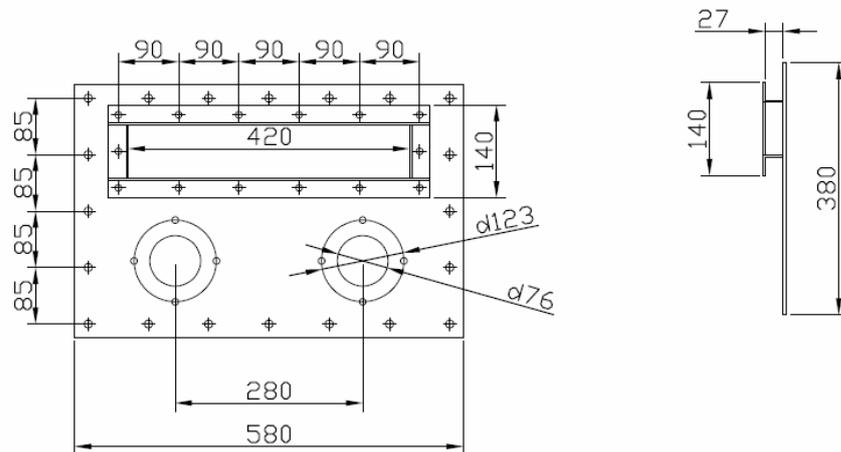
**ภาคผนวก ง**

**ชิ้นส่วนของตัวถังหม้อแปลงไฟฟ้า**

### ขอบล๊อคฝาถังของหม้อแปลงไฟฟ้า

ใช้เหล็กฉาก HAND HOLE 30 X 30 X 3 มม.

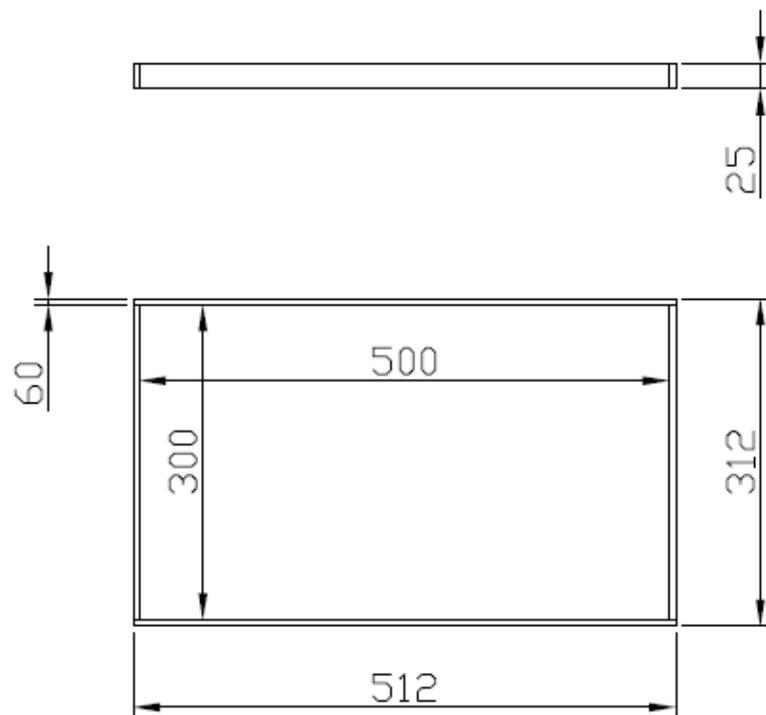
มาตราส่วน 1 : 10 มม.



### ก้นถังของหม้อแปลงไฟฟ้า

ใช้เหล็กแผ่นดำ 6 มม.

