

คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของน้ำมันหม้อแปลงภายใต้แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานใน
สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ



นายกฤษวัฒน์ ทองแกมแก้ว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-5833-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

VOLTAGE-TIME CHARACTERISTICS OF TRANSFORMER OIL UNDER STANDARD LIGHTNING
IMPULSE VOLTAGE IN NON-UNIFORM ELECTRIC FIELD



Mr.Kritsawat Tongkamkawe

สถาบันวิทยบริการ

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-5833-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์

คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของน้ำมันหม้อแปลงภายใต้แรงดัน
อิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

โดย

นายกฤษวัฒน์ ทองแกมแก้ว

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. บุญชัย เตชะอำนาจ)

กฤษฎวัฒน์ ทองแกมแก้ว: คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของน้ำมันหม้อแปลงภายใต้แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ. (VOLTAGE-TIME CHARACTERISTICS OF TRANSFORMER OIL UNDER STANDARD LIGHTNING IMPULSE VOLTAGE IN NON-UNIFORM ELECTRIC FIELD) อ. ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรัักษ์, จำนวนหน้า 72 หน้า. ISBN 974-17-5833-2.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอผลการศึกษาคคุณลักษณะของแรงดัน-เวลาของฉนวนน้ำมันหม้อแปลง โดยศึกษาการเกิดเบรกดาวร์ของแก๊ปเนื่องจากแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าระหว่างอิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง, ระยะแก๊ป, ขนาดรัศมีอิเล็กโตรด และชั่วของแรงดันมีการเปลี่ยนแปลง จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของน้ำมันหม้อแปลง จะเพิ่มขึ้นตามระยะแก๊ป, ขนาดรัศมีอิเล็กโตรด และอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลงที่เพิ่มขึ้น ในทุกกรณีการศึกษา.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2546.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4370215521 : ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORDS : VOLTAGE-TIME CHARACTERISTICS / TRANSFORMER OIL /
LIGHTNING IMPULSE BREAKDOWN VOLTAGE

KRITSAWAT TONGKAMKAWE : VOLTAGE-TIME CHARACTERISTICS OF
TRANSFORMER OIL UNDER STANDARD LIGHTNING IMPULSE VOLTAGE IN
NON-UNIFORM ELECTRIC FIELD .THESIS ADVISOR : KOMSON PETCHARAKS,
Dr.Sc.Techn.,72 pp. ISBN 974-17-5833-2.

This thesis presents a study of voltage-time characteristics of transformer oil under standard lightning impulse voltage in non-uniform electric field. The affect of transformer oil temperature, gap spacing, electrode radius and impulse voltage polarity were investigated. The results show that, in all cases the voltage-time characteristics of transformer oil are increased with gap spacing, electrode radius and temperature of transformer oil .



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Electrical Engineering

Field of study Electrical Engineering

Academic year 2003

Student's signature.....

Advisor's signature.....

Co-advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากอาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรวิเศษ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้แนวทางการศึกษาวิจัย แก้ปัญหาและแก้ไขข้อบกพร่องจนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

นอกจากนั้น ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.สุชุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร และ อาจารย์ ดร.บุญชัย เตชะอำนาจ ที่ช่วยตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณอาจารย์ ดร.วีรพันธ์ รังสีวิจิตรประภา คุณถาวร เอื้อดี คุณเกรียงไกร โอบขันธ์คุณคุณอรอนพ ลឹมสีมาร์ตน คุณพีรภูมิ ยุทธโกวิท และปิ่นศักดิ์เศส ล้ำเลิศประเสริฐฐิติให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์วัดและอุปกรณ์ทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง รวมทั้งให้คำแนะนำในการทดลองมาโดยตลอด ขอขอบคุณเพื่อนพี่น้องในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงท่านอื่นที่ไม่ได้กล่าวถึงที่ช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และแลกเปลี่ยนความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์

ตลอดจน คุณดุษฎี แก้วอินทร์ศรวล สำหรับกำลังใจที่ดีเยี่ยม และเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกท่านในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง รวมทั้งบัณฑิตวิทยาลัยที่มอบทุนอุดหนุนโครงการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณไว้

ท้ายสุดนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และพี่น้องของข้าพเจ้า ที่คอยอบรมสั่งสอน เป็นกำลังใจรวมทั้งสนับสนุนข้าพเจ้าในทุกๆ ด้านตลอดมา จนประสบความสำเร็จในที่สุด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ

บทที่

1. บทนำ.....	1
1.1 บทนำทั่วไป	1
1.2 ที่มาของปัญหา.....	2
1.3 ผลการศึกษาวิจัยในอดีต	3
1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
1.5 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	5
1.6 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์	5
1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ	5
2. ฉนวนเหลว.....	6
2.1 ชนิดของฉนวนเหลว	6
2.2 น้ำมันหม้อแปลง.....	8
2.3 พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า.....	11
2.3.1 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหม้อแปลง	11
2.3.2 ความชื้น.....	12
2.3.3 ก๊าซ.....	13
2.3.4 ประจุค้าง.....	14
2.3.5 การเคลื่อนที่	14
2.3.6 อุณหภูมิ	15

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
2.3.7 ชนิดของรูปคลื่นแรงดัน	15
2.3.8 อนุภาคเจ็อบนของแข็ง	15
2.4 กลไกการเกิดเบรกดาวนในฉนวนเหลว	16
2.4.1 กลไกการเกิดเบรกดาวนของฉนวนเหลวบริสุทธิ์.....	16
2.4.2 กลไกการเกิดเบรกดาวนของฉนวนเหลวเชิงการค้ำ	17
2.4.2.1 กลไกการเกิดเบรกดาวนเนื่องจากอนุภาคเจ็อบนของแข็ง	17
2.4.2.2 กลไกการเกิดเบรกดาวนเนื่องจากฟองก๊าซ	18
2.4.2.3 กลไกการเกิดเบรกดาวนจากหยดของเหลวเจ็อบน	19
2.4.2.4 กลไกการเกิดเบรกดาวนเนื่องจากปรากฏการณ์ EHD	19
2.5 การเกิดเบรกดาวนของแรงดันอิมพัลส์.....	20
2.5.1 เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน.....	20
2.5.2 เส้นคุณลักษณะแรงดัน-เวลา	21
3.วิธีดำเนินการทดลอง	23
3.1 การเตรียมการทดลอง	23
3.1.1 การควบคุมขนาดอนุภาคเจ็อบนและปริมาณความชื้น.....	23
3.1.2 อิเล็กโตรด	25
3.1.3 การทำความสะอาดชุดทดลอง	26
3.1.4 การถ่ายเทน้ำมันหม้อแปลงลงชุดทดลอง	26
3.1.5 การตั้งระยะแกป	27
3.1.6 การควบคุมอุณหภูมิ.....	27
3.2 ชุดทดลอง	27
3.3 วิธีการทดลองและรวบรวมข้อมูล	29
3.3.1 วงจรทดลอง	29
3.3.2 การป้อนแรงดัน.....	30
3.3.3 การควบคุมคุณภาพของน้ำมันหม้อแปลง	30
3.4 การทดสอบความเป็นอิสระต่อกัน	30
3.4.1 การสร้างกราฟเปรียบเทียบ.....	31

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
4.ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	32
4.1 ผลของขนาดรัศมีอิเล็กโตรดและชั่วแรงแง่งตันต่อคุณลักษณะแรงแง่งตัน-เวลา	35
4.2 ผลของระยะแกปและชั่วแรงแง่งตันต่อคุณลักษณะแรงแง่งตัน-เวลา	38
4.3 ผลของอุณหภูมิของน้ำมันหล่อแปลงต่อคุณลักษณะแรงแง่งตัน-เวลา	42
5.สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	45
5.1 สรุปผลการวิจัย	45
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	45
รายการอ้างอิง.....	47
ภาคผนวก.....	50
ภาคผนวก ก. ข้อมูลแรงแง่งตันและเวลาเบรกดาวนีย์.....	51
ก.1 ข้อมูลเบรกดาวนีย์ที่ $T = 30^{\circ}\text{C}$, $r = 2.5$ ม.ม.....	52
ก.2 ข้อมูลเบรกดาวนีย์ที่ $T = 30^{\circ}\text{C}$, $r = 5$ ม.ม.....	55
ก.3 ข้อมูลเบรกดาวนีย์ที่ $T = 30^{\circ}\text{C}$, $r = 10$ ม.ม.....	56
ก.4 ข้อมูลเบรกดาวนีย์ที่ $T = 55^{\circ}\text{C}$, $r = 2.5$ ม.ม.....	57
ก.5 ข้อมูลเบรกดาวนีย์ที่ $T = 55^{\circ}\text{C}$, $r = 5$ ม.ม.....	60
ก.6 ข้อมูลเบรกดาวนีย์ที่ $T = 55^{\circ}\text{C}$, $r = 10$ ม.ม.....	61
ภาคผนวก ข. กราฟเปรียบเทียบค่าแรงแง่งตันเบรกดาวนีย์	62
ข.1 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงแง่งตันเบรกดาวนีย์ที่ $T = 30^{\circ}\text{C}$, $r = 2.5$ ม.ม.....	62
ข.2 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงแง่งตันเบรกดาวนีย์ที่ $T = 30^{\circ}\text{C}$, $r = 5$ ม.ม.....	65
ข.3 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงแง่งตันเบรกดาวนีย์ที่ $T = 30^{\circ}\text{C}$, $r = 10$ ม.ม.....	66
ข.4 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงแง่งตันเบรกดาวนีย์ที่ $T = 55^{\circ}\text{C}$, $r = 2.5$ ม.ม.....	67
ข.5 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงแง่งตันเบรกดาวนีย์ที่ $T = 55^{\circ}\text{C}$, $r = 5$ ม.ม.....	70
ข.6 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงแง่งตันเบรกดาวนีย์ที่ $T = 55^{\circ}\text{C}$, $r = 10$ ม.ม.....	71
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	72

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลและสัดส่วนขององค์ประกอบพื้นฐานของน้ำมันหม้อแปลง	8
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ , เคมีและไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง	9
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ในการทดลอง	10
ตารางที่ 2.4 ค่าคงที่การละลายของก๊าซ (A) ตามกฎของเฮนรี่ ($\mu atm. / (\mu l / l)$) ที่ความดันก๊าซ เหนือน้ำมันหม้อแปลง 760 mmHg.....	13
ตารางที่ 2.5 ความสามารถในการละลายของก๊าซ(K,%Vol)ที่ความดันก๊าซเหนือ น้ำมันหม้อแปลง 760 mmHg.....	14
ตารางที่ 3.1 แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (FF) ที่ระยะแกปและอิเล็กโตรดทรงกลมขนาดต่างๆ	29
ตารางที่ ก.1 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $T = 30^{\circ}C$, $r = 2.5$ ม.ม. , $g = 3$ ม.ม. ขั้วลบ	52
ตารางที่ ก.2 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $T = 30^{\circ}C$, $r = 2.5$ ม.ม. , $g = 3$ ม.ม. ขั้วบวก	52
ตารางที่ ก.3 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $T = 30^{\circ}C$, $r = 2.5$ ม.ม. , $g = 5$ ม.ม. ขั้วลบ	53
ตารางที่ ก.4 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $T = 30^{\circ}C$, $r = 2.5$ ม.ม. , $g = 5$ ม.ม. ขั้วบวก	53
ตารางที่ ก.5 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $T = 30^{\circ}C$, $r = 2.5$ ม.ม. , $g = 10$ ม.ม. ขั้วลบ	54
ตารางที่ ก.6 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $T = 30^{\circ}C$, $r = 2.5$ ม.ม. , $g = 10$ ม.ม. ขั้วบวก	54
ตารางที่ ก.7 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $T = 30^{\circ}C$, $r = 5$ ม.ม. , $g = 3$ ม.ม. ขั้วลบ	55
ตารางที่ ก.8 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $T = 30^{\circ}C$, $r = 5$ ม.ม. , $g = 3$ ม.ม. ขั้วบวก	55
ตารางที่ ก.9 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $T = 30^{\circ}C$, $r = 10$ ม.ม. , $g = 3$ ม.ม. ขั้วลบ	56
ตารางที่ ก.10 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $T = 30^{\circ}C$, $r = 10$ ม.ม. , $g = 3$ ม.ม. ขั้วบวก	56
ตารางที่ ก.11 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $T = 55^{\circ}C$, $r = 2.5$ ม.ม. , $g = 3$ ม.ม. ขั้วลบ	57
ตารางที่ ก.12 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $T = 55^{\circ}C$, $r = 2.5$ ม.ม. , $g = 3$ ม.ม. ขั้วบวก	57
ตารางที่ ก.13 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $T = 55^{\circ}C$, $r = 2.5$ ม.ม. , $g = 5$ ม.ม. ขั้วลบ	58
ตารางที่ ก.14 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $T = 55^{\circ}C$, $r = 2.5$ ม.ม. , $g = 5$ ม.ม. ขั้วบวก	58
ตารางที่ ก.15 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $T = 55^{\circ}C$, $r = 2.5$ ม.ม. , $g = 10$ ม.ม. ขั้วลบ	59
ตารางที่ ก.16 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $T = 55^{\circ}C$, $r = 2.5$ ม.ม. , $g = 10$ ม.ม. ขั้วบวก	59
ตารางที่ ก.17 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $T = 55^{\circ}C$, $r = 5$ ม.ม. , $g = 3$ ม.ม. ขั้วลบ	60
ตารางที่ ก.18 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $T = 55^{\circ}C$, $r = 5$ ม.ม. , $g = 3$ ม.ม. ขั้วบวก	60

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ ก.19 ข้อมูลเบรกดาวนีย์ที่ $T = 55^{\circ}\text{C}$, $r = 10$ ม.ม., $g = 3$ ม.ม. ไข้วลบ	61
ตารางที่ ก.20 ข้อมูลเบรกดาวนีย์ที่ $T = 55^{\circ}\text{C}$, $r = 10$ ม.ม., $g = 3$ ม.ม. ไข้วบวก	61



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1.1 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของน้ำมันหม้อแปลง	4
รูปที่ 2.1 ชนิดของฉนวนเหลว	7
รูปที่ 2.2 พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบบกน้ำมันหม้อแปลง	11
รูปที่ 2.3 เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน	20
รูปที่ 2.4 คุณลักษณะแรงดัน-เวลา.....	22
รูปที่ 3.1 การควบคุมขนาดอนุภาคเจ็ปนและปริมาณความชื้น.....	23
รูปที่ 3.2 การควบคุมขนาดอนุภาคเจ็ปน.....	24
รูปที่ 3.3 จุดเดือดของน้ำกับความดันไอ	25
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการถ่ายเทน้ำมันหม้อแปลง	26
รูปที่ 3.5 ชุดทดลอง(Test Cell)	28
รูปที่ 3.6 วงจรทดลองแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน (1.2/50 μs).....	29
รูปที่ 3.7 ตัวอย่างการตรวจสอบความเป็นอิสระต่อกันด้วยการสร้างกราฟเปรียบเทียบ.....	31
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างข้อมูลคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μs ที่ได้จากการทดลอง.....	32
รูปที่ 4.2 ตัวอย่างรูปคุณลักษณะแรงดัน-เวลา	33
รูปที่ 4.3 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ระยะแกป 3 ม.ม. ขนาดรัศมีอิเล็กโตรด 2.5 ม.ม.	34
รูปที่ 4.4 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ระยะแกป 3 ม.ม. ขนาดรัศมีอิเล็กโตรด 5 ม.ม.	34
รูปที่ 4.5 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ระยะแกป 3 ม.ม. ขนาดรัศมีอิเล็กโตรด 10 ม.ม.	34
รูปที่ 4.6 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ระยะแกป 5 ม.ม. ขนาดรัศมีอิเล็กโตรด 2.5 ม.ม.	35
รูปที่ 4.7 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ระยะแกป 10 ม.ม. ขนาดรัศมีอิเล็กโตรด 2.5 ม.ม.	35
รูปที่ 4.8 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ระยะแกป 3 ม.ม. ขนาดรัศมีอิเล็กโตรด 2.5,5 และ10 ม.ม. อุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง 30°C แรงดันอิมพัลส์ชั่วพล.....	36
รูปที่ 4.9 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ระยะแกป 3 ม.ม. ขนาดรัศมีอิเล็กโตรด 2.5,5 และ10 ม.ม. อุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง 30°C แรงดันอิมพัลส์ชั่วบวก.....	36
รูปที่ 4.10 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ระยะแกป 3 ม.ม. ขนาดรัศมีอิเล็กโตรด 2.5,5 และ10 ม.ม. อุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง 55°C แรงดันอิมพัลส์ชั่วพล.....	37
รูปที่ 4.11 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ระยะแกป 3 ม.ม. ขนาดรัศมีอิเล็กโตรด 2.5,5 และ10 ม.ม. อุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง 55°C แรงดันอิมพัลส์ชั่วบวก.....	37

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.12 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ระยะแกป 3 ม.ม. ขนาดรัศมีอิเล็กโตรด 2.5 5 และ 10 ม.ม. คุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง 30 และ 55°C แรงดันอิมพัลส์ชั่วฉับและชั่วบวก.....	38
รูปที่ 4.13 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ระยะแกป 3,5 และ10 ม.ม. ขนาดรัศมีอิเล็กโตรด 2.5 ม.ม. คุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง 30°C แรงดันอิมพัลส์ชั่วฉับ	39
รูปที่ 4.14 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ระยะแกป 3,5 และ10 ม.ม. ขนาดรัศมีอิเล็กโตรด 2.5 ม.ม. คุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง 30°C แรงดันอิมพัลส์ชั่วบวก	39
รูปที่ 4.15 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ระยะแกป 3,5 และ10 ม.ม. ขนาดรัศมีอิเล็กโตรด 2.5 ม.ม. คุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง 55°C แรงดันอิมพัลส์ชั่วฉับ	40
รูปที่ 4.16 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ระยะแกป 3,5 และ10 ม.ม. ขนาดรัศมีอิเล็กโตรด 2.5 ม.ม. คุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง 55°C แรงดันอิมพัลส์ชั่วบวก	40
รูปที่ 4.17 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ระยะแกป 3,5และ10ม.ม.ขนาดรัศมีอิเล็กโตรด 2.5 ม.ม. คุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง 30 และ 55°C แรงดันอิมพัลส์ชั่วฉับและชั่วบวก	41
รูปที่ 5.18 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ขนาดรัศมีอิเล็กโตรด 2.5 ม.ม. แรงดันอิมพัลส์ชั่วฉับ	42
รูปที่ 5.19 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ขนาดรัศมีอิเล็กโตรด 2.5 ม.ม. แรงดันอิมพัลส์ชั่วบวก	42
รูปที่ 5.20 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ระยะแกป 3 ม.ม. แรงดันอิมพัลส์ชั่วฉับ	43
รูปที่ 5.21 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ระยะแกป 3 ม.ม. แรงดันอิมพัลส์ชั่วบวก	43
รูปที่ ข.1 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนที่T=30°C,r=2.5 ม.ม.,g=3 ม.ม. ชั่วฉับ.....	62
รูปที่ ข.2 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนที่T=30°C,r=2.5 ม.ม.,g=3 ม.ม. ชั่วบวก.....	62
รูปที่ ข.3 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนที่T=30°C,r=2.5 ม.ม.,g=5 ม.ม. ชั่วฉับ.....	63
รูปที่ ข.4 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนที่T=30°C,r=2.5 ม.ม.,g=5 ม.ม. ชั่วบวก.....	63
รูปที่ ข.5 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนที่T=30°C,r=2.5 ม.ม.,g=10 ม.ม. ชั่วฉับ.....	64
รูปที่ ข.6 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนที่T=30°C,r=2.5 ม.ม.,g=10 ม.ม. ชั่วบวก.....	64
รูปที่ ข.7 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนที่T=30°C,r=5 ม.ม.,g=3 ม.ม. ชั่วฉับ.....	65
รูปที่ ข.8 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนที่T=30°C,r=5 ม.ม.,g=3 ม.ม. ชั่วบวก.....	65
รูปที่ ข.9 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนที่T=30°C,r=10 ม.ม.,g=3 ม.ม. ชั่วฉับ.....	66
รูปที่ ข.10 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนที่T=30°C,r=10 ม.ม.,g=3 ม.ม. ชั่วบวก.....	66

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ ข.11 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนที่ $T=55^{\circ}\text{C}$, $r=2.5$ ม.ม., $g=3$ ม.ม. ขั้วลบ.....	67
รูปที่ ข.12 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนที่ $T=55^{\circ}\text{C}$, $r=2.5$ ม.ม., $g=3$ ม.ม. ขั้วบวก.....	67
รูปที่ ข.13 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนที่ $T=55^{\circ}\text{C}$, $r=2.5$ ม.ม., $g=5$ ม.ม. ขั้วลบ.....	68
รูปที่ ข.14 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนที่ $T=55^{\circ}\text{C}$, $r=2.5$ ม.ม., $g=5$ ม.ม. ขั้วบวก.....	68
รูปที่ ข.15 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนที่ $T=55^{\circ}\text{C}$, $r=2.5$ ม.ม., $g=10$ ม.ม. ขั้วลบ.....	69
รูปที่ ข.16 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนที่ $T=55^{\circ}\text{C}$, $r=2.5$ ม.ม., $g=10$ ม.ม. ขั้วบวก....	69
รูปที่ ข.17 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนที่ $T=55^{\circ}\text{C}$, $r=5$ ม.ม., $g=3$ ม.ม. ขั้วลบ.....	70
รูปที่ ข.18 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนที่ $T=55^{\circ}\text{C}$, $r=5$ ม.ม., $g=3$ ม.ม. ขั้วบวก.....	70
รูปที่ ข.19 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนที่ $T=55^{\circ}\text{C}$, $r=10$ ม.ม., $g=3$ ม.ม. ขั้วลบ.....	71
รูปที่ ข.20 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนที่ $T=55^{\circ}\text{C}$, $r=10$ ม.ม., $g=3$ ม.ม. ขั้วบวก.....	71

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำทั่วไป

ของเหลวใดๆสามารถนำมาใช้เป็นฉนวนได้เสมอ ถ้าหากว่าของเหลวนั้นมีค่าความต้านทานสูงมากพอและไม่เปลี่ยนแปลงสภาพทางฟิสิกส์, เคมี และไฟฟ้า ในช่วงเวลาที่ยานพอสสมควร โดยหลักการแล้วฉนวนเหลวจะทำหน้าที่การฉนวนได้ดีกว่าก๊าซและฉนวนแข็ง ที่จัดว่าดีกว่าก๊าซ เพราะว่ามี ความหนาแน่นสูงกว่าก๊าซ จึงมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าก๊าซ ที่จัดว่าดีกว่าฉนวนแข็ง เพราะว่าฉนวนเหลวจะแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างได้ง่ายกว่า และยิ่งกว่านั้นฉนวนเหลวยังสามารถกลับคืนสู่สภาพการเป็นฉนวนเองได้ (self-healing) หลังจากเบรกดาวน์ผ่านพ้นไปแล้ว

ฉนวนเหลวที่ดีจะต้องระบายความร้อนได้ดี, ทนต่อปฏิกิริยาทางเคมี, มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้สูง, มีแพคเกจพลังงานสูญเสียเปล่าในไดอิเล็กตริกต่ำ, ทนต่อความร้อนได้สูงหรือติดไฟได้ยาก, ไม่เกิดก๊าซพิษเมื่อติดไฟ และมีความสามารถในการแทรกซึมแทนที่ช่องว่างของการทำฉนวนได้

อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่นำฉนวนเหลวมาใช้ ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง, หม้อแปลงวัดแรงดัน, หม้อแปลงวัดกระแส, เซอร์คิตเบรกเกอร์, รีเลย์, เคเบิลแรงสูง, ไดโอดและคาปาซิเตอร์ เป็นต้น โดยฉนวนเหลวทำหน้าที่ดังต่อไปนี้ [1,2,3]

- เป็นฉนวนทางไฟฟ้ากันระหว่างส่วนที่มีแรงดันไฟฟ้ากับส่วนที่เป็นกราวด์ในหม้อแปลงไฟฟ้า
- เป็นตัวระบายความร้อนด้วยการพาในหม้อแปลงไฟฟ้าและด้วยการไหลวนในเคเบิลแรงสูง
- เป็นฉนวนแทรกซึมในกระดาษหรือวัสดุอื่นๆในหม้อแปลงไฟฟ้า, เคเบิลแรงสูง, คาปาซิเตอร์
- เป็นตัวดับอาร์กในเซอร์คิตเบรกเกอร์ชนิดฉนวนน้ำมัน
- สร้างค่าความจุไฟฟ้าให้สูงสำหรับคาปาซิเตอร์กำลัง

ของเหลวหลายชนิดที่ได้จากแหล่งธรรมชาติและการสังเคราะห์สามารถนำมาใช้เป็นฉนวนเหลวได้ เช่น น้ำมันแร่ (โดยเฉพาะน้ำมันหม้อแปลง), ไนโตรเจนเหลว, อาร์กอนเหลว, น้ำมันซิลิโคน, น้ำมันพืช เป็นต้น น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนเหลวที่สำคัญและนิยมใช้กันมากเมื่อเปรียบเทียบกับฉนวนเหลวชนิดอื่น มีคุณสมบัติของการเป็นฉนวนทางไฟฟ้าและตัวระบายความร้อนที่ดี โดยยังมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับฉนวนเหลวชนิดอื่น ลักษณะสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงใหม่โดยทั่วไปกำหนดไว้ในมาตรฐาน IEC296-1969 [4] ทั้งด้านฟิสิกส์, เคมี และไฟฟ้า ในการนำมาใช้งานเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดและปลอดภัย วิศวกรผู้ออกแบบจำเป็นต้องเข้าใจ

กลไกการนำไฟฟ้า , การเกิดดิซชาร์จบางส่วนและลักษณะสมบัติด้านความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงเป็นอย่างดี ในระบบไฟฟ้ากำลังอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต้องมีการประสานสัมพันธ์ฉนวน ข้อมูลสำคัญที่ใช้สำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนก็คือ คุณลักษณะแรง-ดันเวลา

ตามมาตรฐานการป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลังอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต้องมีการประสานสัมพันธ์ฉนวน ข้อมูลสำคัญที่ใช้สำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนก็คือ คุณลักษณะแรงดัน-เวลา

การศึกษาวิจัยนี้จึงทำการทดลองหาคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของน้ำมันหม้อแปลงโดยควบคุมพารามิเตอร์และสภาวะในการทดลอง ให้สอดคล้องกับการศึกษาวิจัยในอดีต[1,3]

1.2 ที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น การผลิตและส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าเป็นเรื่องสำคัญ เนื่องด้วยการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยแรงดันสูงสามารถส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ปริมาณมากและความสูญเสียต่ำจึงเป็นที่นิยมอย่างกว้างขวาง โดยที่ปัญหาในการใช้งานแรงดันสูงก็คือการฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั่นเอง ในระบบไฟฟ้ากำลังอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต้องมีการประสานสัมพันธ์ฉนวน ข้อมูลสำคัญที่ใช้สำหรับการประสานสัมพันธ์ฉนวนก็คือ คุณลักษณะแรงดัน-เวลา

ปัจจุบันฉนวนเหลวได้ถูกนำมาใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าและตัวระบายความร้อนในอุปกรณ์ไฟฟ้า แรงสูง โดยเฉพาะน้ำมันหม้อแปลงซึ่งจัดเป็นฉนวนเหลวที่นิยมใช้งานอย่างแพร่หลาย แต่ฐานข้อมูลเกี่ยวกับการประสานสัมพันธ์ฉนวนก็คือ คุณลักษณะแรงดัน-เวลามีน้อยมาก จึงสมควรจะศึกษาในเรื่องนี้เพื่อเป็นฐานข้อมูลเพื่อการออกแบบการประสานสัมพันธ์ฉนวน ได้

การศึกษาวิจัยคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของน้ำมันหม้อแปลง ซึ่งจัดเป็นฉนวนเหลวเชิงการค้ำมีพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า เช่น รูปร่างของอิเล็กโตรด, ระยะแก๊ป, ขนาดอนุภาคเจือปน, องค์ประกอบทางเคมี, อัตราการไหล, ปริมาณความชื้น, ปริมาณก๊าซและอนุหภูมิ เป็นต้น [5-9] ในการศึกษาคุณลักษณะแรง-ดันเวลาของน้ำมันหม้อแปลง ครั้งนี้จะเน้นที่ผลกระทบของพารามิเตอร์ซึ่งพบมากในการใช้งานทางปฏิบัติคือ

1) การกระจายสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากการออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงถึงแม้จะพยายามให้มีการกระจายสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ แต่ในทางปฏิบัติมักมีการกระจายสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ เช่น ส่วนแหลมคมภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง, ผิวของอิเล็กโตรดที่ขรุขระไม่เรียบ, รอยต่อระหว่างอิเล็กโตรด เป็นต้น จึงศึกษาเปรียบเทียบการกระจายตัวสนามไฟฟ้าที่ค่าความไม่สม่ำเสมอต่างๆ ว่าจะมีผลอย่างไรต่อคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของน้ำมันหม้อแปลง

2) อุณหภูมิขณะใช้งาน ในสภาพการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในประเทศไทย ภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง โดยมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามขนาดของโหลด

(Load), กำลังสูญเสียภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง และสภาพอากาศภายนอก ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง เช่น ความสามารถในการละลายของก๊าซและความชื้น, ความสามารถในการเป็นพาหะนำไฟฟ้าในน้ำมันหม้อแปลง เป็นต้น จึงศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลงที่มีต่อคุณลักษณะแรง-ดันเวลาของน้ำมันหม้อแปลง ในช่วงอุณหภูมิ 30-80°C

เพื่อข้อมูลที่ถูกต้องการศึกษาวิจัยจะทำการทดลองภายในระบบปิด และทำการควบคุมพารามิเตอร์อื่นๆ ให้ใกล้เคียงกันตลอดการทดลอง โดยการควบคุมขนาดอนุภาคเจือปนและปริมาณความชื้น และทดสอบน้ำมันหม้อแปลงทั้งก่อนและหลังการทดลองให้คุณสมบัติใกล้เคียงกันตลอดการทดลอง

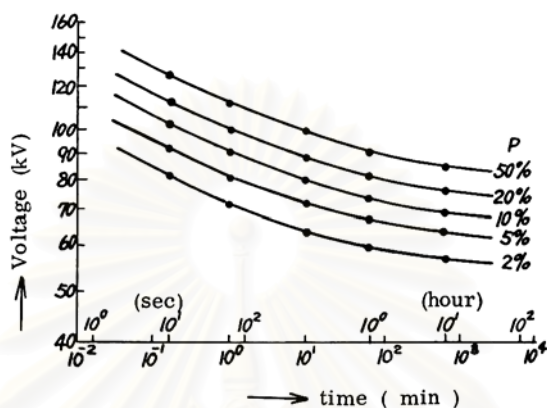
1.3 ผลการศึกษาวิจัยในอดีต

การศึกษาวิจัยในอดีตทางด้านความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง ส่วนใหญ่จะศึกษาภายใต้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า จึงใช้เป็นแนวทางการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

Holle(1967)[3]ได้ศึกษาผลกระทบของความชื้นและอุณหภูมิที่มีต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า ทดลองตามมาตรฐาน VDE-0370 ที่อุณหภูมิ 20 -100 °C และความชื้น 5-200 ppm ผลการศึกษาพบว่า ที่ความชื้นต่ำกว่า 20 ppm แรงดันเบรกดาวนจ์เฉลี่ย (U_b) มีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ ความชื้นในช่วง 20-100 ppm แรงดันเบรกดาวนจ์เฉลี่ย เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในช่วง 20-80 °C และจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 80 °C และที่ความชื้น 200 ppm แรงดันเบรกดาวนจ์เฉลี่ยจะมีแนวโน้มคงที่อีกครั้งแต่มีค่าต่ำมาก

Hauschild(1969)[3]ได้ศึกษาความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยโดยป้อนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่ววอก(1.2/50 μs) ทำการทดสอบในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (slightly nonuniform field) โดยใช้อิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ อิเล็กโตรดแบบทรงกลมมีรัศมีขนาด 50 mm และมีระยะแกป 0-50 mm โดยมีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าสูงสุด ($FF=E_{max}/E_{avg}$) ที่ทรงกลมรัศมีขนาด 50 mm และระยะแกป 50 mm มีค่าเท่ากับ 1.75 โดยผลการทดลองที่ได้พบว่าเมื่อระยะแกปสูงขึ้นค่าแรงดันเบรกดาวนจ์ก็เพิ่มสูงขึ้น และที่แกป 0-5 mm. ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดเบรกดาวนจ์(E_b)มีแนวโน้มลดลงตามแกปที่กว้างขึ้น และเมื่อแกปกว้างกว่า 5 mm E_b มีแนวโน้มคงที่เท่ากับ 700 kV/cm

M. Ikeda และ S. Menju (1978)[5] ได้ศึกษาความน่าจะเป็นของการเกิดเบรกดาวนและคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของน้ำมันหม้อแปลง ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอโดยใช้อิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ ระยะแฉก 10 mm. โดยป้อนแรงดันกระแสสลับ ผลการทดลองได้ลักษณะเส้นแรงดัน-เวลาดังรูปที่ 1



รูปที่ 1.1 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของน้ำมันหม้อแปลง

มนตรี รัชารักษ์ (1999) [1] ได้ศึกษาผลของการกระจายสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิที่มีต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง ทั้งแรงดันกระแสสลับและอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐาน ($1.2/50 \mu s$) ผลการทดลองพบว่าแรงดันเบรกดาวนอิมพัลส์มีลักษณะแปรตามอุณหภูมิและความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า โดยในสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยแรงดันเบรกดาวนมีการเพิ่มขึ้นประมาณ 10-20% ตามการเพิ่มของอุณหภูมิน้ำมัน

M.A. Abdallah (1999) [6] ได้ทำการศึกษาวิจัยถึงความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (highly non-uniform field) เมื่อทดสอบด้วยแรงดันกระแสตรง , แรงดันกระแสสลับ , แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ($1.2/50 \mu s$) และแรงดันสวิตชิ่งอิมพัลส์ ($200/2500 \mu s$) โดยใช้อิเล็กโตรดแบบรีดแกป-ระนาบ ซึ่งรีดแกปทำจากนิกเกิล มีรัศมี $25 \mu m$ และระนาบทำจาก Ni-Cr มีรัศมี 10 mm ทำการปรับระยะแฉกในช่วง $400-1000 \mu m$ พบว่าแรงดันเบรกดาวนเพิ่มขึ้นตามระยะแฉกที่เพิ่มขึ้น

N. Hirai, A.O. Akumu, K. Aarii (1999)[7] ได้ศึกษาค่าเวลาล่าช้าของการเบรกดาวนในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอโดยใช้อิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ทรงกลม ทดลองทั้งในน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์และมีอนุภาคเจือปนโดยป้อนแรงดันอิมพัลส์ ($1.2/50 \mu s$) ผลการทดลองพบว่าเวลาล่าช้ามีค่าลดลงตามการเพิ่มของการป้อนแรงดันอิมพัลส์ อีกทั้งเวลาล่าช้าในน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์จะมากกว่าในน้ำมันที่มีอนุภาคเจือปน

1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาและทดลองหาคคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของน้ำมันหม้อแปลงภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ เมื่อป้อนแรงดันรูปคลื่นฟ้าผ่ามาตรฐาน($1.2/50 \mu s$) หาคความสัมพันธ์ของขนาดอิเล็กโตรด, ระยะแกป, และอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณลักษณะแรงดัน-เวลา เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลในการเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมในการออกแบบการฉนวน ในระบบไฟฟ้าแรงสูงต่อไป

1.5 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นลักษณะเชิงทดลองเพื่อหาคคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของน้ำมันหม้อแปลง เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน($1.2/50 \mu s$) ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ โดยใช้อิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ ระยะแกป 3-10 mm. ที่อุณหภูมิในช่วง $30-80^{\circ}C$ ศึกษาผลของแพกเตอรืที่มีผลต่อคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของฉนวนน้ำมันหม้อแปลง นำผลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์และสรุปผล

1.6 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาทฤษฎีและข้อมูลการทดลองในอดีตรวบรวมข้อมูลของหม้อแปลง
2. ทำการทดลองและเก็บรวบรวม
3. นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาหาคคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของน้ำมันหม้อแปลง
4. วิเคราะห์ผลการทดลอง
5. สรุปและเขียนวิทยานิพนธ์

1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ความรู้เกี่ยวกับลักษณะเส้นเขตอิมพัลส์หรือคุณลักษณะแรงดัน-เวลาจะมีประโยชน์ในการออกแบบเกี่ยวกับการฉนวนอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าแรงสูง
2. ใช้เป็นฐานข้อมูลในการออกแบบการฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่นำน้ำมันหม้อแปลงไปเป็นฉนวนและตัวระบายความร้อน

บทที่ 2

ฉนวนเหลว

บทนี้กล่าวถึง ชนิดของฉนวนเหลว , คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง , พารามิเตอร์ที่มีผลต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าและอธิบายกลไกการเบรกดาวนในฉนวนเหลวบริสุทธิ์และฉนวนเหลวเชิงการค้าทำให้มีความเข้าใจฉนวนเหลวที่นำมาใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้ดี