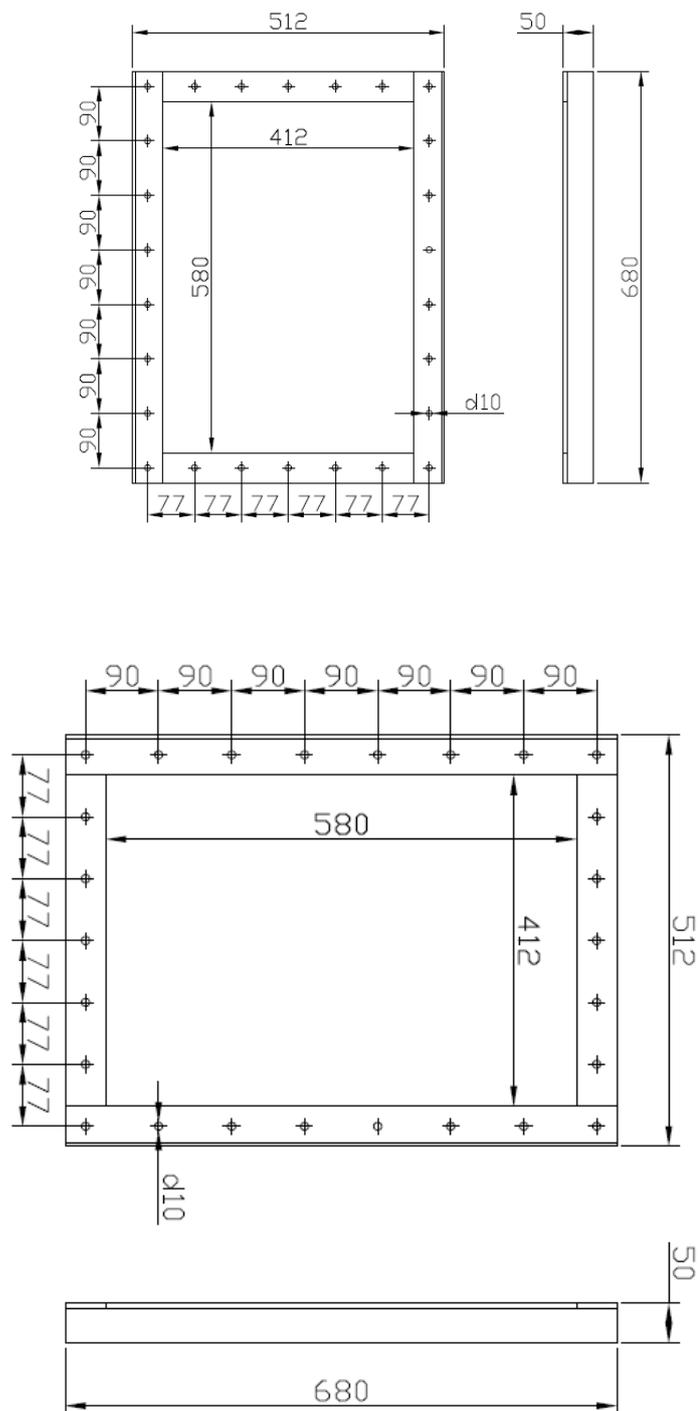
มาตราส่วน 1 : 10 มม.



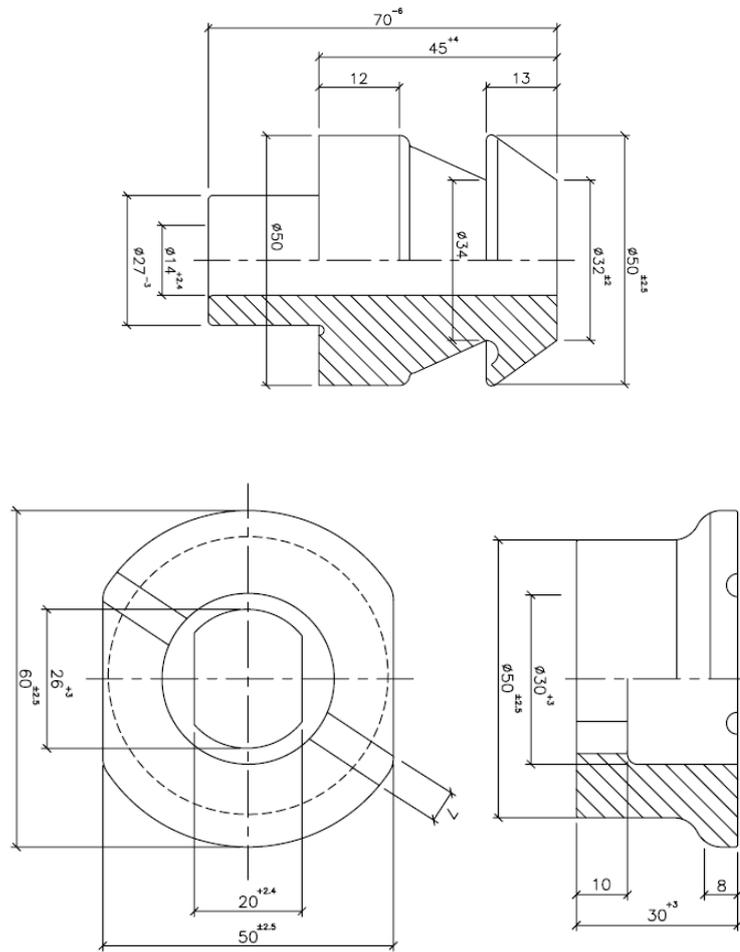
### ตัวถังของหม้อแปลงไฟฟ้า

ใช้เหล็กฉาก 50 X 50 X 6 มม.

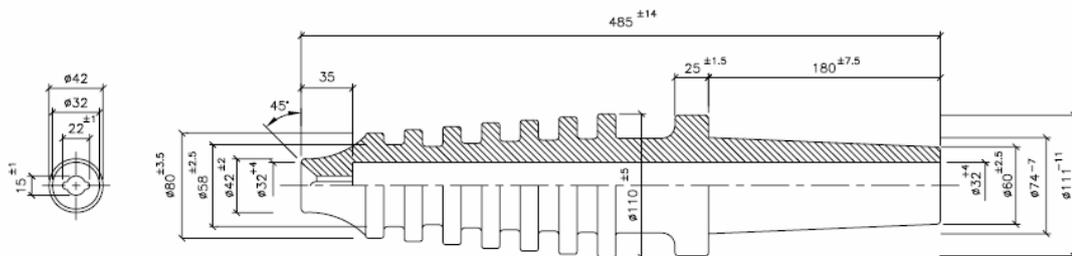
มาตราส่วน 1 : 10 มม.



บุชขึงค้ำแรงค้ำต่ำ



บุชขึงค้ำแรงค้ำสูง



**ภาคผนวก จ**  
**Partial Discharge Test Report**

Partial Discharge Test Report ของ บริษัท อิธิไทย จำกัด (มหาชน)

1. Transformer 250 kVA Three Phase 50 Hz. 22000-400/230 V

- Tapping range +/-2X2.50%
- Cooling type ONAN
- Vector group Dyn11
- Test Date 14/03/2008

ผลการทดสอบ

ตารางผนวกที่ จ1 Transformer 250 kVA Three Phase 50 Hz. 22000-400/230 V

Voltage Level	Time	Partial Discharge (pC)		
		A	B	C
Calibration		100	103	104
U3	5 min	3.4	2.8	2.8
U2	5 min	12.4	13.6	12.9
U1	30 sec	-	-	-
U2	5 min	5.6	7.8	6.4
U3	5 min	2.4	2.2	2.1

จากหม้อแปลงจำหน่าย 3 เฟส กำหนดว่าทำการทดสอบที่

$$U_1 = \frac{1.1U_m}{\sqrt{3}}$$

$$U_2 = \frac{1.3U_m}{\sqrt{3}}$$

$$U_3 = U_m$$

ตารางผนวกที่ จ2 Transformer 30MVA single Phase 50 Hz. 220/19 kV ลูกที่ 1

Voltage Level	Time	Partial Discharge (pC)
Calibration		1000
U3	5 min	29
U2	5 min	33
U1	30 sec	-
U2	5 min	31
U3	5 min	28

ตารางผนวกที่ จ3 Transformer 30MVA single Phase 50 Hz. 220/19 kV ลูกที่ 2

Voltage Level	Time	Partial Discharge (pC)
Calibration		1000
U3	5 min	30
U2	5 min	34
U1	30 sec	-
U2	5 min	30
U3	5 min	28

ตารางผนวกที่ จ4 Transformer 30MVA single Phase 50 Hz. 220/19 kV ลูกที่ 3

Voltage Level	Time	Partial Discharge (pC)
Calibration		1000
U3	5 min	29
U2	5 min	35
U1	30 sec	-
U2	5 min	32
U3	5 min	30

ตารางผนวกที่ จ5 Transformer 30MVA single Phase 50 Hz. 220/19 kV ลูกที่ 4

Voltage Level	Time	Partial Discharge (pC)
Calibration		1000
U3	5 min	31
U2	5 min	36
U1	30 sec	-
U2	5 min	31

จากหม้อแปลงจำหน่าย 1 เฟส กำหนดว่าทำการทดสอบที่

$$U_1 = U_m$$

$$U_2 = \frac{1.3U_m}{\sqrt{3}}$$

$$U_3 = \frac{1.1U_m}{\sqrt{3}}$$

**ภาคผนวก ข**

การวิเคราะห์หาสมการถดถอยโดยโปรแกรม SPSS 13.0 for Windows

### การวิเคราะห์สมการ

#### 1. หม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อหม้อแปลงมีน้ำมันหม้อแปลงเต็มถึง

ตารางผนวกที่ ข1 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการถดถอย  
ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อหม้อแปลงมีน้ำมันหม้อแปลงเต็มถึง

Equation	Model Summary				
	R Square	F	df1	df2	Sig.
Linear	0.563	25.798	1	20	0.000
Logarithmic	0.301	8.629	1	20	0.008
Inverse	0.099	2.199	1	20	0.154
Quadratic	0.898	83.657	2	19	0.000
Cubic	0.990	621.703	3	18	0.000
Compound	0.770	66.908	1	20	0.000
Power	0.508	20.685	1	20	0.000
S	0.224	5.760	1	20	0.026
Growth	0.770	66.908	1	20	0.000
Exponential	0.770	66.908	1	20	0.000
Logistic	0.770	66.908	1	20	0.000