ของเหลวใดๆสามารถนำมาใช้เป็นฉนวนได้เสมอ ถ้าหากว่าของเหลวนั้นมีค่าความต้านทานสูงมากพอและไม่เปลี่ยนแปลงสภาพทางฟิสิกส์ , เคมี และไฟฟ้าในช่วงเวลาที่นานพอสมควร โดยฉนวนเหลวมีคุณสมบัติหลายอย่างที่เป็นประโยชน์ในการเป็นฉนวนมากกว่าฉนวนแข็งและฉนวนก๊าซ เพราะฉนวนเหลวคล้ายกับฉนวนแข็งที่มีความหนาแน่นมากกว่าฉนวนก๊าซประมาณ 1,000 เท่า ทำให้ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่า และฉนวนเหลวยังคล้ายกับฉนวนก๊าซโดยสามารถเข้าไปแทนที่ในช่องว่างในการทำฉนวนได้ดีแต่คุณสมบัติด้านการถ่ายเทความร้อนของฉนวนเหลวมีความสามารถมากกว่าฉนวนก๊าซ (อากาศ , ไนโตรเจน) ประมาณ 10 เท่าเมื่อใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้า ถึงแม้ฉนวนเหลวบริสุทธิ์จะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงมากถึง 10 MV/cm แต่ในฉนวนเหลวเชิงการค้าที่ใช้งานในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจริงมีค่าประมาณ 100 kV/cm เท่านั้น

ฉนวนเหลวนำมาใช้เป็นฉนวนซึมซาบในเคเบิลแรงสูงและคาปาซิเตอร์ และยังเป็นฉนวนกันด้านแรงดันสูงกับกราวด์ในหม้อแปลงไฟฟ้า , เซอร์กิตเบรกเกอร์ ฯลฯ นอกจากนี้ยังเป็นตัวระบายความร้อนในหม้อแปลงไฟฟ้า และดับอาร์กในเซอร์กิตเบรกเกอร์อีกด้วย ฉนวนเหลวโดยทั่วไปมีส่วนผสมของสารไฮโดรคาร์บอนและมีส่วนเจือปนด้วย ฉนวนเหลวที่ดีที่นำมาใช้งานในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต้องปราศจากสารเจือปนต่างๆให้ได้มากที่สุด ซึ่งขึ้นกับกระบวนการกลั่นและแยกสิ่งเจือปนออกจากฉนวนเหลวรวมทั้งการบำรุงรักษาภายหลังการใช้งานด้วย โดยพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ามากเช่น ความชื้น ซึ่งความชื้นแค่ 0.01% ในน้ำมันหม้อแปลงสามารถลดความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ประมาณ 20% [10]

2.1 ชนิดของฉนวนเหลว

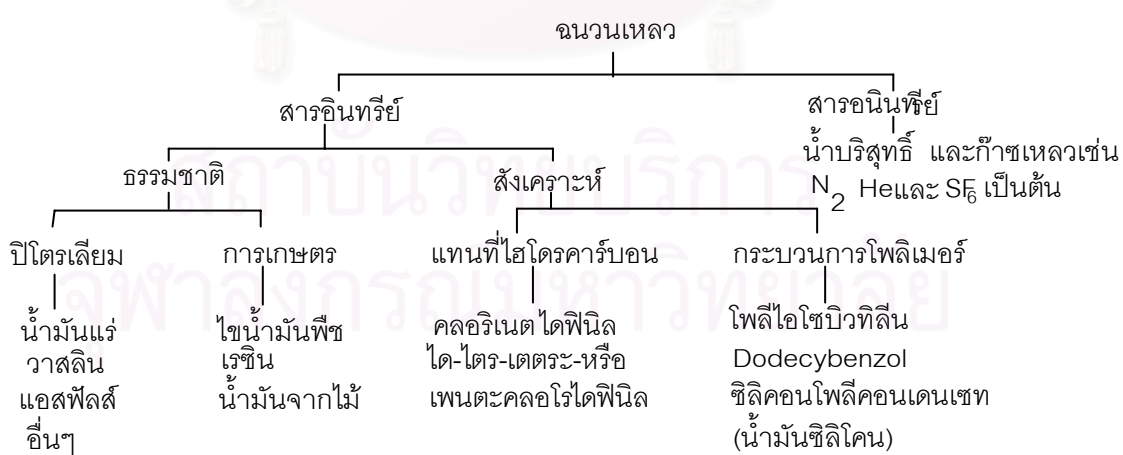
ปัจจุบันได้มีการผลิตฉนวนเหลวหลายชนิดทั้งที่ได้จากกระบวนการกลั่นปิโตรเลียมและการสังเคราะห์ทางเคมี กระบวนการดังกล่าวทำให้โครงสร้างทางเคมีของฉนวนเหลวที่ได้มีความแตกต่างกัน สามารถแบ่งเป็นประเภทใหญ่ๆได้ 2 ประเภทคือ สารอินทรีย์กับสารอนินทรีย์ สารอินทรีย์มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน ตัวอย่างฉนวนเหลวประเภทสารอินทรีย์ที่ได้

จากธรรมชาติ เช่น น้ำมันปิโตรเลียม , น้ำมันแร่ (mineral oils)หรือน้ำมันหม้อแปลง , แอสฟัลต์ , น้ำมันพืช , ไขมันและเรซินธรรมชาติ เป็นต้น [3]

ฉนวนเหลวประเภทสารอินทรีย์นอกจากจะได้จากธรรมชาติแล้วยังผลิตได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี เช่น จากกระบวนการแทนที่โมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในสถานะของเหลวและก๊าซ เช่น คลอรีเนตไดฟีนิล (chlorinated diphenyls) หรือเรียกว่าแอสเคอร์เรล (askerels) ปัจจุบันเลิกใช้เนื่องจากเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและเกิดสารที่เป็นพิษ และจากกระบวนการทำให้เกิดโครงสร้างโพลิเมอร์ เช่น โพลีไอโซบิวทิลีน (polyisobutylene) มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและความร้อนที่ดีกว่าน้ำมันหม้อแปลง จึงมีการนำไปใช้ในเคเบิลแรงสูงและคาปาซิเตอร์ และซิลิโคนโพลีคอนเดนเซทหรือน้ำมันซิลิโคนซึ่งมีเสถียรภาพสูงและติดไฟที่อุณหภูมิสูงกว่าน้ำมันหม้อแปลงแต่ราคาแพงกว่ามาก จึงนำน้ำมันซิลิโคนมาเป็นฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้งานภายในอาคารซึ่งกำหนดคุณสมบัติด้านความปลอดภัยไว้ (การติดไฟ) หรือ นำมาแทนน้ำมันหม้อแปลงเพราะในน้ำมันหม้อแปลงบางชนิดจะมีสาร PCB (polychlorinated biphenyls) ซึ่งเป็นพิษต่อสุขภาพ ทั้งนี้การใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงภายนอกอาคารส่วนใหญ่ยังคงใช้น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนมากกว่า 80%

ส่วนฉนวนเหลวประเภทสารอนินทรีย์ เช่น น้ำบริสุทธิ์ , ไนโตรเจนเหลว , อาร์กอนเหลว และ ออกซิเจนเหลว เป็นต้น น้ำบริสุทธิ์มีราคาถูกและผลิตได้ง่ายนำมาใช้เป็นไดอิเล็กตริกได้นำมาใช้ในอิมพัลส์คาปาซิเตอร์แรงสูง, พัลส์มอดดูเลชั่น เป็นต้น ส่วนก๊าซเหลวนิยมใช้ในด้านโครโอจีนิค [3]

จากรายละเอียดข้างต้น สามารถสรุปประเภทฉนวนเหลวดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ชนิดของฉนวนเหลว [3]

2.2 น้ำมันหม้อแปลง

น้ำมันหม้อแปลงเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมที่ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนหลายชนิด สามารถจำแนกตามโครงสร้างโมเลกุลได้ 3 ประเภทคือ พาราฟินิก (parafinic) , แนฟทีนิก (naphthenic) และ อโรมาติก (aromatic) โดยพาราฟินิกและแนฟทีนิกเป็นประเภทที่มีเสถียรภาพเนื่องจากเป็นไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว ส่วนอโรมาติกไม่มีเสถียรภาพเนื่องจากเป็นไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว แต่ละประเภทยังประกอบไปด้วยโมเลกุลที่มีขนาดและความซับซ้อนของโครงสร้างต่างกัน ไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กและมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนจะอยู่สถานะก๊าซที่อุณหภูมิห้อง ส่วนไฮโดรคาร์บอนที่มีมวลโมเลกุลสูงมากและมีโครงสร้างสลับซับซ้อนระเหยยากและมีความหนืดสูงจะมีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง เช่น ชีฟิ่งพาราฟิน (parafin wax) , แอสฟัลท์ (asphaltic bitumen) เป็นต้น [11]

โดยทั่วไปในน้ำมันดิบจะมีองค์ประกอบอื่นที่ไม่ใช่สารประกอบไฮโดรคาร์บอนอยู่ด้วยต้องกำจัดออกในกระบวนการกลั่นและในการใช้งานจริงจะพยายามให้อัตราส่วนของอโรมาติกน้อยที่สุดเพราะเป็นสาเหตุสำคัญของการเสถียรภาพทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง โดยส่วนใหญ่นิยมให้อัตราส่วนแนฟทีนิกมากเพราะจะไม่เกิดซีฟิ่ง ซึ่งซีฟิ่งมีผลทำให้น้ำมันหม้อแปลงมีความหนืดสูงขึ้นที่อุณหภูมิต่ำทำให้มีปัญหาด้านการระบายความร้อน ส่วนพาราฟินิกจะมีส่วนประกอบของซีฟิ่งจำนวนมาก [12] ทั้งนี้โครงสร้างโมเลกุลสามารถแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลและสัดส่วนขององค์ประกอบพื้นฐานของน้ำมันหม้อแปลง [1]

พาราฟินิก	แนฟทีนิก	อโรมาติก
<p>แบบลูกโซ่</p> $\text{--CH}_2\text{--CH}_2\text{--CH}_2\text{--CH}_2\text{--CH}_2\text{--}$ <p>หรือ</p> <p>แบบกิ่ง</p> $\begin{array}{c} \text{CH}_2 \\ \\ \text{--CH}_2\text{--CH--CH}_2\text{--CH--CH}_2\text{--} \\ \\ \text{CH--} \\ \\ \text{CH}_2 \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{CH}_2 \quad \text{CH}_2 \\ \quad \quad \\ \text{CH}_2 \quad \text{C}_6\text{H}_4 \quad \text{CH}_2 \\ \quad \quad \\ \text{CH}_2 \quad \text{CH}_2 \end{array}$ <p>หรือ</p> $\begin{array}{c} \text{CH}_2 \quad \text{CH}_2 \\ \quad \quad \\ \text{CH}_2 \quad \text{C}_5\text{H}_8 \quad \text{CH}_2 \\ \\ \text{CH}_2 \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{CH} \quad \text{CH} \\ \quad \quad \\ \text{CH} \quad \text{C}_6\text{H}_4 \quad \text{CH} \\ \quad \quad \\ \text{CH} \quad \text{CH} \end{array}$ <p>หรือ</p> $\begin{array}{c} \text{CH} \quad \text{CH} \quad \text{C} \quad \text{CH} \quad \text{CH} \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad \\ \text{CH} \quad \text{C}_6\text{H}_4 \quad \text{C} \quad \text{C}_6\text{H}_4 \quad \text{CH} \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad \\ \text{CH} \quad \text{CH} \quad \text{C} \quad \text{CH} \quad \text{CH} \end{array}$
40-60%	30-50%	5-20%

นอกจากองค์ประกอบดังกล่าวแล้ว ในน้ำมันหม้อแปลงยังมีการใส่สารเติมแต่ง (additive) เพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง โดยเฉพาะสารยับยั้งการเกิดออกซิเดชัน (oxidation inhibitor) ช่วยให้น้ำมันหม้อแปลงเกิดออกซิเดชันยากขึ้นจึงมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น

ลักษณะสมบัติที่ต้องการของน้ำมันหม้อแปลงสำหรับการฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจะกำหนดด้วยคุณสมบัติทางฟิสิกส์, เคมีและไฟฟ้า ซึ่งต้องทำให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์การใช้งาน คุณสมบัติดังกล่าวแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์, เคมีและไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง [12]

คุณสมบัติทางฟิสิกส์	คุณสมบัติทางเคมี	คุณสมบัติทางไฟฟ้า
การระบายความร้อน - ความหนาแน่น - ความหนืด - สัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อน (coefficient of thermal expansion) - ความนำไฟฟ้าความร้อน (thermal conductivity) - ความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat)	องค์ประกอบทางเคมี - โครงสร้างโมเลกุล - อัตราส่วนปริมาณของพาราฟินิก, แนฟทีนิก และอโรมาติก - ค่าความเป็นกลาง - แรงตึงผิว (interfacial tension)	- ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า - ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก - ค่าเปอร์มิติวิตีสัมพัทธ์ - ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า - ความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ - การดิสชาร์จบางส่วนและแรงดันเริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วน
การเก็บรักษาและปฏิบัติงาน - จุดติดไฟ - จุดวาบไฟ - ความดันไอ - อุณหภูมิติดไฟทันที (auto ignition temperature)		

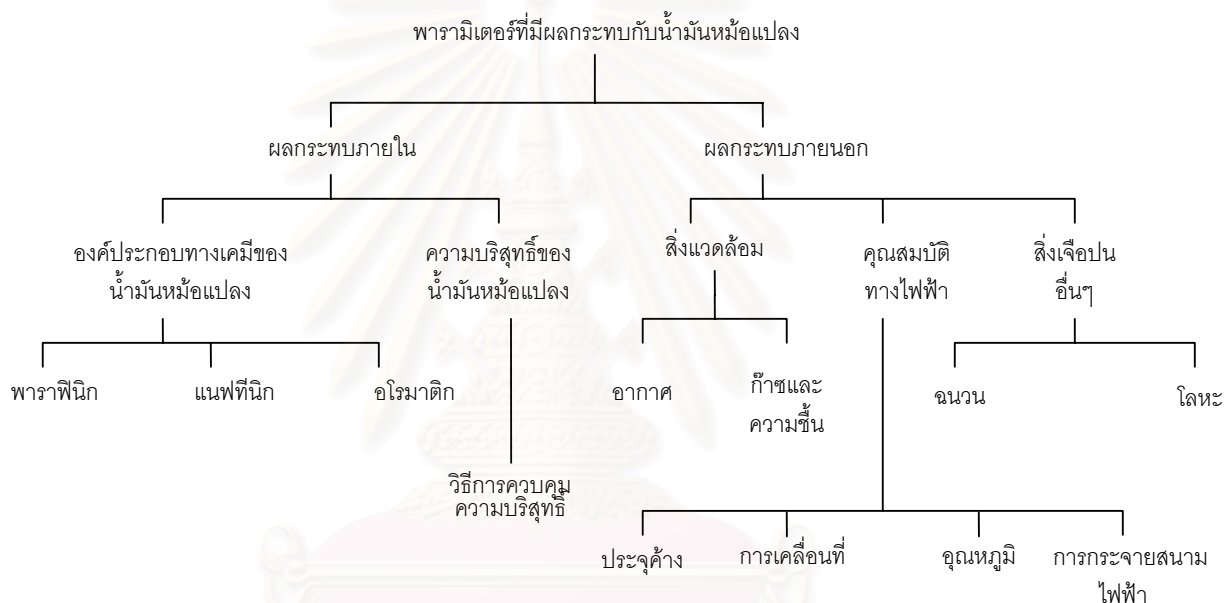
ในการศึกษาความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงภายใต้สนามไฟฟ้าไม่เอกพันธ์ด้วยการบ่อนแรงดันอิมพัลส์ทั้งชั่วคราวและชั่วคราวครั้งนี้จะใช้น้ำมันหม้อแปลงที่ใช้งานจริงในทางปฏิบัติ จึงเลือกใช้น้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ในการฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าของบริษัทเจริญชัยหม้อแปลงจำกัด ซึ่งคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ได้ตามมาตรฐานต่างๆดังแสดงในตารางที่

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ในการทดลอง

คุณสมบัติ	ตามมาตรฐาน ต่างๆ	ปริมาณที่ กำหนด	ปริมาณที่วัด ได้
ลักษณะที่มองเห็น	IEC 296:1969	---	ดี
สี (ASTM Color)	ASTM D 1500	≤ 0.5	L 0.5
ความหนาแน่น ที่ 20 °C kg/dm ³	ASTM D 1298	≤ 0.895	0.8682
จุดติดไฟ °C	ASTM D 92	≥ 140	148
จุดเยือกแข็ง °C	ASTM D 97	≤ -30	-30.0
ความหนืด ที่ 40°C mm ² /s	ASTM D 445	≤ 16.5	7.960
ความหนืด ที่ -15°C mm ² /s	ASTM D 445	≤ 800	104.7
ความตึงพื้นผิว ที่ 25°C N/m	ASTM D 971	$\geq 40 \times 10^{-3}$	48.7×10^{-3}
ค่าความเป็นกลาง mgKOH/g	ASTM D 974	≤ 0.03	< 0.01
ค่ากำมะถันกัดกร่อน (Corrosive Sulpher)	ASTM D 1275	ไม่กัดกร่อน	ไม่กัดกร่อน
ความชื้น ppm (mg/kg)	ASTM D 1533	≤ 40	9
ความมีเสถียรภาพต่อการเกิด ออกซิเดชัน (Oxidation Stability) - เลนน้ำมัน (sludge) % - ค่าความเป็นกลาง mgKOH/g	ASTM D 2440	≤ 0.10 ≤ 0.40	0.04 0.09
ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า -ไม่ผ่านการกำจัดอนุภาคเจือปน และปริมาณความชื้น kV -หลังผ่านการกำจัดอนุภาคเจือปน และปริมาณความชื้น kV	IEC 156:1969	$\geq 30kV$ $\geq 50kV$	72 75
ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก ที่ 90°C	IEC 247:1969	≤ 0.005	0.00008
ค่าความต้านทาน ที่ 50°C ohm-cm	ASTM D 1169	$\geq 1 \times 10^{14}$	3×10^{15}

2.3 พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

น้ำมันหม้อแปลงถูกนำไปใช้เป็นฉนวนและตัวระบายความร้อนภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยน้ำมันหม้อแปลงต้องมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ , เคมีและไฟฟ้าที่เหมาะสมกับการใช้งาน โดยคุณสมบัติที่สำคัญของน้ำมันหม้อแปลงที่พิจารณาคือ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าและการระบายความร้อน โดยมีพารามิเตอร์หลายชนิดที่มีผลกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า ได้แก่ ชนิดและรูปร่างอิเล็กโทรด , ระยะเวลา , อัตราการไหลของฉนวนเหลว , ความดัน , อุณหภูมิ อีกทั้งสิ่งเจือปนที่ปะปนอยู่เช่นฟองก๊าซ , อนุภาคเจือปนของแข็งและความชื้น เป็นต้น ส่วนคุณสมบัติด้านการระบายความร้อนมีพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบได้แก่ ความหนาแน่น , ความหนืดและอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งสามารถอธิบายพารามิเตอร์ต่างๆได้ดังนี้



รูปที่ 2.2 พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบกับน้ำมันหม้อแปลง

2.3.1 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหม้อแปลง

องค์ประกอบทางเคมีมีผลต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าอย่างยิ่ง โดยโครงสร้างโมเลกุลขององค์ประกอบทางเคมีมีผลต่อการเคลื่อนที่ของสตริมเมอร์ซึ่งนำไปสู่การเกิดเบรกดาวนี้ได้ เช่น ปริมาณของโครงสร้างอโรมาติกซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนแบบไม่อิ่มตัวในน้ำมันหม้อแปลงมีผลต่อความสามารถในการละลายของก๊าซและความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า นอกจากนั้นการเกิดออกซิเดชันก็มีผลทำให้โครงสร้างทางเคมีของน้ำมันหม้อแปลงเปลี่ยนแปลงไปและกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าด้วย แม้แต่การใส่สารเติมแต่งเพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงยังส่งผลถึงคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง [13]

2.3.2 ความชื้น

ความชื้นสามารถแทรกตัวอยู่ในฉนวนเหลวได้ 3 ลักษณะคือ [11]

- 1) dissolved water คือโมเลกุลของน้ำที่แทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของฉนวนเหลว
- 2) condensed water คือโมเลกุลของน้ำที่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนอยู่ในฉนวนเหลว
- 3) bound water คือโมเลกุลของน้ำที่ยึดเหนี่ยวอยู่กับโมเลกุลของฉนวนเหลว

ความชื้นมักจะละลายในฉนวนเหลวโดยอยู่ในรูปของ dissolved water จนถึงสถานะอิ่มตัว ซึ่งเป็นสถานะที่มีปริมาณความชื้นมากที่สุดที่สามารถอยู่ในรูปของ dissolved water ได้ และมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง ปริมาณความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงที่เกินจากสถานะอิ่มตัวจะอยู่ในรูปของ condensed water ส่วน bound water เกิดจากการกลั่นที่ไม่ดีพอ หรือการเกิดปฏิกิริยาเมื่อน้ำมันหม้อแปลงมีการเสื่อมสภาพ ในน้ำมันหม้อแปลงสามารถคำนวณหาความสามารถในการละลายได้สูงสุดของความชื้นได้จากความสัมพันธ์กับอุณหภูมิดังสมการที่ 2.1 [8]

$$\log W = 7.0895 - \frac{1567}{T} \quad (2.1)$$

โดยที่

W = ความสามารถในการละลายได้สูงสุดของความชื้น (ppm)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (°K)

จากสมการที่ 2.1 สามารถคำนวณหาความสามารถในการละลายได้สูงสุดของความชื้นในอุณหภูมิ 30°C ได้เท่ากับ 82.77 ppm

ความชื้นที่เจือปนอยู่ในฉนวนเหลวจะทำให้ฉนวนเหลวมีอุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากการสูญเสียไดอิเล็กตริกที่เพิ่มขึ้น ทำให้ฉนวนเหลวเกิดการเสื่อมสภาพ ถ้าเป็นหยดน้ำที่อยู่ในน้ำมันหม้อแปลง หยดน้ำจะยึดออกตามแนวสนามไฟฟ้าทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น เมื่อถึงค่าวิกฤติจะเกิดเบรกดาวน โดยแนวการเบรกดาวนจะเริ่มที่ปลายของหยดน้ำไปสู่อิเล็กโตรด นอกจากนี้ยังมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแยกน้ำออกเป็นก๊าซไฮโดรเจนกับก๊าซออกซิเจนที่อยู่ในรูปของฟองก๊าซทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนและอาจทำให้เกิดเบรกดาวนตามมา

วิธีการป้องกันความชื้นไม่ให้เจือปนในฉนวนเหลวที่ดีที่สุดคือไม่ให้ฉนวนเหลวสัมผัสกับอากาศภายนอกด้วยการบรรจุในภาชนะที่ปิดมิดชิดแต่ต้องมีวิธีแก้ปัญหาการขยายตัวของฉนวนเหลวเมื่อได้รับความร้อนหรือให้สัมผัสกับอากาศโดยผ่านสารดูดความชื้น (silica gel) ก็สามารถลดปริมาณความชื้นจากภายนอกได้

2.3.3 ก๊าซ [11]

ภายในน้ำมันหม้อแปลงอาจมีก๊าซปะปนอยู่ แต่ก๊าซจะถูกขจัดออกไปจากน้ำมันหม้อแปลงก่อนการเติมลงในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง แต่เนื่องจากสภาพใช้งานจริง เช่น การสัมผัสกับอากาศของกระดาดและน้ำมันหม้อแปลงจะมีการเสื่อมสภาพขึ้น(aging) หรือมีการลัดวงจรภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ทำให้มีก๊าซเจือปนในน้ำมันหม้อแปลงได้อีก ฟองก๊าซที่เข้าไปอยู่ในเนื่อน้ำมันหม้อแปลง อาจทำให้เกิดการปล่อยประจุบางส่วนที่เป็นสาเหตุของการทำให้ฉนวนเสื่อมคุณภาพ และเกิดการเบรกดาวนินที่สุด

ก๊าซสามารถละลายอยู่ในฉนวนเหลวได้ โดยความสามารถในการละลายเป็นไปตามกฎของเฮนรี่(Henry's law) ที่กล่าวว่า ความสามารถในการละลาย (saturation solubility, K_a) ของก๊าซใดๆ ที่อยู่เหนือฉนวนเหลวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความดันบางส่วนของก๊าซนั้น ดังสมการที่ 2.2

$$P_a = A_a K_a \quad (2.2)$$

โดยที่ A_a =ค่าคงที่การละลายของก๊าซ a ($\mu atm. / (\mu l / l)$)

P_a =ความดันบางส่วนของก๊าซ a (atm)

K_a =ความสามารถในการละลาย(% Vol)

ในสภาวะสมดุลการละลาย ผลรวมของความดันบางส่วนของก๊าซที่ละลายอยู่ในน้ำมันทั้งหมด ($P_a + P_b + P_c + \dots$) จะเท่ากับผลรวมของความดันบางส่วนของก๊าซเหนือน้ำมัน ตารางที่ 2.4 และ 2.5 แสดงถึงค่าคงที่การละลาย (A) และความสามารถในการละลาย (K) ของก๊าซแต่ละชนิดที่ละลายในน้ำมันหม้อแปลง ณ อุณหภูมิ 0-100°C ความดันบางส่วนของก๊าซเท่ากับ 760 mmHg และพบว่าก๊าซจะละลายได้มากขึ้นหรือน้อยลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของก๊าซแต่ละชนิด

ตารางที่ 2.4 ค่าคงที่การละลายของก๊าซ (A) ตามกฎของเฮนรี่ ($\mu atm. / (\mu l / l)$) ที่ความดันก๊าซเหนือน้ำมันหม้อแปลง 760 mmHg

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

ตารางที่ 2.5 ความสามารถในการละลายของก๊าซ(K,%Vol)ที่ความดันก๊าซเหนือน้ำมันหม้อแปลง 760 mmHg

อุณหภูมิ(°C)	0	20	40	60	80	100
อากาศ	-	10.1	10.3	10.5	10.8	10.9
N ₂ ,ไนโตรเจน	7.7	8.6	8.8	9.0	9.7	9.7
O ₂ ,ออกซิเจน	15.6	16.1	16.4	16.7	16.9	17.2
H ₂ ,ไฮโดรเจน	4.1	4.9	5.7	6.5	7.2	-
CO,คาร์บอนมอนอกไซด์	11.2	12.0	12.7	13.2	13.7	-
CO ₂ ,คาร์บอนไดออกไซด์	138.8	112.3	93.5	81.3	66.7	-

2.3.4 ประจุค้าง

ประจุค้างเกิดจากการดิสชาร์จบางส่วนในบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงหรือเกิดหลังจากมีการเบรกดาวนขึ้น ประจุค้างมีผลทำให้ลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป โดยจะมีผลกระทบจากแรงดันที่มีขั้วทางไฟฟ้า (เช่น แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง , แรงดันเกินอิมพัลส์) มากกว่าแรงดันที่ไม่มีขั้วทางไฟฟ้า [14] (เช่น แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ) นอกจากนี้ประจุค้างยังเกิดจากปรากฏการณ์ streaming electrification ที่น้ำมันหม้อแปลงเคลื่อนที่และเสียดสีกับฉนวนแข็ง เช่น กระดาษ , แผ่นไม้อัด เป็นต้น และทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างฉนวนแข็งกับน้ำมันหม้อแปลงเนื่องจากการสะสมประจุที่ผิวฉนวนแข็งกับน้ำมันหม้อแปลงที่มีประจุตรงข้ามกัน ความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นสูงเพียงพอที่จะทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนและดิสชาร์จตามผิวซึ่งนำไปสู่การเบรกดาวนได้

2.3.5 การเคลื่อนที่

การเคลื่อนที่ของน้ำมันหม้อแปลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ , การทำงานของปั๊มหรือพัดลมในการระบายความร้อนและจากปรากฏการณ์ EHD (electrohydrodynamic) ทำให้เกิดฟองก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง , เกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคเจือปนและเกิดประจุอิสระเนื่องจากการเสียดสีระหว่างฉนวนเหลวกับฉนวนแข็งที่เรียกว่า ปรากฏการณ์ streaming electrification [15] ซึ่งกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าด้วย

2.3.6 อุณหภูมิ

คุณสมบัติของพาราไมเตอร์หลายตัวที่มีผลกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เช่น ความหนืด , ความตึงผิวและความหนาแน่น ทำให้กระบวนการเกิดฟองก๊าซและลักษณะการเคลื่อนที่ของน้ำมันหม้อแปลงเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิด้วย เช่นเดียวกับปริมาณความชื้นที่สภาวะอิ่มตัวซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิและมีผลกระทบโดยตรงต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า การทดลองลักษณะความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันที่ได้ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมินั้น โดยทั่วไปจะมีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วง 20-100 ppm เนื่องจากต้องพิจารณาถึงเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สถานะอยู่ตัวของความชื้นกับน้ำมันหม้อแปลงด้วย ในการศึกษาเราจึงควบคุมปริมาณความชื้นให้ใกล้เคียงกันในการทดลองแต่ละครั้ง และการทดลองผลกระทบของอุณหภูมิจะรอให้อุณหภูมินิ่งก่อนจะเริ่มทำการทดลอง

2.3.7 ชนิดของรูปคลื่นแรงดัน [16]

แรงดันเบรกดาว์นของฉนวนเหลวขึ้นอยู่กับชนิดของรูปคลื่นแรงดันที่ป้อน , วิธีการป้อน และช่วงเวลากการป้อน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าที่คงมีอยู่ ซึ่งในการออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดต่างๆภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเป็นเรื่องสำคัญมาก วิธีการตรวจสอบคุณภาพการฉนวนที่ดีที่สุดคือการทดสอบจริง โดยความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าคงตัว (แรงดันกระแสตรงและแรงดันกระแสสลับ) ของฉนวนเหลวจะมีค่าต่ำกว่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์

2.3.8 อนุภาคเจือปนของแข็ง

อนุภาคของแข็งอาจเจือปนในน้ำมันหม้อแปลงในรูปของไฟเบอร์หรือฝุ่นละอองซึ่งเกิดมาจากกระบวนการผลิตในทางอุตสาหกรรมหรือจากภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เช่น ไฟเบอร์ที่เป็นเยื่อของกระดาษฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้า , เศษทองแดงหรือเศษเหล็กซิลิคอนที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจากกระบวนการผลิต , อนุภาคคาร์บอนที่เกิดจากการทำงานของตัวเปลี่ยนจุดแยก (tap changer) หรือการดีสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้าหรือการดับอาร์กในเซอร์กิตเบรกเกอร์ เป็นต้น ซึ่งอนุภาคเจือปนของแข็งในน้ำมันหม้อแปลงนี้นำไปสู่กลไกการเกิดเบรกดาว์นได้ ดังแสดงในหัวข้อ 2.4.2.1

2.4 กลไกการเกิดเบรกดาวนในฉนวนเหลว

ถ้าพิจารณาจากโครงสร้างและองค์ประกอบของฉนวนเหลวอาจแยกออกได้เป็น 2 ประเภทคือ ฉนวนเหลวบริสุทธิ์กับฉนวนเหลวเชิงการค้ำ ฉนวนเหลวบริสุทธิ์หมายถึงฉนวนเหลวที่มีองค์ประกอบทางเคมีง่าย ๆ ปราศจากสิ่งเจือปนหรือมีแต่น้อยกว่าค่าที่ยอมให้มี ตัวอย่างฉนวนเหลวที่มีโครงสร้างทางเคมีง่าย ๆ เช่น เฮกซะเซน (n-hexane) , เฮปเตน (n-heptane) และ พาราฟินไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ [16] ส่วนฉนวนเหลวเชิงการค้ำหมายถึงฉนวนเหลวที่มีองค์ประกอบทางเคมีไม่บริสุทธิ์ มีโครงสร้างหรือส่วนผสมของโมเลกุลยุ่งยากซับซ้อนและมีสิ่งเจือปนผสมอยู่ด้วย เนื่องจากกระบวนการผลิตไม่สามารถทำให้บริสุทธิ์ได้ร้อยเปอร์เซ็นต์หรือถ้าทำได้ก็มีราคาแพงมาก ซึ่งฉนวนเหลวที่ใช้งานจริงในทางปฏิบัติส่วนใหญ่มักเป็นฉนวนเหลวเชิงการค้ำ จากหัวข้อ 2.3 เนื่องจากมีพารามิเตอร์หลายตัวที่มีผลกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลว จึงไม่สามารถอธิบายกลไกการเกิดเบรกดาวนและคำนวณค่าแรงดันเบรกดาวนได้อย่างถูกต้องโดยใช้ทฤษฎีเพียงทฤษฎีเดียวดังเช่นกรณีการเกิดเบรกดาวนในฉนวนก๊าซ [1] โดยทั่วไปกลไกการเกิดเบรกดาวนในฉนวนเหลวสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทคือ กลไกการเกิดเบรกดาวนของฉนวนเหลวบริสุทธิ์และกลไกการเกิดเบรกดาวนของฉนวนเหลวเชิงการค้ำ สามารถอธิบายได้ดังนี้

2.4.1 กลไกการเกิดเบรกดาวนของฉนวนเหลวบริสุทธิ์

กลไกการเกิดเบรกดาวนของฉนวนเหลวบริสุทธิ์มีหลักการแบบเดียวกับกรณีของฉนวนก๊าซคือเกิดจากอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ซึ่งเกิดจากการชนกันของอนุภาคและของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้าโดยอิเล็กตรอนเริ่มแรกมาจากแคโทดตามกลไกของสนามไฟฟ้า (field emission) หรือโดยความร้อน (thermionic emission) ซึ่งอธิบายอย่างละเอียดได้ดังนี้ [11]

จากการศึกษาการนำไฟฟ้าในฉนวนเหลว เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าสูง พบว่าการไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดเกิดจากการปล่อยอิเล็กตรอนจากแคโทดโดยสนามไฟฟ้า (field emission) และการปล่อยอิเล็กตรอนจากแคโทดด้วยความร้อน (field enhanced thermionic emission) สามารถคำนวณขนาดกระแสได้ด้วยสมการชอตต์กี (Schottky) และเป็นที่น่าสังเกตว่าขนาดกระแสขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิ

การศึกษาการเบรกดาวนในฉนวนเหลว โดยทำการทดลองแปรค่าอุณหภูมิในช่วงกว้าง พบว่าแรงดันเบรกดาวนมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย แตกต่างจากการนำไฟฟ้า จึงมีความเป็นไปได้ว่ากระบวนการแคโทดเกิดจากการปล่อยอิเล็กตรอนจากแคโทดโดยสนามไฟฟ้ามากกว่าที่จะเป็นการปล่อยอิเล็กตรอนจากแคโทดด้วยความร้อน การเกิดเบรกดาวนจึงน่าจะเกิดจากการที่ไอออนบวกและประจุบวกของอนุภาคเจือปนเคลื่อนที่มาสู่แคโทด ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในบริเวณใกล้ผิวแคโทดเพิ่มสูงขึ้นเพียงพอที่อิเล็กตรอนสามารถหลุดออกจาก

ผิวแคโทดได้ อิเล็กตรอนอิสระที่หลุดออกมาเหล่านี้จะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรด ทำให้เกิดการเคลื่อนที่โดยมีทิศทางไปสู่ขั้วแอโนด ระหว่างทางจะชนกับโมเลกุลของฉนวนเหลวทำให้พลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้าสูญเสียไปกับการชน ในกระบวนการนี้จะมีอิเล็กตรอนบางตัวที่สูญเสียพลังงานไปกับการชนต่ำกว่าพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้า ถ้าอิเล็กตรอนเหล่านี้ถูกเร่งจนมีพลังงานสูงพอที่จะชนกับโมเลกุลแล้วทำให้เกิดการแตกตัวเป็น ไอออนและก่ออวาลานซ์ได้ จนมีโอกาสทำให้เกิดเบรกดาวน [17]

สภาวะที่อิเล็กตรอนสามารถก่ออวาลานซ์เป็นไปตามความสัมพันธ์ที่ว่าพลังงานของอิเล็กตรอนที่ได้รับในระยะเวลาอิสระ (mean free path) จะต้องมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานไอออไนเซชันของโมเลกุลฉนวนเหลว

$$eE\lambda \geq chv$$

โดยที่

E = สนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรด

λ = ระยะอิสระของอิเล็กตรอน

$h\nu$ = ควอนตัมของพลังงานที่สูญเสียในการไอออไนซ์โมเลกุล

c = ค่าคงตัว (arbitrary constant)

2.4.2 กลไกการเกิดเบรกดาวนของฉนวนเหลวเชิงการค้ำ

โดยทั่วไปฉนวนเหลวเชิงการค้ำที่นำมาใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงไม่สามารถที่จะทำให้มีความบริสุทธิ์สูงได้เหมือนฉนวนเหลวบริสุทธิ์ กลไกการเกิดเบรกดาวนจึงขึ้นอยู่กับสิ่งเจือปนที่ปะปนอยู่ในฉนวนเหลว ตัวอย่างเช่น ความชื้น, เศษโลหะ, ปริมาณก๊าซ และไฟเบอร์ เป็นต้น สามารถจำแนกกลไกการเกิดเบรกดาวนของฉนวนเหลวเชิงการค้ำได้ดังนี้