ตารางผนวกที่ ข2 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อหม้อแปลงมี  
น้ำมันหม้อแปลงเต็มถึง

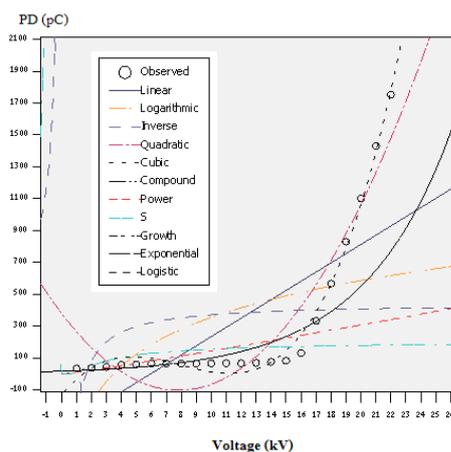
R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
0.995	0.990	0.989	52.825

ตารางผนวกที่ ข3 สัมประสิทธิ์การถดถอยในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อหม้อแปลงมีน้ำมันหม้อแปลงเต็มถึง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	5204459.466	3	1734819.822	621.703	0.000
Residual	50227.807	18	2790.434	-	-
Total	5254687.273	21	-	-	-

ตารางผนวกที่ ข4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร (ANOVA) ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อหม้อแปลงมีน้ำมันหม้อแปลงเต็มถึง

	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
$X$	119.714	19.870	1.554	6.025	0.000
$X^2$	-17.968	1.984	-5.525	-9.056	0.000
$X^3$	0.749	0.057	4.950	13.192	0.000
(Constant)	-134.798	53.968	-	-2.498	0.022



ภาพผนวกที่ ข1 กราฟแสดงการวิเคราะห์ความถดถอยที่ Y และ X มีความสัมพันธ์ในรูปแบบต่างๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อหม้อแปลงมีน้ำมันหม้อแปลงเต็มถึง

2. หม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกครั้งถึง

ตารางผนวกที่ ข5 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการถดถอยในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกครั้งถึง

Equation	Model Summary				
	R Square	F	df1	df2	Sig.
Linear	0.558	25.205	1	20	0.000
Logarithmic	0.295	8.361	1	20	0.009
Inverse	0.095	2.094	1	20	0.163
Quadratic	0.900	85.361	2	19	0.000
Cubic	0.992	774.089	3	18	0.000
Compound	0.760	63.496	1	20	0.000
Power	0.480	18.457	1	20	0.000
S	0.195	4.832	1	20	0.040
Growth	0.760	63.496	1	20	0.000
Exponential	0.760	63.496	1	20	0.000
Logistic	0.760	63.496	1	20	0.000

ตารางผนวกที่ ข6 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกครั้งถึง

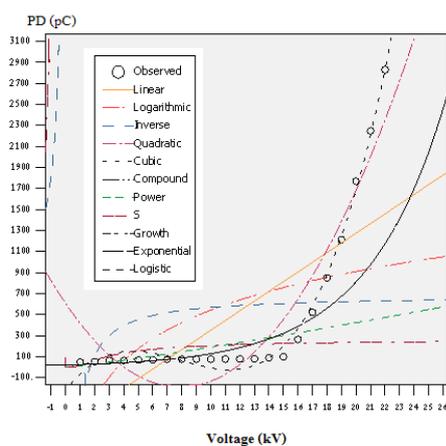
R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
0.996	0.992	0.991	76.033

ตารางผนวกที่ ข7 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร (ANOVA) ในหม้อแปลงไฟฟ้า  
จำลองต้นแบบเมื่อถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกครั้งถึง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	13424989.240	3	4474996.413	774.089	0.000
Residual	104057.714	18	5780.984	-	-
Total	13529046.955	21	-	-	-

ตารางผนวกที่ ข8 สัมประสิทธิ์การถดถอยในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อถ่ายน้ำมันหม้อ  
แปลงออกครั้งถึง

	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
$X$	188.430	28.600	1.524	6.588	0.000
$X^2$	-28.697	2.856	-5.499	-10.048	0.000
$X^3$	1.202	0.082	4.951	14.709	0.000
(Constant)	-224.889	77.678	-	-2.895	0.010



ภาพผนวกที่ ข2 กราฟแสดงการวิเคราะห์ความถดถอยที่ Y และ X มีความสัมพันธ์ในรูปแบบต่างๆ  
ของหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกครั้งถึง

### 3. หม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกหมดถึง

**ตารางผนวกที่ ข9** ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการถดถอย  
ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกหมดถึง

Equation	Model Summary				
	R Square	F	df1	df2	Sig.
Linear	0.520	21.658	1	20	0.000
Logarithmic	0.270	7.416	1	20	0.013
Inverse	0.086	1.870	1	20	0.187
Quadratic	0.869	62.931	2	19	0.000
Cubic	0.986	408.176	3	18	0.000
Compound	0.764	64.877	1	20	0.000
Power	0.478	18.335	1	20	0.000
S	0.189	4.673	1	20	0.043
Growth	0.764	64.877	1	20	0.000
Exponential	0.764	64.877	1	20	0.000
Logistic	0.764	64.877	1	20	0.000

**ตารางผนวกที่ ข10** ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อถ่ายน้ำมัน  
หม้อแปลงออกหมดถึง

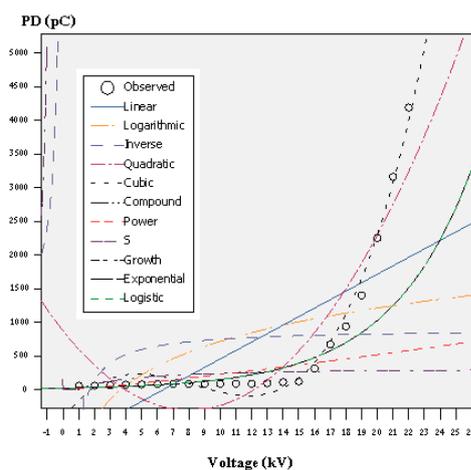
R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
0.993	0.986	0.983	147.397

ตารางผนวกที่ ข11 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร (ANOVA) ในหม้อแปลงไฟฟ้า  
จำลองต้นแบบเมื่อถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกหมดถึง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	26604134.604	3	8868044.868	408.176	0.000
Residual	391068.351	18	21726.019	-	-
Total	26995202.955	21	-	-	-

ตารางผนวกที่ ข12 สัมประสิทธิ์การถดถอยในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อถ่ายน้ำมันหม้อ  
แปลงออกหมดถึง

	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
$X$	325.658	55.445	1.865	5.874	0.000
$X^2$	-47.590	5.537	-6.456	-8.596	0.000
$X^3$	1.908	0.158	5.561	12.040	0.000
(Constant)	-442.805	150.587	-	-2.941	0.009



ภาพผนวกที่ ข3 กราฟแสดงการวิเคราะห์ความถดถอยที่ Y และ X มีความสัมพันธ์ในรูปแบบต่างๆ  
ของหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบเมื่อถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกหมดถึง

## 4. หม้อแปลงเก่า พิกัด 220 V/19 kV, 10 kVA, 50 Hz.

ตารางผนวกที่ ข13 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการถดถอย  
ในหม้อแปลงเก่า

Equation	Model Summary				
	R Square	F	df1	df2	Sig.
Linear	0.475	18.114	1	20	0.000
Logarithmic	0.241	6.335	1	20	0.020
Inverse	0.074	1.589	1	20	0.222
Quadratic	0.834	47.897	2	19	0.000
Cubic	0.971	199.364	3	18	0.000
Compound	0.739	56.708	1	20	0.000
Power	0.442	15.842	1	20	0.001
S	0.162	3.857	1	20	0.064
Growth	0.739	56.708	1	20	0.000
Exponential	0.739	56.708	1	20	0.000
Logistic	0.739	56.708	1	20	0.000

ตารางผนวกที่ ข14 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในหม้อแปลงเก่า

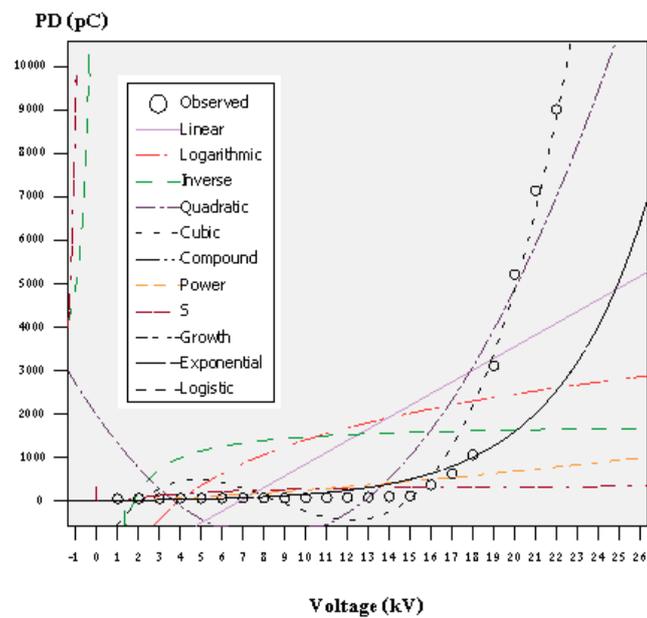
R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
0.985	0.971	0.966	469.142

ตารางผนวกที่ ข15 การวิเคราะห์ความสัมพัทธ์ระหว่างตัวแปร (ANOVA) ในหม้อแปลงเก่า

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	131636709.430	3	43878903.143	199.364	0.000
Residual	3961701.660	18	220094.537	-	-
Total	135598411.091	21	-	-	-

ตารางผนวกที่ ข16 สัมประสิทธิ์การถดถอยในหม้อแปลงเก่า

	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
$X$	815.890	176.472	2.085	4.623	0.000
$X^2$	-117.986	17.622	-7.141	-6.695	0.000
$X^3$	4.622	0.504	6.011	9.164	0.000
(Constant)	-1216.531	479.294	-	-2.538	0.021



ภาพผนวกที่ ข4 กราฟแสดงการวิเคราะห์ความถดถอยที่ Y และ X มีความสัมพันธ์ในรูปแบบต่างๆ ของผลการ Simulate ค่า PD ในหม้อแปลงเก่า

5. หม้อแปลงทดสอบ พิกัด 220V/100 kV, 5 kVA, 50 Hz.

ตารางผนวกที่ ข17 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการถดถอย  
ในหม้อแปลงทดสอบ

Equation	Model Summary				
	R Square	F	df1	df2	Sig.
Linear	0.872	136.530	1	20	0.000
Logarithmic	0.565	25.947	1	20	0.000
Inverse	0.216	5.509	1	20	0.029
Quadratic	0.991	992.188	2	19	0.000
Cubic	0.994	982.404	3	18	0.000
Compound	0.893	167.281	1	20	0.000
Power	0.595	29.362	1	20	0.000
S	0.233	6.080	1	20	0.023
Growth	0.893	167.281	1	20	0.000
Exponential	0.893	167.281	1	20	0.000
Logistic	0.893	167.281	1	20	0.000

ตารางผนวกที่ ข18 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในหม้อแปลงทดสอบ

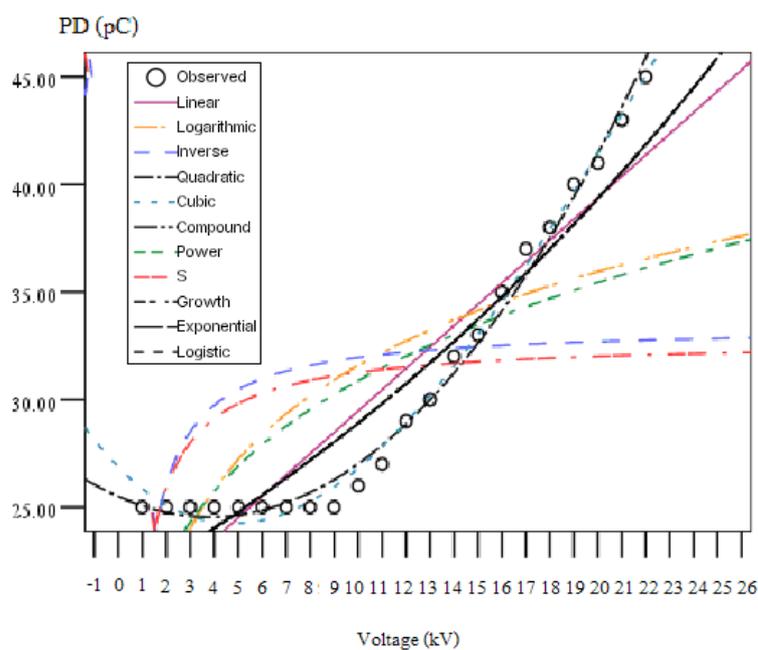
R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
0.997	0.994	0.993	0.580

ตารางผนวกที่ ข19 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร (ANOVA) ในหม้อแปลงทดสอบ

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	990.903	3	330.301	982.404	0.000
Residual	6.052	18	0.336	-	-
Total	996.955	21	-	-	-

ตารางผนวกที่ ๒๒ สัมประสิทธิ์การถดถอยในหม้อแปลงทดสอบ

	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
$X$	-1.136	0.218	-1.071	-5.210	0.000
$X^2$	0.133	0.022	2.967	6.103	0.000
$X^3$	-0.002	0.001	-0.951	-3.182	0.005
(Constant)	26.862	0.592	-	45.345	0.000



ภาพผนวกที่ ๒๓ กราฟแสดงการวิเคราะห์ความถดถอยที่ Y และ X มีความสัมพันธ์ในรูปแบบต่างๆ ของผลการ Simulate ค่า PD ในหม้อแปลงทดสอบ

6. ผลการ Simulate ค่า PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อไม่ได้ตัดมุมแกนเหล็ก)