2.4.2.1. กลไกการเกิดเบรกดาวนเนื่องจากอนุภาคเจือปนของแข็ง (suspended particles)

2.4.2.2. กลไกการเกิดเบรกดาวนเนื่องจากฟองก๊าซ

2.4.2.3 กลไกการเกิดเบรกดาวนจากหยดของเหลวเจือปน

2.4.2.4 กลไกการเกิดเบรกดาวนจากปรากฏการณ์ EHD (electro hydrodynamic)

2.4.2.1 กลไกการเกิดเบรกดาวนเนื่องจากอนุภาคเจือปนของแข็ง [17]

สิ่งเจือปนของแข็งที่ปะปนอยู่ในฉนวนเหลว อาจเป็นอนุภาคตัวนำ, ไฟเบอร์หรือฝุ่นละออง เมื่อมีสนามไฟฟ้าอนุภาคเจือปนเหล่านี้จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วภายใต้สนามไฟฟ้าทำให้เกิดแรงกระทำต่ออนุภาค ถ้าอนุภาคเจือปนของแข็งเป็นทรงกลมขนาดรัศมี r และมีค่าเพอมีตริวิตี ϵ_2 ปะปนอยู่ในฉนวนเหลวที่มีค่าเพอมีตริวิตี ϵ_1 ขนาดของแรงมีค่าตามสมการที่ 2.3

$$F_e = r^3 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1} E \nabla E \quad (2.3)$$

โดยที่

r = รัศมีของอนุภาคเจ็อบน

ε_1 = เพอมีตติวิตี้นวนเหลว

ε_2 = เพอมีตติวิตี้นของอนุภาค

E = ความเครียดสนามไฟฟ้าเมื่อละเลยผลของอนุภาคเจ็อบน

ถ้า $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$ โดยทั่วไปจะเป็นเช่นนี้ แรงจะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่า ผลนี้จะเห็นชัดเจนมากในสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอมากขึ้น ส่วนกรณีของ $\varepsilon_2 < \varepsilon_1$ แรงจะกระทำในทิศตรงข้ามคือเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำ และแรงที่กระทำบนอนุภาคจะเพิ่มเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า ε_2 ดังนั้นกรณีที่อนุภาคมีค่า $\varepsilon_2 \gg \varepsilon_1$ แรงสามารถเขียนแทนด้วยสมการที่ 2.4 โดยผลของแรงที่เกิดขึ้นจะทำให้อนุภาคเจ็อบนของแข็งเรียงตัวกันเป็นลูกโซ่เชื่อมโยงระหว่างอิเล็กโตรดทำให้เกิดเบรกดาวนได้

$$F_e = F_\infty = r^3 E \nabla E \quad (2.4)$$

ในกรณีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ เช่น อิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ หรือ ทรงกลม-ทรงกลมที่แก่แคบค่า ∇E จะเท่ากับศูนย์ ทำให้แรงกระทำต่ออนุภาคเจ็อบนเป็นศูนย์ด้วย อย่างไรก็ตามถ้า $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$ จะทำให้ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้าสูงขึ้นที่บริเวณผิวของอนุภาคเหล่านั้น และทำให้เกิดการเคลื่อนที่และเรียงตัวของอนุภาค เกิดเป็นสายโซ่เรียงตามแนวของสนามไฟฟ้า ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนเหลวที่ปลายโซ่อนุภาคทั้งสองข้างจะเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุนำมาสู่การเกิดเบรกดาวน ดังนั้นความหนาแน่นของอนุภาคเจ็อบนจึงมีผลต่อการเกิดเบรกดาวน

2.4.2.2 กลไกการเกิดเบรกดาวนเนื่องจากฟองก๊าซ

โดยทั่วไปก๊าซสามารถละลายในฉนวนเหลวได้ในปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสภาวะความดันและอุณหภูมิขณะนั้น เนื่องจากก๊าซที่ละลายได้จะมีปริมาณไม่เกินสภาวะอิ่มตัวดังที่ได้อธิบายในหัวข้อ 2.3.3 ฟองก๊าซจึงไม่เกิดจากการละลายของก๊าซ ซึ่งเกิดจากสาเหตุต่อไปนี้ [10]

- 1) ฉนวนมีคุณภาพต่ำหรือเสื่อมคุณภาพ
- 2) ก๊าซจับอยู่ที่ผิวอิเล็กโตรดที่ขรุขระหรือร่องผิวอิเล็กโตรดเก็บฟองก๊าซไว้ขณะเติมฉนวน
- 3) การเปลี่ยนแปลงทางเคมีภายในฉนวนเหลวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ, ความดัน และการชนของไอออนและอิเล็กตรอนทำให้ฉนวนเหลวสลายตัวให้ก๊าซ
- 4) การกลายเป็นไอของฉนวนเหลวจากผลของดิซชาร์จบางส่วนบริเวณผิวอิเล็กโตรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง

ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากสาเหตุที่กล่าวมา เมื่อมีฟองก๊าซเกิดขึ้นก็จะขยายตัวยึดตามแนวสนามไฟฟ้าเพื่อลดพลังงานศักย์ในสนามไฟฟ้า สมมติว่าปริมาตรของฟองก๊าซคงตัวในขณะที่ยึด

ออก การเบรกดาวนจ์จะเกิดเมื่อแรงดันตกคร่อมความยาวของฟองก๊าซมีค่าเท่ากับค่าต่ำสุดของเส้นโค้งพาสเชน (Paschen's curve) ของฟองก๊าซนั้น[16] ถ้ามีฟองก๊าซรูปร่างเป็นทรงกลมสามารถคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวฟองก๊าซได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.5

$$E_b = \frac{3E}{\epsilon_1 + 1} \quad (2.5)$$

โดยที่

E = ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนเหลว (kV/cm)

E_b = ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวฟองก๊าซ (kV/cm)

ϵ_1 = เพอมิตติวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเหลว

เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าของฟองก๊าซมีค่าเท่ากับความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของก๊าซนั้นจะเกิดดิสชาร์จผ่านฟองก๊าซเป็นผลให้เกิดการแยกตัวของโมเลกุลฉนวนเหลวนำไปสู่การเกิดเบรกดาวนจ์ได้

นอกจากสาเหตุที่กล่าวมาข้างต้น ฟองก๊าซยังสามารถเกิดที่บริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเช่น ปลายแหลมของอิเล็กโทรด เป็นต้น เนื่องจากบริเวณนั้นจะมีความร้อนสูง ทำให้อุณหภูมิกลายเป็นไอ ณ จุดนั้นจะเกิดดิสชาร์จผ่านฟองไอทำให้เกิดฟองก๊าซขึ้นและนำไปสู่การเกิดเบรกดาวนจ์ได้เช่นกัน

2.4.2.3 กลไกการเกิดเบรกดาวนจ์จากหยดของเหลวเจือปน [16]

ฉนวนเหลวที่มีหยดของเหลวต่างชนิดเจือปนอยู่ สามารถทำให้เกิดเบรกดาวนจ์ได้ เนื่องจากการเปลี่ยนรูปร่างของหยดของเหลวเจือปน โดยมีการยืดออกตามแนวของสนามไฟฟ้า ความยาวของการยืดออกแปรตามค่าเพอมิตติวิตี ยิ่งเพอมิตติวิตีมีค่าสูงกว่าของฉนวนเหลวมากเท่าใด หยดของเหลวที่เจือปนก็จะยืดออกมากเท่านั้น ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนเหลวที่ปลายทั้งสองของหยดของเหลวมีค่าสูงขึ้น ถ้าค่าสูงเกินค่าวิกฤตจะทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วน เกิดโพรงก๊าซและนำมาสู่การเกิดเบรกดาวนจ์ในที่สุด

2.4.2.4 กลไกการเกิดเบรกดาวนจ์เนื่องจากปรากฏการณ์ EHD

เมื่อป้อนแรงดันสูงให้ฉนวนเหลวที่มีความบริสุทธิ์สูง จะมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าประมาณ 100-300kV/cm ทำให้เกิดการปล่อยอิเล็กตรอนโดยสนามไฟฟ้า ประจุไฟฟ้าจะหลุดออกมาจากผิวอิเล็กโทรดและได้รับแรงกระทำจากสนามไฟฟ้าตามกฎของคูลอมบ์ ทำให้อนุภาคประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ในฉนวนเหลวอันเป็นสาเหตุของการนำไฟฟ้าแบบมีพาหะพา (Electroconvection) อนุภาคประจุไฟฟ้าในสนามไฟฟ้าเหล่านี้ยังทำให้เกิดกระแสไหลวนภายในฉนวนเหลว (eddy motion) ด้วยการไหลของอนุภาคนี้นี้ช่วยทำให้เนื้อฉนวนเองไหลวนด้วยทำให้เกิดความไม่เสถียรภาพของฉนวนเหลว (EHD instability) หมายถึงเนื้อฉนวนไหลวนและมีการ

พาประจุไหลวนไปด้วย ทำให้ฉนวนเหลวขาดเสถียรภาพและมีทิศทางไปยังอิเล็กโตรดตรงข้าม [11]

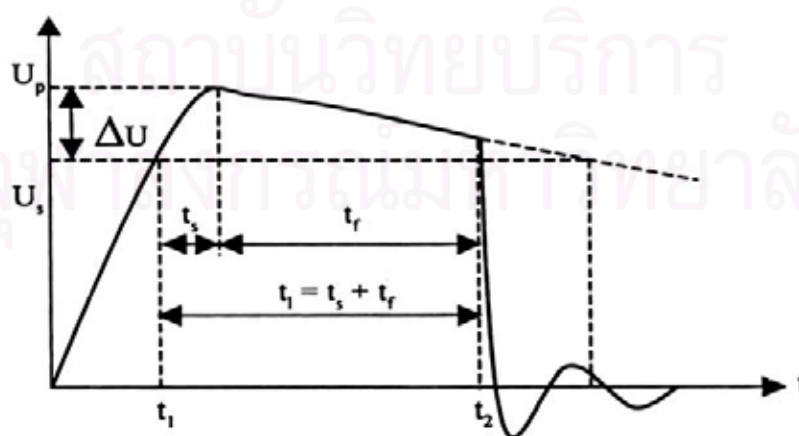
การเคลื่อนที่ของฉนวนเหลวแบบไหลวนทำให้เกิดฟองก๊าซตามทฤษฎีที่ได้มีการสันนิษฐานไว้ 2 ทฤษฎี ทฤษฎีแรกอธิบายว่าการเคลื่อนที่ของฉนวนเหลวที่มีประจุมีความรุนแรงเพียงพอที่จะทำให้ความดันบริเวณนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลง อีกทฤษฎีคือการที่ประจุฉีดออกจากอิเล็กโตรดอย่างรวดเร็วและรุนแรง (burst) ทำให้ฉนวนเหลวที่สัมผัสกับผิวอิเล็กโตรดได้รับประจุที่ฉีดออกมาและได้รับแรงกระทำจากสนามไฟฟ้าจึงเคลื่อนตัวออกจากผิวอิเล็กโตรดอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดฟองก๊าซขึ้นที่ผิวอิเล็กโตรด และนำไปสู่การเกิดเบรกดาวนได้ [18]

การเกิดปรากฏการณ์ EHD ไม่ได้เกิดขึ้นในทันทีที่มีแรงดันสูงแต่ต้องใช้เวลาในระดับมิลลิวินาที ดังนั้นการเบรกดาวนเนื่องจากปรากฏการณ์นี้จึงมีโอกาสเกิดได้เฉพาะการป้อนแรงดันกระแสตรง , กระแสสลับหรือแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ซึ่งที่มีช่วงเวลายาวพอเท่านั้น

2.5 การเกิดเบรกดาวนของแรงดันอิมพัลส์[16]

การเกิดเบรกดาวนของแรงดันอิมพัลส์ (Breakdown of impulse voltage) แรงดันจะคงอยู่ในช่วงระยะเวลาอันสั้น นั้นหมายถึงสนามไฟฟ้าจะคงมีอยู่ในช่วงเวลาอันสั้นด้วย เมื่อขนาดแรงดันอิมพัลส์ (U_p) เท่ากับแรงดันสถานะอยู่ตัว (Steady State Voltage ; U_s) ควรจะเกิดการเบรกดาวนได้ แต่ปรากฏว่ายังไม่เกิดการเบรกดาวน จะต้องรอเวลาอีกช่วงระยะเวลาหนึ่งการเบรกดาวนจึงจะเกิดขึ้นได้ ช่วงระยะเวลานับตั้งแต่ขนาดแรงดันอิมพัลส์เท่ากับแรงดันสถานะอยู่ตัวไปจนถึงเวลาเบรกดาวนเกิดขึ้นจริงของแรงดันอิมพัลส์ เรียกว่า เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน t_l (Time lag to breakdown) ดังรูปที่ 2.3

2.5.1 เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน[16]



รูปที่ 2.3 เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน

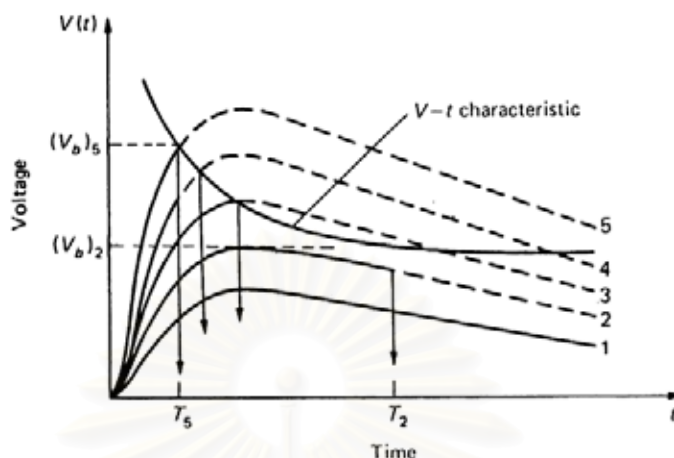
เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน์ ประกอบด้วยเวลาล่าช้าสถิติ (Statistic Time Lag, t_s) และเวลาล่าช้าก่อตัว (Formative Time Lag, t_f) $t_t = t_s + t_f$ ดังในรูปที่ 2.3 เวลาล่าช้าสถิติคือ เวลาช่วงหนึ่งที่จะมีอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งมีพลังงานเริ่มต้นมากพอที่จะทำให้เกิดอะวาลานซ์ได้ กระจายในปริมาตรแกป เวลาที่ใช้หาอิเล็กตรอนเริ่มต้นมีค่าอยู่ในช่วงไมโครวินาทีถึงมิลลิวินาที [19] โอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนระหว่างที่ป้อนแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งสนามไฟฟ้าจะคงตัวอยู่ใน ช่วงเวลานั้น ขึ้นกับธรรมชาติของแกปและปริมาตรแกปที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงพอ เวลาที่ใช้ สร้างอิเล็กตรอนเริ่มต้นนี้จึงเป็นค่าทางสถิติ ส่วนเวลาล่าช้าก่อตัวคือเวลาในการไอออไนเซชัน สร้างอิเล็กตรอน อะวาลานซ์และนำไปสู่การเบรกดาวน์ตามเงื่อนไขของทฤษฎีสตรีมเมอร์มีค่าอยู่ใน ช่วงไมโครวินาทีถึงนาโนวินาที

ถ้าเพิ่มระดับแรงดันที่ป้อนให้อิเล็กโตรดทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย โอกาส ที่อิเล็กตรอนจะสามารถทำหน้าที่เป็นอิเล็กตรอนเริ่มต้นเพื่อเกิดอะวาลานซ์ต่อไปก็จะมีมากขึ้น เวลาล่าช้าทางสถิติจึงลดลง เช่นเดียวกันเวลาล่าช้าก่อตัวจะมีค่าลดลงเพราะสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ทำให้อิเล็กตรอนมีความเร็วมากขึ้น อิเล็กตรอนอิสระมีพลังงานเพียงพอที่จะก่อให้เกิดอะวาลานซ์ และสตรีมเมอร์เร็วขึ้น ขนาดของแรงดันและช่วงเวลาคงอยู่ของแรงดันอิมพัลส์มีผลอย่างมากต่อ เวลาล่าช้า เมื่อเพิ่มขนาดของแรงดันขึ้นเวลาล่าช้าจะลดลง จึงสามารถแสดงความคงทนของฉนวน เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ที่มีรูปคลื่นเหมือนเดิมแต่เปลี่ยนแค่ขนาดค่ายอดแรงดันได้ด้วยเส้น คุณลักษณะแรงดัน-เวลา (Voltage-Time Characteristics)

2.5.2 เส้นคุณลักษณะแรงดัน-เวลา[16]

จากผลของช่วงเวลาคงอยู่ของแรงดันมีผลอย่างมากต่อแรงดันเบรกดาวน์ของแกป การ สร้างอิเล็กตรอนอิสระเพื่อก่ออะวาลานซ์ให้ได้ค่าวิกฤตต้องใช้เวลา ถ้าช่วงเวลาแรงดันอยู่ตัวน้อย จำเป็นต้องใช้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้นเพื่อให้สตรีมเมอร์เกิดขึ้นได้ตามเงื่อนไขในเวลา อันรวดเร็ว นั่นคือค่าแรงดันเบรกดาวน์จะสูงขึ้นถ้าหากช่วงเวลาคงตัวของแรงดันสั้นลง หรือกล่าว อีกนัยหนึ่งคือความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนจะดีขึ้นถ้าใช้กับแรงดันที่มีช่วงเวลาด้านลง ใน กรณีแรงดันอิมพัลส์ความคงทนของไดอิเล็กตริกอาจแสดงได้ด้วยลักษณะเส้นเขตอิมพัลส์หรือ คุณลักษณะแรงดัน-เวลา (Voltage-Time Characteristics) ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์กับเวลาเบรกดาวน์หรือเวลาคลื่นตัด(chopped time) ที่ได้จากการป้อน แรงดันอิมพัลส์ที่มีความชันต่างๆกัน แล้ววัดค่าแรงดันเบรกดาวน์และเวลาเบรกดาวน์นำมาเขียน กราฟลักษณะแรงดัน-เวลา กรณีที่เกิดการเบรกดาวน์ที่หน้าคลื่นค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์คือ แรงดัน ณ เวลาที่เกิดเบรกดาวน์ เช่นจุดที่ (V_{B5} , T_5) แต่ถ้าเบรกดาวน์ที่หลังคลื่นค่าแรงดันอิมพัลส์

เบรกดาวนืคือค่ายอดแรงดันอิมพัลส์กับเวลาเบรกดาวนื (V_{B2} , T_2) เมื่อนำค่ามาเขียนกราฟแสดง ความสัมพันธ์ก็จะได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 คุณลักษณะแรงดัน-เวลา

การทดลองในวิทยานิพนธ์นี้สร้างคุณลักษณะแรงดัน-เวลาโดยใช้วิธีระดับแรงดันคงที่ (Constant Level Voltage) [17,20,21] โดยป้อนแรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่น ตามที่ต้องการ ณ ค่ายอดคงที่ค่าหนึ่งเข้าอิเล็คโตรด เมื่อเกิดเบรกดาวนืก็บันทึกค่ายอดแรงดันเบรก ดาวนืและเวลาเบรกดาวนืจนได้จำนวนข้อมูลการเบรกดาวนืตามที่ต้องการ แล้วก็เปลี่ยนระดับค่า ยอดแรงดันอิมพัลส์ที่ป้อนแล้วบันทึกแรงดันเบรกดาวนืและเวลาเบรกดาวนืเหมือนเดิม จนได้ข้อมูล การเบรกดาวนืครบทุกระดับแรงดันแล้ว นำข้อมูลเวลาเบรกดาวนืในแต่ละระดับแรงดันไปหาการ กระจายทางสถิติและหาค่ากลางทางสถิติของข้อมูลเวลาเบรกดาวนื จากนั้นพล็อตกราฟระหว่าง ค่ายอดแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวนืเฉลี่ยกับค่ากลางของข้อมูลเวลาเบรกดาวนืในแต่ละระดับแรงดัน แล้วก็ลากเส้นเชื่อมจุดเหล่านี้เข้าด้วยกันก็จะได้เส้นคุณลักษณะแรงดัน-เวลา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

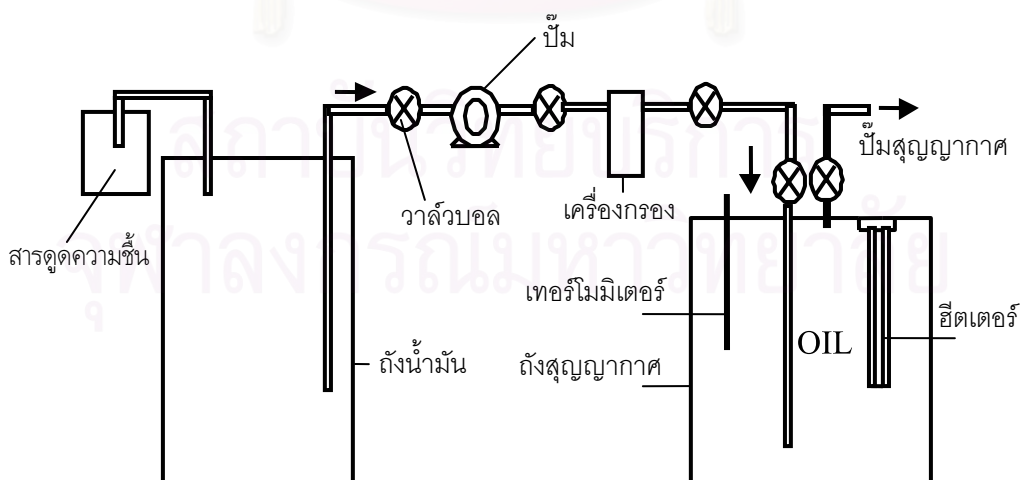
วิธีดำเนินการทดลอง

บทนี้จะกล่าวถึงวิธีควบคุมคุณภาพน้ำมันหม้อแปลง, อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง และวิธีการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดอนุภาคไดรอตทรงกลม, ระยะแคป, อุณหภูมิและชั่วแรงแดัน ที่มีต่อคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของน้ำมันหม้อแปลงภายใต้แรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้ามาตรฐาน ($1.2/50 \mu s$) ในสถานะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

3.1 การเตรียมการทดลอง

น้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ทำการทดลองเป็นชนิดน้ำมันแร่ มีชื่อทางการค้าว่า Sun-Ohm นำเข้าจากประเทศญี่ปุ่น มีคุณสมบัติตามมาตรฐานกำหนดดังแสดงในตารางที่ 2.3 โดยบรรจุในถังน้ำมันหม้อแปลงขนาด 200 ลิตร การนำน้ำมันหม้อแปลงเข้าออกจะมีการควบคุมปริมาณความชื้นที่อาจเข้าไปในถังน้ำมันหม้อแปลงโดยผ่านสารดูดความชื้น (silica gel) ที่บรรจุอยู่ใน Breather ก่อน เพื่อไม่ให้น้ำมันหม้อแปลงสัมผัสกับอากาศโดยตรงทำให้น้ำมันหม้อแปลงไม่เสียสภาพก่อนการทดลอง โดยในการทดลองต้องควบคุมคุณภาพน้ำมันหม้อแปลงให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน เพื่อสามารถนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกันได้ ดังนั้นก่อนการทดลองจึงทำการควบคุมคุณภาพน้ำมันหม้อแปลงให้มีขนาดอนุภาคเจือปนเล็กกว่า $1 \mu m$ และปริมาณความชื้นประมาณ 30 ppm โดยใช้เครื่องควบคุมขนาดอนุภาคเจือปนและปริมาณความชื้นดังแสดงในหัวข้อ 3.1.1

3.1.1 การควบคุมขนาดอนุภาคเจือปนและปริมาณความชื้น



รูปที่ 3.1 การควบคุมขนาดอนุภาคเจือปนและปริมาณความชื้น

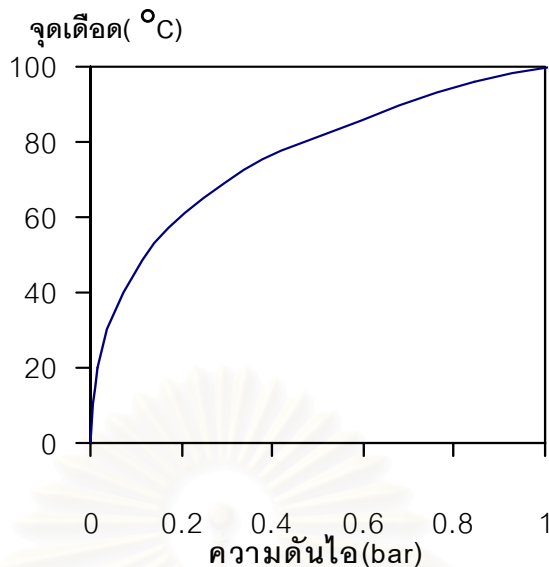
การควบคุมขนาดอนุภาคเจือปนและปริมาณความชื้น ดังแสดงในรูปที่ 3.1 มีหลักการทำงาน 2 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนที่1 ควบคุมอนุภาคเจือปน ด้วยการบีมน้ำมันหม้อแปลงที่บรรจุอยู่ในถังน้ำมันขนาด 200 ลิตร ผ่านเครื่องกรอง CUNO แบบคาร์ทริด ได้กรอง MICRO-KLEAN III เกรด Y ผลิตจากเส้นใยเซลลูโลสผสมกับเรซินเมลามีน (melamine) กรองอนุภาคเจือปนให้มีขนาดเล็กกว่า $1 \mu m$ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 แล้วส่งน้ำมันหม้อแปลงลงถึงสุญญากาศที่มีปริมาตร 20 ลิตร



รูปที่ 3.2 การควบคุมขนาดอนุภาคเจือปน

ขั้นตอนที่2 ควบคุมปริมาณความชื้นและปริมาณก๊าซ โดยให้ความร้อนจากฮีตเตอร์ที่ติดตั้งภายในถังสุญญากาศจนน้ำมันหม้อแปลงมีอุณหภูมิ $70-75^{\circ}C$ พร้อมกับลดความดันภายในถังให้ต่ำกว่า 0.3 bar สภาวะนี้ น้ำจะกลายเป็นไอตามความสัมพันธ์ระหว่างจุดเดือดของน้ำกับความดันไอดังแสดงในรูปที่ 3.3 และแยกตัวออกจากน้ำมันหม้อแปลง ในที่นี้ใช้เวลาประมาณ 0.5 ชั่วโมง ในการให้ความร้อนแก่น้ำมันจากอุณหภูมิห้องประมาณ $30^{\circ}C$ จนมีอุณหภูมิ $70-75^{\circ}C$ และควบคุมให้อุณหภูมิเท่ากับ $70-75^{\circ}C$ คงที่เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยการปรับแรงดันที่ป้อนเข้าฮีตเตอร์ให้เหมาะสม แล้วปล่อยให้ น้ำมันเย็นตัวลงก่อนบรรจุลงชุดทดลอง



รูปที่ 3.3 จุดเดือดของน้ำกับความดันไอ [10]

เนื่องจากการตรวจสอบปริมาณความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงหลังการควบคุมคุณภาพ น้ำมันหม้อแปลง ทางห้องวิจัยไม่มีเครื่องมือตรวจวัดจึงใช้วิธีเปรียบเทียบกับผลการทดลองในอดีต โดยใช้เครื่องทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 156-1963 ป้อนแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับในอัตราเท่ากับ 2 kV/s จนเกิดเบรกดาวน์จำนวน 5 ครั้ง พบว่าแรงดันเบรกดาวน์เฉลี่ย มีค่าในช่วง 56–60 kV เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองในอดีตที่ศึกษาผลกระทบของ ปริมาณความชื้นที่มีต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง ที่ทำการทดลองตาม มาตรฐาน VDE0370 ที่ปริมาณความชื้นประมาณ 30 ppm ได้ค่าแรงดันเบรกดาวน์เท่ากับ 56.9 kV [1] ซึ่งแตกต่างกับค่าแรงดันเบรกดาวน์จากการทดลองไม่เกิน 5% จึงสมมุติได้ว่าปริมาณ ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ทดลองนี้มีค่าประมาณ 30 ppm โดยทำการทดสอบทั้งก่อนและ หลังการทดลอง

3.1.2 อิเล็กโตรด

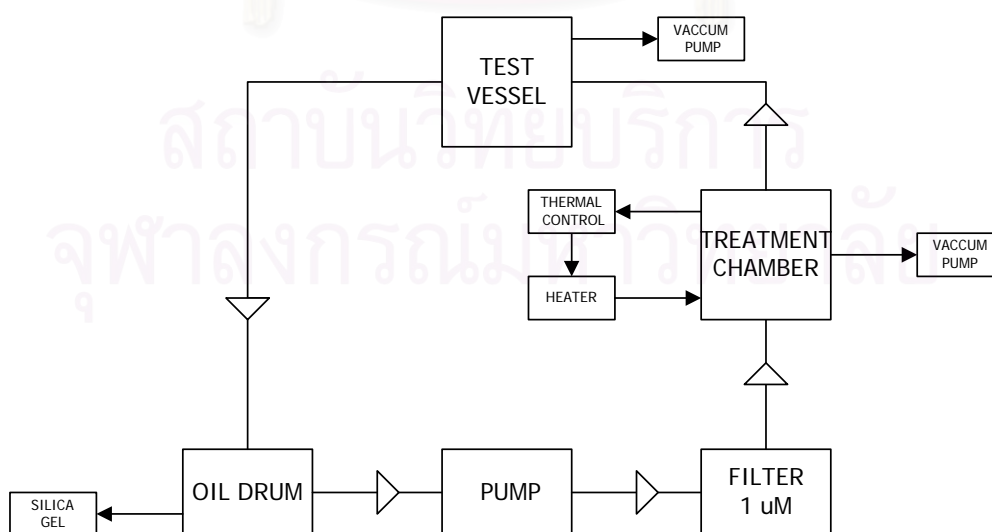
ในการทดลองใช้อิเล็กโตรดทรงกลมมีรัศมีขนาด 2.5, 5 และ 10 mm ภายหลังจากการทดลอง ผิวอิเล็กโตรดอาจขรุขระได้เนื่องจากการเกิดเบรกดาวน์ ซึ่งความเรียบของผิวอิเล็กโตรดมีผลอย่าง ยิ่งต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์ ผิวอิเล็กโตรดที่ขรุขระอาจทำให้แรงดันเบรกดาวน์ที่ได้เปลี่ยนแปลงไป เป็นปัจจัยให้ผลการทดลองที่ได้ไม่เป็นอิสระต่อกัน เพราะฉะนั้นก่อนการทดลองทุกครั้งต้องตรวจดู สภาพความเรียบของผิวอิเล็กโตรด โดยขัดผิวอิเล็กโตรดทั้งแบบทรงกลมและระนาบให้เรียบ ในที่นี้ ใช้กระดาษทราย MIKRON P2000 ขัดผิวอิเล็กโตรดให้เรียบ

3.1.3 การทำความสะอาดชุดทดลอง

ก่อนการถ่ายเทน้ำมันหม้อแปลงลงในชุดทดลองความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า จะต้องทำความสะอาดชุดทดลองให้สะอาดเสียก่อน โดยทำความสะอาดในส่วนของอิเล็กโตรดทรงกลม, อิเล็กโตรดระนาบ, ฟันผิวฝาปิดอะลูมิเนียม, ท่ออะคริลิกและสายนำแรงสูง เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนต่างๆที่อาจมีอยู่จากการทดลองครั้งก่อน ทั้งนี้ก่อนทำการทดลองครั้งแรกจะล้างทำความสะอาดทุกๆส่วน โดยใช้แปรงจุ่มผงซักฟอกที่ละลายในน้ำสะอาดขัดทำความสะอาดทุกส่วนอย่างละ 2 ครั้ง โดยในแต่ละรอบที่ล้างด้วยผงซักฟอกเสร็จจะล้างด้วยน้ำสะอาดอย่างละ 2 ครั้ง หลังจากล้างด้วยน้ำสะอาดเสร็จจะล้างด้วยน้ำร้อนอีก 2 ครั้ง แล้วตั้งทิ้งไว้ให้แห้ง หลังจากแห้งแล้วเช็ดทุกส่วนด้วยเมทิลแอลกอฮอล์ 2 ครั้ง จึงจัดเก็บไว้เพื่อการทดลองต่อไป โดยส่วนที่ต้องทำการเปลี่ยน เช่น อิเล็กโตรดทรงกลมและอิเล็กโตรดระนาบ หลังการทดลองเสร็จทุกครั้งต้องทำความสะอาดดังวิธีข้างต้นอีก ทั้งนี้ก่อนเริ่มการทดลองครั้งแรกจะถ่ายเทน้ำมันหม้อแปลงที่ผ่านการควบคุมคุณภาพแล้วเข้าออกที่ชุดทดลองความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าให้ทั่วทั้งหมดโดยทำซ้ำ 2 ครั้ง เพื่อการทำความสะอาดก่อนการทดลองครั้งแรก

3.1.4 การถ่ายเทน้ำมันหม้อแปลงลงชุดทดลอง

เมื่อได้ทำความสะอาดชุดทดลองดังหัวข้อ 3.1.3 แล้วจะทำการถ่ายเทน้ำมันหม้อแปลงจากถังควบคุมปริมาณความชื้นและปริมาณก๊าซลงชุดทดลองความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการความแตกต่างของความดันและใส่น้ำมันหม้อแปลงสูงประมาณ $1/2$ ของความสูงชุดทดลอง ทั้งนี้การทดลองทุกครั้งจะใช้ปริมาณน้ำมันหม้อแปลงเท่ากันประมาณ 7 ลิตร ซึ่งมีขั้นตอนการถ่ายเทน้ำมันหม้อแปลงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการถ่ายเทน้ำมันหม้อแปลง

3.1.5 การตั้งระยะแกป

ในการทดลองใช้ระยะแกป 3,5 และ 10 mm การปรับระยะแกปเริ่มจากการปรับหาตำแหน่งระยะแกปเท่ากับศูนย์ คืออิเล็กโตรดทรงกลมกับอิเล็กโตรดระนาบติดกันพอดีด้วยการหมุนเกลียวที่ปลายสายนำแรงสูงที่ติดตั้งอยู่กลางฝาปิดอะลูมิเนียมของท่ออะคริลิกและใช้มัลติมิเตอร์วัดความต้านทานระหว่างด้านแรงสูงกับด้านกราวด์ด้วยการตั้งมัลติมิเตอร์ในระบบส่งเสียง การตั้งตำแหน่งระยะแกปเท่ากับศูนย์จะใช้จิ้งหะที่ขันแหวนยึดสายนำแรงสูงให้แน่นกับฝาปิดอะลูมิเนียมแล้วมัลติมิเตอร์ส่งเสียงพอดี จากนั้นปรับระยะแกปตามที่ต้องการโดยใช้ตัวชี้แบบเข็ม (Dial Indicator) ยี่ห้อ มิตูโตโย มีความละเอียด 0.01 mm. ความแม่นยำ (Accuracy) 0.012 mm. ติดตั้งบนปลายแท่งตัวนำแรงสูง แล้วหมุนแท่งตัวนำแรงสูงผ่านเกลียวยึดที่ตัวปรับระยะแกปขึ้นตามระยะแกปที่ต้องการโดยสังเกตที่ตัวชี้แบบเข็ม เมื่อได้ระยะแกปที่ต้องการแล้วถอดตัวชี้แบบเข็มออก

3.1.6 การควบคุมอุณหภูมิ

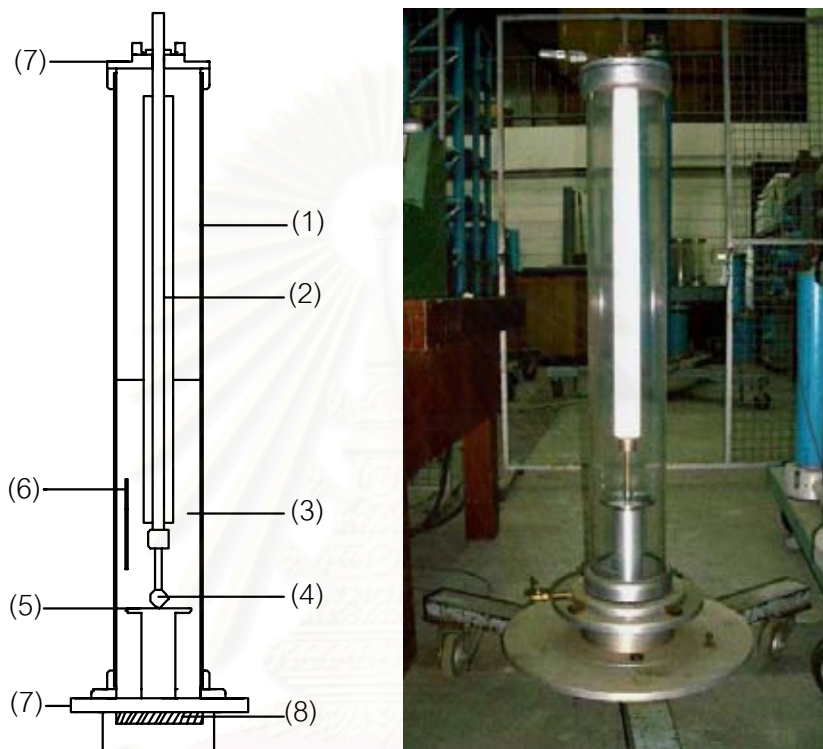
ในการทดลองผลกระทบของอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง 30 ถึง 80 °C โดยทดลองที่อุณหภูมิ 30 และ 55 °C (ที่อุณหภูมิ 80 °C พบว่าชุดทดลองเกิดการรั่วซึมอย่างรุนแรง เนื่องจากชุดทดลองไม่สามารถทนต่อความร้อนที่ป้อนให้น้ำมันจนถึงอุณหภูมิ 80 °C ได้) ควบคุมการให้ความร้อนแก่น้ำมันหม้อแปลงโดยใช้วารีเอกปรับขนาดแรงดันป้อนเข้าฮีตเตอร์ให้เหมาะสม เพื่อให้อุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลงในชุดทดลองค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีค่าใกล้เคียงกันในทุกจุดของชุดทดลอง เมื่อใกล้ถึงอุณหภูมิที่ต้องการทำการปรับลดขนาดแรงดันลงให้เหมาะสมอีกครั้งเพื่อรักษาอุณหภูมิให้ได้ค่าที่ต้องการ รอเวลาให้อุณหภูมิที่ต้องการเริ่มนิ่งก่อนจะเริ่มต้นทำการทดลอง ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิกำหนดให้อยู่ในช่วง $\pm 2^{\circ}\text{C}$ และต้องคอยสังเกตบ่อยๆ เพื่อความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุด

3.2 ชุดทดลอง

ชุดทดลองแสดงในรูปที่ 3.5 ได้ทำการออกแบบให้มีพิกัดแรงดันอิมพัลส์ประมาณ 400 kV มีส่วนประกอบคือ

- 1) ถังครอบทำจากท่ออะคริลิกใส
- 2) สายนำแรงสูง ตัวนำไฟฟ้าทำจากทองเหลืองหุ้มด้วยฉนวนเทฟลอน
- 3) น้ำมันหม้อแปลงที่ผ่านกระบวนการควบคุมอนุภาคเจือปนและปริมาณความชื้นแล้ว โดยใช้น้ำมันหม้อแปลงประมาณ 1/2 ของความสูงชุดทดลอง (Test Cell)
- 4) อิเล็กโตรดกราวด์แบบระนาบแผ่นวงกลม ทำจากสแตนเลสมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm.