ตารางผนวกที่ ข21 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการถดถอย  
ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อไม่ได้ตัดมุมแกนเหล็ก)

Equation	Model Summary				
	R Square	F	df1	df2	Sig.
Linear	0.465	17.372	1	20	0.000
Logarithmic	0.247	6.546	1	20	0.019
Inverse	0.084	1.824	1	20	0.192
Quadratic	0.791	35.868	2	19	0.000
Cubic	0.956	130.158	3	18	0.000
Compound	0.717	50.625	1	20	0.000
Power	0.498	19.841	1	20	0.000
S	0.248	6.592	1	20	0.018
Growth	0.717	50.625	1	20	0.000
Exponential	0.717	50.625	1	20	0.000
Logistic	0.717	50.625	1	20	0.000

ตารางผนวกที่ ข22 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ  
(เมื่อไม่ได้ตัดมุมแกนเหล็ก)

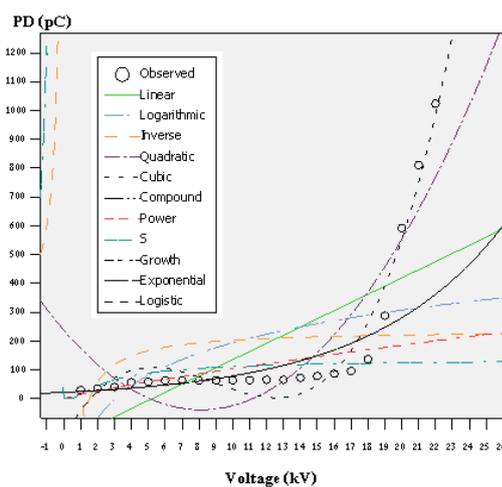
R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
0.978	0.956	0.949	61.223

ตารางผนวกที่ ข23 การวิเคราะห์ความสัมพัทธ์ระหว่างตัวแปร (ANOVA) ในหม้อแปลงไฟฟ้า  
จำลองต้นแบบ (เมื่อไม่ได้ตัดมุมแกนเหล็ก)

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	1463616.999	3	487872.333	130.158	0.000
Residual	67469.365	18	3748.298	-	-
Total	1531086.364	21	-	-	-

ตารางผนวกที่ ข24 สัมประสิทธิ์การถดถอยในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ  
(เมื่อไม่ได้ตัดมุมแกนเหล็ก)

	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
$X$	107.370	23.030	2.582	4.662	0.000
$X^2$	-14.465	2.300	-8.239	-6.290	0.000
$X^3$	0541	0.066	6.620	8.218	0.000
(Constant)	-134.977	62.548	-	-2.158	0.045



ภาพผนวกที่ ข6 กราฟแสดงการวิเคราะห์ความถดถอยที่ Y และ X มีความสัมพันธ์ในรูปแบบต่างๆ  
ของผลการ Simulate ค่า PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ  
(เมื่อไม่ได้ตัดมุมแกนเหล็ก)

7. ผลการ Simulate ค่า PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 4 เซนติเมตร)

ตารางผนวกที่ ข25 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการถดถอยในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 4 เซนติเมตร)

Equation	Model Summary				
	R Square	F	df1	df2	Sig.
Linear	0.766	65.587	1	20	0.000
Logarithmic	0.458	16.895	1	20	0.001
Inverse	0.163	3.903	1	20	0.062
Quadratic	0.984	592.855	2	19	0.000
Cubic	0.996	1499.157	3	18	0.000
Compound	0.864	127.114	1	20	0.000
Power	0.555	24.942	1	20	0.000
S	0.211	5.338	1	20	0.032
Growth	0.864	127.114	1	20	0.000
Exponential	0.864	127.114	1	20	0.000
Logistic	0.864	127.114	1	20	0.000

ตารางผนวกที่ ข26 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 4 เซนติเมตร)

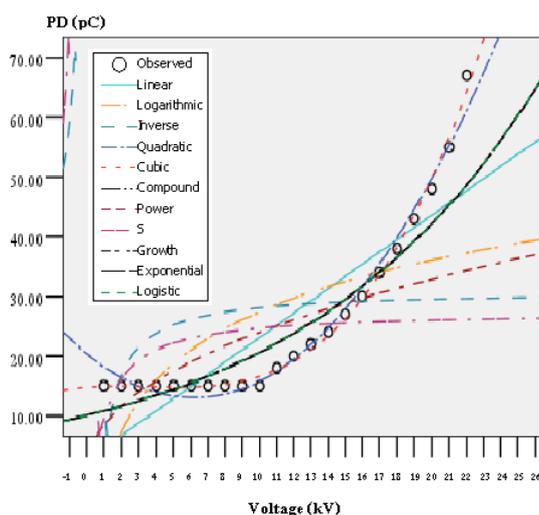
R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
0.998	0.996	0.995	1.036