- 5) อิเล็กโตรดแรงสูงแบบทรงกลม ทำจากเม็ดลูกปัด ทรงกลมมีรัศมีขนาด 2.5, 5 และ 10 mm. ความคลาดเคลื่อน ± 0.01 mm
- 6) เทอร์มิสเตอร์สำหรับวัดอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง
- 7) ฝาปิดถึงครอบทั้ง 2 ด้านทำจากอลูมิเนียม
- 8) ฮีตเตอร์วางอยู่ใต้ฝาอะลูมิเนียมของชุดทดลอง ทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่น้ำมันหม้อแปลง



รูปที่ 3.5 ชุดทดลอง(Test Cell)

ในชุดทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.5 สามารถใช้โปรแกรม Maxwell [22] คำนวณหาการกระจายสนามไฟฟ้าแบบสถิตย์ (Electrostatic field) ระหว่างอิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ ที่ทรงกลมรัศมีขนาด 2.5-10mm และระยะแก๊ป 3-10mm โดยกำหนดค่าเพอมีตริวิตีสัมพัทธ์ (ϵ_r) ของเทฟลอน , น้ำมันหม้อแปลง , อะคริลิกและตัวนำไฟฟ้าเท่ากับ 2.2 , 2.2 , 2.5 และ 1 ตามลำดับ จากนั้นคำนวณค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าตามสมการที่ 3.1

$$FF = \frac{E_{\max}}{E_{\text{avg}}} \quad (3.1)$$

โดยที่

FF = แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า

E_{avg} = ความเครียดสนามไฟฟ้าเฉลี่ย (kV/cm)

E_{max} = ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (kV/cm)

ได้ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 3.1 พบว่าค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ใช้ทำการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 1.21-4.02

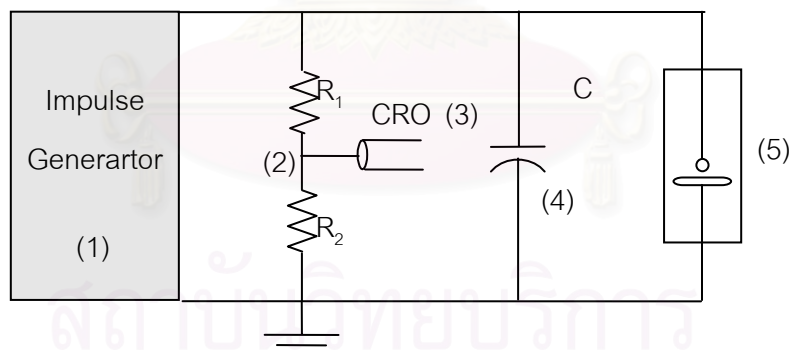
ตารางที่ 3.1 แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (FF) ที่ระยะแกปและอิเล็กโตรดทรงกลมขนาดต่างๆ

รัศมี (mm)	ค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ระยะแกป (mm)		
	3	5	10
2.5	1.90	2.53	4.02
5	1.43	-	-
10	1.21	-	-

3.3 วิธีการทดลองและรวบรวมข้อมูล

3.3.1 วงจรทดลอง

เนื่องจากขนาดแรงดันอิมพัลส์สูงสุดที่ทำการทดลองไม่เกิน 400 kV จึงใช้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 6 ชั้น พิกัดแรงดัน 400kV , 4 kJ มีวงจรทดลองแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐาน ซึ่งออกแบบ สร้างและประกอบโดยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงในรูปที่ 3.6 ประกอบด้วย



รูปที่ 3.6 วงจรทดลองแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน (1.2/50 μ s)

- 1) เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μ s พิกัด 400 kV 4 kJ
- 2) โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทานพิกัดแรงดัน 1000 kV อัตราส่วนแรงดัน 1055 : 1
- 3) ดิจิตอลออสซิลโลสโคป (CRO) สำหรับบันทึกรูปคลื่น ยี่ห้อ Lecroy รุ่น 9310AM ย่านความถี่ 400MHz, 100 Ms/s วัดแรงดันโดยผ่านอุปกรณ์ลดทอนขนาดสัญญาณ (Attenuate) ก่อนเข้าดิจิตอลออสซิลโลสโคป
- 4) โหลดตัวเก็บประจุขนาด 2 nF
- 5) ชุดทดลอง

3.3.2 การป้อนแรงดัน

ทำการตรวจสอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากวงจรโดยป้อนแรงดันที่ระดับต่ำที่ไม่เกิดเบรกดาวร์ วัดค่าเวลาน้ำคลื่น และหลังคลื่นจากออสซิลโลสโคปเพื่อเปรียบเทียบกับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μ s [23]

เมื่อได้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ต้องการแล้ว การทดลองหาแรงดันเบรกดาวร์และเวลาเบรกดาวร์ ซึ่งใช้เป็นข้อมูลในการสร้างเส้นคุณลักษณะแรงดัน-เวลาจะใช้วิธีระดับแรงดันคงที่ในมาตรฐาน IEC No. 60-1 [24] เลือกระดับค่ายอดแรงดันอิมพัลส์มา 5 ระดับแรงดัน โดยที่แต่ละระดับแรงดันจะป้อนแรงดันอิมพัลส์ให้เกิดเบรกดาวร์เป็นจำนวน 20 ครั้ง โดยรอเวลาประมาณ 5 นาที [25] ในแต่ละครั้งที่ป้อนแรงดันแล้วเกิดเบรกดาวร์ ก่อนที่จะป้อนแรงดันครั้งต่อไปเพื่อรอให้ฉนวนภายในชุดทดลองคืนตัวก่อนเพื่อความเป็นอิสระต่อกันของข้อมูลเวลาเบรกดาวร์ หลังจากนั้นบันทึกค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ที่เกิดเบรกดาวร์และเวลาเบรกดาวร์ ดังนั้นจะได้ข้อมูลการเบรกดาวร์ 100 ค่า ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง นำข้อมูลของแรงดันเบรกดาวร์และเวลาเบรกดาวร์มาแสดงในกราฟแรงดันเวลา ซึ่งจะแสดงในบทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล โดยข้อมูลของแรงดันเบรกดาวร์และเวลาเบรกดาวร์ที่ได้ทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ก.

3.3.3 การควบคุมคุณภาพของน้ำมันหม้อแปลง

ในการทดลองที่สภาวะต่างๆก่อนการทดลองในแต่ละครั้งจะทำการเปลี่ยนน้ำมันหม้อแปลงที่ผ่านการควบคุมคุณภาพแล้วลงในชุดทดลองความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า เพื่อความน่าเชื่อถือของผลการทดลองจึงทำการตรวจสอบคุณภาพของน้ำมันหม้อแปลงให้มีคุณภาพใกล้เคียงกันในทุกการทดลอง ด้วยการวัดคุณสมบัติความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง โดยเครื่องทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับตามมาตรฐาน IEC 156:1963 ทั้งก่อนและหลังการทดลองของน้ำมันหม้อแปลงในสภาวะนั้น

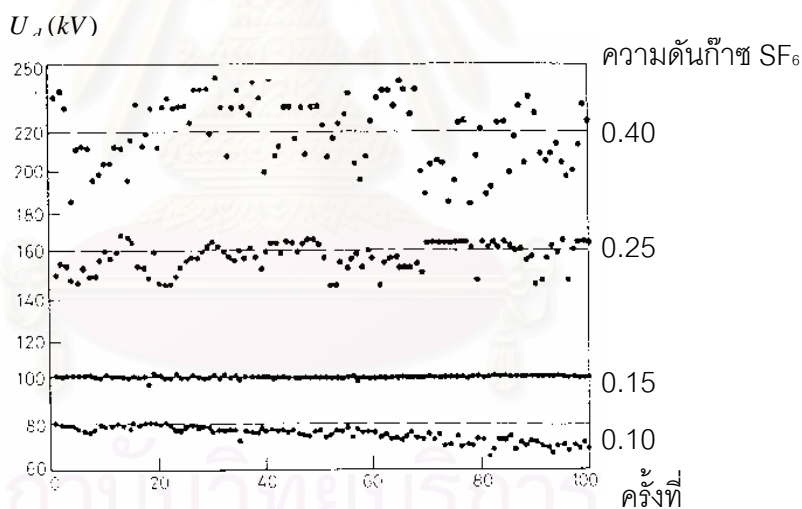
3.4 การทดสอบความเป็นอิสระต่อกัน [14,26,27]

ในส่วนของคุณสมบัติความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองนั้น จำเป็นต้องตรวจสอบว่าคุณสมบัติที่ได้นั้นมีความเป็นอิสระต่อกันหรือไม่ ความเป็นอิสระต่อกันของคุณสมบัติที่มีความสำคัญยิ่งในการหาค่าทางสถิติ โดยทุกค่าต้องเป็นอิสระต่อกัน ความเป็นอิสระต่อกันของค่าแรงดันเบรกดาวร์ขึ้นอยู่กับจำนวนที่ใช้ทำการทดลองว่ามีการคืนตัวกลับเป็นฉนวนอีกครั้งหลังการเกิดเบรกดาวร์อย่างไร นานเท่าใดและมีคุณสมบัติใดของฉนวนที่เปลี่ยนไป จนส่งผลกระทบต่อค่าแรงดันเบรกดาวร์ ทำให้ค่าแรงดันเบรกดาวร์ที่ได้ผิดเพี้ยนและไม่เป็นอิสระต่อกัน โดยมีตัวแปรอื่นที่ทำให้ค่า

แรงดันเบรกดาวนีนในน้ำมันหม้อแปลงชนิดพิเศษ เช่น อนุภาคคาร์บอน , การชุกระของผิวอิเล็กโตรด และประจุค้าง เป็นต้น วิธีการทดสอบความเป็นอิสระต่อกัน ในที่นี้ใช้ การสร้างกราฟเปรียบเทียบ

3.4.1 การสร้างกราฟเปรียบเทียบ

เริ่มด้วยการสร้างกราฟแรงดันที่ได้จากการทดลองทุกค่าและเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของข้อมูล(กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนีนแสดงในภาคผนวก ข.) ถ้าแต่ละกลุ่มของข้อมูลการทดลองที่เรียงลำดับกันมีการกระจายตัวรอบค่าเฉลี่ยแบบสุ่มก็เพียงพอที่จะสมมุติได้ว่า ข้อมูลการทดลองแต่ละค่ามีความเป็นอิสระต่อกัน ในทางกลับกัน ถ้าแรงดันเบรกดาวนีนมีแนวโน้มสูงขึ้น , ต่ำลง หรือมีการเพิ่มขึ้นและลดลงเป็นรายคาบต่อเนื่องกัน ข้อมูลการทดลองที่ได้จะไม่เป็นอิสระต่อกันและไม่สามารถนำมาใช้หาการกระจายทางสถิติได้ ดังเช่นตัวอย่างการทดลองหาค่าแรงดันเบรกดาวนีนของก๊าซ SF₆ ที่ความดันก๊าซค่าต่างๆดังแสดงในรูปที่ 3.9 พบว่าที่ความดันก๊าซ 0.15 , 0.25 และ 0.40 MPa ค่าแรงดันเบรกดาวนีนที่ได้มีความเป็นอิสระต่อกันมีการกระจายตัวของข้อมูลรอบค่าเฉลี่ยแบบสุ่ม ส่วนที่ความดันก๊าซ 0.10 MPa ค่าแรงดันเบรกดาวนีนที่ได้ไม่เป็นอิสระต่อกันโดยมีการลดลงอย่างต่อเนื่องแสดงว่ามีผลกระทบจากตัวแปรอื่นทำให้ค่าแรงดันเบรกดาวนีนที่ได้ผิดปกติไป[1]



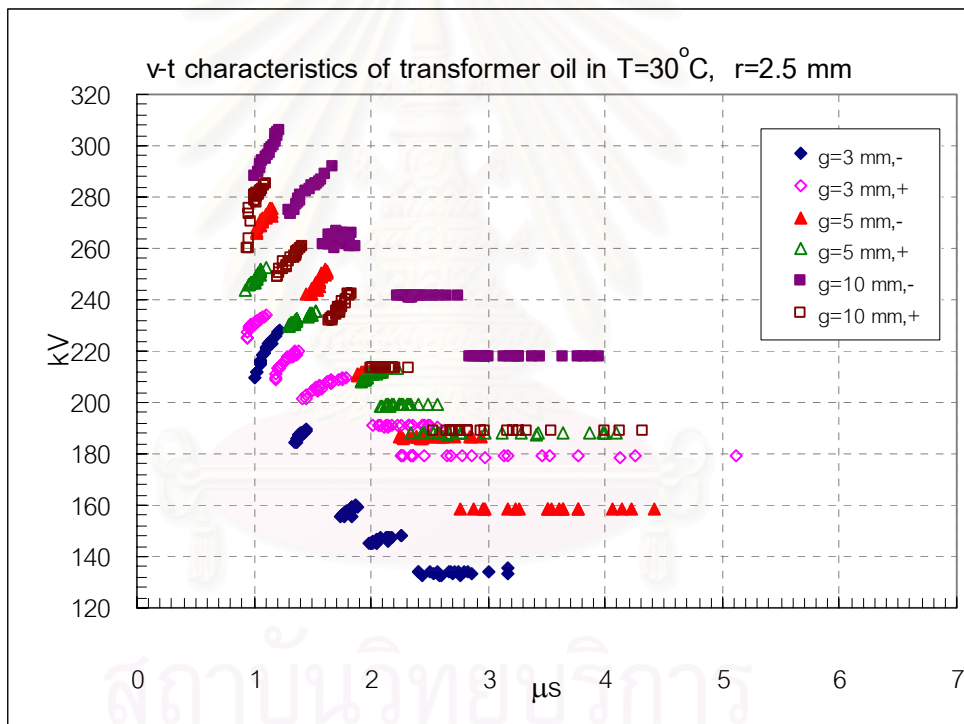
รูปที่ 3.7 ตัวอย่างการตรวจสอบความเป็นอิสระต่อกันด้วยการสร้างกราฟเปรียบเทียบ

บทที่ 4

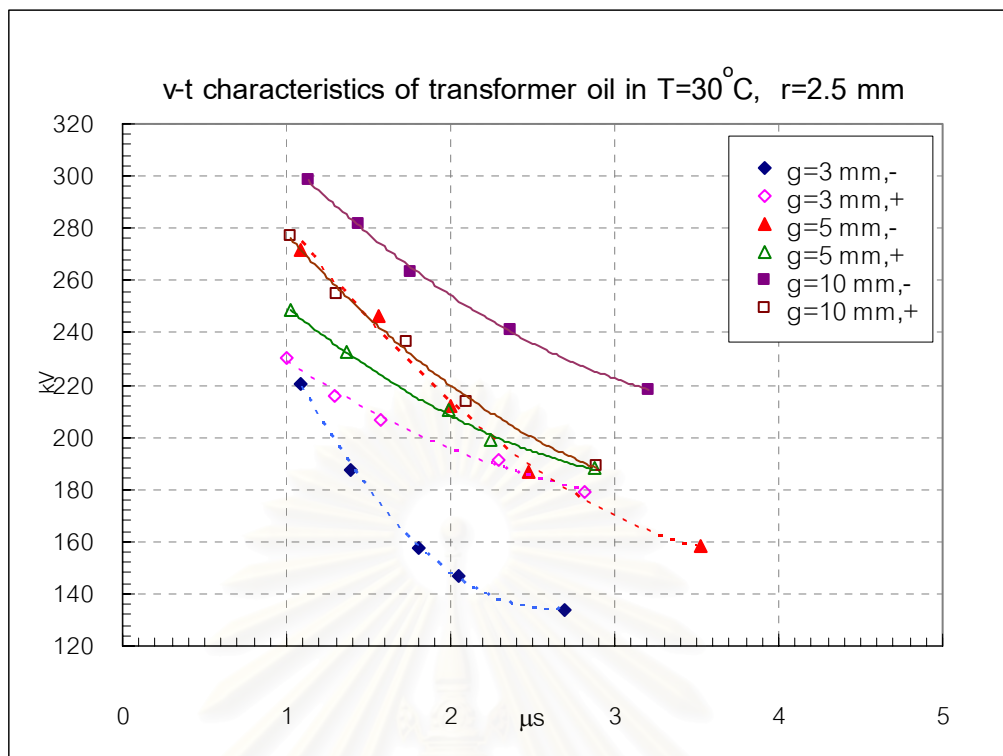
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ผลการทดลองหาค่าคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของน้ำมันหม้อแปลงแสดงที่แต่ละเงื่อนไขการทดลอง คือ ขนาดรัศมีอิเล็กโทรด(r) ระยะแกป(g) และชั่วแรงแดันอิมพัลส์ ต่อคุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่อุณหภูมิ(T)ต่างๆ แสดงอยู่ในภาคผนวก ก.

ตัวอย่างของข้อมูลคุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ได้จากการทดลองแสดงในรูปที่ 5.1 พบว่าการอ่านข้อมูลทำได้ยากเพราะข้อมูลมีจำนวนมากและมีการซ้อนทับกัน ดังนั้นเพื่อให้การวิเคราะห์ข้อมูลง่ายขึ้นจึงแทนข้อมูลด้วยการเข้ารูป (fitting) ดังแสดงในรูปที่ 4.2

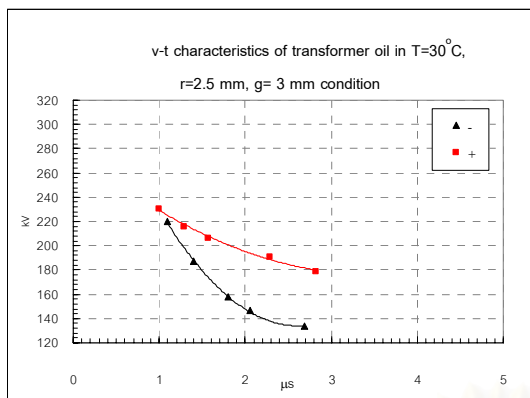


รูปที่ 4.1 ตัวอย่างข้อมูลคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของแรงดันอิมพัลส์ $1.2/50\ \mu\text{s}$ ที่ได้จากการทดลอง

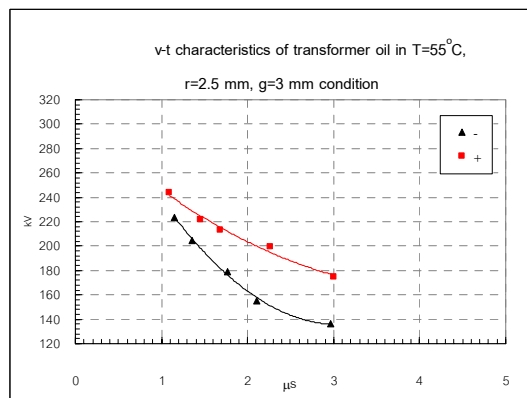


รูปที่ 4.2 ตัวอย่างรูปคุณลักษณะแรงดัน-เวลา

จากรูปที่ 4.1 ตัวอย่างข้อมูลที่อุณหภูมิ (T) 30 °C ขนาดรัศมีอิเล็กโทรด (r) 2.5 มม. ระยะแกป (g) 3 มม. ขั้วแรงดันบวก ข้อมูลมีกลุ่มกระจายเป็น 5 กลุ่มย่อยตามระดับแรงดันอิมพัลส์ป้อนคงที่ พบว่าข้อมูลดิบของแรงดันเบรกดาวนมีลักษณะของช่วงแคบที่บริเวณเวลาเบรกดาวนต่ำๆ และมีช่วงกว้างออกไปที่เวลาเบรกดาวนเพิ่มขึ้นซึ่งสามารถอธิบายด้วยการกระจายของข้อมูลที่แต่ละระดับแรงดันป้อนคงที่ 5 ระดับแรงดัน ในที่ระดับที่ 1 ซึ่งมีระดับต่ำที่สุดการเบรกดาวนเกิดขึ้นที่บริเวณทางคลื่นของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งข้อมูลแรงดันที่นำมาใช้สร้างเส้นคุณลักษณะแรงดัน-เวลาเป็นค่ายอดแรงดันดังที่แสดงในรูปที่ 2.4 ดังนั้นที่ระดับนี้จะมีการกระจายของแรงดันต่ำ ในขณะที่การกระจายของเวลาจะมีค่าสูงเนื่องจากผลของเวลาล่าช้านั่นเอง ส่วนในระดับที่ 5 เบรกดาวนเกิดหน้าคลื่นแรงดัน เวลาที่คลื่นตัดประมาณ 1 μ s ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงพอที่จะทำให้เกิดเบรกดาวน ดังนั้นเวลาล่าช้าจึงสั้นการกระจายของเวลาเบรกดาวนจึงน้อย ผลการทดลองทั้งหมดแสดงในรูปที่ 4.3 – 4.7

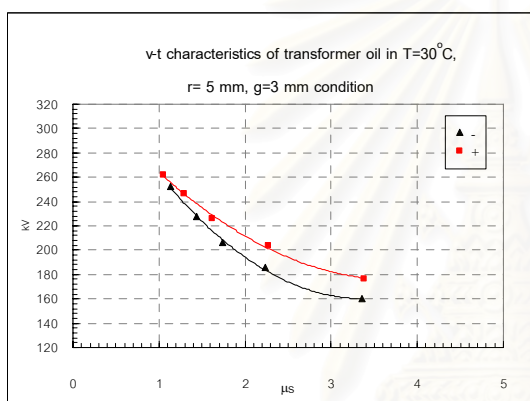


ก) คุณลักษณะของน้ำมันหม้อแปลง 30°C

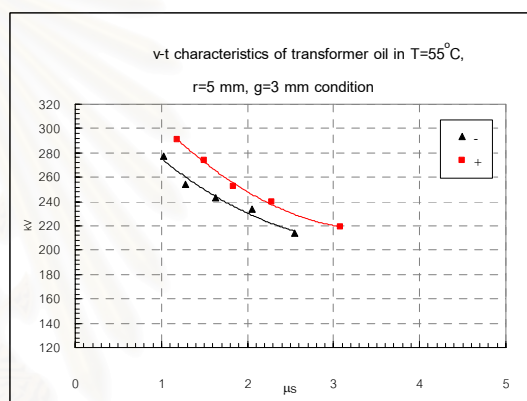


ข) คุณลักษณะของน้ำมันหม้อแปลง 55°C

รูปที่ 4.3 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ระยะแกป 3 ม.ม. ขนาดรัศมีอิเล็กโตรด 2.5 ม.ม.

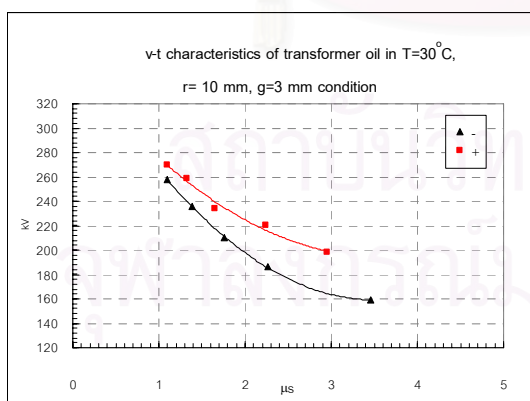


ก)) คุณลักษณะของน้ำมันหม้อแปลง 30°C

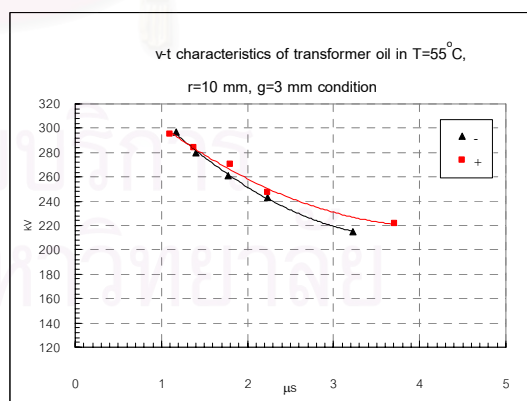


ข) คุณลักษณะของน้ำมันหม้อแปลง 55°C

รูปที่ 4.4 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ระยะแกป 3 ม.ม. ขนาดรัศมีอิเล็กโตรด 5 ม.ม.

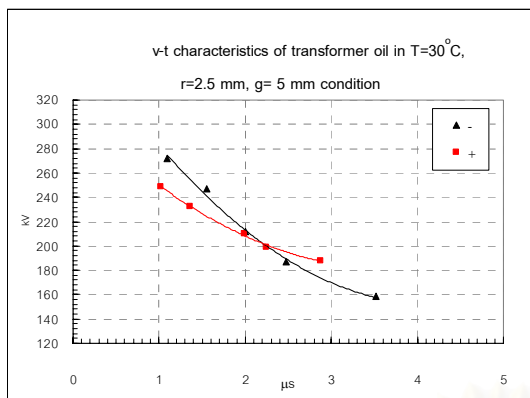


ก)) คุณลักษณะของน้ำมันหม้อแปลง 30°C

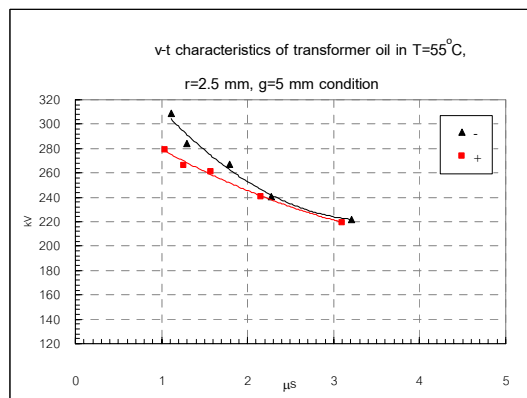


ข) คุณลักษณะของน้ำมันหม้อแปลง 55°C

รูปที่ 4.5 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ระยะแกป 3 ม.ม. ขนาดรัศมีอิเล็กโตรด 10 ม.ม.

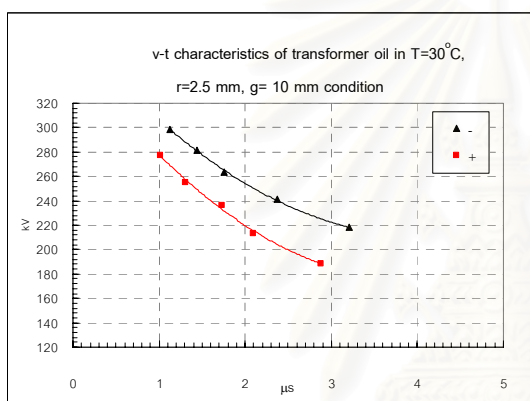


ก) คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง 30°C

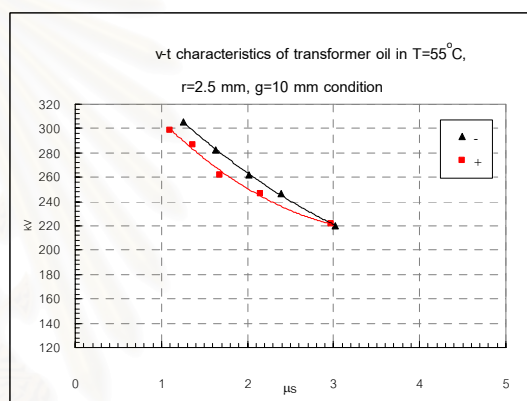


ข) คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง 55°C

รูปที่ 4.6 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ระยะแกป 5 ม.ม. ขนาดรัศมีอิเล็กโทรด 2.5 ม.ม.



ก) คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง 30°C

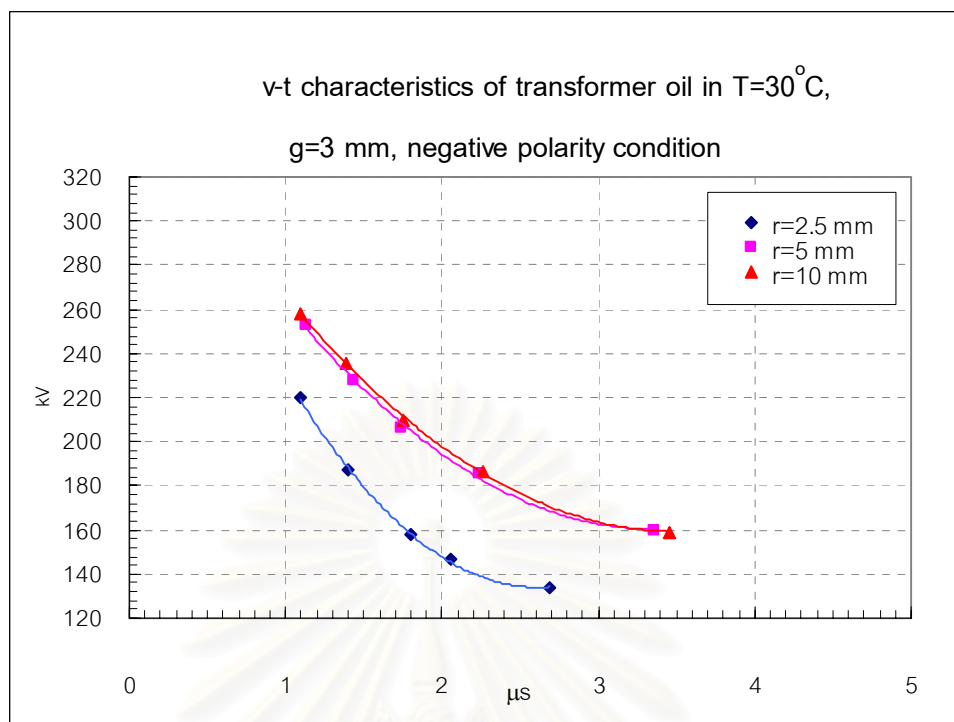


ข) คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง 55°C

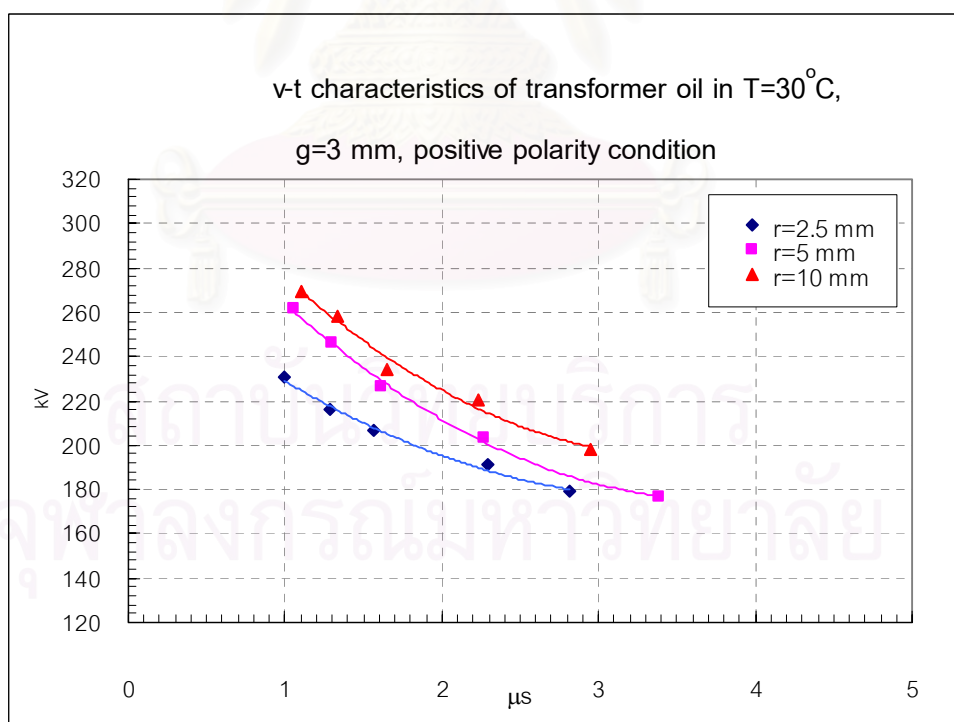
รูปที่ 4.7 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ระยะแกป 10 ม.ม. ขนาดรัศมีอิเล็กโทรด 2.5 ม.ม.

4.1 ผลของขนาดรัศมีอิเล็กโทรดและขั้วแรงดันต่อคุณลักษณะแรงดัน-เวลา

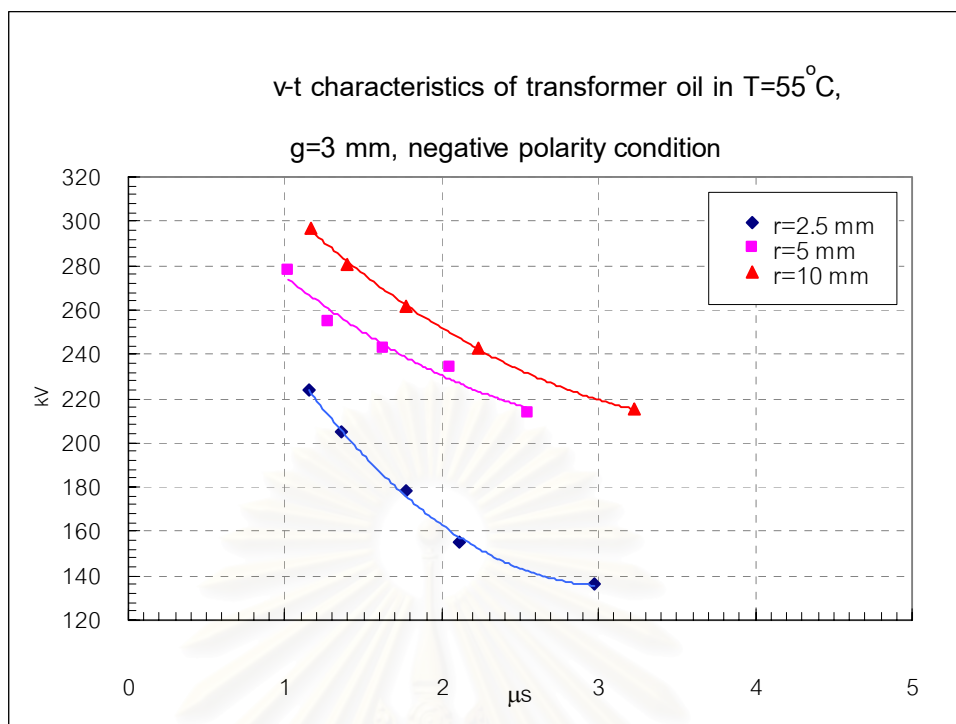
ผลของขนาดรัศมีอิเล็กโทรดต่อคุณลักษณะแรงดัน-เวลาจากผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.8 ถึง รูปที่ 4.11 โดยแยกพิจารณาว่าคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง 30°C และ 55°C พบว่าเส้นคุณลักษณะแรงดัน-เวลาขยับค่าสูงขึ้นในทุกคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงทั้งขั้วลบและขั้วบวกเมื่อขนาดรัศมีอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น ระยะแกปคงที่ การทำให้แฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นด้วยการลดขนาดอิเล็กโทรดทรงกลม ทำให้แรงดันเบรกดาวนมีค่าลดลงตามขนาดอิเล็กโทรดทรงกลมที่ลดลง สามารถอธิบายโดยพิจารณาการกระจายสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด กล่าวคือที่แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าค่าสูง ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวทรงกลมมีค่าสูงและการกระจายสนามไฟฟ้ามีความไม่สม่ำเสมอ ทำให้โอกาสเกิดเบรกดาวนตามกลไกการเกิดเบรกดาวนเกิดขึ้นได้ง่าย



รูปที่ 4.8 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ระยะแกป 3 ม.ม. ขนาดรัศมีอิเล็กโทรด 2.5, 5 และ 10 ม.ม.
 คุณหมุมิของน้ำมันหม้อแปลง 30°C แรงดันอิมพัลส์ชั่วพล

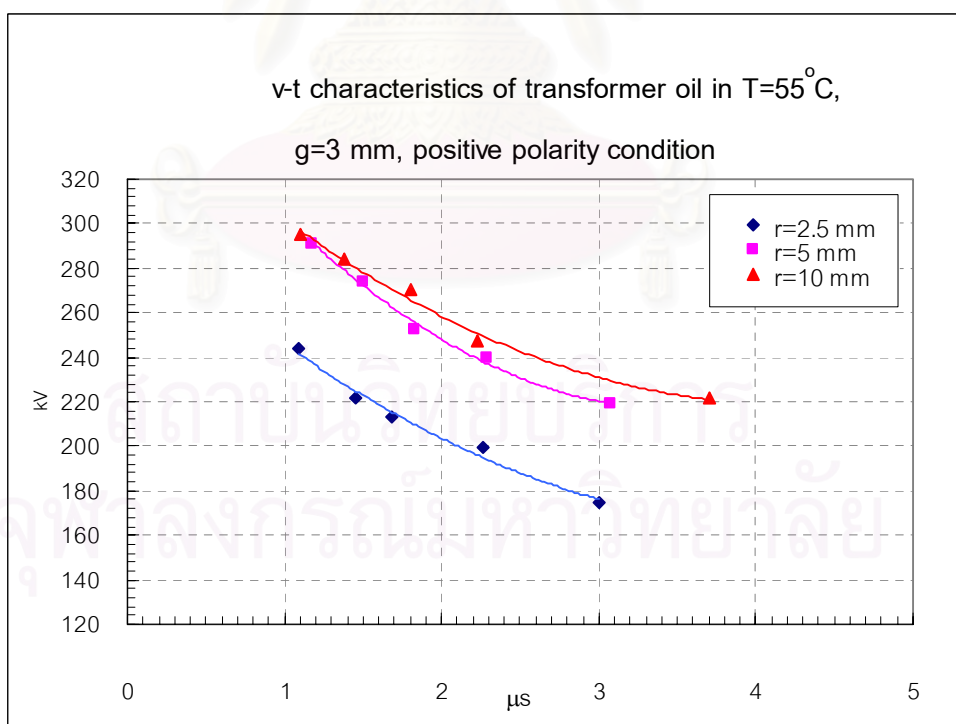


รูปที่ 4.9 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ระยะแกป 3 ม.ม. ขนาดรัศมีอิเล็กโทรด 2.5, 5 และ 10 ม.ม.
 คุณหมุมิของน้ำมันหม้อแปลง 30°C แรงดันอิมพัลส์ชั่วบวก



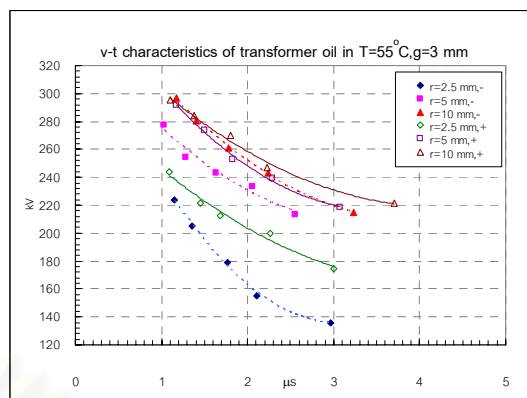
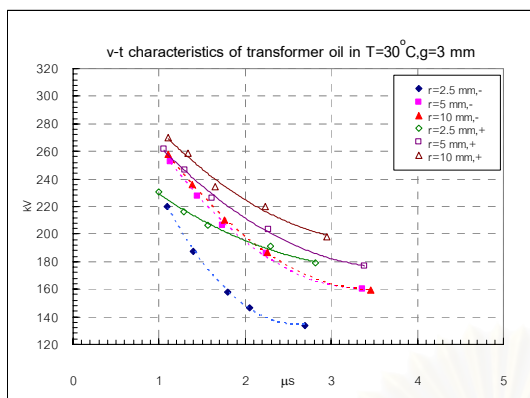
รูปที่ 4.10 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ระยะแกป 3 ม.ม. ขนาดรัศมีอิเล็กโตรด 2.5, 5 และ 10 ม.ม.

คุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง 55°C แรงดันอิมพัลส์ชั่วพล



รูปที่ 4.11 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ระยะแกป 3 ม.ม. ขนาดรัศมีอิเล็กโตรด 2.5, 5 และ 10 ม.ม.

คุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง 55°C แรงดันอิมพัลส์ชั่วบวก



ก) คุณภูมิของน้ำมันหม้อแปลง 30°C

ข) คุณภูมิของน้ำมันหม้อแปลง 55°C

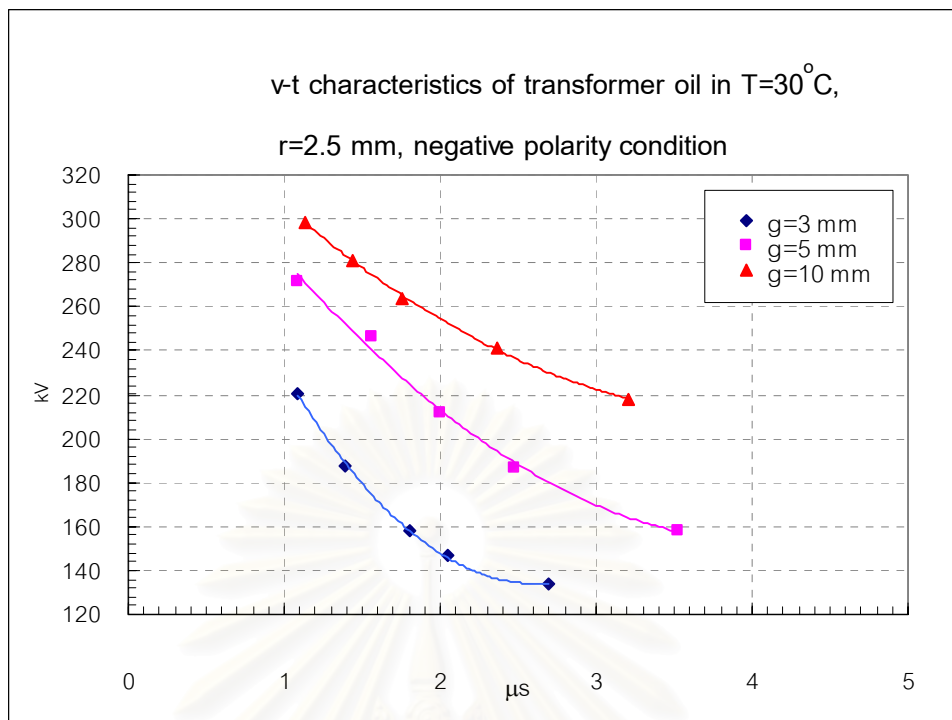
รูปที่ 4.12 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ระยะแกป 3 ม.ม. ขนาดรัศมีอิเล็กโทรด 2.5 5 และ 10 ม.ม.

คุณภูมิของน้ำมันหม้อแปลง 30 และ 55°C แรงดันอิมพัลส์ชั่วลบและชั่วบวก

ผลของชั่วแรงดันต่อเส้นคุณลักษณะแรงดัน-เวลาจากผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.3 ,4.4 4.5 นำมาแสดงใหม่ในรูปที่ 4.12 พบว่าเส้นคุณลักษณะแรงดัน-เวลาชั่วบวกมีค่าสูงกว่าชั่วลบในทุกคุณภูมิของน้ำมันหม้อแปลง

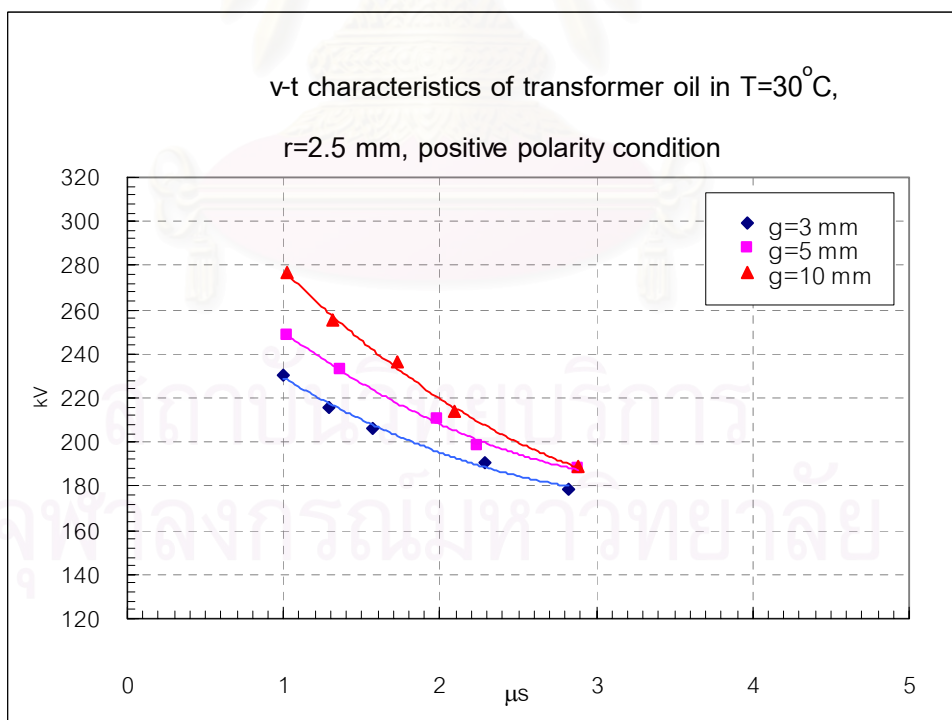
4.2 ผลของระยะแกปและชั่วแรงดันต่อคุณลักษณะแรงดัน-เวลา

ผลของระยะแกปต่อเส้นคุณลักษณะแรงดัน-เวลาจากผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.13 ถึงรูปที่ 4.16 โดยแยกพิจารณาที่คุณภูมิของน้ำมันหม้อแปลง 30°C และ 55°C พบว่าเมื่อระยะแกปเพิ่มขึ้นเส้นคุณลักษณะแรงดัน-เวลาก็ขยับค่าสูงขึ้นในทุกคุณภูมิของน้ำมันหม้อแปลงทั้งชั่วลบและชั่วบวก ซึ่งสามารถอธิบายด้วยการกระจายสนามไฟฟ้าของแกปเมื่อระยะแกปเพิ่มขึ้น ความเครียดสนามไฟฟ้าในบริเวณอิเล็กโทรดแรงสูงจะมีค่าลดลง ดังนั้นการเกิดเบรกดาวนจึงยากกว่าในกรณีระยะแกปแคบ สอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต



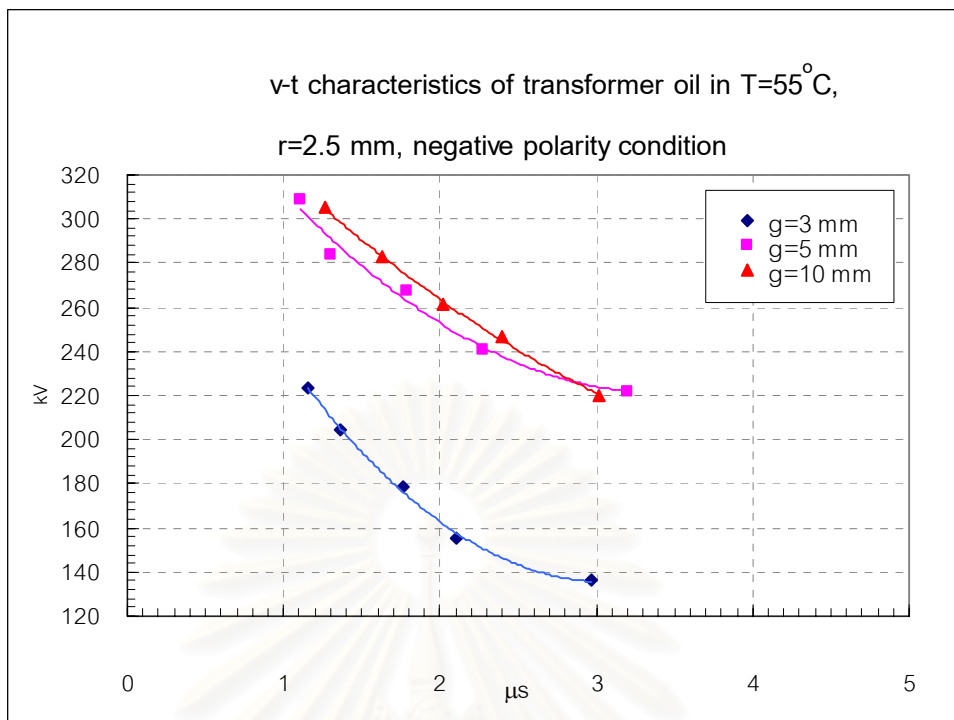
รูปที่ 4.13 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ระยะแกป 3, 5 และ 10 ม.ม. ขนาดรัศมีอิเล็กโตรด 2.5 ม.ม.

อุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง 30°C แรงดันอิมพัลส์ชั่วลบ



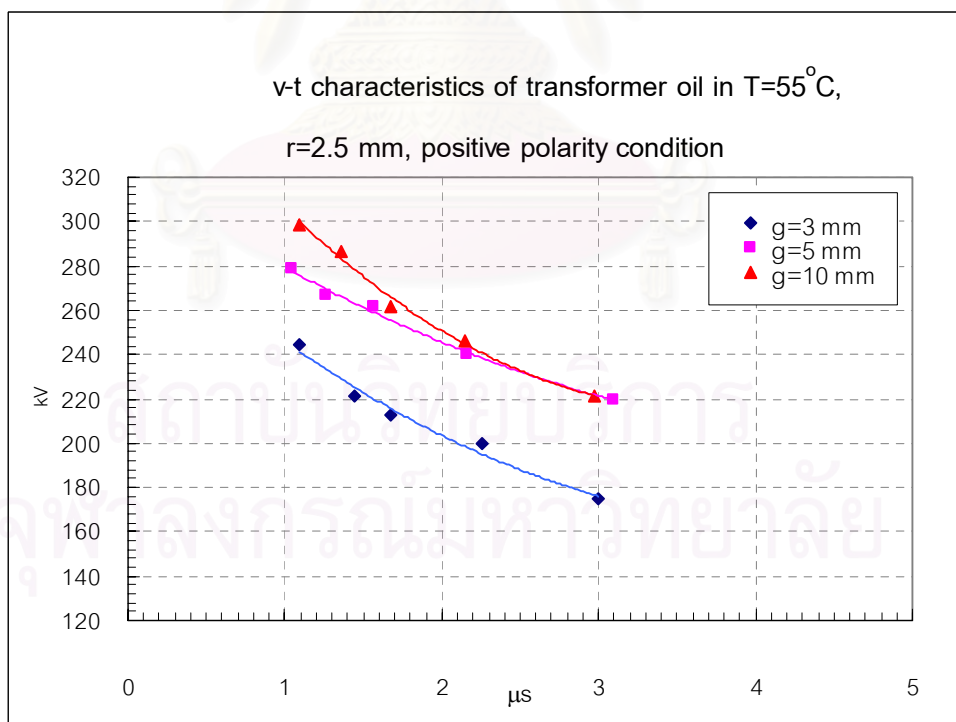
รูปที่ 4.14 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ระยะแกป 3, 5 และ 10 ม.ม. ขนาดรัศมีอิเล็กโตรด 2.5 ม.ม.

อุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง 30°C แรงดันอิมพัลส์ชั่วบวก



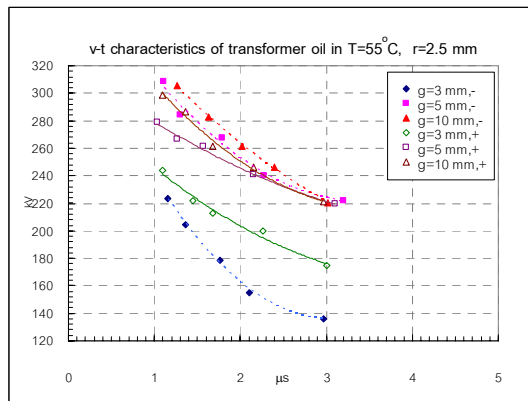
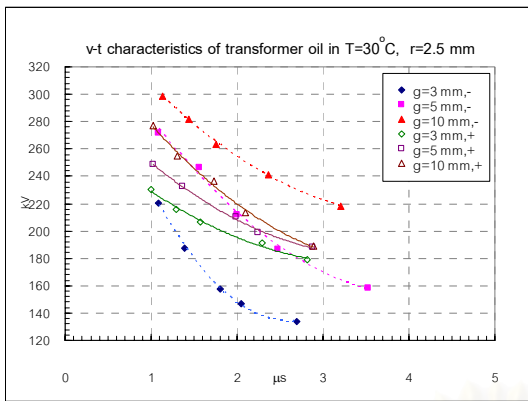
รูปที่ 4.15 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ระยะแกป 3, 5 และ 10 ม.ม. ขนาดรัศมีอิเล็กโตรด 2.5 ม.ม.

คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง 55°C แรงดันอิมพัลส์ชั่วลบ



รูปที่ 4.16 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ระยะแกป 3, 5 และ 10 ม.ม. ขนาดรัศมีอิเล็กโตรด 2.5 ม.ม.

คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง 55°C แรงดันอิมพัลส์ชั่วบวก

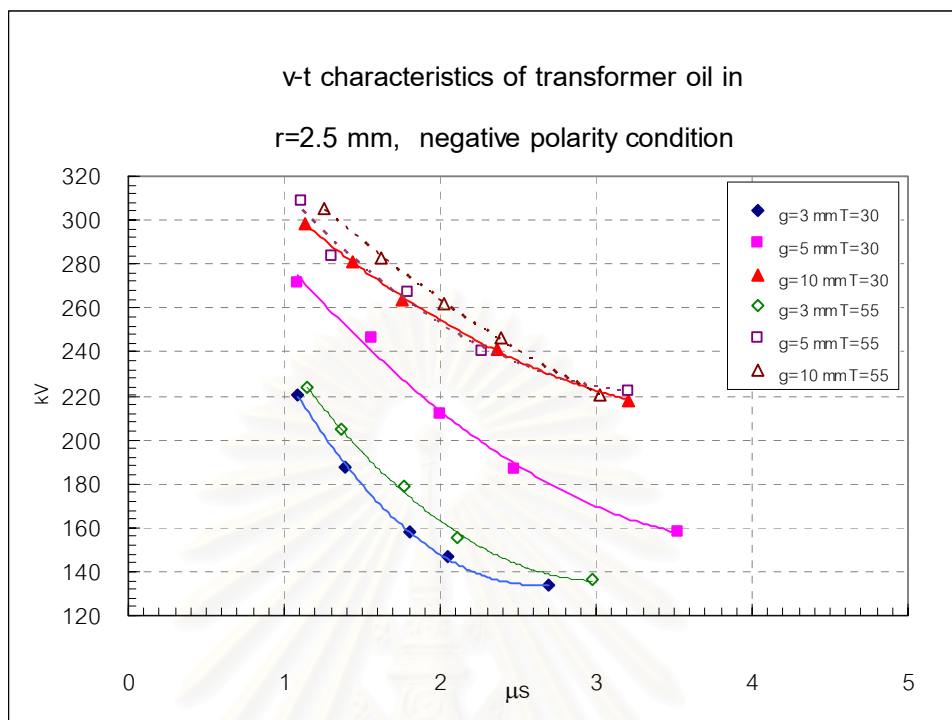


ก) คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง 30°C ข) คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง 55°C
รูปที่ 4.17 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ระยะแกป 3, 5 และ 10 ม.ม. ขนาดรัศมีอิเล็กโตรด 2.5 ม.ม.

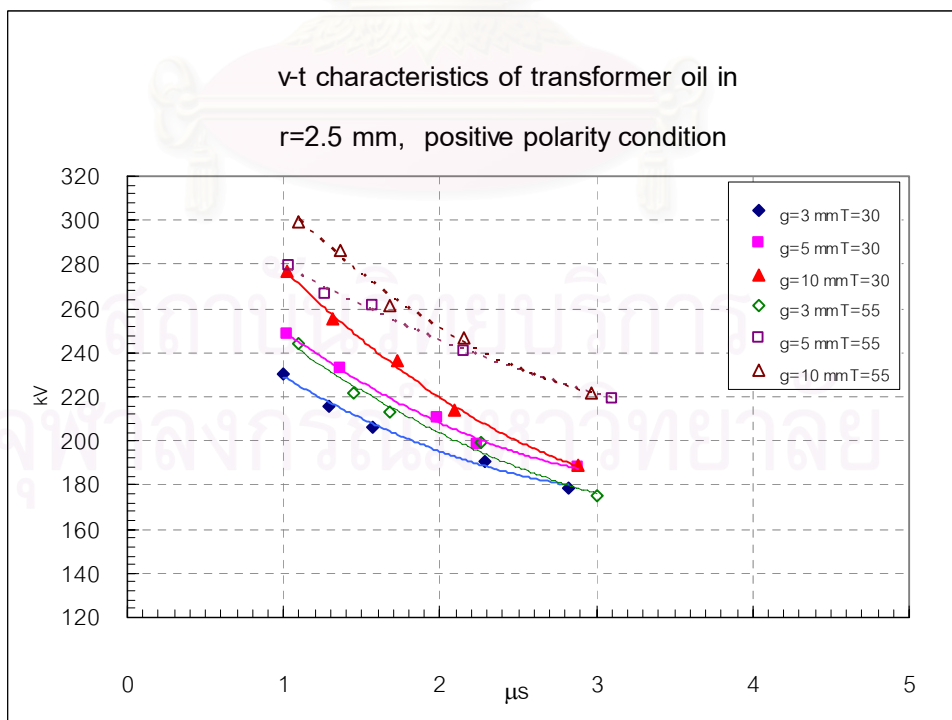
คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง 30 และ 55°C แรงดันอิมพัลส์ชั่วพลบและชั่วบวก

ในการพิจารณาผลของชั่วแรงดัน เมื่อค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าสูงการกระจายของสนามไฟฟ้าเป็นแบบไม่สม่ำเสมอ ดังกรณีทรงกลมรัศมีขนาด 2.5 mm ที่ระยะแกปมากกว่าหรือเท่ากับ 5 mm แรงดันเบรกดาวนชั่วพลบจะมีค่าสูงกว่าแรงดันชั่วบวก แต่ในสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ดังกรณีทรงกลมรัศมีขนาด 10 mm แรงดันเบรกดาวนชั่วบวกจะมีค่าสูงกว่าแรงดันชั่วพลบ แนวโน้มลักษณะนี้อธิบายได้จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวนกับแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ระยะแกปคงที่[2] เมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าน้อยกว่า 2.1 แรงดันเบรกดาวนชั่วบวกจะสูงกว่าแรงดันชั่วพลบ แต่เมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามากกว่า 2.1 แรงดันเบรกดาวนชั่วพลบจะสูงกว่าแรงดันชั่วบวก กล่าวคือในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอจะมีผลกระทบของประจุค้าง (space charge) เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปลายทรงกลมถึงค่าเริ่มต้นเกิดดิสชาร์จบางส่วน การเกิดเบรกดาวนของแรงดันชั่วบวกประจุจะวิ่งจากน้ำมันหม้อแปลงมาที่ชั่วอิเล็กโตรดทรงกลม ทำให้ประจุบวกซึ่งมีความเร็วในการเคลื่อนที่ต่ำจับกลุ่มอยู่บนผิวทรงกลม เป็นผลให้ความเครียดสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนเกิดเบรกดาวนง่ายขึ้น ส่วนกรณีการเกิดเบรกดาวนของแรงดันชั่วพลบ อิเล็กโตรดทรงกลมจะฉีดอิเล็กตรอนให้กับน้ำมันหม้อแปลง ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณผิวทรงกลมลดลง เพราะฉะนั้นการเกิดเบรกดาวนของชั่วพลบจึงเกิดยากกว่าของชั่วบวก ทำให้แรงดันเบรกดาวนชั่วพลบสูงกว่าแรงดันชั่วบวกในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ส่วนกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยเช่นกรณีอิเล็กโตรดทรงกลมขนาดใหญ่การเกิดเบรกดาวนจะเป็นการเบรกดาวนโดยตรง (direct breakdown) ไม่มีผลกระทบของประจุค้างการเกิดเบรกดาวนของแรงดันชั่วบวกจะสูงกว่าแรงดันชั่วพลบ

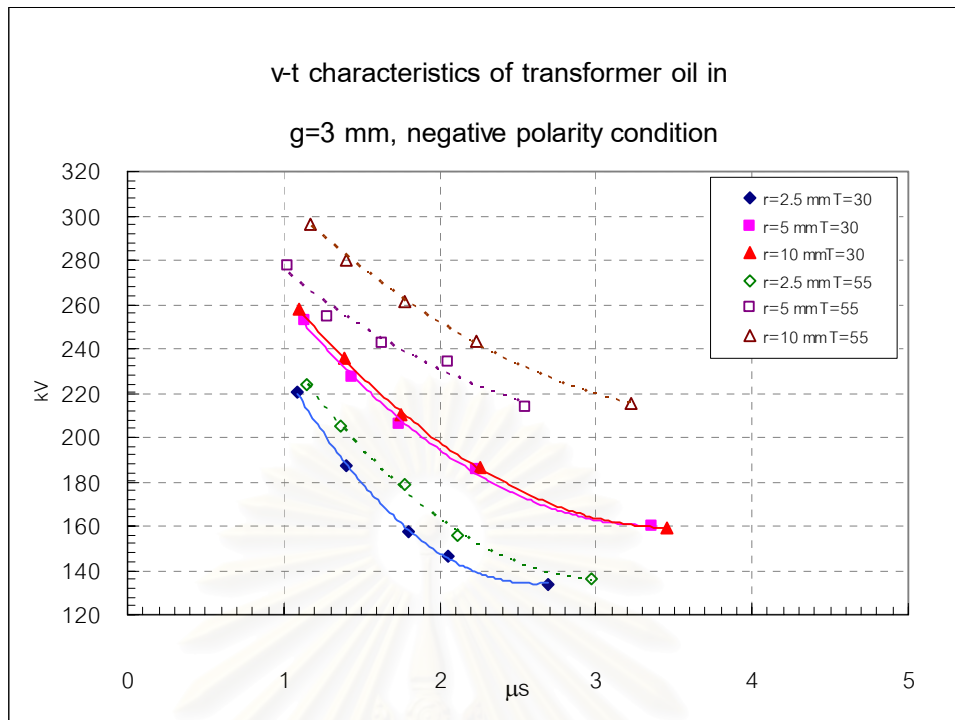
4.3 ผลของอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลงต่อคุณลักษณะแรงดัน-เวลา



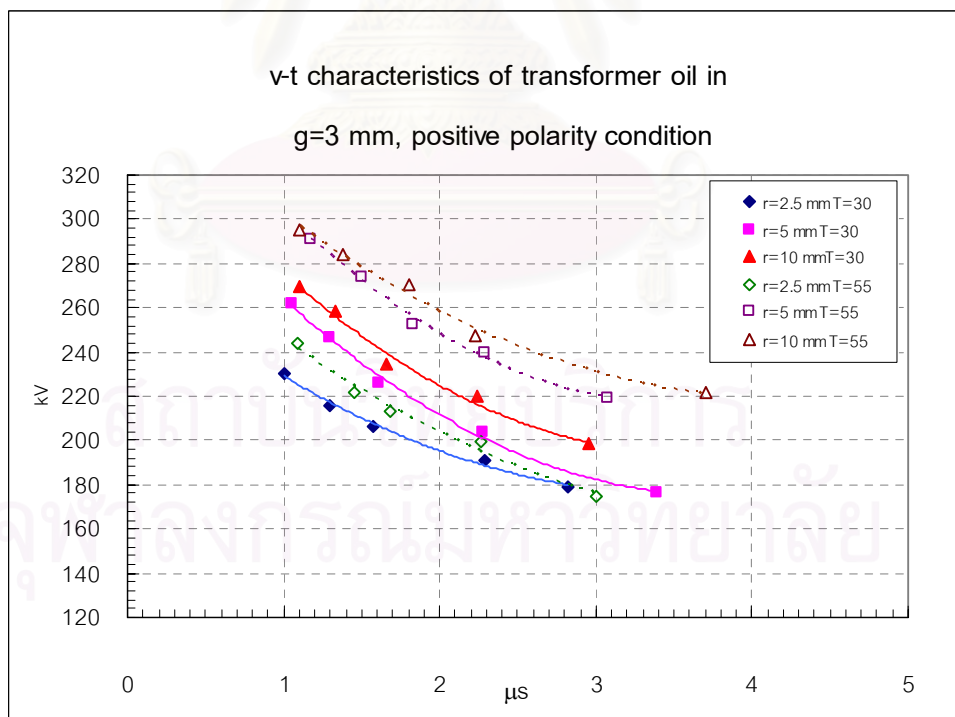
รูปที่ 5.18 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ขนาดรัศมีอิเล็กโทรด 2.5 ม.ม. แรงดันอิมพัลส์ชั่วพล



รูปที่ 5.19 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ขนาดรัศมีอิเล็กโทรด 2.5 ม.ม. แรงดันอิมพัลส์ชั่วววก



รูปที่ 5.20 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ระยะแกป 3 ม.ม. แรงดันอิมพัลส์ขั้วลบ



รูปที่ 5.21 คุณลักษณะแรงดัน-เวลาที่ระยะแกป 3 ม.ม. แรงดันอิมพัลส์ขั้วบวก

ผลของอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลงต่อเส้นคุณลักษณะแรงดัน-เวลา จากผลการทดลอง แสดงในรูปที่ 5.18 ถึง รูปที่ 5.21 พบว่าเมื่ออุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลงเพิ่มขึ้นเส้นคุณลักษณะแรงดัน-เวลาก็ขยับค่าสูงขึ้นในทุกอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลงทั้งชั่วคราวและชั่วคราว

จากผลการทดลองในอดีตของ มนตรี รัชารักษ์[1] อธิบายผลกระทบของอุณหภูมิต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงที่อุณหภูมิต่างๆ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติหลายตัวที่มีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ได้แก่

- คุณสมบัติทางฟิสิกส์ เช่น ความหนืด , ความหนาแน่น เป็นต้น
- คุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ แรงดึงผิว , ความสามารถในการละลายของความชื้นและก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ซึ่งพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น [8,28]
- คุณสมบัติทางไฟฟ้า เช่น การนำกระแส , ความสูญเสียไดอิเล็กตริก เป็นต้น

พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นในช่วง $30-80^{\circ}\text{C}$ ค่าแรงดันเบรกดาวนจะสูงขึ้นทุกขนาด อิเล็กโตรดและระยะแกปทั้งชั่วคราวและชั่วคราว โดยแรงดันเบรกดาวนสูงสุดที่อุณหภูมิ 80°C การเพิ่มขึ้นของแรงดันเบรกดาวนตามอุณหภูมิอาจเกิดจากผลกระทบของคุณสมบัติอย่างไร อย่างหนึ่งในคุณสมบัติที่กล่าวมานี้ ซึ่งเมื่อมองที่คุณสมบัติทางไฟฟ้าพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการนำกระแสและความสูญเสียไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้น ความสามารถในการเคลื่อนที่ของพาหะสูงขึ้นค่าแรงดันเบรกดาวนควรจะมีความต่ำลงแต่ผลการทดลองที่ได้ไม่ใช่ จึงใช้เหตุผลนี้อธิบายไม่ได้

จากคุณสมบัติทางเคมีที่ว่าความสามารถในการละลายของความชื้นและก๊าซจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและจากแรงดันเบรกดาวนมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นก็สามารถอธิบายความสัมพันธ์นี้โดยใช้ทฤษฎีปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง (stress volume หรือ critical volume)

เมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าต่ำ(อิเล็กโตรดทรงกลมมีขนาดใหญ่) แม้ว่าความสามารถในการละลายของก๊าซจะมีค่าสูงที่อุณหภูมิสูงก็ตาม แต่เนื่องจากการกระจายสนามไฟฟ้ามีลักษณะเกือบสม่ำเสมอ ปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมีบริเวณกว้าง บริเวณส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงนี้จึงยังคงมีฟองก๊าซอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้แรงดันเบรกดาวนเปลี่ยนแปลงน้อยตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

เมื่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าสูง (อิเล็กโตรดทรงกลมมีขนาดเล็ก) การกระจายสนามไฟฟ้ามีความไม่สม่ำเสมอสูง ความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าสูงบริเวณผิวทรงกลม เนื่องจากทรงกลมมีขนาดเล็กปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมีบริเวณแคบ เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันสูงขึ้นความสามารถในการละลายของฟองก๊าซเพิ่มขึ้น ทำให้ฟองก๊าซที่อยู่ในบริเวณปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมีจำนวนน้อยกว่าที่อุณหภูมิห้องมาก การเกิดเบรกดาวนจึงยากขึ้นทำให้แรงดันเบรกดาวนมีค่าเพิ่มขึ้นมากตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองในบทที่ 4 สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการทดลอง ซึ่งประกอบไปด้วย ผลของขนาดตัวเก็บประจุตัวเล็ก ระยะเวลาพักรอก ชั่วแรงดันอิมพัลส์ และอุณหภูมิต่อคุณลักษณะแรงดัน-เวลาได้ดังนี้

1. คุณลักษณะแรงดัน-เวลาของระบบอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดิวเซอร์-ระบบเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ ฟิวส์มาตรฐานมีช่วงแรงดันเบรกดาวน 120 ถึง 320 kV เวลาเบรกดาวนอยู่ในช่วง 1 ถึง 7 μs โดยระดับแรงดันมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่เมื่อเวลาเบรกดาวนมากกว่า 2 μs และคุณลักษณะแรงดัน-เวลามีความชันมากขึ้นเมื่อเวลาเบรกดาวนลดลง

2. การกระจายของแรงดันเบรกดาวนมีค่าน้อยที่ระดับแรงดันป้อนต่ำ คือในช่วงทางของคุณลักษณะแรงดัน-เวลามีระดับแรงดันคงที่ ซึ่งการกระจายของแรงดันเบรกดาวนจะมีมากขึ้นเมื่อระดับแรงดันป้อนสูงขึ้น เวลาเบรกดาวนลดลง ในทางกลับกัน การกระจายของเวลาเบรกดาวนมีค่าสูงที่ระดับแรงดันป้อนต่ำ และจะกระจายมากขึ้นเมื่อระดับแรงดันป้อนสูงขึ้น

3. คุณลักษณะแรงดัน-เวลามีค่าสูงขึ้นเมื่อขนาดตัวเก็บประจุตัวเล็ก เพิ่มขึ้นในทุกเงื่อนไขการทดลอง และคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของแรงดันอิมพัลส์ชัวบวกรมีค่าสูงกว่ากรณีชัวลบ

4. คุณลักษณะแรงดัน-เวลามีค่าสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาพักรอกมีค่ามากขึ้น โดยเมื่อค่าแพกเตอร์สนามไฟฟ้าสูงการกระจายของสนามไฟฟ้าเป็นแบบไม่สม่ำเสมอสูง ดังกรณีทรานสดิวเซอร์ขนาด 2.5 mm ที่ระยะเวลาพักรอก 10 mm แรงดันเบรกดาวนชัวลบจะมีค่าสูงกว่าแรงดันชัวบวกร แต่ในสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ดังกรณีทรานสดิวเซอร์ขนาด 10 mm แรงดันเบรกดาวนชัวบวกรจะมีค่าสูงกว่าแรงดันชัวลบ.