ตารางผนวกที่ ข27 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร (ANOVA) ใน หม้อแปลงไฟฟ้า  
จำลองต้นแบบ (เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 4 เซนติเมตร)

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	4829.942	3	1609.981	1499.157	0.000
Residual	19.331	18	1.074	-	-
Total	4849.273	21	-	-	-

ตารางผนวกที่ ข28 สัมประสิทธิ์การถดถอยในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ  
(เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 4 เซนติเมตร)

	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
$X$	0.244	0.390	0.104	0.627	0.539
$X^2$	-0.087	0.039	-0.883	-2.242	0.038
$X^3$	0.008	0.001	1.768	7.295	0.000
(Constant)	14.782	1.059	-	13.962	0.000



ภาพผนวกที่ ข7 กราฟแสดงการวิเคราะห์ความถดถอยที่ Y และ X มีความสัมพันธ์ในรูปแบบต่างๆ  
ของผลการ Simulate ค่า PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ  
(เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 4 เซนติเมตร)

8. ผลการ Simulate ค่า PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 15 เซนติเมตร)

**ตารางผนวกที่ ข29** ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการถดถอยในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 15 เซนติเมตร)

Equation	Model Summary				
	R Square	F	df1	df2	Sig.
Linear	0.770	66.901	1	20	0.000
Logarithmic	0.461	17.073	1	20	0.001
Inverse	0.164	3.933	1	20	0.061
Quadratic	0.987	698.015	2	19	0.000
Cubic	0.997	2320.599	3	18	0.000
Compound	0.878	144.551	1	20	0.000
Power	0.574	26.926	1	20	0.000
S	0.221	5.675	1	20	0.027
Growth	0.878	144.551	1	20	0.000
Exponential	0.878	144.551	1	20	0.000
Logistic	0.878	144.551	1	20	0.000

**ตารางผนวกที่ ข30** ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 15 เซนติเมตร)

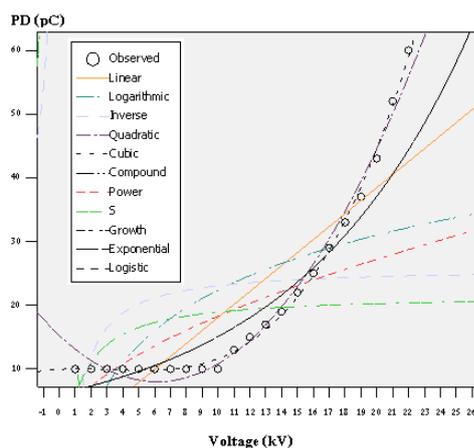
R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
0.999	0.997	0.997	0.827

ตารางผนวกที่ ข31 การวิเคราะห์ความสัมพัทธ์ระหว่างตัวแปร (ANOVA) ในหม้อแปลงไฟฟ้า  
จำลองต้นแบบ (เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 15 เซนติเมตร)

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	4764.273	3	1588.091	2320.599	0.000
Residual	12.318	18	0.684	-	-
Total	4776.591	21	-	-	-

ตารางผนวกที่ ข32 สัมประสิทธิ์การถดถอยในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ  
(เมื่อตัดมุมแกนเหล็กออกข้างละ 15 เซนติเมตร)

	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
$X$	0.153	0.311	0.066	0.491	0.629
$X^2$	0-.076	0.031	-0.774	-2.441	0.025
$X^3$	0.008	0.001	1.696	8.702	0.000
(Constant)	9.946	0.845	-	11.768	0.000



ภาพผนวกที่ ข8 กราฟแสดงการวิเคราะห์ความถดถอยที่ Y และ X มีความสัมพันธ์ในรูปแบบต่างๆ  
ของผลการ Simulate ค่า PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าจำลองต้นแบบ (เมื่อตัดมุมแกน  
เหล็กออกข้างละ 15 เซนติเมตร)

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวอุไรรัตน์ เฟื่องสูงเนิน
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 13 มีนาคม 2526
สถานที่เกิด	จ.ชัยภูมิ
ประวัติการศึกษา	ระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	วิศวกรไฟฟ้า
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค กองบริการวิศวกรรม อาคาร 5 ชั้น 3 เลขที่ 200 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	1. ตีพิมพ์งานวิจัยเรื่อง Partial Discharge Analysis for Power Distribution Transformer Model ของการ ประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 46 The 46 <sup>th</sup> Kasetsart University Annual Conference 2. ตีพิมพ์งานวิจัยเรื่อง Partial Discharge Analysis for Power Distribution Transformer Model ของวารสาร ไฟฟ้าและอุตสาหกรรมปีที่ 14 ฉบับที่ 5 กันยายน – ตุลาคม 2550