5. คุณลักษณะแรงดัน-เวลามีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น ในทุกเงื่อนไขการทดลอง

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดิวเซอร์ ระยะเวลาพักรอก และอุณหภูมิที่ค่าต่างๆเพิ่ม
- ศึกษาผลของรูปคลื่นแรงดันแบบอื่นนอกเหนือจากรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μs เช่นรูปคลื่นแรงดันความชันสูง (Steep front Impulse) ที่เวลาเบรกดาวนอยู่ในช่วงน้อยกว่า 1 μs เพราะการเกิดความบกพร่องในระบบไฟฟ้ามาจากหลายสาเหตุไม่ใช่มาจากฟิวส์เท่านั้น และลักษณะรูปคลื่นฟิวส์จริงก็แตกต่างจากรูปคลื่นมาตรฐาน

3. ศึกษาคุณลักษณะแรงดัน-เวลาในระบบอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอื่นๆ เช่นระบบเข็ม-ระนาบ ระบบทรงกลม-ทรงกลม เพื่อจุดประสงค์ของสนามไฟฟ้า



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. มนตรี รัชารักษ์ , ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ , วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2542.
2. ชลวิทย์ วินิจชัย,แรงดันเบรกดาวน์กระแสตรงและสวิตช์ซึ่งอิมพัลส์ของน้ำมันหม้อแปลงภายใต้สนามไฟฟ้าไม่เอกพันธ์,วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2544.
3. Ravindra, A. and Wolfgang, M. Liquids dielectrics in high-voltage application: High-voltage insulation engineering. India:Wiley Eastern,1995.
4. IEC 296 Specification for new insulating oils for transformers and switchgear,1969.
5. Ikeda, M. , and Menju, S. Breakdown probability distribution and equi-probabilistic V-t characteristic of transformer oil. IEEE trans. on PAS vol.PAS-98,No.4 1978 :1430-1438.
6. M.A. Abdallah , Properties of Transformer Oil under Different Types of Voltages , High Voltage Engineering Symposium , 22-27 August 1999. : 349-351.
7. Hirai ,N. , Akumu ,A.O. , and Ariei ,K., The Effect of Contaminant in Breakdown Time Lag of Uniform Electric Field Using Impulse Breakdown in Mineral Oil, 13th International Conference on Dielectric Liquids,1999,pp.207-210.
8. Yimaz, H. , and Guler,S., The Effect of Electrode Shape, Gap and Moisture on Dielectric Breakdown of Transformer Oil, International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquid 12th , 1996, pp.354-357.
9. E.O.Forster, H.Yamashita, C.Mazzetti, M.Pompili, L.Caroli and S.Patrisi , The effect of the electrode gap on breakdown in liquid dielectrics,IEEE tran. Diel. And Elect. Ins. , Vol.1,No.3,June 1994.
10. Naidu, M.S. , and Kamaraju, S. Conduction and breakdown in liquid dielectrics: High-voltage engineering. New Delhi:Tata Mcgraw-Hill publishing company limited, 1995.
11. สุรพล ดำรงกิตติกุล. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. พิมพ์ครั้งที่1. เชียงใหม่:มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ,2535.

12. Amanpreet Singh Gill , The Design of Transformer oil , IEEE Conf. Elect. Ins. , Anaheim, CA USA , April 5-5 , 2000 : 247-250.
13. Beroual, A. and et al. , Propagation and structure of streamers in liquid dielectrics, IEEE EI magazine vol.14, no.2, March/April 1998 : 6-17.
14. Hauschild, W. , and Mosch, W. , Statistical techniques for high voltage engineering. Peter Peregrinus Ltd, 1992.
15. Lee, M.J. and Nelson, J.K. Dielectric integrity associated with circulating insulating fluids. IEEE trans. on EI, vol.23, no.4 August 1988 : 712.
16. สำรวัย สังข์สะอาด , วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. กรุงเทพมหานคร , สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์ , 2528.
17. Kuffel, E.; Zaengl, W.; and Kuffel, J. High Voltage Engineering .Fundamentals 2nd edition, Oxford: Newnes, 2000.
18. Cross, J.D. Breakdown across a dielectric spacer in insulating oil and the role of electrohydrodynamics in liquid breakdown. IEEE trans. on EI vol.EI-17, no.6, 1982 : 496-497.
19. Mazen, A. S.; and ABD E. H. A. Breakdown Voltage and Time-to- Breakdown as Influenced by the Steepness of the Applied Positive Impulse. IEEE Trans. On Indus. App., Vol.24, No.6, (November/December 1988): 1031-1037.
20. Suzuki, T.; and Miyake, K. Experimental Study of Breakdown Voltage-Time Characteristics of Large Air Gaps with Lightning Impulses. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems vol. PAS-96, No.1, (January/February 1977): 227-233.
21. Naidu, M. S., and Venkatesh, S. K. A Test setup with Automated Measurements for Impulse Voltage Breakdown Studies of Gaseous Insulation. High Voltage Engineering Symposium, 22-27 August 1999 Conf. Pub. No. 467, (1999).
22. Maxwell 2D field simulator. Ansoft corporation, 1995.
23. IEEE Std 4-1995. IEEE Standard Technique for High-Voltage Testing, 1995.
24. IEC 60-1 International Standard High-Voltage Test Technique, 2nd Edition, 1989.
25. Graf, R., and Boeck, W. Defect Sensibility of N₂ - SF₆ Gas Mixtures with Equal Dielectric Strength, 2000 Conf. On EI. Ins and Diel. Phoenimena. (2000).
26. กัลยา วานิชย์บัญชา. การวิเคราะห์สถิติ: สถิติเพื่อการตัดสินใจ. พิมพ์ครั้งที่ 4: โรงพิมพ์จุฬาฯ, 2537.

27. คณาจารย์ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาฯ. ความน่าจะเป็นและสถิติ. พิมพ์ครั้งที่ 8 : ห้างหุ้นส่วนจำกัดพิทักษ์การพิมพ์, 2537.
28. Kaufman, R.B., Pierce, J.L. , and Uhlig, E.R. The effect of transformer oil preservation methods on dielectric strength of oil. AIEE transactions (1958): 1316.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลแรงดันและเวลาเบรกดาวน

ข้อมูลแรงดันและเวลาเบรกดาวนเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานรูปคลื่น $1.2/50 \mu s$ ให้แก่ชุดทดลองที่เงื่อนไขต่างๆ คือ ขนาดอิมพัลส์ (r), ระยะแกป (g), อุณหภูมิ (T), และชั่วแรงดันอิมพัลส์ โดยมีระดับแรงดันที่ป้อน 5 ระดับในแต่ละเงื่อนไขการทดลองแสดงที่ด้านบนของตาราง

ค่าทางสถิติของข้อมูล ประกอบด้วย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล (SD) และ ค่ากลาง (m) ค่ากลางของข้อมูลคือ เวลาตำแหน่งกลาง (Median Time) และแรงดันเฉลี่ย (Average Voltage) ส่วนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลคือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเวลา และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันเบรกดาวนแสดงที่ด้านล่างของตาราง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.1 ข้อมูลเบรกดาวน์ที่ $T = 30^{\circ}\text{C}$, $r = 2.5$ ม.ม.

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลเบรกดาวน์ที่ $T = 30^{\circ}\text{C}$, $r = 2.5$ ม.ม., $g = 3$ ม.ม. ไข้วลป

ระดับที่ 1 = 143.75 kV			ระดับที่ 2 = 163.17 kV			ระดับที่ 3 = 178.71 kV			ระดับที่ 4 = 217.56 kV			ระดับที่ 5 = 248.64 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	T(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)
1	3.16	133.69	21	2.25	148.48	41	1.77	157.26	61	1.39	187.10	81	1.13	223.60
2	2.74	134.06	22	2.26	148.48	42	1.79	157.97	62	1.41	188.47	82	1.10	220.71
3	2.40	134.44	23	2.17	147.75	43	1.83	159.39	63	1.38	186.41	83	1.06	216.54
4	2.82	134.44	24	2.04	145.55	44	1.8	157.97	64	1.37	185.72	84	1.18	225.84
5	2.56	134.44	25	2.14	147.75	45	1.77	155.85	65	1.43	188.47	85	1.22	228.41
6	2.80	134.44	26	2.12	147.75	46	1.83	159.39	66	1.45	189.85	86	1.05	215.58
7	2.67	134.44	27	2.16	147.75	47	1.8	157.97	67	1.41	187.79	87	1.09	219.43
8	2.86	133.69	28	2.00	145.55	48	1.86	160.10	68	1.4	187.79	88	1.12	222.64
9	2.50	134.06	29	2.14	146.28	49	1.75	156.55	69	1.38	186.41	89	1.16	224.56
10	2.40	134.06	30	2.02	145.55	50	1.86	160.10	70	1.44	189.16	90	1.10	221.35
11	2.76	132.93	31	2.00	145.55	51	1.85	159.39	71	1.39	187.10	91	1.06	216.22
12	2.70	133.69	32	1.98	144.82	52	1.88	159.39	72	1.42	188.47	92	1.15	223.28
13	2.54	133.69	33	2.14	147.75	53	1.79	157.26	73	1.39	186.41	93	1.02	211.73
14	3.00	134.44	34	2.04	145.55	54	1.83	159.39	74	1.35	184.35	94	1.07	218.46
15	2.58	132.93	35	2.08	147.75	55	1.75	156.55	75	1.38	187.10	95	1.00	209.80
16	2.68	134.44	36	2.06	147.02	56	1.82	157.26	76	1.41	188.47	96	1.20	227.77
17	2.72	134.44	37	2.00	145.55	57	1.84	155.85	77	1.36	184.35	97	1.06	214.94
18	2.60	132.93	38	2.04	146.28	58	1.77	156.55	78	1.38	187.10	98	1.09	219.43
19	3.16	135.20	39	2.04	147.02	59	1.78	157.26	79	1.41	188.47	99	1.02	211.73
20	2.44	132.93	40	2.02	146.28	60	1.74	155.85	80	1.43	189.16	100	1.05	215.58
m	2.69	133.97	m	2.05	146.72	m	1.80	157.86	m	1.40	187.41	m	1.09	219.38
SD	0.22	0.65	SD	0.08	1.15	SD	0.04	1.46	SD	0.03	1.50	SD	0.06	5.36

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลเบรกดาวน์ที่ $T = 30^{\circ}\text{C}$, $r = 2.5$ ม.ม., $g = 3$ ม.ม. ไข้ววก

ระดับที่ 1 = 194.25 kV			ระดับที่ 2 = 209.79 kV			ระดับที่ 3 = 233.1 kV			ระดับที่ 4 = 248.61 kV			ระดับที่ 5 = 264.18 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	T(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)
1	5.12	179.01	21	2.46	191.20	41	1.72	209.16	61	1.38	220.07	81	1.02	231.62
2	2.36	179.01	22	2.14	191.20	42	1.58	205.31	62	1.33	218.14	82	1.00	230.98
3	2.26	179.01	23	2.36	191.20	43	1.65	207.24	63	1.31	218.14	83	0.96	229.37
4	3.76	179.01	24	2.12	191.20	44	1.75	209.16	64	1.26	216.22	84	0.98	230.33
5	3.46	179.01	25	2.46	191.20	45	1.55	205.31	65	1.29	217.50	85	1.11	234.18
6	4.12	178.36	26	2.32	191.20	46	1.78	209.80	66	1.24	214.94	86	1.00	230.33
7	2.46	179.01	27	2.14	190.56	47	1.56	206.60	67	1.19	211.09	87	0.98	230.33
8	2.78	179.01	28	2.22	191.20	48	1.64	207.88	68	1.31	218.14	88	1.06	232.90
9	2.65	179.01	29	2.06	191.20	49	1.42	201.46	69	1.26	216.22	89	1.08	233.54
10	2.34	179.01	30	2.44	191.20	50	1.52	205.31	70	1.22	214.29	90	1.09	233.54
11	3.16	179.01	31	2.32	191.20	51	1.76	209.80	71	1.36	218.79	91	1.04	231.62
12	2.98	178.36	32	2.02	191.20	52	1.55	204.67	72	1.34	218.79	92	1.05	232.26
13	2.28	179.01	33	2.56	190.56	53	1.66	208.52	73	1.29	216.86	93	0.96	229.05
14	2.35	179.01	34	2.32	191.20	54	1.56	205.95	74	1.22	213.01	94	0.94	225.20
15	3.14	179.01	35	2.26	191.20	55	1.44	201.46	75	1.18	209.16	95	1.01	230.33
16	4.26	179.01	36	2.18	191.20	56	1.68	207.88	76	1.35	220.07	96	1.06	232.26
17	2.86	179.01	37	2.08	191.20	57	1.44	202.75	77	1.29	216.86	97	0.94	227.13
18	3.52	179.01	38	2.48	191.20	58	1.50	204.67	78	1.35	219.43	98	0.98	229.69
19	2.68	179.01	39	2.5	191.20	59	1.53	205.95	79	1.20	213.01	99	1.00	230.98
20	2.26	179.01	40	2.11	190.56	60	1.62	207.88	80	1.18	209.80	100	0.94	225.20
m	2.82	178.94	m	2.29	191.10	m	1.57	206.34	m	1.29	216.03	m	1.00	230.54
SD	0.79	0.20	SD	0.17	0.24	SD	0.11	2.54	SD	0.06	3.32	SD	0.05	2.50

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลเบรกคาวานที่ $T = 30^{\circ}\text{C}$, $r = 2.5$ ม.ม., $g = 5$ ม.ม. ไข้วลป

ระดับที่ 1 = 170.94 kV			ระดับที่ 2 = 202.02 kV			ระดับที่ 3 = 233.1 kV			ระดับที่ 4 = 279.72 kV			ระดับที่ 5 = 318.57 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)
1	3.64	158.48	21	2.94	186.71	41	2.10	212.37	61	1.56	246.37	81	1.15	272.68
2	2.96	158.48	22	2.46	186.71	42	2.06	212.37	62	1.62	250.87	82	1.07	271.40
3	2.76	158.48	23	2.62	186.71	43	2.02	212.37	63	1.50	244.45	83	1.03	268.19
4	3.24	158.48	24	2.48	186.71	44	1.92	211.73	64	1.55	246.37	84	1.13	273.32
5	4.41	158.48	25	2.24	186.71	45	1.97	212.37	65	1.47	242.52	85	1.11	272.04
6	3.50	158.48	26	2.36	186.71	46	2.04	212.37	66	1.58	249.58	86	1.02	266.91
7	2.98	158.48	27	2.50	186.71	47	2.00	212.37	67	1.55	243.81	87	1.05	268.83
8	3.60	158.48	28	2.60	186.71	48	1.88	210.44	68	1.49	242.52	88	1.15	273.96
9	4.14	158.48	29	2.28	186.06	49	2.02	212.37	69	1.60	251.51	89	1.05	270.76
10	3.26	158.48	30	2.32	186.71	50	1.93	211.73	70	1.56	247.66	90	1.14	275.25
11	3.16	158.48	31	2.38	186.71	51	2.06	212.37	71	1.47	243.17	91	1.10	272.68
12	3.76	158.48	32	2.72	186.71	52	2.00	212.37	72	1.54	246.37	92	1.04	268.83
13	4.22	158.48	33	2.58	186.71	53	1.95	211.73	73	1.56	245.09	93	1.11	273.32
14	2.88	158.48	34	2.86	186.71	54	2.02	212.37	74	1.60	249.58	94	1.08	270.11
15	2.96	158.48	35	2.62	186.71	55	1.97	212.37	75	1.62	250.22	95	1.13	274.60
16	3.54	158.48	36	2.44	186.06	56	1.99	212.37	76	1.57	248.94	96	1.07	272.04
17	3.76	158.48	37	2.84	186.71	57	1.88	211.09	77	1.44	242.20	97	1.16	275.89
18	4.06	158.48	38	2.26	186.71	58	2.06	212.37	78	1.52	247.02	98	1.05	268.83
19	3.64	158.48	39	2.38	186.71	59	2.04	212.37	79	1.55	245.73	99	1.13	275.25
20	3.50	158.48	40	2.42	186.06	60	2.00	212.37	80	1.58	250.22	100	1.02	265.94
m	3.52	158.48	M	2.47	186.61	m	2.00	212.11	m	1.56	246.71	m	1.09	271.54
SD	0.47	0.00	SD	0.20	0.24	SD	0.06	0.53	SD	0.05	3.02	SD	0.05	2.90

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลเบรกคาวานที่ $T = 30^{\circ}\text{C}$, $r = 2.5$ ม.ม., $g = 5$ ม.ม. ไข้ววก

ระดับที่ 1 = 202.02 kV			ระดับที่ 2 = 217.56 kV			ระดับที่ 3 = 233.1 kV			ระดับที่ 4 = 264.18 kV			ระดับที่ 5 = 295.26 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)
1	4.10	187.99	21	2.24	198.90	41	2.00	211.73	61	1.52	235.47	81	1.05	250.87
2	3.98	187.99	22	2.20	198.90	42	1.97	210.44	62	1.48	234.18	82	1.04	250.22
3	2.54	187.99	23	2.15	198.90	43	2.01	211.09	63	1.37	231.62	83	1.10	252.79
4	2.76	187.99	24	2.32	198.90	44	2.22	213.01	64	1.35	230.98	84	0.98	246.37
5	3.86	187.99	25	2.56	198.90	45	2.05	211.73	65	1.46	233.54	85	1.03	249.58
6	2.44	187.99	26	2.30	198.90	46	1.94	208.52	66	1.34	230.66	86	0.96	245.73
7	2.58	187.99	27	2.15	198.90	47	2.10	211.73	67	1.50	234.83	87	1.02	248.30
8	2.65	187.35	28	2.24	198.90	48	2.08	211.73	68	1.35	231.62	88	1.03	248.94
9	3.28	187.99	29	2.12	198.90	49	1.92	207.88	69	1.37	232.90	89	0.98	246.37
10	2.98	187.99	30	2.10	198.25	50	1.95	209.16	70	1.30	230.33	90	1.00	247.02
11	3.64	187.99	31	2.48	198.90	51	1.97	209.80	71	1.52	235.47	91	1.02	248.30
12	3.42	187.99	32	2.26	198.90	52	2.05	211.09	72	1.50	234.18	92	1.04	250.22
13	2.34	187.99	33	2.40	198.90	53	2.12	213.01	73	1.50	233.86	93	1.06	251.83
14	2.46	187.99	34	2.34	198.90	54	1.99	211.73	74	1.33	231.30	94	1.05	250.87
15	4.00	187.99	35	2.08	198.25	55	1.98	211.09	75	1.30	229.69	95	1.00	247.66
16	3.41	187.35	36	2.18	198.90	56	1.94	208.52	76	1.36	232.58	96	0.96	245.73
17	2.78	187.99	37	2.16	198.25	57	1.92	207.88	77	1.32	230.98	97	0.92	243.81
18	2.66	187.99	38	2.24	198.90	58	2.01	211.73	78	1.48	235.15	98	1.05	249.90
19	3.12	187.99	39	2.27	198.90	59	1.97	209.80	79	1.32	230.66	99	1.02	248.62
20	2.56	187.99	40	2.12	198.25	60	1.95	209.16	80	1.36	231.62	100	1.00	247.02
1	4.10	187.99	21	2.24	198.90	41	2.00	211.73	61	1.52	235.47	81	1.05	250.87
SD	0.59	0.20	SD	0.13	0.26	SD	0.08	1.60	SD	0.08	1.87	SD	0.04	2.31

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $T = 30^{\circ}\text{C}$, $r = 2.5$ ม.ม., $g = 10$ ม.ม. ไข้วลบ

ระดับที่ 1 = 233.1 kV			ระดับที่ 2 = 264.18 kV			ระดับที่ 3 = 295.26 kV			ระดับที่ 4 = 324.94 kV			ระดับที่ 5 = 357.42 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)
1	3.94	218.14	21	2.36	241.24	41	1.76	266.26	61	1.68	291.93	81	1.22	305.72
2	2.98	218.14	22	2.40	241.24	42	1.82	263.38	62	1.60	288.72	82	1.18	301.23
3	3.14	218.14	23	2.44	241.24	43	1.84	265.62	63	1.47	282.95	83	1.10	295.46
4	2.94	218.14	24	2.32	240.60	44	1.76	265.94	64	1.38	279.10	84	1.20	303.80
5	3.82	218.14	25	2.36	241.24	45	1.72	263.06	65	1.34	274.93	85	1.05	291.29
6	2.88	217.50	26	2.74	241.24	46	1.76	262.41	66	1.52	284.87	86	1.08	294.17
7	2.98	218.14	27	2.38	241.24	47	1.78	263.70	67	1.32	273.64	87	1.16	299.31
8	3.76	218.14	28	2.54	241.24	48	1.80	264.34	68	1.37	276.85	88	1.19	301.87
9	3.64	218.14	29	2.36	240.60	49	1.68	264.98	69	1.56	286.15	89	1.12	296.10
10	2.92	217.50	30	2.64	241.24	50	1.64	261.13	70	1.31	273.32	90	1.06	292.57
11	3.26	218.14	31	2.28	241.24	51	1.86	260.49	71	1.44	282.30	91	1.17	300.27
12	3.88	218.14	32	2.26	241.24	52	1.70	266.91	72	1.40	280.38	92	1.04	289.68
13	2.98	218.14	33	2.38	241.24	53	1.78	261.45	73	1.50	284.23	93	1.20	305.08
14	3.18	218.14	34	2.48	241.24	54	1.82	262.74	74	1.38	277.49	94	1.14	298.66
15	3.26	218.14	35	2.32	241.24	55	1.64	265.30	75	1.58	286.47	95	1.10	294.82
16	3.44	218.14	36	2.58	241.24	56	1.82	260.49	76	1.40	278.78	96	1.18	304.44
17	2.84	218.14	37	2.22	241.24	57	1.72	265.62	77	1.45	282.30	97	1.14	297.38
18	3.00	218.14	38	2.40	241.24	58	1.64	261.77	78	1.53	284.55	98	1.08	294.17
19	3.24	218.14	39	2.30	241.24	59	1.69	259.85	79	1.30	274.60	99	1.00	288.40
20	3.38	218.14	40	2.34	240.60	60	1.59	261.13	80	1.55	285.51	100	1.06	292.89
m	3.21	218.08	m	2.37	241.15	m	1.76	263.33	m	1.45	281.45	m	1.13	297.37
SD	0.36	0.20	SD	0.13	0.24	SD	0.08	2.20	SD	0.11	5.26	SD	0.06	5.24

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $T = 30^{\circ}\text{C}$, $r = 2.5$ ม.ม., $g = 10$ ม.ม. ไข้ววบก

ระดับที่ 1 = 202.02 kV			ระดับที่ 2 = 233.1 kV			ระดับที่ 3 = 264.18 kV			ระดับที่ 4 = 295.26 kV			ระดับที่ 5 = 324.94 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)
1	2.83	188.63	21	2.11	213.65	41	1.84	242.52	61	1.36	257.28	81	1.06	282.30
2	2.76	188.63	22	2.33	213.65	42	1.70	235.79	62	1.42	260.49	82	1.09	284.23
3	2.70	188.63	23	2.08	213.65	43	1.72	236.75	63	1.32	256.00	83	1.03	281.66
4	4.32	188.63	24	2.06	213.65	44	1.67	231.94	64	1.30	255.04	84	1.05	282.30
5	3.26	188.63	25	2.02	213.01	45	1.78	239.96	65	1.28	252.79	85	1.00	278.45
6	2.98	188.63	26	2.04	213.65	46	1.74	237.39	66	1.37	258.56	86	1.02	279.74
7	3.22	188.63	27	2.21	213.65	47	1.72	236.11	67	1.34	256.64	87	0.94	259.85
8	4.12	188.63	28	2.12	213.65	48	1.80	241.88	68	1.28	253.43	88	1.00	280.38
9	2.68	188.63	29	2.08	213.65	49	1.66	232.26	69	1.22	250.22	89	1.05	282.30
10	2.76	188.63	30	2.02	213.01	50	1.74	235.47	70	1.25	254.72	90	0.96	275.25
11	3.54	188.63	31	2.20	213.65	51	1.82	241.24	71	1.40	259.85	91	1.10	284.87
12	2.64	188.63	32	2.16	213.65	52	1.78	238.68	72	1.36	258.24	92	1.04	281.02
13	2.54	188.63	33	2.10	213.65	53	1.74	234.83	73	1.34	257.28	93	0.98	270.11
14	3.33	188.63	34	2.00	213.01	54	1.68	233.54	74	1.28	253.43	94	0.96	263.70
15	2.94	188.63	35	2.08	213.65	55	1.64	231.62	75	1.22	251.51	95	1.00	280.38
16	2.82	188.63	36	2.12	213.65	56	1.76	239.32	76	1.20	248.94	96	1.08	282.95
17	4.00	188.63	37	2.18	213.65	57	1.70	234.83	77	1.38	259.21	97	0.96	259.85
18	3.16	188.63	38	2.04	213.65	58	1.75	237.07	78	1.25	252.15	98	1.04	280.38
19	2.76	188.63	39	2.09	213.65	59	1.71	234.18	79	1.20	248.94	99	1.02	277.81
20	2.70	188.63	40	2.11	213.65	60	1.68	232.26	80	1.36	257.92	100	0.96	273.32
m	2.89	188.63	m	2.10	213.56	m	1.73	236.38	m	1.31	255.13	m	1.02	277.04
SD	0.52	0.00	SD	0.08	0.24	SD	0.05	3.37	SD	0.07	3.58	SD	0.05	7.77

ก.2 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $T = 30^{\circ}\text{C}$, $r = 5$ ม.ม.

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $T = 30^{\circ}\text{C}$, $r = 5$ ม.ม., $g = 3$ ม.ม. ไข้วล

ระดับที่ 1 = 170.94 kV			ระดับที่ 2 = 202.02 kV			ระดับที่ 3 = 233.1 kV			ระดับที่ 4 = 264.18 kV			ระดับที่ 5 = 295.26 kV		
No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)
1	3.30	159.75	21	2.72	186.06	41	1.80	207.64	61	1.54	229.43	81	1.22	268.20
2	3.24	159.76	22	2.52	185.42	42	1.68	205.72	62	1.50	227.50	82	1.12	254.72
3	3.56	159.75	23	2.08	185.42	43	1.72	206.36	63	1.32	224.94	83	1.14	256.64
4	4.68	159.75	24	2.56	186.06	44	1.64	205.72	64	1.52	230.71	84	1.12	252.16
5	5.36	160.40	25	2.08	185.42	45	2.02	207.64	65	1.50	228.79	85	1.12	253.44
6	2.74	159.76	26	2.08	185.42	46	1.88	207.00	66	1.60	229.43	86	1.10	246.38
7	3.10	159.76	27	2.26	185.42	47	1.74	206.36	67	1.42	226.22	87	1.18	259.85
8	3.62	159.75	28	2.32	186.06	48	1.88	207.00	68	1.44	229.43	88	1.14	252.80
9	5.50	160.40	29	2.08	185.42	49	2.02	207.00	69	1.50	229.43	89	1.06	250.23
10	5.04	160.40	30	2.20	185.42	50	1.80	206.36	70	1.38	223.01	90	1.24	269.16
11	3.90	159.75	31	2.18	185.42	51	1.72	207.00	71	1.32	218.52	91	1.14	254.08
12	3.92	159.75	32	2.28	186.06	52	1.68	206.36	72	1.34	221.73	92	1.10	248.31
13	3.20	159.76	33	2.16	185.42	53	1.74	206.36	73	1.36	226.22	93	1.08	232.27
14	3.20	159.75	34	2.18	186.06	54	1.80	207.00	74	1.44	227.50	94	1.22	267.55
15	2.44	159.75	35	2.22	185.42	55	1.68	205.72	75	1.54	230.71	95	1.14	253.76
16	2.70	159.76	36	2.30	185.42	56	1.78	206.36	76	1.42	228.15	96	1.12	253.12
17	2.86	159.76	37	2.26	185.42	57	1.73	205.72	77	1.52	228.79	97	1.06	223.28
18	3.42	159.75	38	2.02	185.42	58	1.70	205.08	78	1.38	226.22	98	1.20	263.70
19	3.76	160.40	39	2.34	185.42	59	1.68	205.08	79	1.50	231.35	99	1.10	239.32
20	2.44	159.76	40	2.26	185.42	60	1.60	205.08	80	1.38	228.79	100	1.14	254.08
m	3.36	159.88	m	2.24	185.58	m	1.74	206.33	m	1.44	227.34	m	1.13	252.65
SD	0.91	0.26	SD	0.18	0.29	SD	0.11	0.79	SD	0.08	3.25	SD	0.05	11.37

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $T = 30^{\circ}\text{C}$, $r = 5$ ม.ม., $g = 3$ ม.ม. ไข้วบก

ระดับที่ 1 = 186.48 kV			ระดับที่ 2 = 217.56 kV			ระดับที่ 3 = 248.67 kV			ระดับที่ 4 = 279.72 kV			ระดับที่ 5 = 310.8 kV		
No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)
1	4.97	176.76	21	2.28	203.39	41	1.74	231.62	61	1.29	248.30	81	1.13	268.83
2	3.67	176.76	22	2.30	203.39	42	1.58	223.28	62	1.36	251.83	82	1.05	264.98
3	3.32	176.76	23	2.46	203.39	43	1.70	229.69	63	1.31	247.02	83	0.98	256.64
4	3.20	176.76	24	2.35	203.39	44	1.61	225.84	64	1.34	251.51	84	1.06	263.70
5	3.54	176.76	25	2.12	203.39	45	1.76	231.94	65	1.30	247.66	85	1.05	263.06
6	4.58	176.76	26	2.52	203.39	46	1.66	227.45	66	1.35	250.87	86	1.01	258.56
7	4.30	176.76	27	2.31	203.39	47	1.69	229.69	67	1.22	242.85	87	0.95	252.47
8	3.74	176.76	28	2.18	203.39	48	1.55	221.99	68	1.14	239.00	88	0.99	257.60
9	2.98	176.76	29	2.09	203.39	49	1.53	219.11	69	1.34	250.54	89	1.17	271.72
10	3.18	176.76	30	2.19	203.39	50	1.56	222.96	70	1.32	249.58	90	1.06	263.06
11	4.21	176.76	31	2.24	203.39	51	1.65	226.16	71	1.23	244.45	91	0.98	256.00
12	2.90	176.76	32	2.22	203.39	52	1.61	225.84	72	1.27	246.37	92	1.15	271.40
13	2.78	176.76	33	2.16	203.39	53	1.49	217.50	73	1.20	242.20	93	0.96	256.00
14	4.23	176.76	34	2.15	203.39	54	1.72	230.33	74	1.37	251.83	94	1.05	263.06
15	3.65	176.76	35	2.48	204.03	55	1.58	223.92	75	1.17	240.60	95	1.01	258.56
16	3.21	176.76	36	2.53	203.39	56	1.77	231.94	76	1.32	247.98	96	1.07	263.70
17	3.45	176.76	37	2.33	203.39	57	1.56	223.28	77	1.26	246.05	97	0.99	257.60
18	3.02	176.76	38	2.21	203.39	58	1.68	229.05	78	1.37	251.51	98	1.12	269.47
19	3.12	176.76	39	2.31	203.39	59	1.61	225.84	79	1.11	236.75	99	1.08	264.98
20	2.88	176.76	40	2.26	203.39	60	1.62	225.84	80	1.20	242.20	100	0.95	255.04
m	3.39	176.76	m	2.27	203.42	m	1.62	226.16	m	1.30	246.45	m	1.05	261.82
SD	0.62	0.00	SD	0.13	0.14	SD	0.08	4.13	SD	0.08	4.59	SD	0.07	5.68

ก.3 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $T = 30^{\circ}\text{C}$, $r = 10$ ม.ม.

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $T = 30^{\circ}\text{C}$, $r = 10$ ม.ม., $g = 3$ ม.ม. ไข้วลบ

ระดับที่ 1 = 170.94 kV			ระดับที่ 2 = 202.02 kV			ระดับที่ 3 = 233.1 kV			ระดับที่ 4 = 264.18 kV			ระดับที่ 5 = 295.26 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)
1	4.02	159.12	21	2.15	186.71	41	1.72	209.16	61	1.44	238.68	81	1.05	255.36
2	3.70	159.12	22	3.00	186.71	42	1.78	211.73	62	1.38	234.18	82	1.12	259.21
3	3.00	159.12	23	2.29	186.71	43	1.51	206.60	63	1.50	243.17	83	1.03	253.11
4	3.48	159.12	24	2.58	186.71	44	1.82	213.33	64	1.31	231.62	84	1.12	258.56
5	3.72	159.12	25	2.25	186.06	45	1.74	210.12	65	1.34	232.58	85	1.19	263.70
6	3.95	159.12	26	2.22	186.71	46	1.76	211.73	66	1.42	236.75	86	1.13	259.85
7	3.25	159.12	27	2.36	186.71	47	1.79	212.69	67	1.32	232.58	87	1.14	261.45
8	3.86	159.12	28	2.20	186.71	48	1.50	205.95	68	1.48	240.92	88	1.15	262.41
9	2.85	159.12	29	2.15	186.71	49	1.65	208.52	69	1.32	231.62	89	1.10	259.85
10	3.12	159.12	30	2.12	186.06	50	1.53	206.60	70	1.38	234.18	90	1.20	263.99
11	4.10	159.12	31	2.27	186.71	51	1.75	210.44	71	1.34	232.26	91	1.03	253.11
12	2.98	159.12	32	2.17	186.71	52	1.52	206.27	72	1.42	237.39	92	1.00	248.94
13	2.64	158.48	33	2.44	186.71	53	1.76	211.09	73	1.29	230.33	93	1.06	256.00
14	3.75	159.12	34	2.36	186.71	54	1.63	207.88	74	1.50	242.52	94	1.13	260.17
15	3.44	159.12	35	2.05	186.71	55	1.78	212.69	75	1.48	240.92	95	1.01	250.54
16	3.48	159.12	36	2.60	186.06	56	1.81	212.69	76	1.50	242.52	96	1.05	255.36
17	3.25	159.12	37	2.28	186.71	57	1.77	211.73	77	1.39	234.50	97	1.12	259.21
18	2.92	159.12	38	2.14	186.71	58	1.66	208.52	78	1.40	235.47	98	1.03	251.83
19	3.00	159.12	39	2.48	186.71	59	1.78	212.69	79	1.35	233.54	99	1.10	258.56
20	3.86	159.12	40	2.08	186.06	60	1.76	211.09	80	1.32	231.30	100	1.00	248.94
m	3.46	159.08	m	2.26	186.58	m	1.75	210.08	m	1.39	235.85	m	1.1	257.01
SD	0.44	0.14	SD	0.23	0.26	SD	0.11	2.45	SD	0.07	4.23	SD	0.06	4.69

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $T = 30^{\circ}\text{C}$, $r = 10$ ม.ม., $g = 3$ ม.ม. ไข้ววก

ระดับที่ 1 = 209.75 kV			ระดับที่ 2 = 233.1 kV			ระดับที่ 3 = 264.18 kV			ระดับที่ 4 = 295.26 kV			ระดับที่ 5 = 326.34 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)
1	2.73	198.25	21	2.42	220.07	41	1.90	240.92	61	1.42	263.70	81	1.13	275.89
2	3.35	198.25	22	2.21	220.07	42	1.83	239.32	62	1.35	260.49	82	1.16	277.81
3	2.88	198.25	23	2.10	220.07	43	1.77	236.11	63	1.22	247.02	83	1.06	272.68
4	3.68	198.25	24	2.35	220.07	44	1.62	231.62	64	1.48	265.62	84	1.18	278.45
5	2.55	198.25	25	2.50	220.07	45	1.85	239.32	65	1.32	258.56	85	0.96	250.22
6	2.64	198.25	26	2.15	220.07	46	1.65	232.90	66	1.44	264.66	86	1.10	274.60
7	3.98	198.25	27	2.22	220.07	47	1.60	230.33	67	1.32	258.56	87	1.22	281.66
8	3.24	198.25	28	2.06	220.07	48	1.58	229.05	68	1.34	261.77	88	1.03	263.70
9	2.96	198.25	29	2.45	220.07	49	1.78	236.75	69	1.24	250.22	89	1.05	270.76
10	2.76	198.25	30	2.18	220.07	50	1.64	232.26	70	1.43	263.70	90	1.14	276.53
11	4.22	198.25	31	2.20	220.07	51	1.68	234.18	71	1.28	254.07	91	1.12	275.89
12	2.70	198.25	32	2.58	220.07	52	1.75	236.11	72	1.42	263.06	92	0.98	247.02
13	2.86	198.25	33	2.28	220.07	53	1.62	232.90	73	1.30	256.64	93	1.20	280.38
14	3.42	198.25	34	2.16	220.07	54	1.60	231.62	74	1.38	262.41	94	1.10	275.25
15	2.76	198.25	35	2.48	220.07	55	1.55	230.33	75	1.35	260.49	95	1.14	276.85
16	3.24	198.25	36	2.22	220.07	56	1.50	229.05	76	1.25	252.15	96	1.12	275.25
17	3.62	198.25	37	2.30	220.07	57	1.72	236.75	77	1.46	264.98	97	0.98	252.79
18	2.90	198.25	38	2.25	220.07	58	1.64	233.54	78	1.32	257.92	98	1.08	272.68
19	3.58	198.25	39	2.46	220.07	59	1.66	234.83	79	1.29	255.04	99	1.10	274.60
20	2.95	198.25	40	2.20	220.07	60	1.78	237.39	80	1.22	247.02	100	0.96	242.52
m	2.96	198.25	m	2.235	220.07	m	1.66	234.26	m	1.33	258.40	m	1.10	269.78
SD	0.47	0.00	SD	0.15	0.00	SD	0.11	3.50	SD	0.08	5.84	SD	0.08	11.82

ก.4 ข้อมูลเบรกดาวน์ที่ $T = 55^{\circ}\text{C}$, $r = 2.5$ ม.ม.

ตารางที่ ก.11 ข้อมูลเบรกดาวน์ที่ $T = 55^{\circ}\text{C}$, $r = 2.5$ ม.ม., $g = 3$ ม.ม. ไข้วลป

ระดับที่ 1 = 147.63 kV			ระดับที่ 2 = 170.94 kV			ระดับที่ 3 = 201.02 kV			ระดับที่ 4 = 233.1 kV			ระดับที่ 5 = 264.18 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	T(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)
1	3.18	136.02	21	2.31	155.27	41	1.82	180.24	61	1.34	203.59	81	1.21	227.77
2	2.84	136.02	22	2.32	155.27	42	1.85	180.24	62	1.36	206.35	82	1.15	224.56
3	3.56	136.02	23	2.23	155.27	43	1.76	178.11	63	1.39	207.72	83	1.11	219.43
4	2.82	136.02	24	2.10	155.27	44	1.8	180.24	64	1.25	200.50	84	1.20	226.48
5	3.98	136.02	25	2.20	155.27	45	1.72	177.41	65	1.37	206.35	85	1.18	226.81
6	2.78	136.02	26	2.18	155.27	46	1.79	178.11	66	1.39	207.72	86	1.15	223.92
7	2.67	136.02	27	2.22	155.27	47	1.81	176.70	67	1.36	205.66	87	1.11	219.75
8	2.86	136.02	28	2.06	155.27	48	1.74	177.41	68	1.22	198.25	88	1.23	229.05
9	3.45	136.02	29	2.20	155.91	49	1.75	178.11	69	1.44	208.52	89	1.07	214.94
10	2.68	136.02	30	2.08	155.27	50	1.71	176.70	70	1.37	206.35	90	1.10	218.79
11	3.25	136.02	31	2.06	155.27	51	1.74	178.11	71	1.25	201.46	91	1.05	213.01
12	2.72	136.02	32	2.04	155.27	52	1.76	178.82	72	1.37	205.66	92	1.25	230.98
13	2.54	136.02	33	2.20	155.27	53	1.8	180.24	73	1.33	203.59	93	1.10	218.79
14	3.08	136.02	34	2.10	155.27	54	1.77	178.82	74	1.36	206.35	94	1.14	222.64
15	3.21	136.02	35	2.14	155.91	55	1.74	176.70	75	1.39	207.72	95	1.17	225.84
16	3.44	136.02	36	2.12	155.27	56	1.8	180.24	76	1.34	203.59	96	1.20	226.48
17	2.72	136.02	37	2.06	155.27	57	1.77	178.82	77	1.27	201.46	97	1.27	231.62
18	3.54	136.02	38	2.10	155.27	58	1.83	180.95	78	1.38	207.03	98	1.30	230.98
19	2.78	136.02	39	2.10	155.27	59	1.72	177.41	79	1.36	205.66	99	1.07	214.94
20	3.16	136.02	40	2.08	155.27	60	1.83	180.95	80	1.42	208.41	100	1.11	218.14
m	2.97	136.02	m	2.11	155.33	m	1.77	178.72	m	1.36	205.10	M	1.15	223.24
SD	0.38	0.00	SD	0.08	0.20	SD	0.04	1.46	SD	0.06	2.86	SD	0.07	5.72

ตารางที่ ก.12 ข้อมูลเบรกดาวน์ที่ $T = 55^{\circ}\text{C}$, $r = 2.5$ ม.ม., $g = 3$ ม.ม. ไข้ววก

ระดับที่ 1 = 186.48 kV			ระดับที่ 2 = 217.56kV			ระดับที่ 3 = 233.1kV			ระดับที่ 4 = 248.64 kV			ระดับที่ 5 = 279.72 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)
1	3.02	174.84	21	2.30	199.54	41	1.75	215.90	61	1.55	227.77	81	1.15	247.34
2	2.8	174.84	22	2.27	199.54	42	1.61	211.09	62	1.35	214.94	82	1.08	244.13
3	2.87	174.84	23	2.33	199.54	43	1.73	215.58	63	1.47	221.99	83	1.05	241.88
4	3.26	174.84	24	2.17	199.54	44	1.66	212.37	64	1.57	228.09	84	1.11	245.73
5	3.57	174.84	25	2.25	199.54	45	1.80	218.14	65	1.43	220.07	85	1.17	248.62
6	3.04	174.84	26	2.58	199.54	46	1.59	209.16	66	1.53	227.77	86	1.03	241.24
7	2.94	174.84	27	2.42	199.54	47	1.76	216.54	67	1.40	218.14	87	1.20	251.51
8	2.76	174.84	28	2.21	199.54	48	1.58	208.52	68	1.48	221.35	88	1.07	242.52
9	3.13	174.84	29	2.14	199.54	49	1.68	213.01	69	1.39	218.14	89	1.03	238.03
10	3.03	174.84	30	2.30	199.54	50	1.72	214.94	70	1.37	216.22	90	1.18	249.58
11	2.45	174.84	31	2.35	199.54	51	1.72	214.94	71	1.56	227.77	91	1.12	246.37
12	2.85	174.84	32	2.22	199.54	52	1.66	212.37	72	1.51	223.92	92	1.09	245.41
13	3.12	174.84	33	2.14	199.54	53	1.74	216.22	73	1.43	219.75	93	1.01	234.18
14	3.42	174.84	34	2.46	199.54	54	1.70	213.01	74	1.39	218.46	94	1.10	245.09
15	2.45	174.84	35	2.19	199.54	55	1.56	207.88	75	1.41	219.43	95	1.05	241.24
16	2.78	174.84	36	2.10	199.54	56	1.52	207.24	76	1.53	226.48	96	1.11	245.73
17	2.98	174.84	37	2.09	199.54	57	1.68	212.37	77	1.50	223.28	97	1.17	248.62
18	2.85	174.84	38	2.32	199.54	58	1.55	207.88	78	1.47	221.99	98	1.03	239.96
19	3.22	174.84	39	2.28	199.54	59	1.68	213.01	79	1.37	216.22	99	1.20	251.51
20	3.33	174.84	40	2.08	199.54	60	1.74	215.58	80	1.43	220.07	100	1.00	233.54
m	3.00	174.84	m	2.26	199.54	m	1.68	212.79	m	1.45	221.59	m	1.10	244.11
SD	0.29	0.00	SD	0.13	0.00	SD	0.08	3.27	SD	0.07	4.21	SD	0.06	5.09

ตารางที่ ก.13 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $T = 55^{\circ}\text{C}$, $r = 2.5$ ม.ม., $g = 5$ ม.ม. ไข้วลป

ระดับที่ 1 = 233.1 kV			ระดับที่ 2 = 264.18 kV			ระดับที่ 3 = 295.26 kV			ระดับที่ 4 = 326.34 kV			ระดับที่ 5 = 357.42 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	T(μs)	V(kV)
1	3.64	221.99	21	2.42	240.60	41	1.79	267.55	61	1.44	293.85	81	1.16	312.78
2	3.42	221.99	22	2.12	240.60	42	1.74	264.02	62	1.26	282.30	82	1.08	305.40
3	2.98	221.99	23	2.32	240.60	43	1.83	271.40	63	1.35	287.44	83	1.04	298.34
4	3.25	221.99	24	2.41	240.60	44	1.65	260.49	64	1.24	279.74	84	1.10	308.93
5	3.15	221.99	25	2.25	239.96	45	1.88	274.28	65	1.37	288.72	85	1.14	310.53
6	2.87	221.99	26	2.18	240.60	46	1.80	267.87	66	1.32	286.47	86	1.12	310.21
7	3.40	221.99	27	2.29	240.60	47	1.90	269.47	67	1.28	284.23	87	1.07	302.84
8	2.88	221.99	28	2.34	240.60	48	1.94	270.76	68	1.42	291.93	88	1.05	301.55
9	3.16	221.99	29	2.48	239.96	49	1.68	264.34	69	1.15	276.85	89	1.23	317.59
10	3.28	221.99	30	2.56	240.60	50	1.82	268.19	70	1.22	280.70	90	1.06	302.84
11	3.78	221.99	31	2.02	240.60	51	1.79	267.55	71	1.36	285.83	91	1.15	311.18
12	2.78	221.99	32	2.18	240.60	52	1.70	264.98	72	1.23	279.10	92	1.10	306.04
13	2.84	221.99	33	2.39	240.60	53	1.76	266.26	73	1.38	286.47	93	1.18	315.67
14	3.34	221.99	34	2.25	240.60	54	1.73	265.62	74	1.19	278.78	94	1.08	305.40
15	3.46	221.99	35	2.44	240.60	55	1.71	264.98	75	1.32	283.91	95	1.20	314.38
16	3.02	221.99	36	2.34	239.96	56	1.93	269.79	76	1.28	282.62	96	1.08	304.12
17	3.56	221.99	37	2.22	240.60	57	1.72	263.06	77	1.17	277.49	97	1.22	317.27
18	2.76	221.99	38	2.15	240.60	58	1.84	272.04	78	1.26	281.98	98	1.14	311.18
19	2.92	221.99	39	2.08	240.60	59	1.70	264.34	79	1.42	293.53	99	1.19	315.67
20	3.30	221.99	40	2.20	240.60	60	1.82	268.19	80	1.36	288.08	100	1.08	305.40
m	3.21	221.99	m	2.27	240.50	m	1.79	267.26	m	1.30	284.50	m	1.11	308.87
SD	0.30	0.00	SD	0.14	0.24	SD	0.08	3.40	SD	0.09	5.10	SD	0.06	5.64

ตารางที่ ก.14 ข้อมูลเบรกดาวนที่ $T = 55^{\circ}\text{C}$, $r = 2.5$ ม.ม., $g = 5$ ม.ม. ไข้ววก

ระดับที่ 1 = 233.1 kV			ระดับที่ 2 = 264.18 kV			ระดับที่ 3 = 295.26 kV			ระดับที่ 4 = 326.34 kV			ระดับที่ 5 = 357.42 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	T(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)
1	2.85	219.43	21	2.18	240.60	41	1.47	258.56	61	1.15	260.81	81	1.08	284.23
2	4.94	219.43	22	2.03	240.60	42	1.65	263.06	62	1.31	269.47	82	1.12	285.83
3	3.45	219.43	23	2.10	240.60	43	1.72	264.66	63	1.27	268.19	83	1.05	281.34
4	3.10	219.43	24	2.29	240.60	44	1.56	261.45	64	1.22	264.34	84	1.00	278.13
5	2.31	219.43	25	2.16	240.60	45	1.66	263.06	65	1.35	270.11	85	0.94	270.76
6	2.52	219.43	26	2.25	240.60	46	1.70	264.34	66	1.26	267.55	86	0.94	269.47
7	4.03	219.43	27	2.21	240.60	47	1.44	257.92	67	1.23	266.26	87	1.11	285.51
8	3.66	219.43	28	2.02	240.60	48	1.58	261.77	68	1.19	263.70	88	1.07	283.59
9	3.07	219.43	29	2.15	240.60	49	1.55	261.13	69	1.23	264.66	89	1.03	279.10
10	2.73	219.43	30	2.20	240.60	50	1.46	258.56	70	1.37	271.40	90	0.98	273.96
11	3.79	219.43	31	2.06	240.60	51	1.52	259.85	71	1.16	262.41	91	1.06	283.59
12	2.94	219.43	32	2.35	240.60	52	1.49	259.21	72	1.32	269.47	92	1.10	285.19
13	2.62	219.43	33	2.11	240.60	53	1.47	258.56	73	1.28	268.19	93	1.08	282.30
14	3.54	219.43	34	2.22	240.60	54	1.69	263.38	74	1.19	263.06	94	0.96	272.04
15	3.80	219.43	35	2.04	240.60	55	1.74	264.98	75	1.27	267.55	95	0.94	270.76
16	3.44	219.43	36	2.54	240.60	56	1.63	262.41	76	1.26	267.55	96	1.02	279.10
17	2.88	219.43	37	2.07	240.60	57	1.65	263.06	77	1.17	263.06	97	1.10	284.87
18	3.11	219.43	38	2.43	240.60	58	1.58	261.45	78	1.19	263.70	98	1.07	283.59
19	3.03	219.43	39	2.10	240.60	59	1.44	257.60	79	1.30	268.83	99	1.02	278.45
20	3.10	219.43	40	2.06	240.60	60	1.49	259.21	80	1.28	268.19	100	0.96	271.40
m	3.10	219.43	m	2.16	240.60	m	1.57	261.21	m	1.26	266.42	m	1.04	279.16
SD	0.61	0.00	SD	0.14	0.00	SD	0.10	2.38	SD	0.06	2.98	SD	0.06	5.75

ตารางที่ ก.15 ข้อมูลเบรกดาวน์ที่ $T = 55^{\circ}\text{C}$, $r = 2.5$ ม.ม., $g = 10$ ม.ม. ไข้วลบ

ระดับที่ 1 = 233.1 kV			ระดับที่ 2 = 264.18 kV			ระดับที่ 3 = 295.26 kV			ระดับที่ 4 = 326.34 kV			ระดับที่ 5 = 357.42 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	T(μs)	V(kV)
1	2.82	220.07	21	2.48	245.73	41	1.7	263.06	61	1.35	287.12	81	1.17	299.95
2	2.87	220.07	22	2.10	245.73	42	1.76	264.66	62	1.45	291.93	82	1.26	304.76
3	3.26	220.07	23	2.58	245.73	43	1.67	259.21	63	1.39	289.36	83	1.09	296.42
4	2.98	220.07	24	2.32	245.73	44	1.8	265.62	64	1.35	284.23	84	1.18	300.91
5	3.45	220.07	25	2.22	245.73	45	1.77	264.98	65	1.45	290.32	85	1.20	301.55
6	3.12	220.07	26	2.15	245.73	46	1.72	263.06	66	1.39	288.40	86	1.07	293.53
7	3.05	220.07	27	2.08	245.73	47	1.62	256.64	67	1.38	284.55	87	1.10	297.06
8	2.78	220.07	28	2.35	245.73	48	1.7	263.06	68	1.27	281.66	88	1.18	300.27
9	3.22	219.43	29	2.42	245.73	49	1.68	259.85	69	1.32	283.27	89	1.10	297.06
10	3.18	220.07	30	2.82	246.37	50	1.65	257.28	70	1.48	293.85	90	1.23	303.16
11	3.45	220.07	31	2.16	245.73	51	1.68	260.17	71	1.35	283.91	91	1.10	296.42
12	3.00	220.07	32	2.06	245.73	52	1.72	263.06	72	1.32	283.59	92	1.08	293.85
13	2.94	220.07	33	2.19	245.73	53	1.7	263.06	73	1.45	291.93	93	1.12	297.70
14	2.88	220.07	34	2.34	246.37	54	1.82	266.26	74	1.26	281.34	94	1.30	306.36
15	3.04	220.07	35	2.27	245.73	55	1.68	259.85	75	1.41	289.36	95	1.10	297.06
16	3.28	220.07	36	2.10	245.73	56	1.69	260.49	76	1.39	288.72	96	1.20	301.55
17	3.06	220.07	37	2.20	245.73	57	1.76	264.34	77	1.34	286.80	97	1.15	298.99
18	2.72	220.07	38	2.11	245.73	58	1.63	257.92	78	1.43	291.93	98	1.07	293.53
19	2.85	220.07	39	2.38	245.73	59	1.8	265.30	79	1.3	282.95	99	1.25	303.80
20	2.76	220.07	40	2.33	245.73	60	1.6	255.68	80	1.31	283.27	100	1.28	304.12
m	3.02	220.04	m	2.245	245.80	m	1.70	261.68	m	1.37	286.92	m	1.16	299.40
SD	0.22	0.14	SD	0.19	0.20	SD	0.06	3.22	SD	0.06	3.88	SD	0.07	3.86

ตารางที่ ก.16 ข้อมูลเบรกดาวน์ที่ $T = 55^{\circ}\text{C}$, $r = 2.5$ ม.ม., $g = 10$ ม.ม. ไข้วบวก

ระดับที่ 1 = 233.1 kV			ระดับที่ 2 = 264.18 kV			ระดับที่ 3 = 295.26 kV			ระดับที่ 4 = 326.34 kV			ระดับที่ 5 = 357.42 kV		
1	3.63	221.35	21	2.23	246.37	41	1.70	262.41	61	1.35	284.23	81	1.17	303.16
2	3.42	221.35	22	2.11	246.37	42	1.76	265.62	62	1.45	290.32	82	1.10	300.27
3	2.42	221.35	23	2.34	246.37	43	1.67	260.17	63	1.39	288.40	83	1.20	306.36
4	3.56	221.35	24	2.05	246.37	44	1.69	261.77	64	1.41	289.36	84	1.00	291.93
5	3.42	221.35	25	2.14	246.37	45	1.66	259.53	65	1.40	288.40	85	1.12	300.91
6	2.85	221.35	26	2.27	246.37	46	1.60	257.60	66	1.32	283.27	86	1.08	297.06
7	2.56	221.35	27	2.15	246.37	47	1.76	265.94	67	1.48	290.64	87	1.15	301.55
8	2.78	221.35	28	2.06	246.37	48	1.80	266.58	68	1.30	282.62	88	1.03	294.49
9	3.12	221.35	29	2.22	246.37	49	1.74	264.66	69	1.32	283.59	89	1.09	297.70
10	2.65	221.35	30	2.36	246.37	50	1.68	261.45	70	1.38	284.55	90	1.05	293.85
11	2.45	221.35	31	2.15	246.37	51	1.77	265.94	71	1.26	282.62	91	1.11	298.34
12	3.46	221.35	32	2.08	246.37	52	1.65	260.81	72	1.35	284.55	92	1.10	300.27
13	2.89	221.35	33	2.16	246.37	53	1.58	257.60	73	1.50	292.25	93	1.18	303.48
14	2.78	221.35	34	2.38	246.37	54	1.68	261.13	74	1.42	287.12	94	1.06	298.34
15	2.98	221.35	35	2.21	246.37	55	1.72	264.02	75	1.24	281.98	95	1.09	299.63
16	3.25	221.35	36	2.05	246.37	56	1.62	258.89	76	1.32	283.27	96	1.18	304.76
17	3.12	221.35	37	2.10	246.37	57	1.60	258.24	77	1.46	291.61	97	1.00	291.29
18	3.33	221.35	38	2.42	246.37	58	1.74	264.02	78	1.30	282.62	98	1.07	296.74
19	2.96	221.35	39	2.11	246.37	59	1.68	260.81	79	1.48	290.32	99	1.10	300.27
20	2.56	221.35	40	2.03	246.37	60	1.58	257.60	80	1.28	285.83	100	1.09	298.34
m	2.97	221.35	m	2.15	246.37	m	1.68	261.74	m	1.37	286.38	m	1.10	298.94
SD	0.38	0.00	SD	0.12	0.00	SD	0.07	3.03	SD	0.08	3.47	SD	0.06	4.03
1	3.63	221.35	21	2.23	246.37	41	1.70	262.41	61	1.35	284.23	81	1.17	303.16

ก.5 ข้อมูลเบรกคาวานที่ $T = 55^{\circ}\text{C}$, $r = 5$ ม.ม.

ตารางที่ ก.17 ข้อมูลเบรกคาวานที่ $T = 55^{\circ}\text{C}$, $r = 5$ ม.ม., $g = 3$ ม.ม. ไข้วลอบ

ระดับที่ 1 = 233.1 kV			ระดับที่ 2 = 264.18 kV			ระดับที่ 3 = 295.26 kV			ระดับที่ 4 = 326.34 kV			ระดับที่ 5 = 357.42 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)
1	2.60	218.79	21	2.11	239.32	41	1.82	255.68	61	1.53	279.10	81	1.29	304.76
2	2.98	218.79	22	2.96	239.32	42	1.80	247.02	62	1.48	271.40	82	1.15	290.32
3	3.48	218.79	23	2.25	239.32	43	1.74	245.73	63	1.49	273.96	83	1.20	293.85
4	3.30	218.79	24	2.54	239.32	44	2.00	259.85	64	1.55	278.45	84	1.18	292.57
5	3.95	218.79	25	2.21	239.32	45	1.87	256.64	65	1.47	269.47	85	1.21	293.85
6	3.60	218.79	26	2.18	239.32	46	1.77	246.37	66	1.57	279.10	86	1.12	281.02
7	2.55	218.79	27	2.32	239.32	47	1.88	256.64	67	1.43	262.41	87	1.10	279.10
8	2.98	218.79	28	2.16	239.32	48	1.76	246.37	68	1.46	268.19	88	1.26	297.06
9	3.15	218.79	29	2.11	239.32	49	1.84	255.04	69	1.51	277.17	89	1.16	290.32
10	2.45	218.79	30	2.36	239.32	50	1.97	259.21	70	1.53	279.10	90	1.18	291.93
11	2.66	218.79	31	2.23	239.32	51	1.90	257.28	71	1.47	270.11	91	1.21	295.14
12	2.98	218.79	32	2.42	239.32	52	1.82	255.68	72	1.51	276.53	92	1.14	284.87
13	3.22	218.79	33	2.40	239.32	53	1.74	244.45	73	1.43	263.06	93	1.26	300.91
14	3.75	218.79	34	2.32	239.32	54	1.84	255.36	74	1.61	284.23	94	1.28	302.84
15	3.45	218.79	35	2.24	239.32	55	1.72	244.45	75	1.53	277.17	95	1.14	286.15
16	3.09	218.79	36	2.56	239.32	56	1.74	245.09	76	1.44	266.26	96	1.13	285.51
17	3.12	218.79	37	2.24	239.32	57	1.91	257.28	77	1.49	275.89	97	1.12	282.30
18	2.92	218.79	38	2.32	239.32	58	1.94	257.92	78	1.67	282.95	98	1.24	295.78
19	3.06	218.79	39	2.44	239.32	59	1.76	244.13	79	1.54	278.45	99	1.26	300.27
20	2.96	218.79	40	2.10	239.32	60	1.98	259.85	80	1.46	267.55	100	1.17	291.29
m	3.08	218.79	m	2.29	239.32	m	1.83	252.50	m	1.50	274.03	m	1.18	291.99
SD	0.40	0.00	SD	0.20	0.00	SD	0.09	6.08	SD	0.06	6.34	SD	0.06	7.25

ตารางที่ ก.18 ข้อมูลเบรกคาวานที่ $T = 55^{\circ}\text{C}$, $r = 5$ ม.ม., $g = 3$ ม.ม. ไข้วบวก

ระดับที่ 1 = 202.02 kV			ระดับที่ 2 = 233.1 kV			ระดับที่ 3 = 264.18 kV			ระดับที่ 4 = 295.26 kV			ระดับที่ 5 = 326.34 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	T(μs)	V(kV)
1	2.25	213.65	21	2.22	234.18	41	1.62	248.94	61	1.36	257.28	81	1.06	282.30
2	2.60	213.65	22	2.40	234.18	42	1.60	242.20	62	1.42	260.49	82	1.09	284.23
3	2.68	213.65	23	1.91	232.90	43	1.54	243.17	63	1.28	253.43	83	1.04	281.66
4	2.50	213.65	24	2.14	234.18	44	1.80	238.35	64	1.18	250.22	84	1.05	282.30
5	3.15	213.65	25	1.95	232.90	45	1.67	246.37	65	1.28	252.79	85	1.00	278.45
6	2.80	213.65	26	1.99	233.54	46	1.57	243.81	66	1.37	258.56	86	1.02	279.74
7	3.15	213.65	27	1.98	233.54	47	1.61	248.62	67	1.34	256.64	87	0.96	263.70
8	2.20	213.65	28	2.10	234.18	48	1.56	248.30	68	1.28	253.43	88	1.02	279.74
9	2.35	213.65	29	2.00	233.54	49	1.64	238.68	69	1.22	250.22	89	1.05	282.30
10	2.65	213.65	30	1.98	232.90	50	1.77	241.88	70	1.18	249.58	90	0.96	275.25
11	2.44	213.65	31	1.95	232.26	51	1.70	247.66	71	1.40	259.85	91	1.10	284.87
12	2.60	213.65	32	2.36	234.18	52	1.64	239.96	72	1.36	258.24	92	1.04	281.02
13	3.42	213.65	33	2.05	234.18	53	1.54	241.24	73	1.34	257.28	93	0.98	270.11
14	2.95	213.65	34	2.20	234.18	54	1.64	239.96	74	1.28	253.43	94	0.96	263.70
15	2.65	213.65	35	2.11	234.18	55	1.52	238.03	75	1.22	251.51	95	1.00	280.38
16	2.29	213.65	36	2.06	234.18	56	1.54	245.73	76	1.34	256.64	96	1.08	282.95
17	2.32	213.65	37	2.00	234.18	57	1.71	241.24	77	1.38	259.21	97	0.96	259.85
18	2.12	213.65	38	1.98	233.54	58	1.74	243.49	78	1.25	252.15	98	1.04	280.38
19	2.26	213.65	39	2.08	234.18	59	1.54	241.24	79	1.20	248.94	99	1.02	277.81
20	2.16	213.65	40	2.28	234.18	60	1.78	238.68	80	1.18	249.58	100	1.03	281.66
m	2.55	213.65	m	2.06	233.77	m	1.63	242.88	m	1.28	254.47	m	1.03	277.62
SD	0.37	0.00	SD	0.14	0.60	SD	0.09	3.62	SD	0.08	3.83	SD	0.04	7.35

ก.6 ข้อมูลเบรกดาวน์ที่ $T = 55^{\circ}\text{C}$, $r = 10$ ม.ม.

ตารางที่ ก.19 ข้อมูลเบรกดาวน์ที่ $T = 55^{\circ}\text{C}$, $r = 10$ ม.ม., $g = 3$ ม.ม. ขั้วลบ

ระดับที่ 1 = 225.33 kV			ระดับที่ 2 = 256.41 kV			ระดับที่ 3 = 287.49 kV			ระดับที่ 4 = 318.57 kV			ระดับที่ 5 = 349.65 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	T(μs)	V(kV)
1	3.80	214.94	21	2.32	243.17	41	1.81	264.02	61	1.50	285.83	81	1.10	293.85
2	3.23	214.94	22	2.15	243.17	42	1.87	266.26	62	1.40	279.10	82	1.17	297.70
3	4.12	214.94	23	2.20	243.17	43	1.51	256.64	63	1.52	288.08	83	1.08	291.61
4	2.82	214.94	24	2.27	243.17	44	1.85	264.66	64	1.33	276.53	84	1.05	287.44
5	3.56	214.94	25	2.40	243.17	45	1.77	261.45	65	1.36	277.49	85	1.24	302.19
6	3.36	214.94	26	2.46	243.17	46	1.76	260.65	66	1.44	281.66	86	1.18	298.34
7	3.65	214.94	27	2.12	243.17	47	1.82	264.02	67	1.34	277.49	87	1.20	299.95
8	3.29	214.94	28	2.20	243.17	48	1.53	257.28	68	1.46	283.59	88	1.22	300.91
9	4.22	214.94	29	2.45	243.17	49	1.68	259.85	69	1.30	272.68	89	1.10	292.57
10	3.23	214.94	30	2.32	243.17	50	1.56	257.92	70	1.32	275.89	90	1.06	289.04
11	2.89	214.94	31	2.56	243.17	51	1.78	261.77	71	1.36	277.17	91	1.27	303.48
12	2.78	214.94	32	2.08	243.17	52	1.81	263.06	72	1.44	282.30	92	1.17	297.06
13	3.14	214.94	33	2.26	243.17	53	1.79	262.41	73	1.30	275.25	93	1.11	294.49
14	2.65	214.94	34	2.14	243.17	54	1.66	259.21	74	1.34	276.21	94	1.18	298.66
15	3.08	214.94	35	2.44	243.17	55	1.75	260.49	75	1.50	285.83	95	1.34	302.48
16	2.56	214.94	36	2.32	243.17	56	1.84	264.02	76	1.52	287.44	96	1.10	293.85
17	3.01	214.94	37	2.15	243.17	57	1.80	263.06	77	1.40	279.42	97	1.17	297.70
18	2.98	214.94	38	2.21	243.17	58	1.69	259.85	78	1.42	280.38	98	1.08	290.32
19	3.33	214.94	39	2.18	243.17	59	1.81	264.02	79	1.37	278.45	99	1.05	287.44
20	4.34	214.94	40	2.08	243.17	60	1.55	257.60	80	1.52	288.08	100	1.24	300.91
m	3.23	214.94	m	2.235	243.17	m	1.78	261.41	m	1.40	280.44	m	1.17	296.00
SD	0.51	0.00	SD	0.14	0.00	SD	0.11	2.77	SD	0.08	4.67	SD	0.08	5.08

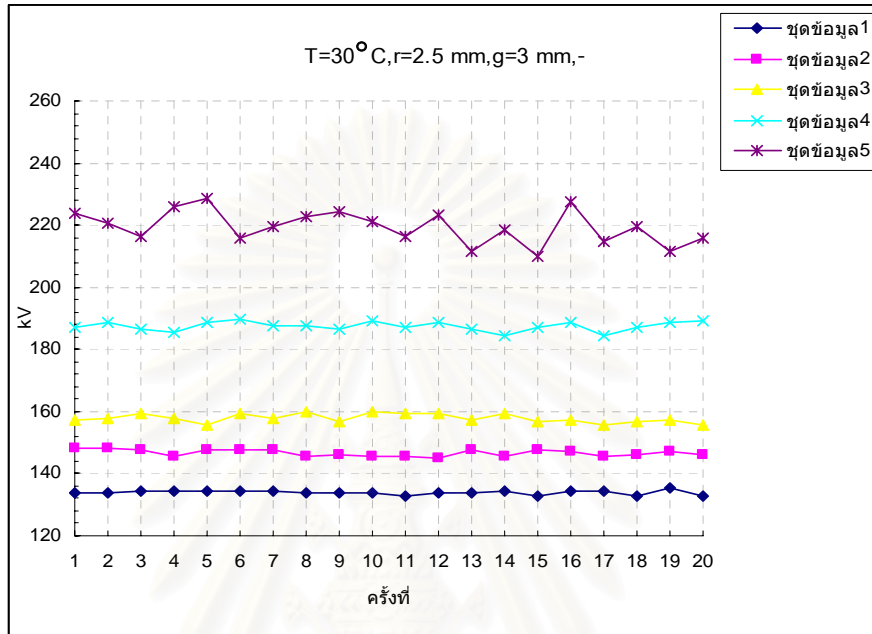
ตารางที่ ก.20 ข้อมูลเบรกดาวน์ที่ $T = 55^{\circ}\text{C}$, $r = 10$ ม.ม., $g = 3$ ม.ม. ขั้วบวก

ระดับที่ 1 = 233.1 kV			ระดับที่ 2 = 264.18 kV			ระดับที่ 3 = 295.26 kV			ระดับที่ 4 = 326.34 kV			ระดับที่ 5 = 349.65 kV		
No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	t(μs)	V(kV)	No.	T(μs)	V(kV)
1	4.59	221.35	21	2.31	247.02	41	1.78	268.19	61	1.44	288.72	81	1.14	296.74
2	3.16	221.35	22	2.22	247.02	42	1.79	269.47	62	1.38	285.19	82	1.02	287.76
3	5.90	221.35	23	2.17	247.02	43	1.91	274.60	63	1.26	278.45	83	1.18	298.66
4	2.47	221.35	24	2.25	247.02	44	1.82	270.76	64	1.35	283.27	84	1.24	304.76
5	3.86	221.35	25	2.10	247.02	45	1.97	276.85	65	1.30	280.06	85	1.10	295.14
6	2.83	221.35	26	2.35	247.02	46	1.87	272.36	66	1.41	286.15	86	1.06	290.64
7	3.56	221.35	27	2.23	247.02	47	1.72	263.38	67	1.46	289.36	87	1.00	284.55
8	4.12	221.99	28	2.18	247.02	48	1.76	266.91	68	1.33	281.34	88	1.04	289.68
9	3.22	221.35	29	2.30	247.02	49	1.74	264.02	69	1.25	277.49	89	1.22	302.19
10	2.98	221.35	30	2.11	247.02	50	1.77	267.87	70	1.45	289.04	90	1.11	295.14
11	3.51	221.35	31	2.23	247.02	51	1.79	268.19	71	1.43	288.08	91	1.03	288.08
12	4.22	221.35	32	2.08	247.02	52	1.89	273.96	72	1.34	282.95	92	1.20	303.48
13	3.62	221.99	33	2.45	247.02	53	1.70	262.41	73	1.38	284.87	93	1.23	305.40
14	3.95	221.35	34	2.32	247.02	54	1.93	275.25	74	1.31	280.70	94	1.10	295.14
15	2.98	221.35	35	2.28	247.02	55	1.79	268.83	75	1.48	290.32	95	1.06	290.64
16	3.79	221.35	36	2.18	247.02	56	1.98	276.85	76	1.28	279.10	96	1.12	295.78
17	4.56	221.35	37	2.12	247.02	57	1.90	274.60	77	1.43	286.47	97	1.04	289.68
18	3.90	221.35	38	2.50	247.02	58	1.82	270.43	78	1.37	284.55	98	1.23	304.76
19	2.87	221.35	39	2.26	247.02	59	1.74	265.62	79	1.48	290.00	99	1.13	297.06
20	4.64	221.35	40	2.18	247.02	60	1.83	270.76	80	1.22	275.25	100	1.00	287.12
m	3.70	221.42	m	2.23	247.02	m	1.81	270.07	m	1.38	284.07	m	1.11	295.12
SD	0.81	0.20	SD	0.11	0.00	SD	0.08	4.38	SD	0.08	4.54	SD	0.08	6.53

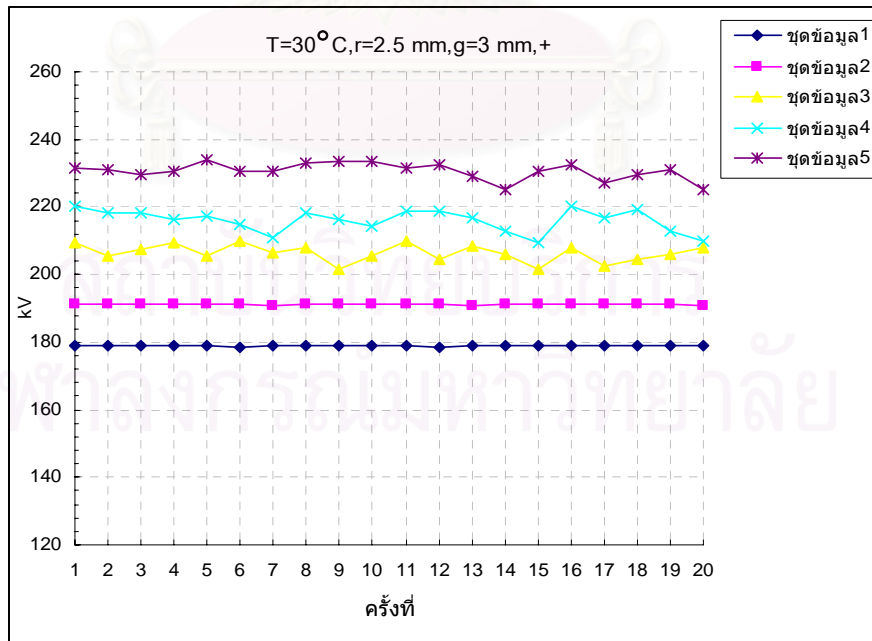
ภาคผนวก ข.

กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวน

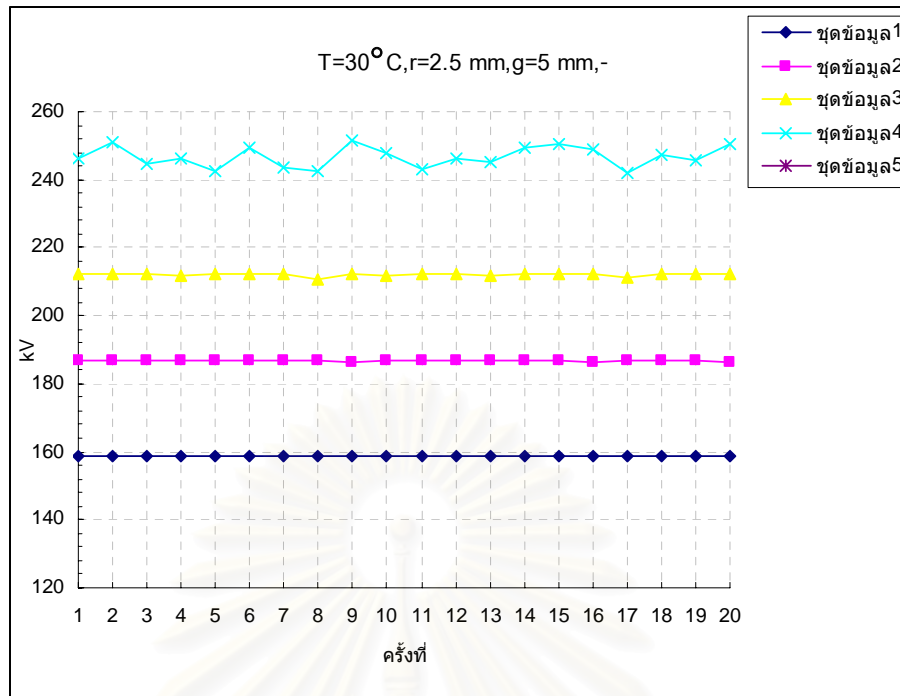
ข.1 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนที่ $T = 30^{\circ}\text{C}$, $r = 2.5$ ม.ม.



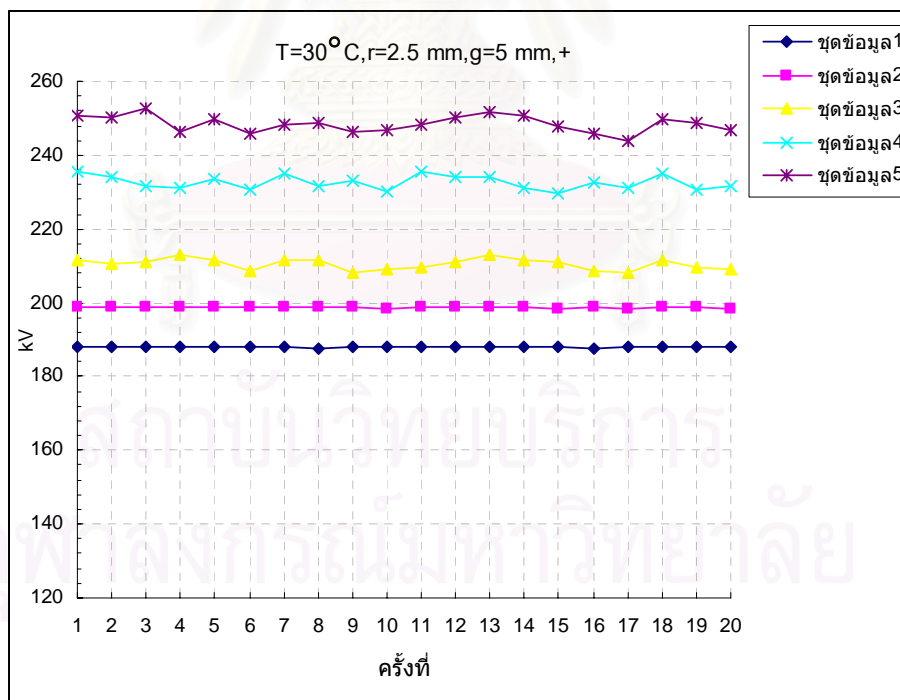
รูปที่ ข.1 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนที่ $T=30^{\circ}\text{C}$, $r=2.5$ ม.ม., $g = 3$ ม.ม. ขั้วลบ



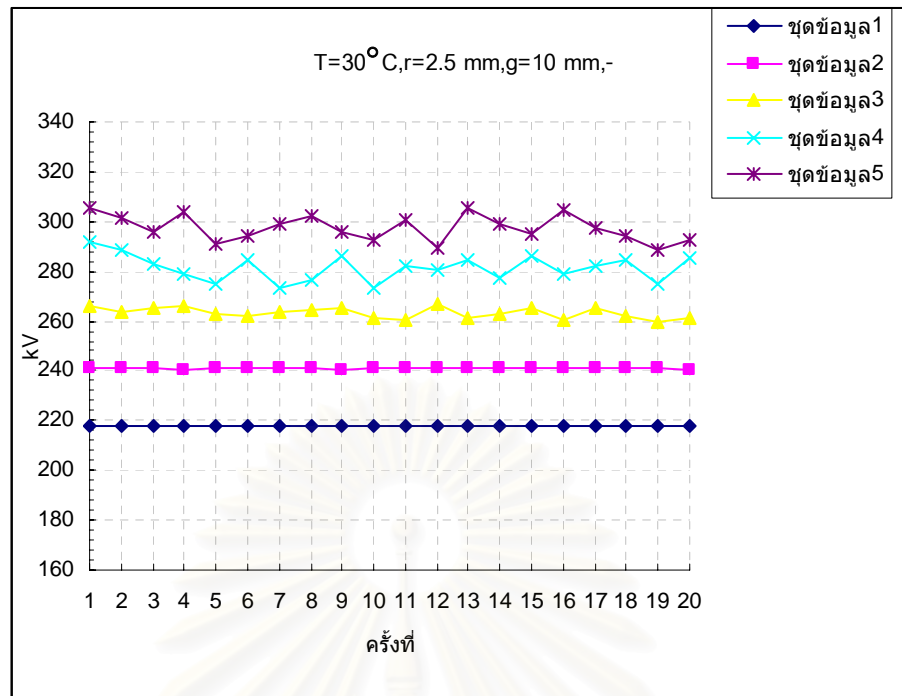
รูปที่ ข.2 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนที่ $T=30^{\circ}\text{C}$, $r=2.5$ ม.ม., $g = 3$ ม.ม. ขั้วบวก



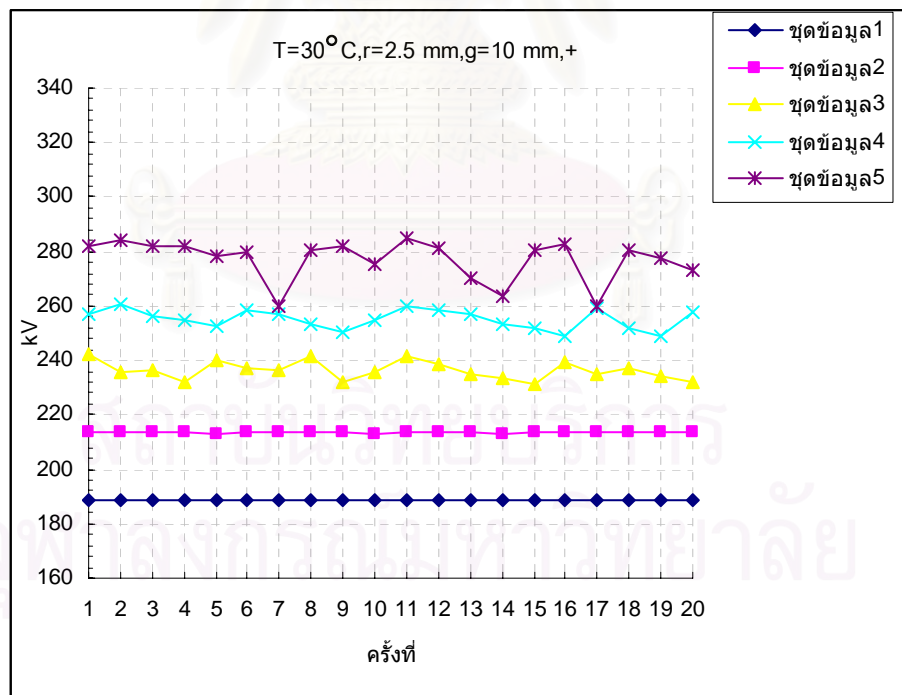
รูปที่ ข.3 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวานที่ $T=30^{\circ}\text{C}$, $r=2.5$ ม.ม., $g=5$ ม.ม. ไข้วลบ



รูปที่ ข.4 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวานที่ $T=30^{\circ}\text{C}$, $r=2.5$ ม.ม., $g=5$ ม.ม. ไข้วบวก

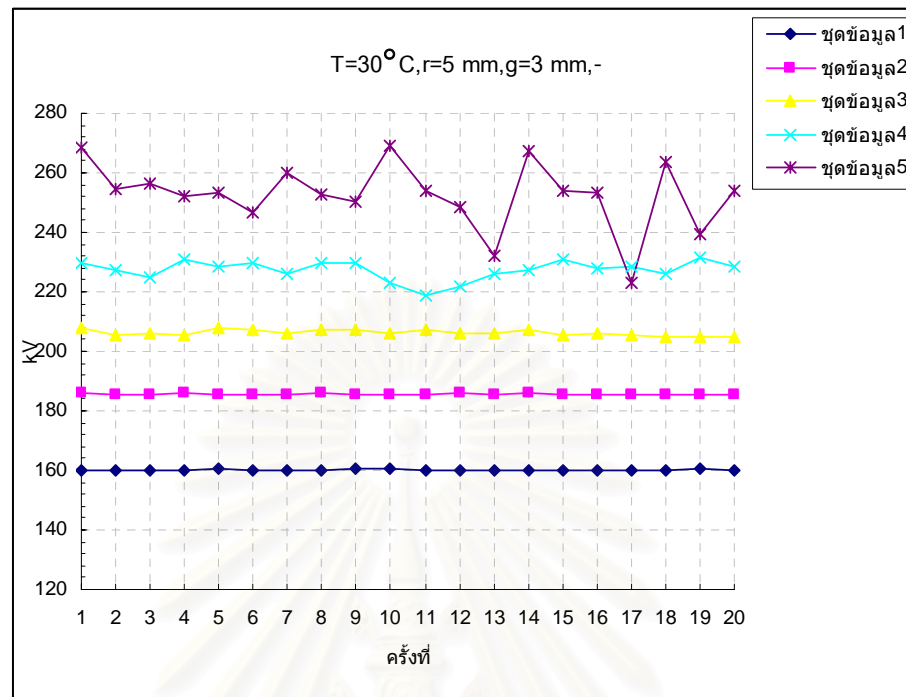


รูปที่ ข.5 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาววันที่ $T=30^{\circ}\text{C}$, $r=2.5$ ม.ม., $g=10$ ม.ม. ขั้วลบ

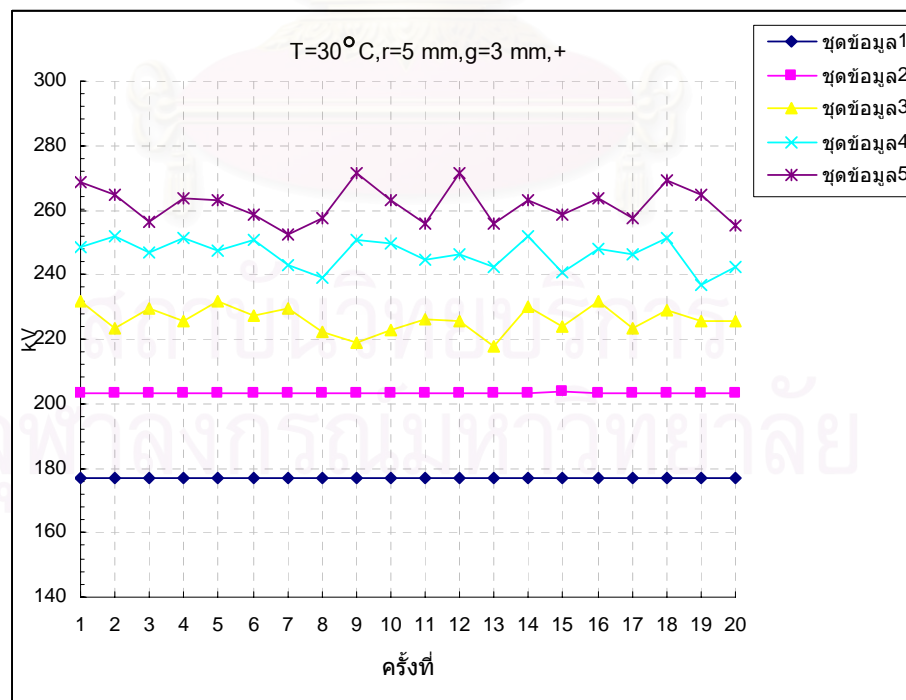


รูปที่ ข.6 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาววันที่ $T=30^{\circ}\text{C}$, $r=2.5$ ม.ม., $g=10$ ม.ม. ขั้วบวก

ข.2 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวานที่ $T = 30^{\circ}\text{C}$, $r = 5$ ม.ม.

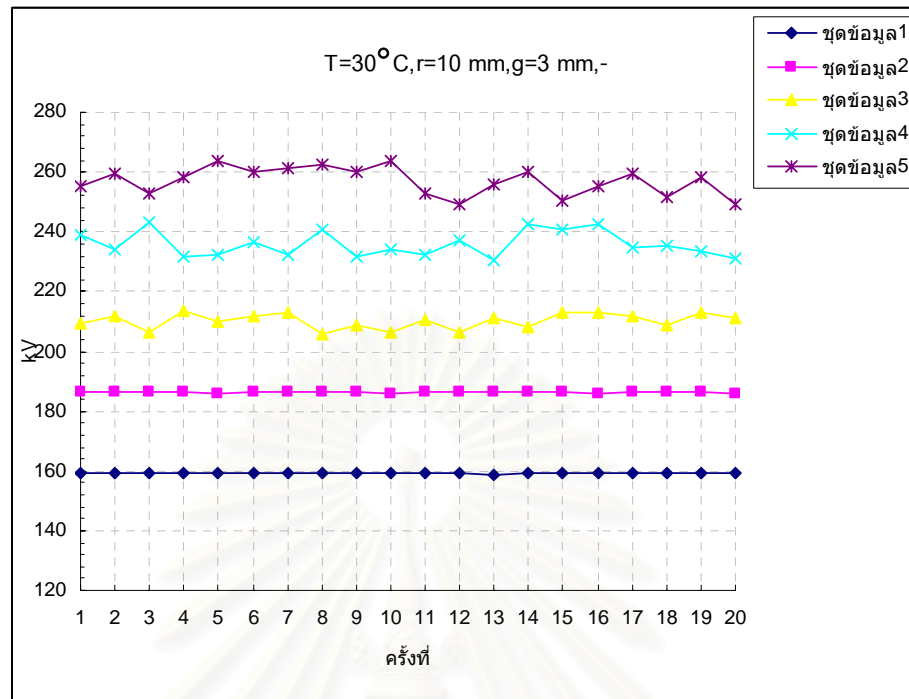


รูปที่ ข.7 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวานที่ $T=30^{\circ}\text{C}$, $r=5$ ม.ม., $g = 3$ ม.ม. ขั้วลบ

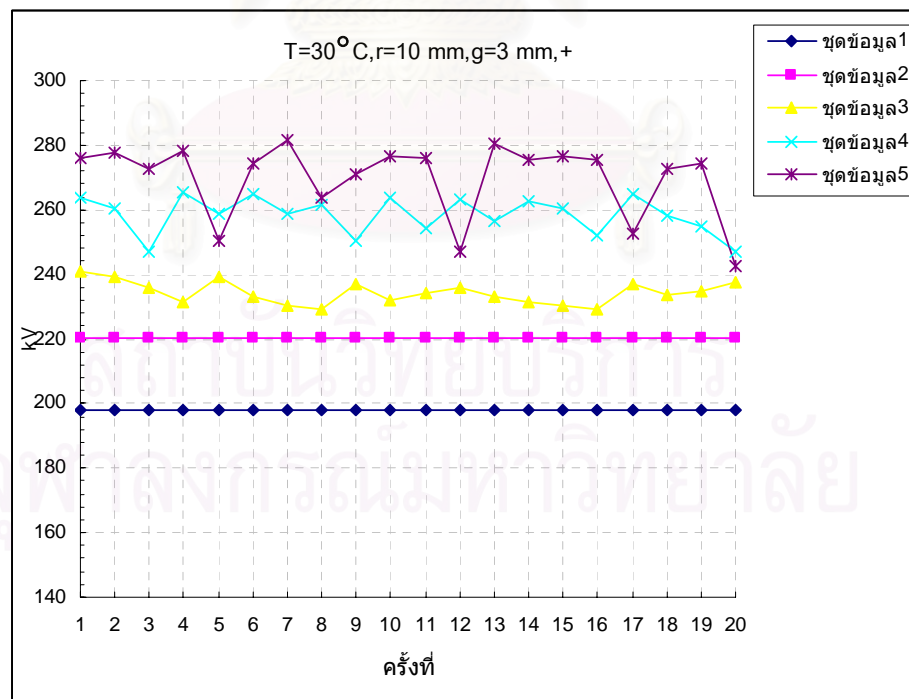


รูปที่ ข.8 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวานที่ $T=30^{\circ}\text{C}$, $r=5$ ม.ม., $g = 3$ ม.ม. ขั้วบวก

ข.3 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวานที่ $T = 30^{\circ}\text{C}$, $r = 10$ ม.ม.

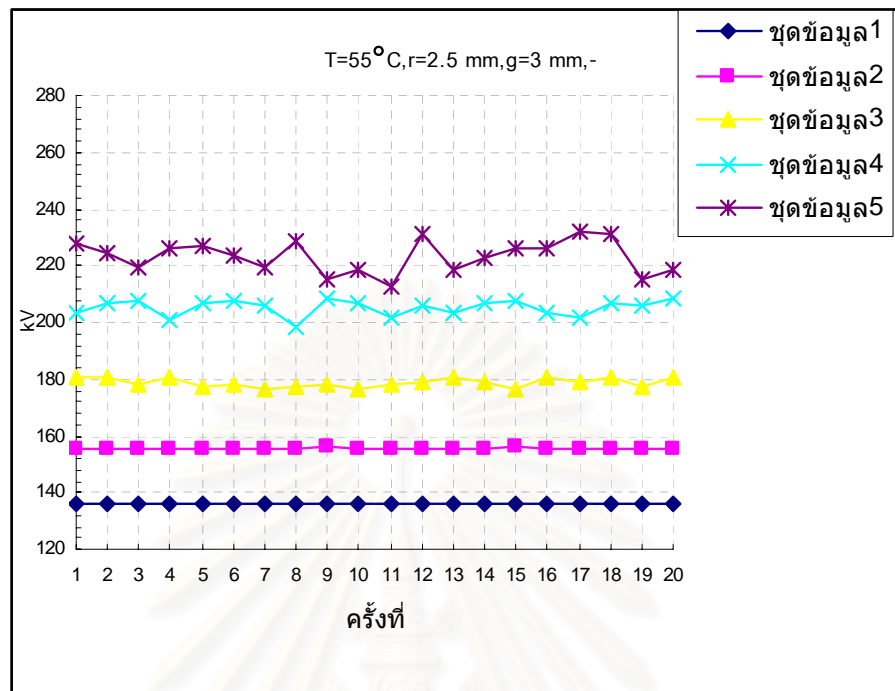


รูปที่ ข.9 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวานที่ $T=30^{\circ}\text{C}$, $r=10$ ม.ม., $g = 3$ ม.ม. ขั้วลบ

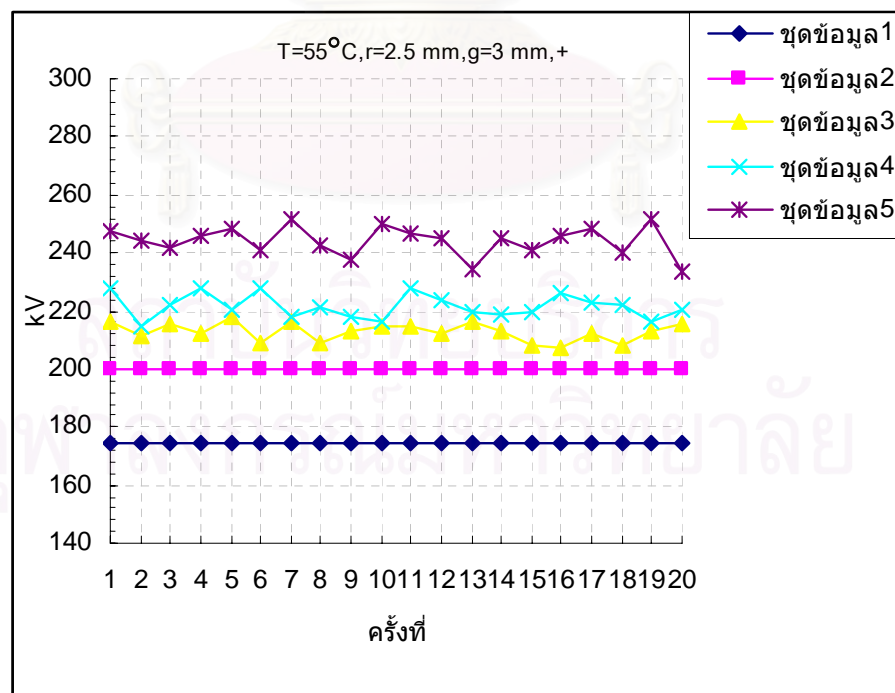


รูปที่ ข.10 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวานที่ $T=30^{\circ}\text{C}$, $r=10$ ม.ม., $g = 3$ ม.ม. ขั้วบวก

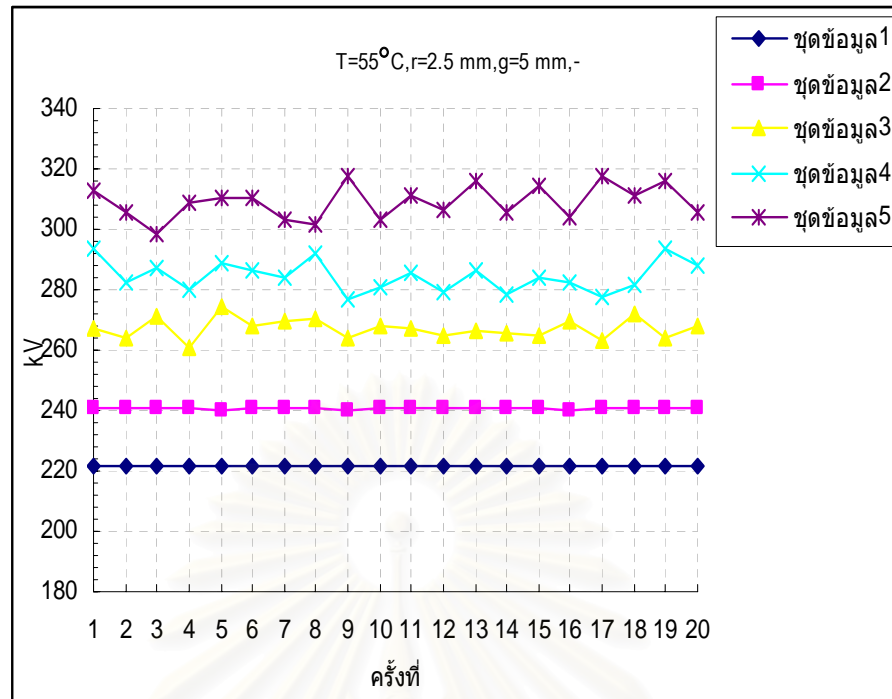
ข.4 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนที่ $T = 55^{\circ}\text{C}$, $r = 2.5$ ม.ม.



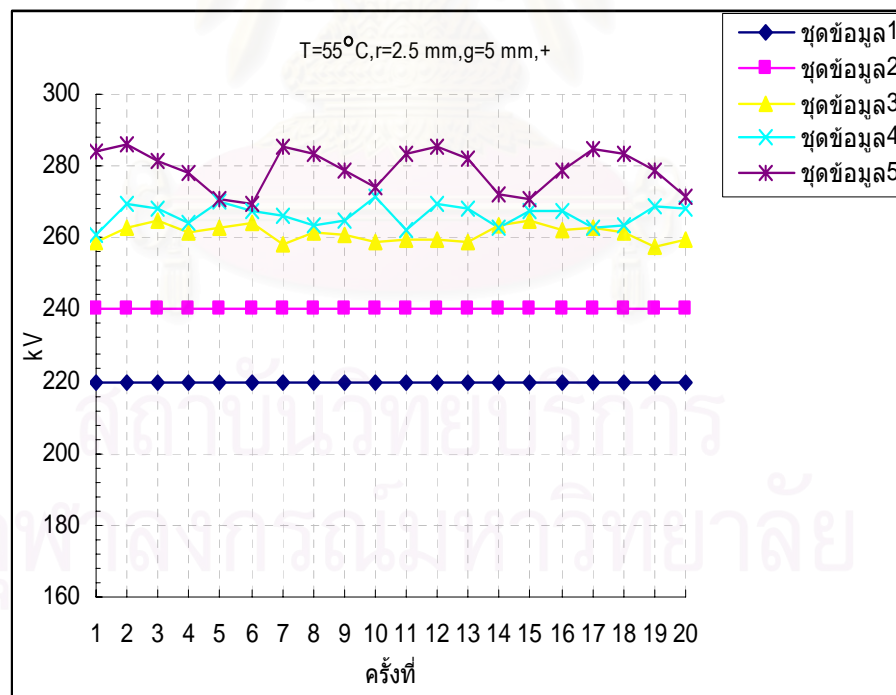
รูปที่ ข.11 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนที่ $T=55^{\circ}\text{C}$, $r=2.5$ ม.ม., $g = 3$ ม.ม. ขั้วลบ



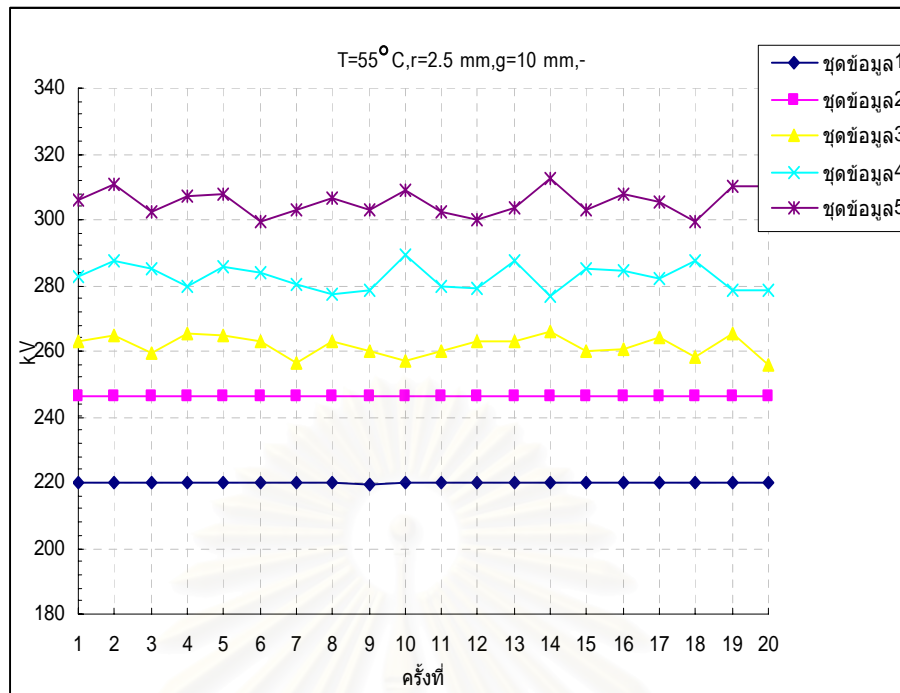
รูปที่ ข.12 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนที่ $T=55^{\circ}\text{C}$, $r=2.5$ ม.ม., $g = 3$ ม.ม. ขั้วบวก



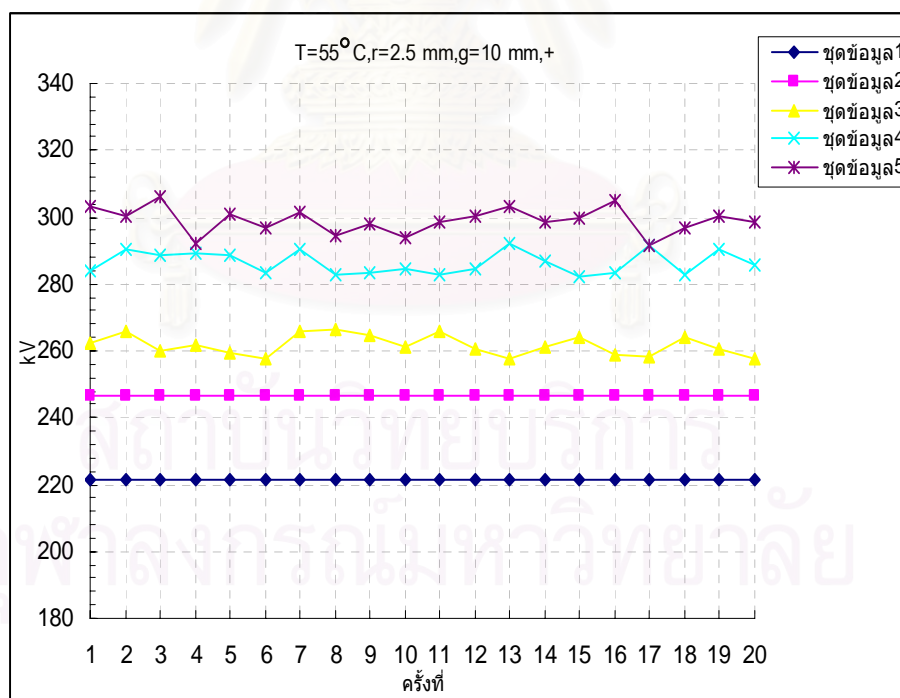
รูปที่ ข.13 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนที่ $T=55^{\circ}\text{C}$, $r=2.5$ ม.ม., $g=5$ ม.ม. ขั้วลบ



รูปที่ ข.14 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนที่ $T=55^{\circ}\text{C}$, $r=2.5$ ม.ม., $g=5$ ม.ม. ขั้วบวก

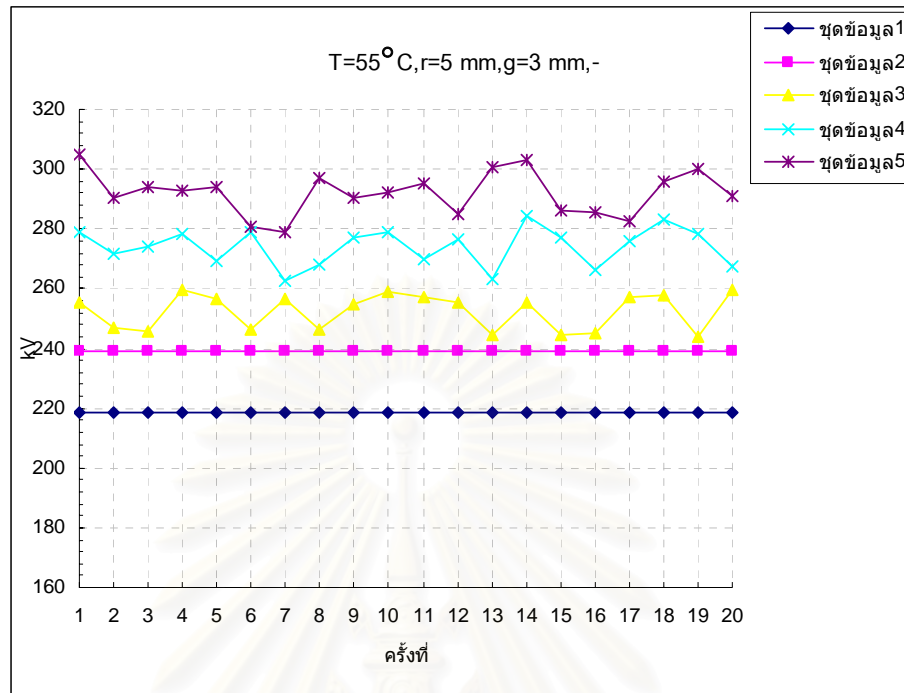


รูปที่ ข.15 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนที่ T=55°C, r=2.5 ม.ม., g = 10 ม.ม. ขั้วลบ

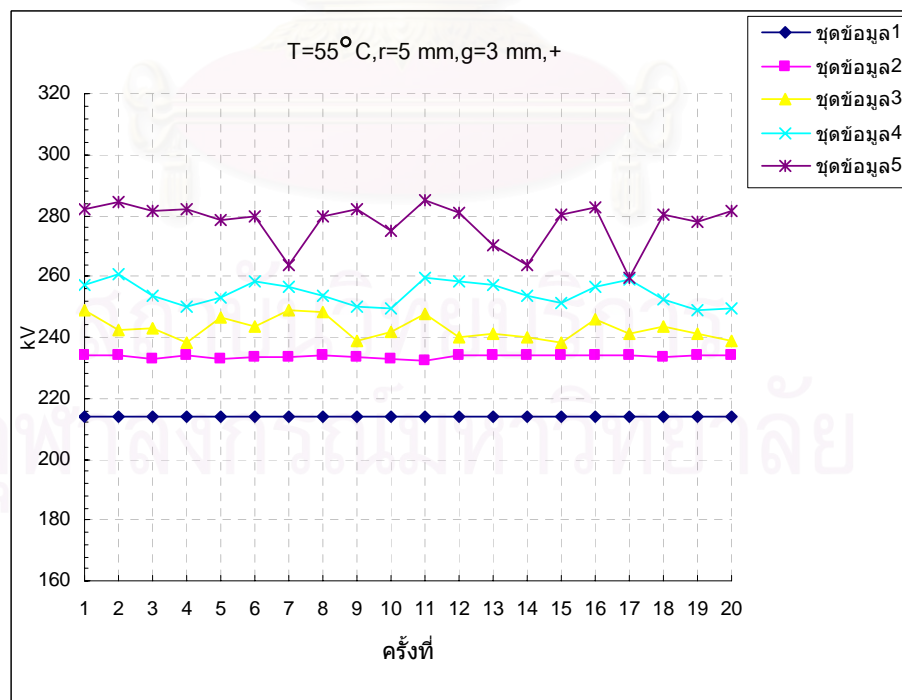


รูปที่ ข.16 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนที่ T=55°C, r=2.5 ม.ม., g = 10 ม.ม. ขั้วบวก

ข.5 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวานที่ $T = 55^{\circ}\text{C}$, $r = 5$ ม.ม.

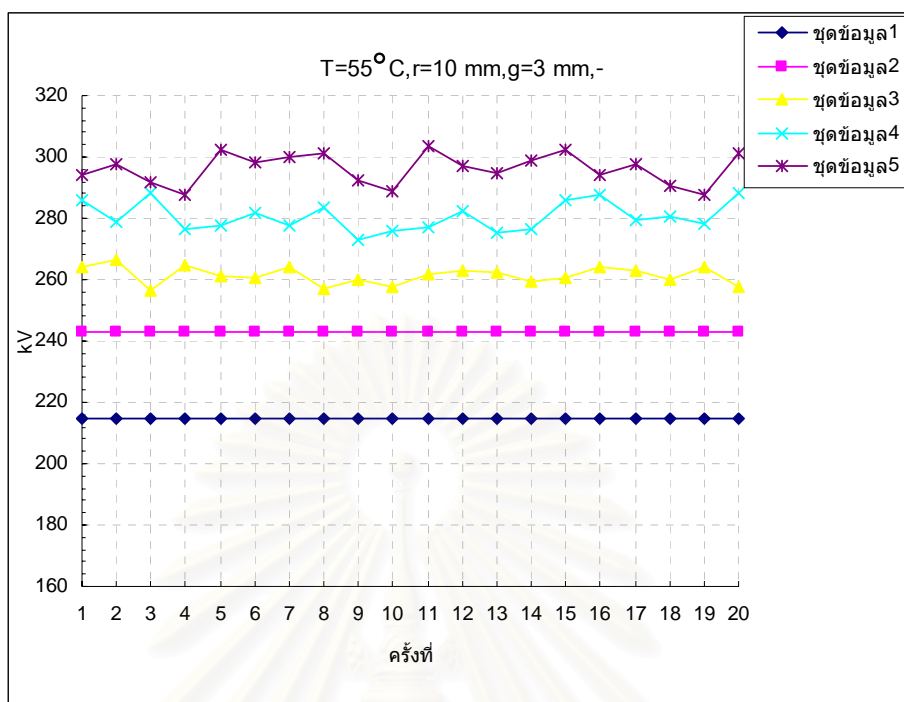


รูปที่ ข.17 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวานที่ $T=55^{\circ}\text{C}$, $r=5$ ม.ม., $g = 3$ ม.ม. ขั้วลบ

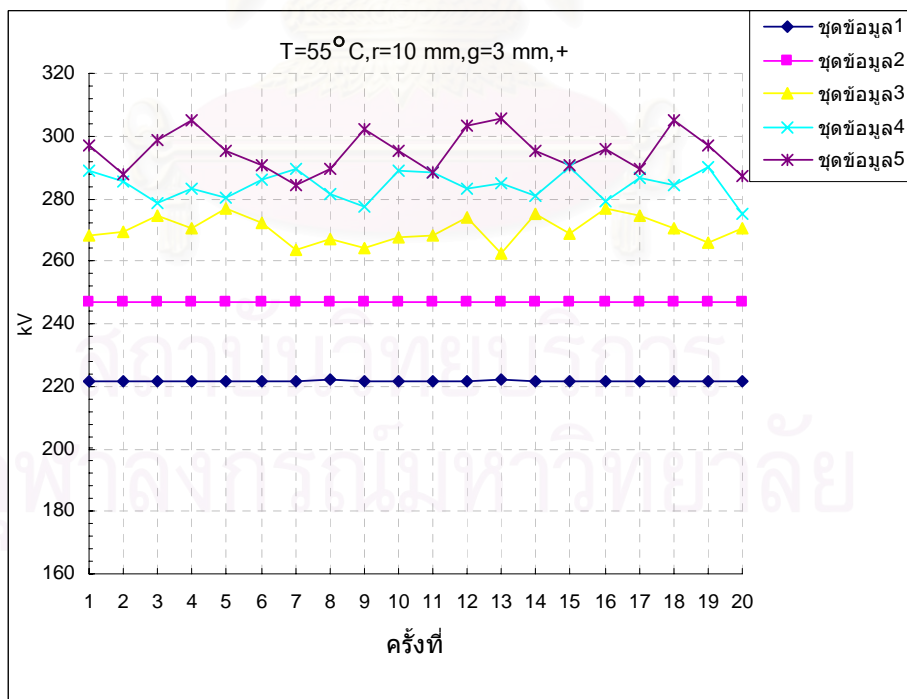


รูปที่ ข.18 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวานที่ $T=55^{\circ}\text{C}$, $r=5$ ม.ม., $g = 3$ ม.ม. ขั้วบวก

ข.6 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ $T = 55^{\circ}\text{C}$, $r = 10$ ม.ม.



รูปที่ ข.19 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ $T=55^{\circ}\text{C}$, $r=10$ ม.ม., $g = 3$ ม.ม. ขั้วลบ



รูปที่ ข.20 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ $T=55^{\circ}\text{C}$, $r=10$ ม.ม., $g = 3$ ม.ม. ขั้วบวก

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกฤษวัฒน์ ทองแกมแก้ว เกิดเมื่อวันที่ 6 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2521 จังหวัดสุราษฎร์ธานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2542 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2543 จนถึงปัจจุบัน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย