

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกสำหรับฉนวนน้ำมัน
Study of Dielectric Loss for Oil Insulating Materials



T111007



เลขหมู่.....T111007
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี..... - 8 S.A. 2553



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2552

การศึกษาค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกสำหรับฉนวนน้ำมัน
Study of Dielectric Loss for Oil Insulating Materials



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2552

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกสำหรับฉนวนน้ำมัน

ผู้จัดทำ



1. นาย ธนุส บุญเรืองศรี
2. นาย นครศ คณะโน
3. นาย ปิยะพล ถิ่นทอง
4. นาย ปิยะพันธ์ ตั้งวรกิจ

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกสำหรับฉนวนน้ำมัน

นาย ธนุส บุญเรืองศรี

นาย นครศ คณะโน

นาย ปิยะพล ถือทอง

นาย ปิยะพันธ์ ตั้งวรกิจ

รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2552

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนน้ำมัน โดยทำการศึกษาน้ำมันพีช 5 ชนิด คือ น้ำมันรำข้าว, น้ำมันปาล์ม, น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน, น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันข้าวโพด แล้วนำมาเปรียบเทียบกับน้ำมันหม้อแปลง เพื่อหาความเป็นไปได้ในการที่จะนำน้ำมันพีชมาใช้งานแทนน้ำมันหม้อแปลง ซึ่งจะทำการทดสอบโดยหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Breakdown Voltage) ตามมาตรฐาน IEC 156 ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก (Tan δ) ตามมาตรฐาน ASTM D924-03A และค่าความคงทนต่อแรงดัน IMPULSE ตามมาตรฐาน ASTM D3300-00 จากการทดลองพบว่า น้ำมันปาล์มมีความเหมาะสมมากที่สุด ที่สามารถนำไปใช้งานแทนน้ำมันหม้อแปลง เนื่องจากน้ำมันปาล์มมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าและค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ที่สูง นอกจากนี้ ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันปาล์มอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้

Study of Dielectric Loss for Oil Insulating Materials

Thanut Boonruangsri

Nakaret Kano

Piyapon Tuethong

Piyapan Tangworrakit

Assoc.Prof.Dr.Anantawat Kunakorn Supervisor

Year 2009

ABSTRACT

This paper presents study of electrical properties of insulating oil. The purpose of project is to investigate possibility for using the vegetable oil instead of transformer oil, Five types of vegetable oil which are rice bran oil, palm oil, sun flower oil, soy bean oil and corn oil. The electrical properties investigated in this testing are breakdown voltage, dielectric loss factor and impulse withstand voltage, which are carried out according to the standard of IEC 156, ASTM D924-03A and ASTM D3300-00, respectively. It is found that the palm oil is the most candidate to be used as a replacement of the transformer oil due to high dielectric strength and the impulse withstand voltage. In addition, the dielectric loss of the palm oil is in the acceptable range.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยจากหลายท่านโดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร อาจารย์ที่ปรึกษา และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์นรเศรษฐ์ พัฒนเดช ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจสอบแก้ไข ปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณคุณสามภพ แสงอำยวน คุณกฤษวัฒน์ ทองแกมแก้ว และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง กองทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (บางพลี) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการยืมอุปกรณ์การทดสอบ และให้คำปรึกษา

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคน โดยเฉพาะนายปุ่นยวีร์ ทองเขียว ที่ช่วยให้คำปรึกษาและช่วยทำการทดสอบ

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจอีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จไปได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

บทคัดย่อ	
ABSTRACT	
กิตติกรรมประกาศ	
สารบัญ	I
สารบัญรูป	IV
สารบัญตาราง	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ประเภทของฉนวน	5
2.1.1 ฉนวนแข็ง	5
2.1.2 ฉนวนก๊าซ	6
2.1.3 ฉนวนเหลว	6
2.2 น้ำมันหม้อแปลง	10
2.3 น้ำมันพืช	13
2.3.1 โครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันพืช	14
2.3.2 องค์ประกอบของน้ำมันพืช	15
2.3.3 การเปรียบเทียบโครงสร้างโมเลกุลฉนวนเหลวกับน้ำมันพืช	16
2.4 ลักษณะสมบัติที่สำคัญของฉนวนเหลว	24
2.4.1 ความต้านทาน (resistance)	25
2.4.2 เพอร์มิตติวิตี (permittivity)	26
2.4.3 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก (dielectric strength)	29
2.4.4 แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$)	30

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5	ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่า	31
2.5.1	ค่า $\tan \delta$ กับความถี่	31
2.5.2	ค่า $\tan \delta$ กับอุณหภูมิ	33
2.5.3	ค่า $\tan \delta$ กับความชื้น	34
2.5.4	ค่า $\tan \delta$ กับแรงดัน	35
2.6	กลไกการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนเหลว	36
2.6.1	ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้า (electric field configuration)	37
2.6.2	อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ	38
2.6.3	อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ	40
2.6.4	กลไกการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวบริสุทธิ์	43
2.6.5	กลไกการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนเหลวบริสุทธิ์เนื่องจากสนามไฟฟ้า	44
2.6.6	กลไกการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนเชิงการค้ำ	45
2.7	ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเบรกดาวน์ในฉนวนเหลว	49
2.7.1	วิธีการทดลอง	49
2.7.2	ระยะแกป	49
2.7.3	รัศมีความโค้งของอิเล็กโตรด	50
2.7.4	รูปทรงเรขาคณิตของอิเล็กโตรด	50
2.7.5	สารโลหะที่ใช้ทำอิเล็กโตรด	50
2.7.6	พื้นที่ผิวของอิเล็กโตรด	51
2.7.7	อิเล็กโตรดโคทติ้ง	52
2.7.8	อุณหภูมิ	52
2.7.9	ความดัน	53
2.7.10	จำนวนอะตอมของคาร์บอน	54
2.7.11	ผลทางเวลา	54
2.7.12	ความชื้น	55
2.8	ทฤษฎีและหลักการสร้างแรงดันอิมพัลส์	58
2.8.1	หลักการทั่วไป	58
2.8.2	การวัดแรงดันอิมพัลส์	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบและประกอบสร้างชุดทดสอบน้ำมัน	60
3.1 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์	60
3.1.1 การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธ์ ที่ใช้หัวอิเล็กโตรดแบบ sphere-sphere	60
3.1.2 การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธ์ ที่ใช้หัวอิเล็กโตรดแบบ plate-plate	62
3.1.3 การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธ์ ที่ใช้หัวอิเล็กโตรดแบบ rod-rod	63
3.1.4 การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธ์ ที่ใช้หัวอิเล็กโตรดแบบ rod-sphere	65
3.1.5 การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธ์ ที่ใช้หัวอิเล็กโตรดแบบ rod-plate	67
3.2 ชุดทดสอบน้ำมันหม้อแปลง	69
3.2.1 กล้องบรรจุน้ำมัน	69
3.2.2 อิเล็กโตรด	70
3.2.3 แกนตัวนำไฟฟ้าทางด้านกราวด์	71
3.2.4 ฉนวนไฟฟ้าแรงสูงด้านต่อกราวด์	71
3.2.5 ตัวยึดหัวอิเล็กโตรด	71
3.2.6 แกนตัวนำไฟฟ้าทางด้านไฟฟ้าแรงสูง	71
3.3 น้ำมันที่ใช้ในการทดสอบ	72
3.4 การเตรียมน้ำมัน	73
3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ	73
3.5.1 อุปกรณ์ที่ใช้การทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า	73
3.5.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก	75
3.5.3 อุปกรณ์ที่ใช้การทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า แบบอิมพัลส์	78
บทที่ 4 การทดสอบและประเมินผล	80
4.1 การทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า	80
4.1.1 การต่อวงจรที่ใช้ในการทดสอบ	80
4.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ	80

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.3 ผลการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันแต่ละชนิด	81
4.2 การทดสอบแพกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก	87
4.2.1 การต่อวงจรที่ใช้ในการทดสอบ	87
4.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ	87
4.2.3 ผลการทดสอบแพกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก	88
4.2.3.1 น้ำมันใหม่	88
4.2.3.2 น้ำมันที่ผ่านการทอด 10 ครั้ง	91
4.2.3.3 น้ำมันที่ผ่านการทอด 20 ครั้ง	94
4.2.3.4 น้ำมันที่ผ่านการทอด 30 ครั้ง	97
4.2.3.5 น้ำมันที่ผ่านการทอด 40 ครั้ง	100
4.3 การทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์	103
4.3.1 การต่อวงจรที่ใช้ในการทดสอบ	103
4.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ	103
4.3.3 ผลการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์	104
4.3.3.1 ขั้วลบ	104
4.3.3.2 ขั้วบวก	104
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	106
5.1 สรุป	106
5.2 ข้อเสนอแนะ	107
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	
ประวัติผู้เขียน	

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	ไดอะแกรมของฉนวนเหลว	10
2.2	องค์ประกอบชั้นพื้นฐานในโมเลกุลของน้ำมันพืช	14
2.3	โครงสร้างโมเลกุลของฉนวนไฮโดรคาร์บอนเหลวจำพวกแนพทาซีน	16
2.4	โครงสร้างโมเลกุลฉนวนเหลวไฮโดรคาร์บอนเหลวจำพวกพาราฟิน	16
2.5	โครงสร้างของโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกอะโรมาติก	17
2.6	โครงสร้างของโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกอะโรมาติก 2 ตัว	18
2.7	ค่าเก็บประจุระหว่างแผ่นระนาบที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีเป็นสุญญากาศ ϵ_0 และ ϵ	27
2.8	วงจรสมมูลย์ของไดอิเล็กตริก	28
2.9	มุมเฟสกระแสในตัวเก็บประจุ	30
2.10	กราฟแสดงค่า $\tan \delta$ ของนอนโพลาร์ไดอิเล็กตริกและความถี่	32
2.11	กราฟแสดงค่า $\tan \delta$ ของโพลีเมทิลเมตาครายเลตและความถี่ ที่อุณหภูมิ 20°C	33
2.12	กราฟแสดงค่า ϵ กับ $\epsilon \tan \delta$ กับความถี่ของโพลีบิวทิลเมตาครายเลต	33
2.13	กราฟแสดงค่า $\tan \delta$ ของ $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ และ $2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$ ที่ความถี่ 1 MHz กับอุณหภูมิ	33
2.14	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า $\tan \delta$ กับอุณหภูมิ	34
2.15	กราฟที่แสดงค่า $\tan \delta$ ของกระดาษที่ชุ่มด้วยน้ำมันผสมโคลโลไฟน์ กับอุณหภูมิ ที่ 50 Hz	34
2.16	กราฟแสดงค่า $\tan \delta$ ของกระดาษกับความชื้นในรูปเปอร์เซ็นต์ปริมาตร ที่ความถี่ 1 MHz (แกนตั้งเป็นลอการิทึม)	34
2.17	กราฟแสดงเส้นโค้งไอออไนเซชัน	35
2.18	อิเล็กโตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ กัน	38
2.19	เปรียบเทียบแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวนในไดอิเล็กตริกตามลักษณะสนามไฟฟ้า	39
2.20	สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า	40
2.21	เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ	41
2.22	ค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของเหลว	43
2.23	ลักษณะกลไกการเกิดเบรกดาวนของหยดน้ำภายในฉนวนของเหลว	47
2.24	ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในทอมของอุณหภูมิในเฮกเซน	53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.25 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของความดันในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า	54
2.26 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของการป้องกันความยาวพัลส์	55
2.27 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของระยะเวลาป้องกันแรงดันของพัลส์ ในไฮโดรเจนเหลว	55
2.28 ผลของระยะเวลาในการป้องกันต่อค่าความคงทนแรงดันไฟฟ้า	55
2.29 ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมปริมาณความชื้นปะปนของน้ำมันหม้อแปลง	57
2.30 รูปคลื่นนิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 60-1	58
3.1 วัสดุและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ทดสอบสนามไฟฟ้าที่ใช้โอเล็กโตรด แบบ sphere-sphere	60
3.2 สนามไฟฟ้าที่ใช้โอเล็กโตรดแบบ sphere-sphere ในน้ำมันหม้อแปลง แบบมีระยะแคบ 2.5 mm.	61
3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้ากับระยะห่าง ระหว่างโอเล็กโตรดแบบ sphere-sphere	61
3.4 วัสดุและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ทดสอบสนามไฟฟ้าที่ใช้โอเล็กโตรด แบบ plate-plate	62
3.5 สนามไฟฟ้าที่ใช้โอเล็กโตรดแบบ plate-plate ในน้ำมันหม้อแปลง แบบมีระยะแคบ 2.5 mm.	62
3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้ากับระยะห่าง ระหว่างโอเล็กโตรดแบบ plate-plate	63
3.7 วัสดุและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ทดสอบสนามไฟฟ้าที่ใช้โอเล็กโตรด แบบ rod-rod	63
3.8 สนามไฟฟ้าที่ใช้โอเล็กโตรดแบบ rod-rod ในน้ำมันหม้อแปลง แบบมีระยะแคบ 2.5 mm	64
3.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้ากับระยะห่าง ระหว่างโอเล็กโตรดแบบ rod-rod	64
3.10 วัสดุและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ทดสอบสนามไฟฟ้าที่ใช้โอเล็กโตรด แบบ rod-sphere	65
3.11 สนามไฟฟ้าที่ใช้โอเล็กโตรดแบบ rod-sphere ในน้ำมันหม้อแปลง แบบมีระยะแคบ 2.5 mm	65
3.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้ากับระยะห่าง ระหว่างโอเล็กโตรดแบบ rod-sphere	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและตี IX อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.13	วัสดุและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ทดสอบสนามไฟฟ้าที่ใช้ อิเล็กโตรดแบบ rod-plate	67
3.14	สนามไฟฟ้าที่ใช้อิเล็กโตรดแบบ rod-plate ในน้ำมันหม้อแปลง แบบมีระยะแฉก 2.5 mm.	67
3.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้ากับระยะห่าง ระหว่างอิเล็กโตรดแบบ rod-plate	68
3.16	แบบจำลองกล่องบรรจุน้ำมัน	69
3.17	กล่องบรรจุน้ำมัน	70
3.18	แบบจำลองหัวอิเล็กโตรด	70
3.19	หัวอิเล็กโตรด	70
3.20	แบบจำลองชุดทดสอบน้ำมัน	71
3.21	แสดงส่วนต่างๆ ของชุดทดสอบน้ำมัน	72
3.22	น้ำมันพืชที่ใช้ทดสอบ	72
3.23	การเตรียมน้ำมัน	73
3.24	เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ	74
3.25	ชุดทดสอบน้ำมัน	74
3.26	โวลต์เดจิติไวเดอร์	75
3.27	ความต้านทานน้ำ	75
3.28	เครื่อง Temperature Adjust	76
3.29	Capacitance and Tan delta Meter	76
3.30	Test Cell	77
3.31	Liquid Electrode	77
3.32	วงจรการทดสอบความคงทนต่อแรงดัน IMPULSE	78
3.33	Test Cell	79
3.34	ชุดควบคุม Impulse Voltage Generator	79
3.35	Tektronix DPO 4054 Digital Phosphor Oscilloscope	79
4.1	วงจรการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า	80
4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากับจำนวนครั้ง ที่ผ่านการทดสอบของน้ำมันทานตะวัน	82
4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากับจำนวนครั้ง ที่ผ่านการทดสอบของน้ำมันรำข้าว	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและตัว X อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากับจำนวนครั้งที่ผ่านการทอดของน้ำมันถั่วเหลือง	84
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากับจำนวนครั้งที่ผ่านการทอดของน้ำมันข้าวโพด	85
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากับจำนวนครั้งที่ผ่านการทอดของน้ำมันปาล์ม	86
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากับชนิดน้ำมัน ทั้งที่ผ่านการทอด 10, 20, 30, 40 ครั้ง และน้ำมันใหม่	86
4.8 วงจรการทดสอบแพกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก	87
4.9 กราฟผลการทดสอบแพกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันใหม่แต่ละชนิด	90
4.10 กราฟแสดงผลการทดสอบ $\tan \delta$ ของน้ำมันที่ผ่านการทอด 10 ครั้งแต่ละชนิด	93
4.11 กราฟแสดงผลการทดสอบ $\tan \delta$ ของน้ำมันที่ผ่านการทอด 20 ครั้งแต่ละชนิด	96
4.12 กราฟแสดงผลการทดสอบ $\tan \delta$ ของน้ำมันที่ผ่านการทอด 30 ครั้งแต่ละชนิด	99
4.13 กราฟแสดงผลการทดสอบ $\tan \delta$ ของน้ำมันที่ผ่านการทอด 40 ครั้งแต่ละชนิด	102
4.14 วงจรการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์	103
4.15 กราฟแสดงผลการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ของน้ำมันแต่ละชนิด	105

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	คุณสมบัติของฉนวนของเหลวบางชนิดที่นิยมใช้เป็นฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้า	8
2.2	คุณลักษณะจำเพาะ และผลกระทบที่เกิดขึ้น	9
2.3	โครงสร้างโมเลกุลและสัดส่วนขององค์ประกอบพื้นฐานของน้ำมันหม้อแปลง	12
2.4	คุณสมบัติทางฟิสิกส์, เคมี และไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง	13
2.5	แสดงปริมาณกรดไขมันในน้ำมันพืช	15
2.6	สูตรโครงสร้างของกรดไขมันในน้ำมันพืช	15
2.7	ส่วนประกอบทางเคมีของเมล็ดพืชน้ำมันและสมบัติของน้ำมัน	19
2.8	ปริมาณของกรดไขมันชนิดอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวในโมเลกุลของไตรเอซิลกลีเซอรอลในน้ำมันถั่วเหลือง	21
2.9	ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวบริสุทธิ์ Alston	44
2.10	รูปทรงทางเรขาคณิตของอิเล็กโตรด มีสัมประสิทธิ์แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าที่แตกต่างกัน	51
2.11	ค่าตัวแปรต่างๆ มีผลต่อแรงดันเบรกดาวน์ในฉนวนเหลวประเภทน้ำมันแร่	51
3.1	ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดและลักษณะสนามไฟฟ้ากับรูปแบบอิเล็กโตรด	68
3.2	ข้อมูล Liquid Electrode	77
4.1	ตารางแสดงผลการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันทานตะวัน	81
4.2	ตารางแสดงผลการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันรำข้าว	82
4.3	ตารางแสดงผลการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันถั่วเหลือง	83
4.4	ตารางแสดงผลการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันข้าวโพด	84
4.5	ตารางแสดงผลการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันปาล์ม	85
4.6	ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันทานตะวัน	88
4.7	ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันถั่วเหลือง	88
4.8	ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันปาล์ม	89
4.9	ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันรำข้าว	89
4.10	ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันข้าวโพด	90
4.11	ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันทานตะวัน ที่ผ่านการทอด 10 ครั้ง	91
4.12	ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันถั่วเหลือง ที่ผ่านการทอด 10 ครั้ง	91

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.13 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันปาล์ม ที่ผ่านการทอด 10 ครั้ง	92
4.14 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันรำข้าว ที่ผ่านการทอด 10 ครั้ง	92
4.15 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันข้าวโพด ที่ผ่านการทอด 10 ครั้ง	93
4.16 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันทานตะวัน ที่ผ่านการทอด 20 ครั้ง	94
4.17 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันถั่วเหลือง ที่ผ่านการทอด 20 ครั้ง	94
4.18 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันปาล์ม ที่ผ่านการทอด 20 ครั้ง	95
4.19 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันรำข้าว ที่ผ่านการทอด 20 ครั้ง	95
4.20 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันข้าวโพด ที่ผ่านการทอด 20 ครั้ง	96
4.21 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันทานตะวัน ที่ผ่านการทอด 30 ครั้ง	97
4.22 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันถั่วเหลือง ที่ผ่านการทอด 30 ครั้ง	97
4.23 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันปาล์ม ที่ผ่านการทอด 30 ครั้ง	98
4.24 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันรำข้าว ที่ผ่านการทอด 30 ครั้ง	98
4.25 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันข้าวโพด ที่ผ่านการทอด 30 ครั้ง	99
4.26 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันทานตะวัน ที่ผ่านการทอด 40 ครั้ง	100
4.27 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันถั่วเหลือง ที่ผ่านการทอด 40 ครั้ง	100

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.28 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันปาล์ม ที่ผ่านการทอด 40 ครั้ง	101
4.29 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันรำข้าว ที่ผ่านการทอด 40 ครั้ง	101
4.30 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันข้าวโพด ที่ผ่านการทอด 40 ครั้ง	102
4.31 ผลการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบ	104
4.32 ผลการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวก	104



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบันประชากรมนุษย์บนโลกนั้น มีจำนวนเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องหลายเท่าเมื่อเทียบกับในอดีต ซึ่งมนุษย์ทุกคนก็ล้วนแล้วแต่ต้องการปัจจัยต่างๆ ในการดำเนินชีวิต พลังงานก็นับเป็นหนึ่งในปัจจัยเหล่านั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานเชื้อเพลิงอย่างน้ำมันเป็นปัจจัยแรกสำหรับต้นทุนการผลิตในทุกกระบวนการผลิต ซึ่งปัจจุบันนั้นมีการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรและมีการขยายตัวทางภาคธุรกิจที่เกี่ยวข้องอุตสาหกรรมมากขึ้น ทำให้ความต้องการพลังงานเชื้อเพลิงมีเพิ่มมากขึ้น ซึ่งน้ำมันเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่ใช้แล้วหมดไป ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก เมื่อน้ำมันในโลกมีปริมาณลดลงเรื่อยๆ จนเริ่มที่จะเกิดภาวะขาดแคลน จึงทำให้ราคาของน้ำมันสูงขึ้น ดังนั้นปัจจุบันจึงมีนักวิจัยและหน่วยงานจำนวนมาก พยายามที่จะหาพลังงานต่างๆ ที่สามารถนำมาทดแทนน้ำมันที่ใช้อยู่ในขณะนี้ได้

หากจะกล่าวถึงหม้อแปลงในระบบไฟฟ้านั้น การทำงานของหม้อแปลง จะอาศัยน้ำมันทำหน้าที่เป็นฉนวนและเป็นตัวถ่ายเทความร้อนให้กับหม้อแปลง โดยน้ำมันหม้อแปลงนั้นได้มาจากกระบวนการกลั่นปิโตรเลียมและการสังเคราะห์ทางเคมี เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่กำหนด ซึ่งน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้อยู่ในปัจจุบันนั้น มีราคาอยู่ในระดับที่ค่อนข้างสูงและมีโอกาสที่จะหมดไปจากโลก ซึ่งถ้าหากสามารถหาน้ำมันชนิดอื่น ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันหม้อแปลง แต่มีราคาต่ำกว่ามาใช้ทดแทนได้ ก็จะเป็นการประหยัดทรัพยากรธรรมชาติและค่าใช้จ่ายได้เป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง หากสามารถหาน้ำมันพืชที่ผ่านการใช้แล้ว มาใช้แทนน้ำมันหม้อแปลงได้ ก็จะเป็นการใช้ทรัพยากร และเป็นการนำทรัพยากรกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้อย่างคุ้มค่ายิ่งขึ้นไปอีก

ด้วยเหตุนี้เอง จึงได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันพืชชนิดต่างๆ ด้วยกัน 5 ชนิด ได้แก่ น้ำมันถั่วเหลือง, น้ำมันรำข้าว, น้ำมันปาล์ม, น้ำมันข้าวโพด และน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน โดยนำมาเปรียบเทียบกับคุณสมบัติกับน้ำมันหม้อแปลง ซึ่งแบ่งเป็น 2 กรณี คือ น้ำมันใหม่และน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้ว เพื่อวิเคราะห์และหาความเป็นไปได้ในการนำน้ำมันพืชเหล่านี้ไปใช้งานแทนน้ำมันหม้อแปลง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อวิเคราะห์และหาความเป็นไปได้ในการนำน้ำมันพืชไปใช้งานแทนน้ำมันหม้อแปลง
- 2) เพื่อทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง และน้ำมันพืชชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) เพื่อให้เข้าใจถึงเทคนิคการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ น้ำมันหม้อแปลง และน้ำมันพีชชนิดต่าง ๆ

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย

- 1) ศึกษาทฤษฎีการทดสอบน้ำมันหม้อแปลงและน้ำมันพีชที่ระบุตามมาตรฐาน IEC 156, ASTM D3300-00 และ ASTM D924-03A เพื่อใช้ศึกษาถึงลักษณะการทดสอบ และ ขั้นตอนในการทดสอบตามมาตรฐาน รวมทั้งผลที่ได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน
- 2) วิเคราะห์สนามไฟฟ้าในขณะทดสอบน้ำมันหม้อแปลงและน้ำมันพีชชนิดต่าง ๆ โดยการใช้โปรแกรมไฟไนท์อีลีเมนต์ในการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (simulation)
- 3) ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า, ความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ และค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริกสำหรับฉนวนน้ำมัน

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

โครงการนี้ส่วนหนึ่งเป็นการใช้ประโยชน์จากโปรแกรมที่ใช้เพื่อวิเคราะห์สนามไฟฟ้าจากน้ำมันหม้อแปลงรวมถึงนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ไปศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้า ตลอดจนศึกษาแนวทางการลดทอนผลกระทบ โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

- 1) ศึกษาทฤษฎีและพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยโดยมุ่งเน้นในส่วนของน้ำมันหม้อแปลงและน้ำมันพีช
- 2) ศึกษามาตรฐานการทดสอบน้ำมันหม้อแปลงและน้ำมันพีชตามมาตรฐาน IEC 156, ASTM D3300-00 และ ASTM D924-03A
- 3) ศึกษาการใช้โปรแกรมไฟไนท์อีลีเมนต์ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า รวมทั้งโปรแกรมที่ใช้ในการเขียนแบบเพื่อการวิเคราะห์ เช่น AutoCad, Comsol เป็นต้น
- 4) ศึกษาการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า, ความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ และการวัดค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันหม้อแปลงและน้ำมันพีช
- 5) ออกแบบวงจรการทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า, ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ และการวัดค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันหม้อแปลงและน้ำมันพีชให้ได้ตามมาตรฐาน IEC 156, ASTM D3300-00 และ ASTM D924-03A
- 6) ทดสอบและบันทึกผลการทดลอง
- 7) สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนการดำเนินงานในโครงการวิศวกรรม

ขั้นตอนการดำเนินงาน	2552							2553		
	มี.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. ศึกษาทฤษฎีและพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยโดยมุ่งเน้นในส่วนของน้ำมันพืชและน้ำมันหม้อแปลง	←-----→									
2. ศึกษามาตรฐานการทดสอบน้ำมันหม้อแปลงตามมาตรฐาน IEC 156 และ IEC 247	←-----→									
3. ศึกษาการใช้โปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า	←-----→									
4. ศึกษาการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์และการวัดค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันหม้อแปลงและน้ำมันพืช		←-----→								
5. ออกแบบวงจรการทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ และการวัดค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันหม้อแปลงและน้ำมันพืช			←-----→							
6. ทดสอบและบันทึกผลการทดลอง				←-----→						
7. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง						←-----→				
8. จัดทำปริญญานิพนธ์								←-----→		

←-----→ แผนการดำเนินงานที่กำหนดไว้

←-----→ แผนการดำเนินงานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำโครงการวิจัยฉบับนี้

- 1) ทราบถึงมาตรฐาน, ขั้นตอน และวิธีการทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงและน้ำมันพีชชนิดต่าง ๆ
- 2) ทราบถึงมาตรฐาน, ขั้นตอน และวิธีการทดสอบหาค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกในน้ำมันหม้อแปลงและน้ำมันพีชชนิดต่าง ๆ
- 3) ทราบถึงมาตรฐาน, ขั้นตอน และวิธีการทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ในน้ำมันหม้อแปลงและน้ำมันพีชชนิดต่าง ๆ
- 4) ทราบถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง และน้ำมันพีชชนิดต่าง ๆ
- 5) เป็นแหล่งข้อมูลและวิจัยเกี่ยวกับเรื่องของฉนวนน้ำมันในระบบไฟฟ้าแก่นักวิจัยและนักศึกษาที่ต้องการการพัฒนาและศึกษาต่อ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การฉนวนเป็นสิ่งจำเป็นในการใช้ประโยชน์ของไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับแรงดันสูง การฉนวนเป็นการป้องกันมิให้เกิดอันตรายแก่สิ่งมีชีวิตที่เข้าไปใกล้สัมผัสหรือป้องกันมิให้เกิดการลัดวงจร การออกแบบฉนวนที่ดีและประหยัดจำเป็นต้องใช้ความรู้เทคนิคการฉนวน ซึ่งเกี่ยวข้องกับลักษณะคุณสมบัติของฉนวน และพิกัดความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า หน้าที่ที่สำคัญที่สุดของตัวฉนวนหรือวัสดุฉนวนก็คือ การเป็นฉนวนคั่นระหว่างตัวนำที่มีแรงดันต่างกัน หรือระหว่างตัวนำมีแรงดันกับดิน ในขณะเดียวกันก็ทำหน้าที่รับแรงทางกล, เผชิญกับความชื้น, ปฏิกริยาเคมี, และระบายความร้อน ยิ่งกว่านั้นต้องคำนึงถึงความประหยัดโดยพิจารณาถึงอายุการใช้งานที่นานพอ การฉนวนจึงมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อเสถียรภาพและความเชื่อถือได้ของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ฉะนั้นการเลือกใช้วัสดุฉนวนจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของการฉนวนที่ดีและเหมาะสม

เนื่องจากปัจจุบันฉนวนเหลวที่นำมาใช้งานในระบบไฟฟ้าแรงสูง และในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต่างๆ เป็นฉนวนเหลวที่ได้มาจากการกลั่นปิโตรเลียม และในในอนาคตน้ำมันปิโตรเลียมอาจหมดไป จึงได้มีการศึกษาเพื่อหาความเป็นไปได้ในการนำน้ำมันพืชมาใช้งานแทน

2.1 ประเภทของฉนวน

ฉนวนในระบบไฟฟ้านั้น โดยทั่วไปอาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ ฉนวนแข็ง, ฉนวนกึ่ง และฉนวนเหลว ซึ่งฉนวนแต่ละประเภทนั้นจะมีลักษณะและคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป โดยการเลือกใช้ฉนวนแต่ละประเภทจะต้องเลือกให้เหมาะสมกับชนิดและประเภทของงาน จึงจะทำให้การฉนวนมีประสิทธิภาพสูง ฉะนั้นเราจึงจำเป็นที่จะต้องทราบถึงลักษณะและคุณสมบัติต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับฉนวนในแต่ละประเภท

2.1.1 ฉนวนแข็ง [1]

ในระบบไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ไฟฟ้า จะต้องใช้ฉนวนแข็งประกอบกับฉนวนเหลวหรือกึ่ง เพื่อทำหน้าที่ยึดให้มั่นคง และรองรับแรงทางกลอันเกิดจากน้ำหนักของโครงสร้างหรือแรงกลไดนามิกส์ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าอีกด้วย ฉนวนกึ่งและฉนวนเหลวใช้ทำหน้าที่การฉนวนทางไฟฟ้าได้ดีและเพียงพอ แต่ก็ต้องใช้ฉนวนแข็งประกอบ ทำหน้าที่ยึดและรับแรงกล ตัวอย่างง่ายๆ เช่น สายไฟขึงในอากาศ ใช้อากาศทำหน้าที่เป็นฉนวน แต่สายไฟจะลอยหรือยึดอยู่ในอากาศได้จำเป็นต้องใช้ฉนวนแข็ง เช่น ลูกถ้วยฉนวนทำหน้าที่ยึดสายไฟไว้ให้มั่นคง ห่างจากดินและสายไฟอื่นที่มีศักย์ไฟฟ้าไม่เท่ากันหรือเคเบิลอัดก๊าซ หรืออัดน้ำมันก็ตาม ต้องใช้ฉนวนแข็งเป็นตัวยึดตัวนำ หรือในหม้อแปลงไฟฟ้าใช้ฉนวนเหลวหรือกึ่งเป็นฉนวนหลัก แต่ก็

ต้องใช้ฉนวนแข็งทำหน้าที่ยึดขดลวดต่าง ๆ และแกนเหล็กให้มั่นคง ให้มีระยะห่างตามที่กำหนดตามแบบ ฉนวนนั้นจึงกล่าวได้ว่าฉนวนที่สำคัญยิ่งในระบบและอุปกรณ์ไฟฟ้า

ฉนวนแข็งที่ดีนั้นจะต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง, มีความต้านทานสูงทุกระดับแรงดัน, มีกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำ, ทนต่อแรงทางกลได้สูง, ปราศจากฟองก๊าซและความชื้น, ทนความร้อนได้สูง, ทนต่อปฏิกิริยาเคมีได้ดี และไม่เป็นพิษเมื่อติดไฟ ฉนวนแข็งเมื่อเกิดเบรกดาวนหรือเจาะทะลุ และเสียสภาพการฉนวนโดยสมบูรณ์ มีพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกระบายความร้อนได้ไม่ดีเท่าฉนวนเหลว ถ้ามีฟองก๊าซอยู่ในเนื้อฉนวนจะเป็นต้นเหตุการเกิดดิสชาร์จบางส่วนและนำไปสู่การเกิดเบรกดาวนในที่สุด ฉนวนแข็งที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่ กระดาษกระดาษอัด, ยาง, ไมก้า, แก้ว, เซรามิกหรือพอร์ซเลน, เบกซ์ไลท์, คาสต์เรซิน, ไฟเบอร์ใยแก้ว, พีวีซี, พีอี (PE), ครอสลิงค์ (XLPE) เป็นต้น

2.1.2 ฉนวนก๊าซ [2]

ฉนวนก๊าซมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน โดยใช้เป็นฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เช่น ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ใช้อากาศชั้นระหว่างสายตัวนำ โดยที่อากาศเป็นฉนวนที่ดีและไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เช่น หม้อแปลง, สายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ก็ยังนิยมใช้ก๊าซ SF₆ เป็นฉนวนหม้อแปลงบางประเภทก็ยังมีการใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นฉนวนร่วมกับน้ำมันหม้อแปลงด้วย

การใช้อากาศหรือก๊าซเป็นฉนวนนั้น เป็นที่นิยมกันอย่างมากในระบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากการที่ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่าย และมีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดีเมื่อเป็นอากาศแห้งและสะอาด การใช้อากาศเป็นฉนวนอาจจะเป็นฉนวนหลักในระบบการส่งจ่ายซึ่งจะใช้เป็นฉนวนระหว่างสายตัวนำระหว่างเฟสหรืออาจจะใช้อากาศเป็นฉนวนผสมกับฉนวนแข็ง ซึ่งก็คือลูกถ้วยฉนวนในการคั่นสายตัวนำกับเสาส่งหรือระบบกราวด์ ปัญหาหลักที่พบในการใช้อากาศเป็นฉนวนก็คือ การที่คุณสมบัติการเป็นฉนวนของอากาศลดลง เมื่ออากาศมีความสกปรกและความเปียกชื้น

2.1.3 ฉนวนเหลว [1,2,3]

ฉนวนเหลวถูกนำมาใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เช่น สายเคเบิลที่มีฉนวนเป็นกระดาษชุบน้ำมัน, หม้อแปลงชนิดฉนวนด้วยน้ำมัน, ตัวเก็บประจุแรงสูง และเบรกเกอร์ บางชนิด เป็นต้น ลักษณะโมเลกุลของฉนวนของเหลวจะมีระยะห่างระหว่างโมเลกุลพอๆ กับขนาดโมเลกุล ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับระยะห่างระหว่างโมเลกุลของก๊าซแล้วจะสั้นกว่ามาก ดังนั้นระยะทางอิเล็กตรอนจะสามารถเคลื่อนที่ได้จึงสั้นกว่า พลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจากสนามไฟฟ้าจึงมีน้อย ในการที่จะเกิดการแตกตัวเป็นไอออนโดยการชนต้องใช้สนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงมาก ฉนวนเหลวจึงมีความแตกต่างกับฉนวนแข็ง โดยที่โมเลกุลของฉนวนเหลวไม่ได้ถูกยึดเหนี่ยวไว้ด้วยกันอย่างหนาแน่นเหมือนโมเลกุลของแข็ง โมเลกุลของเหลวสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนที่ไปมาได้โดยอิสระพอสมควร อนุภาคไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายกว่าของแข็ง เมื่ออนุภาคไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปจะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในเนื้อฉนวนเหลว ฉนวนเหลวที่นำมาใช้ในระบบไฟฟ้าและอุปกรณ์ส่วนใหญ่จะเป็นประเภทน้ำมันไฮโดรคาร์บอน หรือ ฉนวนไฟฟ้าสังเคราะห์ซึ่งทนความร้อนได้สูง ซึ่งฉนวนประเภทที่มีความบริสุทธิ์ที่นั่นหาได้ยาก เช่นเดียวกับก๊าซบริสุทธิ์ ส่วนใหญ่แล้วในฉนวนจะมีสิ่งเจือปนอยู่ไม่มากก็น้อย เช่น ผุ่นและความชื้น ดังนั้นการวิเคราะห์เบรกดาวนในฉนวนของเหลวจึงต้องมีความสำคัญเดียวกับปัจจัยผลของสิ่งเจือปนเป็นอย่างมาก

ลักษณะคุณสมบัติที่ต้องการของฉนวน สำหรับฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าอาจกำหนดด้วยคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญคือ

- 1) ความถ่วงจำเพาะ (ดูตารางที่ 2.1)
- 2) จุดติดไฟ (จุดติดไฟสูง ย่อมหมายถึงโอกาสเกิดเพลิงไหม้ย่อมมีน้อย)
- 3) ความหนืด (ความหนืดสูง ย่อมหมายถึงความสามารถระบายความร้อนได้ดี)
- 4) ความเป็นกรด (ซึ่งแสดงถึงปริมาณส่วนที่เป็นกรดผสมอยู่ในของเหลว)
- 5) แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่า $\tan \delta$ (เป็นตัวชี้ให้ทราบว่าการเกิดพลังงานสูญเสียเล็กน้อยเพียงใด)

ในตารางที่ 2.1 แสดงถึงลักษณะสมบัติบางประการของฉนวนเหลวที่ใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทั่วไป ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้า, เซอร์คิตเบรกเกอร์, เคเบิล, ตัวเก็บประจุ, ฉนวนเหลวที่ดีจะต้องระบายความร้อนได้ดี, ทนต่อปฏิกิริยาทางเคมี, มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้สูง, มีแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำ, ทนความร้อนได้สูงหรือติดไฟได้ยาก และไม่เกิดก๊าซพิษเมื่อติดไฟ

โดยหลักการแล้วฉนวนเหลวจะทำหน้าที่การฉนวนได้ดีกว่าฉนวนประเภทก๊าซและฉนวนแข็ง ที่จัดว่าดีกว่าฉนวนก๊าซเพราะมีความหนาแน่นสูงกว่าฉนวนก๊าซ ย่อมมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าฉนวนก๊าซ และจัดว่าดีกว่าฉนวนแข็งเพราะฉนวนสามารถแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างได้ง่ายกว่า ที่สำคัญฉนวนเหลวสามารถกลับคืนสู่การเป็นฉนวนเองได้ภายหลังการดีสชาร์จผ่านพ้นไปแล้ว ข้อดีอีกประการหนึ่งของฉนวนเหลว คือ สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีอย่างไรก็ตามฉนวนของเหลวจะมีข้อดีหลายประการดังที่กล่าวมาแล้ว แต่ในทางปฏิบัติเราจะพบว่ามีการใช้ฉนวนของเหลวก็น้อยกว่าฉนวนก๊าซและฉนวนแข็ง ทั้งนี้เนื่องจากฉนวนของเหลวที่ใช้กันในเชิงการค้ามักไม่บริสุทธิ์จึงมักใช้ฉนวนของเหลวในรูปของกระบวนการแช่อิม (Impregnation) มากกว่า

ถ้าพิจารณาจากลักษณะโครงสร้างและองค์ประกอบของฉนวนเหลวอาจแยกได้ 2 ประเภท คือ ฉนวนเหลวบริสุทธิ์และฉนวนเหลวเชิงการค้า [3]

1) ฉนวนเหลวเชิงการค้า หมายถึง ฉนวนที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่ไม่บริสุทธิ์ มีโครงสร้าง หรือส่วนผสมของโมเลกุลยุ่งยากซับซ้อน และอาจมีฟองอากาศเจือปนอยู่

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของฉนวนของเหลวบางชนิดที่นิยมใช้เป็นฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้า [4]

Property	Transformer oil	Cable oil	Capacitor oil	Askarels	Silicone oil
Flash point	130-180				
Breakdown strength at 20°C on 2.5mm standard sphere gap	10-25 kV/mm	30 kV/mm	20 kV/mm	20-25 kV/mm	30-40 kV/mm
Relative permittivity (50 Hz)	2.2-2.3	2.3-2.6	2.1	4.8	2-73.0
$\tan \delta$ (50 Hz)	0.001	0.002	0.25×10^{-3}	0.60×10^{-3}	10^{-3}
$\tan \delta$ (1 kHz)	0.0005	0.0001	0.10×10^{-3}	0.50×10^{-3}	10^{-4}
Resistivity (Ohm-cm)	10^{12} - 10^{13}	10^{12} - 10^{13}	10^{13} - 10^{14}	2×10^{13}	3×10^{14}
Specific gravity at 20°C	0.89	0.93	0.88-0.89	1.4	1.0-1.1
Viscosity at 20°C (CS)	30	30	30	100-150	10-1000
Acid value (mg/gm of KOH)	Nil	Nil	Nil	Nil	Nil
Refractive index	1.4820	1.4700	1.4740	1.6000	1.5000-1.6000
Saponification (mg of KOH/gm of oil)	0.01	0.01	0.01	<0.01	<0.01
Expansion (20-100°C)	$7 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$	$7 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$	$7 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$	$7 \times 10^{-1} / ^\circ\text{C}$	$5 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$
Max. permissible water content (ppm)	50	50	50	<30 (negligible)	<30 (negligible)
Thermal conductivity (mw/cm°C)	1.6				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 คุณลักษณะจำเพาะ และผลกระทบที่เกิดขึ้น [4]

คุณลักษณะ	คำอธิบายเพิ่มเติม
ความหนืด	ถ้าน้ำมันหม้อแปลงมีความหนืดต่ำ จะทำให้ประสิทธิภาพการระบายความร้อนดี
ความแข็งแรง	ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ความแข็งแรงเชิงกำลังไฟฟ้ามีค่าต่ำ เชิงกำลังไฟฟ้าแต่จะทำให้ก๊าซที่ละลายในน้ำมันเกิดการแตกตัวมากขึ้น และความเป็นฉนวนของน้ำมันจะลดลง
จุดวาบไฟ	เป็นระดับอุณหภูมิที่ไอหน้าบนผิวน้ำมันสามารถติดไฟขึ้นเองได้โดยธรรมชาติ ถ้าน้ำมันหม้อแปลงมีจุดวาบไฟต่ำ จะทำให้น้ำมันระเหยได้ง่ายและขยายตัวได้มากนั่นคือ ทำให้ความดันหม้อแปลงมีค่าสูง
ความหนาแน่น	เป็นค่าที่ระบุไว้เพื่อป้องกันมิให้น้ำมันกลายเป็นน้ำแข็งในสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำ โดนทั่วไปจะกำหนดไว้ประมาณ 0.895 g/cm^2 ที่ 20°C
จุดเทไหล	เป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับความหนาแน่น ซึ่งจะเป็นค่าอุณหภูมิที่มีค่าต่ำที่สุดที่น้ำมันยังไหลได้
ค่ามุลน้ำมันและค่าความเป็นกรด	เป็นค่าที่เกิดขึ้นภายหลังที่น้ำมันทำปฏิกิริยากับอากาศซึ่งหากมีค่าความเป็นกรดสูง จะทำให้ประสิทธิภาพการระบายความร้อนต่ำ และยังมีผลต่อการไหลเวียนของน้ำมันในท่อน้ำมันด้วย เพราะว่ามีมุลน้ำมันไปเกาะภายในท่อน้ำมัน
ความแข็งแรงเชิงไฟฟ้า	เป็นค่าที่ระบุความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้น้ำมันคงค่าความเป็นฉนวนได้ดี
การปนเปื้อนของสารอื่น	ได้แก่ สารจำพวก กำมะถันและน้ำ ซึ่งกรณีของกำมะถันนั้นจะต้องไม่มีอยู่เลยในน้ำมัน ส่วนน้ำก็จะต้องอยู่ในพิภักดิ์ ทั้งนี้เพื่อรักษาความเป็นฉนวนของน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ฉนวนเหลวบริสุทธิ์ หมายถึง ฉนวนของเหลวที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่มีโมเลกุลอย่างง่าย ๆ ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ปราศจากสิ่งเจือปน หรือมีบ้างแต่น้อยกว่าค่าคงที่กำหนด ฉนวนที่ใช้ในทางปฏิบัติส่วนใหญ่จะเป็นฉนวนเชิงการค้ำ อาจมีการเติมสารเคมีบางชนิดลงไป เพื่อให้ฉนวนมีคุณสมบัติที่เหมาะสมมากขึ้น เช่น การลดการเกิดการปฏิกิริยาออกซิเดชัน, ช่วยลดความหนืด เป็นต้น ฉะนั้นค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวจึงขึ้นอยู่กับสิ่งเจือปนที่มากน้อยแตกต่างกันไป อย่างไรก็ตามสิ่งเจือปนในฉนวนเหลวอาจจะกรองให้สะอาดใหม่ได้ และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าก็จะสูงขึ้น [3]

น้ำมันที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันก็คือ น้ำมันปิโตรเลียม แต่มีข้อเสียคือ สามารถที่ติดไฟได้ง่ายที่อุณหภูมิสูงๆ และเกิดก๊าซพิษ ส่วนข้อดีคือ ราคาถูก ดังนั้นในอนาคตมีแนวโน้มที่จะนำเอาน้ำมันสังเคราะห์มาใช้แทน เพื่อลดอันตรายจากการติดไฟ จากรายละเอียดข้างต้นสามารถสรุปประเภทฉนวนเหลวเป็นไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.1



2.2 น้ำมันหม้อแปลง[3,4]

น้ำมันหม้อแปลงเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากการกลั่นปิโตรเลียมที่ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนหลายชนิด สามารถจำแนกตามโครงสร้างโมเลกุลได้ 3 ประเภท คือ พาราฟินิก (parafinic), แนฟทีนิก(napthenic) และอะโรมาติก (aromatic) ซึ่งพาราฟินิกและแนฟทีนิกเป็นประเภทที่มีโครงสร้างของไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว จึงถือได้ว่ามีเสถียรภาพสูง ส่วนอะโรมาติกเป็นประเภทที่มีโครงสร้างของไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว ทำให้สารประเภทนี้ ไม่ค่อยมีเสถียรภาพ แต่ละประเภทยังประกอบไปด้วยโมเลกุลที่มีขนาดและความซับซ้อนของโครงสร้างที่แตกต่างกัน เช่น ชนิดที่อุณหภูมิห้อง ประเภทที่มีขนาดของไฮโดรคาร์บอนเล็กและโครงสร้างไม่ซับซ้อนมากนัก จะอยู่ในสถานะก๊าซ ประเภทที่มีมวลโมเลกุลสูงจะมีความหนืด ระเหยกลายเป็นไอยาก ประเภทที่มีมวลโมเลกุลสูงมากๆ และโครงสร้างสลับซับซ้อนยิ่งระเหยยาก มีความหนืดสูงและมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง เช่น แอสฟัลต์ (asphaltic bitumen) และซีฟิ่งพาราฟิน (paraffin wax) เป็นต้น

ส่วนองค์ประกอบอื่นที่ไม่ใช่ไฮโดรคาร์บอนหรือสิ่งแปลกปลอมอื่น ๆ จะถูกกำจัดออกไประหว่างกระบวนการกลั่นน้ำมัน จากความแตกต่างของน้ำหนักโมเลกุลและกระบวนการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมดังกล่าว จึงทำให้คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงจากแต่ละแห่งแตกต่างกันไป ด้วย โดยน้ำหนักโมเลกุลซึ่งเป็นวัตถุดิบสำคัญนั้น พอจะแบ่งได้ 3 ประเภท ดังนี้

ประเภทแรก เป็นน้ำหนักโมเลกุลที่มีพาราฟินิกเป็นมูลฐาน (paraffin base crude) ประกอบด้วยพาราฟินิกและแนฟทีนิก ที่มีมวลโมเลกุลมีค่ามากและซับซ้อน มีสัดส่วนของพาราฟินิกมาก และสัดส่วนของอะโรมาติกต่ำ ดังนั้นจึงมีซีฟิ่ง (wax) จำนวนมาก ส่วนแอสฟัลต์มีจำนวนน้อย

ประเภทที่สอง เป็นน้ำหนักโมเลกุลที่มีแนฟทีนิกเป็นมูลฐาน (naphtene base crude) มีสัดส่วนของแนฟทีนิกและอะโรมาติกมากกว่าประเภทแรก และมีสัดส่วนของพาราฟินิกต่ำ แนฟทีนิกที่ผสมอยู่มีมวลโมเลกุลสูง จึงมีสัดส่วนของปริมาณแอสฟัลต์มากกว่า

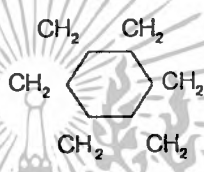
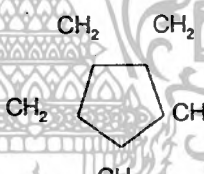
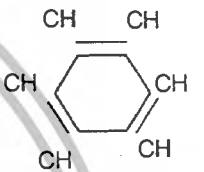
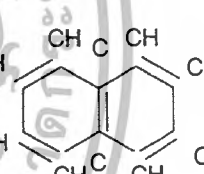
ประเภทที่สาม เป็นน้ำหนักโมเลกุลผสม (mixed base crude) มีสัดส่วนของพาราฟินิกและแนฟทีนิกใกล้เคียงกัน น้ำมันที่ได้จากน้ำหนักโมเลกุลชนิดนี้จะคล้ายกับที่ได้จากน้ำหนักโมเลกุลสองชนิดแรก ขึ้นอยู่กับว่าไฮโดรคาร์บอนประเภทใดมีสัดส่วนมากกว่า ก็จะแสดงคุณสมบัติดังกล่าวออกมามากกว่า

โดยทั่วไปในน้ำหนักโมเลกุลจะมีองค์ประกอบอื่นที่ไม่ใช่สารประกอบไฮโดรคาร์บอนอยู่ด้วยต้องกำจัดออกไปในกระบวนการกลั่นและในการใช้งานจริงจะพยายามให้อัตราส่วนของอะโรมาติกน้อยที่สุดเพราะเป็นสาเหตุสำคัญของการเสียหายทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง โดยส่วนใหญ่นิยมให้อัตราส่วนแนฟทีนิกมากเพราะจะไม่เกิดซีฟิ่ง ซึ่งซีฟิ่งมีผลทำให้น้ำมันหม้อแปลงมีความหนืดสูงขึ้นที่อุณหภูมิต่ำทำให้มีปัญหาเรื่องการระบายความร้อน ส่วนพาราฟินิกจะมีส่วนประกอบของซีฟิ่งจำนวนมาก

น้ำมันหม้อแปลงที่ใช้กันทั่วไปนั้นสามารถผลิตได้จากน้ำหนักโมเลกุลทั้งสามชนิดที่กล่าวมาข้างต้นเป็นวัตถุดิบเบื้องต้น โดยมีกระบวนการที่ใช้ในการผลิตสำหรับน้ำหนักโมเลกุลแต่ละชนิดจะแตกต่างกันออกไป เพื่อให้อัตราส่วนขององค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนทั้ง 3 ประเภทเหมาะสม โดยทั่วไปแล้วจะมีสัดส่วนของพาราฟินิกประมาณ 40-60 เปอร์เซ็นต์, แนฟทีนิกประมาณ 30-50 เปอร์เซ็นต์ และอะโรมาติก 5-20 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก นอกจากนี้ยังมีการเติมสารเติมแต่ง (additive) บางชนิด เพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง ตัวอย่างเช่น สารยับยั้งการเกิดออกซิเดชัน (oxidation inhibitor) ช่วยให้น้ำมันเกิดออกซิเดชันยากขึ้น เพื่อให้ น้ำมันหม้อแปลงที่ได้มีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานเป็นฉนวนทางไฟฟ้าที่ดี

น้ำมันหม้อแปลงที่นิยมใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง บางครั้งอาจจะมีชื่อเรียกแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและการนำไปใช้งานกับอุปกรณ์ชนิดนั้น ส่วนใหญ่ใช้ทำหน้าที่เป็นฉนวนและระบายความร้อนในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง และที่ใช้ในคาปาซิเตอร์แรงสูงก็มักจะเรียกว่า น้ำมันคาปาซิเตอร์ เป็นชนิดที่มีคุณสมบัติคล้ายกับน้ำมันหม้อแปลง แต่มีความบริสุทธิ์ที่สูงกว่า ซึ่งใช้เป็นตัวกลางในการแช่กระดาษฉนวนและฟิล์มโพลีเอสเตอร์ในการสร้างคาปาซิเตอร์ เป็นต้น โครงสร้างโมเลกุลและสัดส่วนขององค์ประกอบพื้นฐานของน้ำมันหม้อแปลงโดยทั่วไปสามารถแสดงดังตาราง 2.3

ตารางที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลและสัดส่วนขององค์ประกอบพื้นฐานของน้ำมันหม้อแปลง [4]

พาราฟินิก	แนฟทีนิก	อะโรมาติก
<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> $\begin{array}{c} \text{CH}_2 \\ \\ \text{--CH}_2\text{--CH--CH}_2\text{--CH--CH}_2\text{--} \\ \qquad \\ \text{CH} \qquad \text{CH}_2 \end{array}$	<p>หรือ</p>  <p>หรือ</p> 	<p>หรือ</p>  <p>หรือ</p> 

ลักษณะสมบัติที่ต้องการของน้ำมันหม้อแปลงสำหรับการฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจะกำหนดด้วยคุณสมบัติทางฟิสิกส์, เคมี และไฟฟ้า ซึ่งต้องใช้ให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์การใช้งาน คุณสมบัติดังกล่าวแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทางฟิสิกส์, เคมี และไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง [4]

คุณสมบัติทางฟิสิกส์	คุณสมบัติทางเคมี	คุณสมบัติทางไฟฟ้า
การระบายความร้อน - ความหนาแน่น - ความหนืด - สัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน (coefficient of thermal expansion) - ความนำไฟฟ้าเนื่องจากความร้อน (thermal conductivity) - ความถ่วงความร้อนจำเพาะ (specific heat) - การเก็บรักษาและปฏิบัติงาน - จุดติดไฟ - จุดวาบไฟ - ความดันไอ - อุณหภูมิติดไฟทันที (auto ignition temperature)	องค์ประกอบทางเคมี - โครงสร้างโมเลกุล - อัตราส่วนปริมาณของพาราฟินิก, แนฟทีนิก และอะโรมาติก - ค่าความเป็นกลาง - แรงตึงผิว (interfacial tension)	- ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า - ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก - ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ - ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า - ความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ - การดีสชาร์จบางส่วนและแรงดันเริ่มเกิดดีสชาร์จบางส่วน

2.3 น้ำมันพืช [7]

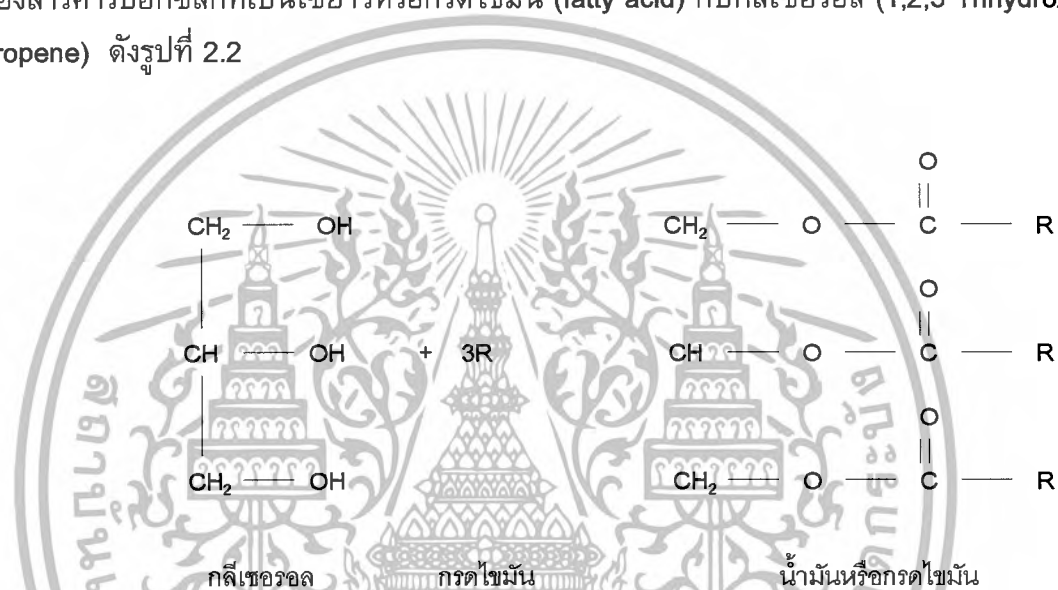
น้ำมันทดสอบที่นำมาศึกษาในปริณญาณินทร์นี้ เป็นน้ำมันไฮโดรคาร์บอนที่สกัดมาจากพืช ซึ่งส่วนใหญ่เป็นผลผลิตทางการเกษตรภายในประเทศรวม 5 ชนิดด้วยกัน คือ น้ำมันถั่วเหลือง, น้ำมันรำข้าว, น้ำมันทานตะวัน, น้ำมันปาล์ม และน้ำมันข้าวโพด นอกจากนี้ยังได้มีการนำน้ำมันหม้อแปลงมาทดสอบเพื่อเปรียบเทียบค่าอีกด้วย

น้ำมันพืชเหล่านี้เกิดจากการรวมตัวของกรดไขมัน (fatty acids) ชนิดต่างๆ เป็นส่วนใหญ่และมีส่วนประกอบของแร่ธาตุบางชนิดในปริมาณต่ำ ซึ่งต่างจากน้ำมันแร่ที่มีองค์ประกอบเป็นแร่ธาตุเสียส่วนใหญ่ กรดไขมันเหล่านี้เป็นอินทรีย์สาร (organic) ซึ่งเป็นตัวทำให้น้ำมันพืชมีเสถียรภาพทางด้านปฏิกิริยาเคมีและฟิสิกส์ต่ำในสภาพบรรยากาศ (atmospheric) เช่น เกิดเป็นไขที่อุณหภูมิห้อง เกิดปฏิกิริยากับอากาศ (atmospheric oxidation) ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดกลิ่นเหม็นหืน (rancidity) และเกิดการเสียหรือเน่า (spoilage) พฤติกรรมเหล่านี้เป็นปัญหาสำคัญในการที่จะเอาน้ำมันพืชมาใช้เป็นฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้า

อย่างไรก็ตาม จากความก้าวหน้าทางด้านเทคนิค การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันพืช ทำให้สามารถผลิตน้ำมันพืชได้สะอาดและบริสุทธิ์มาก และที่สำคัญคือสามารถทำให้น้ำมันพืชมีเสถียรภาพ ทางด้านปฏิกิริยาเคมีสูงขึ้นมาก สามารถตรวจสอบและปรับลักษณะสมบัติทางฟิสิกส์ได้ ซึ่งพบว่าตัวแปรที่สำคัญ ได้แก่ กรดไขมันชนิดต่าง ๆ อันดับต่อไปจะกล่าวถึงโครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันพืช, องค์ประกอบของน้ำมันพืช และส่วนประกอบของน้ำมันพืชที่ใช้ทดสอบ

2.3.1 โครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันพืช [7]

น้ำมันพืชที่นำมาทดสอบ ประกอบด้วยโครงสร้างพื้นฐาน 2 ชนิด คือ เอสเทอร์ของสารคาร์บอกซิลิกที่เป็นโซ่ยาวหรือกรดไขมัน (fatty acid) กับกลีเซอรอล (1,2,3 Trihydroxy propene) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบขั้นพื้นฐานในโมเลกุลของน้ำมันพืช

น้ำมันที่สกัดได้จากพืชจะแตกต่างกันไปตามองค์ประกอบของกรดไขมัน (R) ในโมเลกุลและกรดไขมันที่เป็นส่วนประกอบนี้มีคาร์บอนตั้งแต่ 12 ถึง 26 ตัว คาร์บอนที่ประกอบในกรดไขมันจะเป็นเลขคู่เสมอ เนื่องจากกรดไขมันเกิดจากการรวมตัวของคาร์บอนที่ละ 2 อะตอม ในโมเลกุลของกรดอะซิติก กรดไขมันนี้เป็นสาเหตุให้น้ำมันมีเสถียรภาพต่ำหรือสูง ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของกรดไขมันว่าเป็นประเภทอิ่มตัวหรือไม่อิ่มตัว (มีพันธะคู่ในโมเลกุล) พันธะคู่ในโมเลกุลเป็นต้นเหตุให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน มีผลให้น้ำมันมีกลิ่นหืน (rancidity)

ในปัจจุบันการสกัดน้ำมันพืชใช้เทคโนโลยีขั้นสูง สามารถควบคุมปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ อายุการใช้งานจึงยาวนานโดยปราศจากกลิ่นหืน

2.3.2 องค์ประกอบของน้ำมันพืช [7]

ชนิดของน้ำมันพืชได้จากการสกัดพืช แตกต่างกันไปตามส่วนประกอบของกรดไขมันที่มีอยู่ในพืชนั้นๆ ทำให้คุณสมบัติของน้ำมันพืชที่ได้ต่างกัน สำหรับกรดไขมันพื้นฐานที่มีอยู่ทั่วไปแสดงในตารางที่ 2.4 และสูตรโครงสร้างของกรดไขมันในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 แสดงปริมาณกรดไขมันในน้ำมันพืช [7]

น้ำมัน	ปริมาณกรดไขมัน (%)					
	ลิโนเลอิก	โอเลอิก	ไลโนเลอิก	สเตียริก	ไมริสตริก	ปาล์มิติก
ถั่วเหลือง	50-58	20-30	5-10	2-4	1-2	6-10
ปาล์ม	2-11	40-52	-	1-6	1-6	32-47
เมล็ดทานตะวัน	4-8	12-21	60-65	← 17.6 →		
รำข้าว	34.6	47.6	0.8	← 15 →		
ข้าวโพด	← >80 →		-	-	-	10

ตารางที่ 2.6 สูตรโครงสร้างของกรดไขมันในน้ำมันพืช [7]

ชนิดกรดไขมัน	สูตรโครงสร้างโมเลกุล
1) ไมริสตริก	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$
2) ปาล์มิติก	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$
3) สเตียริก	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$
4) โอเลอิก	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$
5) ลิโนเลอิก	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$
6) ไลโนเลนิก	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 การเปรียบเทียบโครงสร้างโมเลกุลฉนวนเหลวกับน้ำมันพืช

ในการพัฒนาคุณสมบัติของฉนวนเหลวสำหรับใช้เป็นฉนวนเหลวในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ต้องศึกษาโครงสร้างชั้นพื้นฐานโมเลกุลฉนวนเหลวเปรียบเทียบกับโครงสร้างโมเลกุลของฉนวนเหลว ฉนวนเหลวที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เช่น น้ำมันแร่, โพลีบิวเทน, ไฮโดรคาร์บอนเหลวพวกแนพทาลิน, พาราฟิน เป็นต้น

1) ไฮโดรคาร์บอนเหลวจำพวกแนพทาลิน

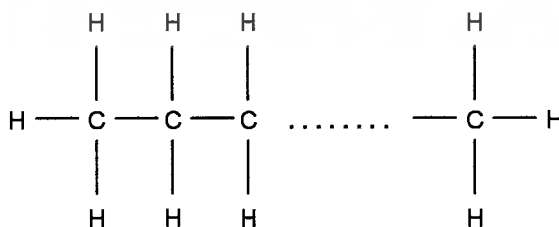
ไฮโดรคาร์บอนเหลวจำพวกแนพทาลิน กลั่นมาจากน้ำมันปิโตรเลียม ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจนต่อกันเป็นโซ่วงกลมที่เรียกว่า ไซคลิกไฮโดรคาร์บอน (cyclic hydrocarbon) มีคุณสมบัติในการต่อต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน เนื่องจากไม่มีพันธะคู่ในโมเลกุลรูปที่ 2.3 ในฉนวนน้ำมันที่ใช้ในปัจจุบัน มีไฮโดรคาร์บอนเหลวจำพวกแนพทาลิน ประมาณ 70 – 80 %



รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของฉนวนไฮโดรคาร์บอนเหลวจำพวกแนพทาลิน

2) ไฮโดรคาร์บอนเหลวจำพวกพาราฟิน

ไฮโดรคาร์บอนเหลวจำพวกพาราฟิน ประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนและไฮโดรเจนเรียงต่อกันและมีโครงสร้างเป็นอนุกรมยาว (chain series structure) มีคุณสมบัติในการต่อต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันมากกว่าแนพทาลิน มีโครงสร้างที่เสถียรภาพทางด้านเคมี ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลฉนวนเหลวไฮโดรคาร์บอนเหลวจำพวกพาราฟิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

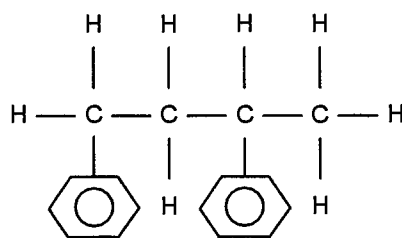
3) สารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกอะโรมาติก

สารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกอะโรมาติก ประกอบด้วยไซคลิกไฮโดรคาร์บอนหรือองค์ประกอบของเบนซิน มีอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจน สารจำพวกนี้ต่อต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี เนื่องจากมีโมเลกุลของเบนซินเป็นองค์ประกอบ ทำให้สารนี้เป็นตัวทำละลายที่ดี นิยมผสมสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกอะโรมาติกประมาณ 10–12 % กับไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่นๆ ในรูปที่ 2.5 เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกอะโรมาติกที่นิยมผสมในฉนวนเหลว

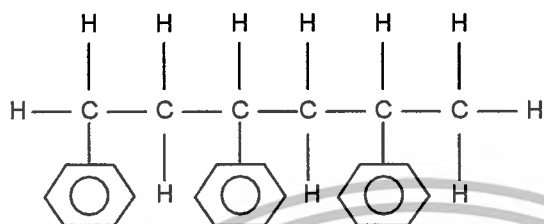


รูปที่ 2.5 โครงสร้างของโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกอะโรมาติก

นอกจากนี้ยังมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกอะโรมาติก 2 ตัว ที่มีคุณสมบัติต่อต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน มีจุดวาบไฟ (flash point) ประมาณ $300\text{--}500^{\circ}\text{C}$ นิยมใช้เป็นฉนวนไฟฟ้า ได้แก่ 1, 3-diphenylbutane และ 1, 3, 5-triphenylhexane ดังรูปที่ 2.6



1, 3-diphenylbutane



1, 3, 5-triphenylhexane

รูปที่ 2.6 โครงสร้างของโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกอะโรมาติก 2 ตัว

น้ำมันที่ผลิตเพื่อใช้ในการบริโภคส่วนใหญ่ได้มาจากเมล็ดพืชบางชนิด ซึ่งรวมเรียกว่าเมล็ดพืชน้ำมัน (oilseed) แต่มีน้ำมันบางชนิดสกัดได้จากส่วนเนื้อเยื่อที่หุ้มเมล็ด (mesocarp) เช่น น้ำมันปาล์ม กรดไขมันที่พบในน้ำมันพืชที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยที่สุด คือ กรดคาโพรอิก (C6 : 0) และที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากที่สุด คือ กรดบีฮีนิก (C22 : 0) และกรดอีรูซิก (C22 : 1) สำหรับกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวมีทั้งชนิดที่มีพันธะคู่ 1 อัน และที่มีพันธะคู่หลายอัน และน้ำมันจากเมล็ดพืชมีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่หลายอันเป็นองค์ประกอบอยู่ในโมเลกุลของไตรเอซิลกลีเซอรอลมากกว่าไขมัน จึงทำให้น้ำมันพืชมีจุดหลอมเหลวต่ำ

ตารางที่ 2.7 ส่วนประกอบทางเคมีของเมล็ดพืชน้ำมันและสมบัติของน้ำมัน

เมล็ดพืช	ข้าวโพด	ปาล์ม	ถั่วเหลือง	เมล็ดทานตะวัน
ส่วนประกอบทางเคมีของเมล็ดพืชน้ำมัน				
ปริมาณน้ำมัน (%)	3.6	70.0	20.0	47.0
ปริมาณโปรตีน (%)	8.0	-	36.0	23.0
ปริมาณเส้นใย (%)	2.5	-	5.0	4.2
ปริมาณความชื้น (%)	16.0	-	8.5	5.4
ปริมาณเถ้า (%)	1.2	-	4.9	-
จำนวนเมล็ดต่อกรัม	3.0	0.03	6.0	11.0
ลักษณะเฉพาะของน้ำมัน				
Saponification number	250 - 264	196 - 206	189 - 195	188 - 194
Iodine number	7.5 - 10.5	51 - 58	120 - 141	125 - 136
Refractive index	1.448 - 1.450	1.453 - 1.456	1.470 - 1.476	1.466 - 1.684
Specific gravity	0.917 - 0.919	0.857 - 0.860	0.917 - 0.921	0.894 - 0.899

1) น้ำมันถั่วเหลือง

น้ำมันถั่วเหลือง เป็นน้ำมันที่มีปริมาณการผลิตมากที่สุดในโลก สกัดได้มาจากเมล็ดของถั่วเหลือง (*Glycine max L.*) ซึ่งมีน้ำมันประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักแห้ง และเป็นน้ำมันพืชที่มีกรดไขมันอิ่มตัวสูงที่สุด การสกัดแยกเอาน้ำมันออกมาจากเมล็ดถั่วเหลืองใช้วิธีบีบ หรือใช้วิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย น้ำมันที่ได้จะนำมาผ่านกระบวนการทำให้ไขมันบริสุทธิ์ คือ การรีไฟน์, ฟอกสี, กำจัดกลิ่น, และอาจทำไฮโดรจิเนชันเพียงบางส่วนก็ได้เมื่อต้องการใช้น้ำมันถั่วเหลืองเป็นวัตถุดิบในการผลิตเนยเทียมหรือมาร์การีนและเนยขาว น้ำมันถั่วเหลืองยังนำไปใช้ผสมกับน้ำมันพืชชนิดอื่นด้วย แต่มีข้อเสีย คือ จะเกิดออกซิเดชันได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับอากาศและความร้อนสูง นอกจากนั้นน้ำมันถั่วเหลืองยังนำไปใช้ทำผลิตภัณฑ์เป็น **drying oil products**

น้ำมันถั่วเหลืองที่มีคุณภาพดีจะมีสีเหลืองอ่อน การรีไฟน์น้ำมันถั่วเหลืองด้วยต่างจะช่วยลดความเข้มของสีให้อ่อนลงได้ น้ำมันถั่วเหลืองที่สกัดจากเมล็ดถั่วเหลืองที่ยังไม่แก่จัด หรือเมล็ดที่ยังมีสีเขียว อาจมีคลอโรฟิลล์ปนอยู่ในน้ำมันได้ ทำให้น้ำมันที่ได้มีสีเขียวซึ่งผิดไปจากปกติ นอกจากนั้นน้ำมันที่ได้จากเมล็ดถั่วเหลืองที่มีคุณภาพต่ำ เช่น เมล็ดเสียหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากถูกทำลายด้วยแมลง หรือเมล็ดแตกจะทำให้น้ำมันที่สกัดได้มีสีน้ำตาล ซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนสีให้เป็นปกติได้โดยวิธีการรีไฟน์และการฟอกสีสารฟอสฟาไตต์ ซึ่งสามารถแยกออกได้โดยการล้างด้วยน้ำ ส่วนที่ถูกแยกออกมาอยู่ในน้ำจะมีเลซิทินสูง จึงใช้เป็นแหล่งวัตถุดิบสำหรับผลิตเลซิทินในอุตสาหกรรม

นอกจากนี้ การสกัดน้ำมันถั่วเหลืองยังอาจใช้ตัวทำละลายอื่นๆ เช่น ไฮโซลเฮกเซน, เอทานอล, และไตรคลอโรเอทิลีน การใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายจะทำให้น้ำมันที่ได้มีกลิ่นดีขึ้น แต่โปรตีนในกากถั่วเหลืองจะมีสมบัติเปลี่ยนไป มีผลทำให้ **functionality** ลดลง การใช้ไตรคลอโรเอทิลีนเป็นตัวทำละลาย จะทำให้ในกากถั่วเหลืองมีสารใหม่เกิดขึ้นซึ่งเป็นสารพิษต่อสัตว์ ดังนั้นจึงนิยมใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลายมากที่สุด

ในน้ำมันถั่วเหลืองจะมีกรดไขมันอิสระปะปนอยู่ประมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าการหักเหของแสงที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ประมาณ 1,460 ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ประมาณ 0.898 และมีสารที่ไม่ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยด่างประมาณ 0.6 เปอร์เซ็นต์

น้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการรีไฟน์และกำจัดกลิ่นแล้ว จะนำไปใช้ประโยชน์เป็นน้ำมันสำหรับทอดอาหาร, น้ำมันสกัด, เนยขาว, เนยเทียม และใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตปลาทูนับบรรจุกระป๋อง

สมบัติของน้ำมันถั่วเหลืองตามมาตรฐาน มีดังนี้

ความถ่วงจำเพาะ (25°C)	0.917 – 0.921
ค่าไอโอดีน (Wijs)	120 – 141
ค่าซาฟอนิฟิเคชัน	189 – 195
สารที่ไม่ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยด่าง (%)	< 1.5
ค่าการหักเหของแสง (25°C)	1.470 – 1.476

กรดไขมันที่สำคัญในน้ำมันถั่วเหลือง คือ กรดลิโนเลอิกมีอยู่ประมาณ 43 – 56 เปอร์เซ็นต์ กรดลิโนเลนิกประมาณ 5–11 เปอร์เซ็นต์ และกรดไขมันชนิดอิ่มตัวประมาณ 11– 26 เปอร์เซ็นต์ ของกรดไขมันทั้งหมด ความผันแปรของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบจะทำให้ค่าไอโอดีน (I.N.) เปลี่ยนไป หากทราบค่าไอโอดีนของน้ำมันถั่วเหลืองจะสามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอย่างคร่าวๆ ได้จากสมการดังนี้

% กรดไขมันชนิดอิ่มตัว	=	- 0.045 I.N. + 20.5
% กรดโอเลอิก	=	- 0.792 I.N. + 128.3
% กรดนิโนเลอิก	=	0.669 I.N. + 31.9
% กรดลิโนเลนิก	=	0.170 I.N. + 17.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การที่มีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวสูง ทำให้เกิดออกซิเดชันและหืนได้ง่าย มีผลทำให้ปริมาณกรดลิโนเลนิกลดลงเหลือน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์, กรดลิโนเลนิกลดลงเหลือประมาณ 35 เปอร์เซ็นต์ และมีกรดโอเลอิกเพิ่มสูงขึ้นถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถชะลอการเกิดออกซิเดชันได้ โดยการทำให้ selective hydrogenation แต่อาจทำให้เกิดไอโซเมอร์เป็นทรานส์-ไอโซเมอร์ได้ ปริมาณของกรดไขมันชนิดอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของไตรเอซิลกลีเซอรอลในน้ำมันถั่วเหลือง ดังแสดงในตารางที่ 2.7

ในอุตสาหกรรมอาหารจะนำน้ำมันถั่วเหลืองมาใช้ผลิตมายองเนสและน้ำมันสลัดชนิดต่างๆ ไม่นิยมใช้เป็นน้ำมันสำหรับทอดอาหาร เพราะความร้อนและอากาศจะทำให้เกิดกลิ่นขึ้น ซึ่งหลังการทอดอาหารใหม่ๆ ไม่ค่อยมีกลิ่น แต่กลิ่นจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเก็บอาหารไว้นานขึ้น และกลิ่นจะเกิดขึ้นในระยะเวลาอันรวดเร็ว ปัจจุบันคนนิยมใช้น้ำมันถั่วเหลืองในการผัดและทอดอาหารกันเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีคุณค่าทางโภชนาการสูงกว่าน้ำมันชนิดอื่น คือ มีปริมาณกรดลิโนเลนิกและกรดลิโนเลนิกสูง ช่วยลดระดับคอเลสเตอรอลในเลือดได้ แต่เนื่องจากกรดไขมันทั้ง 2 ชนิดนี้เกิดออกซิไดส์ได้ง่ายมาก จึงควรใช้น้ำมันถั่วเหลืองสำหรับผัดอาหารหรือปรุงอาหารที่ใช้เวลาสั้นมากกว่าการทอดอาหารที่ใช้เวลานาน ซึ่งจะทำให้น้ำมันเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย

ตารางที่ 2.8 ปริมาณของกรดไขมันชนิดอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวในโมเลกุลของไตรเอซิลกลีเซอรอลในน้ำมันถั่วเหลือง

กรดไขมัน	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	
	ช่วงห่าง	ค่าเฉลี่ย
กรดไขมันชนิดอิ่มตัวทั้งหมด	10 – 19	15.0
กรดลอริก	-	0.1
กรดไมริสติก	< 0.5	0.2
กรดปาล์มิติก	7 – 12	10.7
กรดสเตียริก	2 – 5.5	3.9
กรดอะราคิติก	1.0	0.2
กรดบีฮีนิก	0.5	-
กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว		
กรดปาล์มิโตเลอิก	< 0.5	0.3
กรดโอเลอิก	20.0 – 50.0	22.8
กรดลิโนเลอิก	35.0 – 60.0	50.8
กรดฮีโคเซโนอิก	1.0	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) น้ำมันข้าวโพด

ข้าวโพดเป็นพืชชนิดหนึ่งที่มีส่วนของเมล็ด คือ germ (embryos ของ *Zea mays* L.) ซึ่งเป็นผลพลอยได้ในกระบวนการผลิตแป้งข้าวโพด สามารถนำมาสกัดเอาน้ำมันออกมาได้ น้ำมันข้าวโพดที่สกัดได้จะมีสีส้มแดง (dark reddish amber colour) ถึงแม้จะผ่านการรีไฟน์แล้วก็ตาม สีก็ยังเข้มกว่าน้ำมันชนิดอื่น กากข้าวโพดที่เหลือหลังจากแยกเอาน้ำมันออกไปแล้ว จะนำไปทำแป้งข้าวโพดและผลิตภัณฑ์ที่ใช้แป้งข้าวโพด

น้ำมันข้าวโพดประกอบด้วยกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว คือ กรดโอเลอิกและกรดลิโนเลอิก มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ส่วนกรดลิโนเลอิกมีจำนวนน้อยมากหรือไม่มีเลย กรดไขมันชนิดอิ่มตัวที่มีปริมาณมาก คือ กรดปาล์มิติก ซึ่งมีประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นไตรเอซิลกลีเซอรอลที่เป็นส่วนประกอบของน้ำมันข้าวโพด จึงเป็นพวกที่มีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นองค์ประกอบในโมเลกุล 2-3 โมเลกุลเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนั้นยังมีฟอสฟาไทด์ประมาณ 1-3 เปอร์เซ็นต์ สเตอรอลประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ และกรดไขมันอิสระประมาณ 1.5 เปอร์เซ็นต์หรือมากกว่า ซึ่งสูงกว่าน้ำมันพืชชนิดอื่นๆ มีวิตามินอีประมาณ 0.1 เปอร์เซ็นต์ และมีแวกซ์อีกเล็กน้อยประมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถแยกแวกซ์ออกได้โดยการทำ winterization

สมัยก่อนน้ำมันข้าวโพดไม่ได้ถูกนำมาใช้ประกอบอาหาร แต่ในปัจจุบันคนที่มีความต้องการบริโภคน้ำมันที่มีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวมากขึ้น ทำให้น้ำมันข้าวโพดถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมากขึ้น เช่น นำไปใช้ทำน้ำมันปรุงอาหาร, น้ำมันสลัด, มายองเนส และเนยเทียม น้ำมันข้าวโพดมีราคาแพงและเก็บไว้ได้นาน เนื่องจากมีวิตามินอีเป็นสารต้านออกซิเดชันที่ดี

สมบัติของน้ำมันข้าวโพดตามมาตรฐาน มีดังนี้

ความถ่วงจำเพาะ (25 °C)	0.915–0.920
ค่าการหักเหของแสง (25 °C)	1.470–1.474
ค่าไอโอดีน (Wijs)	103–128
ค่าซาฟอนิฟิเคชัน	187–193
สารที่ไม่ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยด่าง (%)	< 2.0
ไต่เตอร์ (°C)	14–20

3) น้ำมันเมล็ดทานตะวัน

น้ำมันเมล็ดทานตะวันสกัดได้จากเมล็ดของทานตะวัน (*Helianthus annuus* L.) ซึ่งปลูกมากในประเทศรัสเซีย, แคนาดา, อเมริกา, อังการี และอาร์เจนตินา เมล็ดทานตะวันมีน้ำมันประมาณ 20 – 36 เปอร์เซ็นต์ บางสายพันธุ์อาจมีน้ำมันสูงถึง 40 เปอร์เซ็นต์ และมีโปรตีนประมาณ 15 – 20 เปอร์เซ็นต์ การสกัดน้ำมันออกมาเมล็ดทำได้โดยใช้ hydraulic หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

screw pressing หรือใช้สกัดด้วยตัวทำละลาย น้ำมันเมล็ดทานตะวันมีประโยชน์นำไปทำน้ำมันปรุงอาหาร, น้ำมันสลัด, เนยเทียม และเนยขาว

น้ำมันเมล็ดทานตะวันมีสีเหลืองอ่อน มีกลิ่นเฉพาะซึ่งสามารถกำจัดออกได้โดยใช้วิธีการกำจัดกลิ่น องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันเมล็ดทานตะวัน ประกอบด้วยกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวประมาณ 85 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นกรดโอเลอิกเป็นส่วนใหญ่ มีกรดลิโนเลอิก 4–8 เปอร์เซ็นต์ และมีกรดลิโนเลนิก น้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ มีกรดไขมันชนิดอิ่มตัวประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ น้ำมันเมล็ดทานตะวันที่ผ่านการรีไฟน์แล้ว จะมีค่าไอโอดีน 130 ค่าการหักเหของแสง 1.4599 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ค่าซาฟอนิฟิเคชัน 190 ความหนาแน่น 0.897 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ไตเตอร์ 18 องศาเซลเซียส มีสารที่ไม่ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยด่าง 0.8 เปอร์เซ็นต์

สมบัติของน้ำมันเมล็ดทานตะวันตามมาตรฐาน มีดังนี้

ความถ่วงจำเพาะ (25 °C)	0.915–0.919
ค่าการหักเหของแสง (25 °C)	1.472–1.474
ค่าไอโอดีน (Wijs)	125–136
ค่าซาฟอนิฟิเคชัน	188–194
สารที่ไม่ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยด่าง (%)	< 1.5
ไตเตอร์ (°C)	16–20

4) น้ำมันรำข้าว

น้ำมันรำข้าวมีประมาณ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งของเมล็ดข้าว มีลิวพิดประมาณ 9–22 เปอร์เซ็นต์ (เฉลี่ยประมาณ 15–20 เปอร์เซ็นต์) น้ำมันรำข้าวมีความสำคัญมากเพราะข้าวเป็นพืชที่มีผลผลิตมากที่สุดในโลก น้ำมันรำข้าวมีกรดไขมันอิสระสูงมาก เพราะรำข้าวมีเอนไซม์ไลเปสสูงมาก เมื่อนำรำข้าวใหม่มาสกัดน้ำมันออก จะมีกรดไขมันอิสระประมาณ 4–6 เปอร์เซ็นต์ ถ้าเก็บรำข้าวปล่อยทิ้งไว้ ค่าความเป็นกรด (Acid Value) ของน้ำมันรำข้าวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วประมาณชั่วโมงละ 1 เปอร์เซ็นต์ น้ำมันรำข้าวที่มีความเป็นกรดสูงมาก ๆ ไม่สามารถนำมาทำรีไฟน์ให้บริสุทธิ์เพื่อใช้บริโภคได้ นอกจากนี้ในน้ำมันรำข้าวยังมีแวกซ์และสารที่ไม่ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยด่างสูง แต่ น้ำมันรำข้าวมีความคงตัวต่อการออกซิเดชัน เพราะมีวิตามินอีเป็นสารต้านการออกซิเดชันที่มีอยู่ในน้ำมันตามธรรมชาติสูงด้วย

น้ำมันรำข้าวประกอบด้วยกรดไขมันชนิดอิ่มตัวประมาณ 15–20 เปอร์เซ็นต์ และกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว 80 – 85 เปอร์เซ็นต์ เป็นกรดไขมันชนิดต่าง ๆ ดังนี้ กรดไมริสติก 0.4–1 เปอร์เซ็นต์, กรดปาล์มิติก 12–16 เปอร์เซ็นต์, กรดสเตียริก 1–3 เปอร์เซ็นต์, กรดไขมัน C₂₀–C₂₂ ชนิดอิ่มตัว 1 เปอร์เซ็นต์, กรดโอเลอิก 40–50 เปอร์เซ็นต์, กรดลิโนเลอิก 29–42 เปอร์เซ็นต์, กรดลิโนเลนิกน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ และกรดปาล์มิโตเลอิก 0.2–0.4 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติของน้ำมันรำข้าวตามมาตรฐาน มีดังนี้

ความถ่วงจำเพาะ (25 °C)	0.910 – 0.921
ค่าการหักเหของแสง (25 °C)	1.470 – 1.473
ค่าไอโอดีน (Wijs)	99 – 108
ค่าซาฟอนิฟิเคชัน	181 – 189
สารที่ไม่ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยด่าง (%)	3 – 5
ไต่เตอร์ (°C)	24 – 28
ค่าความเป็นกรด	4 – 120

5) น้ำมันปาล์ม

สำหรับน้ำมันปาล์มที่ใช้บริโภคแม้จะมีปริมาณกรดไลโนเลอิกไม่สูงนัก คือ อยู่ในช่วงร้อยละ 8-17 ของกรดไขมันทั้งหมด แต่มีปริมาณกรดโอเลอิก (C18 : 1) ซึ่งเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวชนิดที่มีพันธะคู่หนึ่งตำแหน่ง (monounsaturated fatty acids, MUFA) สูงถึงร้อยละ 34-36 ของไขมันทั้งหมด สำหรับน้ำมันปาล์มที่ใช้บริโภคจะมีปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวสูง คือ มีกรดปาล์มมิติกสูงถึงร้อยละ 32-59 ของกรดไขมันทั้งหมด องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันปาล์มสำหรับบริโภค พบว่า โดยทั่วไปน้ำมันปาล์มประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวในปริมาณที่เกือบเท่าๆ กัน ได้แก่ กรดไมริสติก, กรดปาล์มมิติก และกรดสเตียริก ซึ่งเป็นกรดไขมันอิ่มตัวประมาณร้อยละ 2, 43 และ 7 ตามลำดับ ส่วนกรดไขมันไม่อิ่มตัว มีกรดปาล์มมิโตเลอิกประมาณร้อยละ 0.5, 39 และ 9 ตามลำดับ โดยองค์ประกอบของกรดไขมันเหล่านี้ อาจแปรผันได้ขึ้นอยู่กับพันธุ์ปาล์ม, สภาพดินฟ้าอากาศ และสถานที่เพาะปลูก นอกจากนี้ น้ำมันปาล์มยังมีสารประกอบแคโรทีน ซึ่งร่างกายนำไปสังเคราะห์เป็นวิตามินเอได้ในปริมาณสูงถึง 500-700 ส่วนในน้ำมันล้านส่วน แต่สารประกอบพวกนี้จะสลายตัวไป เมื่อทำให้น้ำมันร้อนหรือในการฟอกสีน้ำมันปาล์มดิบ แต่มีประโยชน์มากในการผลิตมาการีนหรือเนยเทียม ซึ่งต้องการให้มีสีเหลือง

2.4 ลักษณะสมบัติที่สำคัญของฉนวนเหลว [1,4,5]

ลักษณะสำคัญที่เป็นตัวชี้บอกถึงคุณสมบัติและคุณภาพของไดอิเล็กตริกมี

4 ประการ คือ

- 1) ความต้านทาน (resistance)
- 2) เปรอริมิตติวิตีหรือค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (permittivity)
- 3) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก (dielectric strength)
- 4) แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 ความต้านทาน (resistance)

ไดโอดีล็กทริกหรือฉนวนไฟฟ้าที่สมบูรณ์แล้วจะต้องไม่นำกระแสเลยทั้งสิ้นถ้าหากได้รับแรงดันกระแสตรง นั่นคือจะไม่มีสภาพนำไฟฟ้าอยู่เลย หรือกล่าวอีกในหนึ่งก็คือ ฉนวนนั้นมีค่าความต้านทานสูงเป็นอนันต์ แต่ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในทางปฏิบัตินั้นมักจะนำกระแสแต่มีค่าน้อยมากเมื่อป้อนแรงดันกระแสตรง นั่นแสดงว่าฉนวนไฟฟ้ามีค่าความต้านทานไม่สูงเป็นอนันต์ หากแต่มีค่าสูงที่วัดได้ ค่าความต้านทานยิ่งสูงก็แสดงว่าฉนวนนี้มีคุณภาพการฉนวนที่ดี

เมื่อนำฉนวนไปคั่นระหว่างอิเล็คโตรดที่ป้อนแรงดันกระแสตรงเป็นเวลานานพอจะมีกระแสไหลผ่านฉนวนนั้นแต่น้อย เรียกว่า กระแสรั่วหรือกระแสค้ำง กระแสรั่วที่ไหลผ่านฉนวนที่แบ่งออกเป็นสองทาง คือ ทางหนึ่งไหลผ่านเนื้อฉนวนใน เนื่องจากฉนวนมีสภาพนำไฟฟ้าอยู่บ้างตั้งกล่าวแล้ว ส่วนอีกทางหนึ่งไหลผ่านตามผิวฉนวนเนื่องจากผิวฉนวนมีสภาพนำไฟฟ้า เนื่องจากสิ่งเปื้อนและความชื้นที่ผิว ด้วยเหตุนี้เองการวัดความต้านทานของฉนวนจึงแยกเป็นความต้านทานเชิงปริมาตร (volume resistance) และความต้านทานเชิงผิว (surface resistance)

ค่าความต้านทานของไดโอดีล็กทริกอาจคำนวณหรือวัดได้เช่นเดียวกับความต้านทานของตัวนำ ถ้าทราบความต้านทานจำเพาะ ρ ความยาว l พื้นที่หน้าตัด A ของไดโอดีล็กทริก เช่นในกรณีแผ่นไดโอดีล็กทริกระหว่างแผ่นระนาบคาปาซิเตอร์ ความต้านทานของฉนวน จะหาได้จาก

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.1)$$

ส่วนในกรณีของไดโอดีล็กทริกของตาปาซิเตอร์แบบทรงกระบอกซ้อน ความต้านทานของฉนวนหาได้จาก

$$R = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\rho dx}{2\pi l x} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2.2)$$

เมื่อ	x	=	รัศมีใดๆ วัดจากแกนและ dx ความหนาส่วนย่อยของฉนวน
	r_1 และ r_2	=	รัศมีของตัวนำในและตัวนำนอกตามลำดับ
	l	=	ความยาว

2.4.2 เฟอร์มิตติวิตี (permittivity)

เฟอร์มิตติวิตีนี้บางทีก็เรียกว่า ค่าคงตัวของไดอิเล็กตริก (dielectric constant, ϵ) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญประการหนึ่ง ไม่มีมิติและเป็นตัวชี้บอกลักษณะของไดอิเล็กตริก หรือสารฉนวนไฟฟ้าเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดความสามารถของการสร้างค่าเก็บประจุ หรือกล่าวง่าย ๆ ϵ ก็คือค่าตัวเลขที่บอกให้ทราบว่าค่าเก็บประจุจะเพิ่มขึ้นกี่เท่าของค่าเก็บประจุสุญญากาศ เมื่อใส่ไดอิเล็กตริกมีเฟอร์มิตติวิตี ϵ เข้าไปแทนที่ นั่นคือ

$$C = \epsilon C_0 \quad (2.3)$$

ปกติเฟอร์มิตติวิตี ϵ จะแสดงเป็นความสัมพันธ์ ϵ_r เทียบกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสุญญากาศ หรือความว่างเปล่า ϵ_0

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (2.4)$$

โดยที่ $\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

และจากความสัมพันธ์ของค่าเก็บประจุ $C = \frac{Q}{U}$ จะได้ค่าเก็บประจุของสุญญากาศ

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (2.5)$$

เมื่อ A = พื้นที่ระนาบ
 d = ระยะห่างระหว่างระนาบ
 ϵ_0 = ค่าเฟอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ = $8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

ถ้าใส่ไดอิเล็กตริกที่มีสารอื่น (ฉนวนเหลว, ฉนวนแข็ง, ฉนวนก๊าซ) เข้าไปแทนที่สุญญากาศระหว่างแผ่นอิเล็กโตรด จะพบว่าถึงแม้ว่าแรงดันที่ป้อนมีค่าคงที่ก็ตาม แต่กระแสในวงจร I (รูปที่ 2.7) จะมากขึ้น ซึ่งแสดงว่าค่าเก็บประจุเพิ่มสูงขึ้น ความหนาแน่นของประจุบนอิเล็กโตรดเพิ่มขึ้น และอาจเนื่องจากจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนไหลผ่านไดอิเล็กตริกมากขึ้นในตัวเก็บประจุสุญญากาศที่มีค่าเก็บประจุ C_0 กระแสที่ไหลผ่านจะเป็น

$$I(t) = C \frac{du(t)}{dt} \quad \text{หรือ} \quad \bar{I} = j\omega C_0 \bar{U} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องหมาย j แสดงให้เห็นเด่นชัดว่ากระแสหน้าแรงดันเป็นมุม 90 องศา ส่วนตัวเก็บประจุที่มีสารไดอิเล็กตริก ค่าเก็บประจุ c จะไม่เท่ากับ c_0 และยิ่งกว่านั้นจะสังเกตเห็นว่าในทางปฏิบัติเฟสเซอร์ระหว่างแรงดันกับกระแสมีมุมน้อยกว่า 90 องศา เพราะมีพลังงานสูญเสียเปล่าในลักษณะความต้านทาน นั้นแสดงว่าค่าเก็บประจุเป็นจำนวนเชิงซ้อน คือ มีค่าจริงและค่าจินตภาพ ซึ่งรวมอยู่ในรูปของเปอร์มิตติวิตี คือ

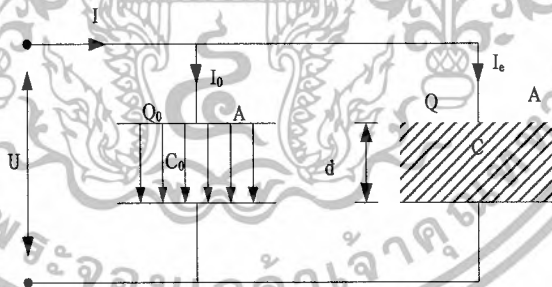
$$\bar{c} = \epsilon_r c_0 \quad (2.7)$$

โดยที่ $\bar{\epsilon}_r = \epsilon' - j\epsilon''$

ฉะนั้น กระแสที่ไหลผ่านค่าเก็บประจุ

$$\begin{aligned} \bar{I} &= j\omega\bar{C}U = I_c + I_r \\ &= j\omega(\epsilon' - j\epsilon'')\bar{U} \\ \bar{I} &= j\omega\epsilon' C_0 \bar{U} + \omega\epsilon'' C_0 \bar{U} \end{aligned} \quad (2.8)$$

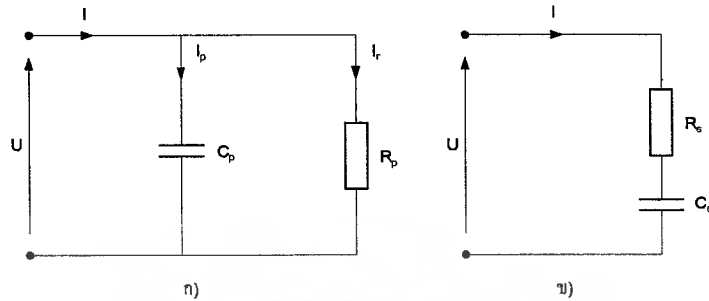
โดยที่ เทอมแรกขวามือ คือ กระแสเก็บประจุ I_c และเทอมหลัง คือ กระแสกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก I_r



รูปที่ 2.7 ค่าเก็บประจุระหว่างแผ่นระนาบที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีเป็นสัจพจน์ ϵ_0 และ ϵ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดอิเล็กทริกมีพลังงานสูญเสีย และสามารถเก็บประจุไว้ในตัวเก็บประจุ จึงอาจเขียนแทนด้วยวงจรสมมูลย์ คือ ดังรูปที่ 2.8 ก) เป็นวงจรขนาน รูป ข) เป็นวงจรรอนุกรม



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลย์ของไดอิเล็กทริก

วงจรรขนาน :

$$\begin{aligned} c_p &= \epsilon' c_0 \\ R_p &= 1/(\omega \epsilon'' c_0) \\ \tan \delta &= \frac{1}{\omega R_p c_p} = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \end{aligned} \quad (2.9)$$

วงจรรอนุกรม :

$$\begin{aligned} c_s &= \frac{|\epsilon_r|^2}{\epsilon'} c_0 = \epsilon' \{1 + (\tan \delta)^2\} c_0 \\ R_s &= \frac{\epsilon''}{\omega |\epsilon_r|^2 c_0} \\ \tan \delta &= \omega R_s c_s = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \end{aligned} \quad (2.10)$$

มุม δ นี้เรียกว่ามุมพลังงานสูญเสีย (loss angle)

จากสมการ c_p และ c_s จะเห็นได้ว่า ค่าเก็บประจุที่มีสารไดอิเล็กทริกขึ้นอยู่กับวงจรสมมูลย์ ในกรณีที่พลังงานสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าต่ำ คือ $\epsilon'' \ll \epsilon'$ หรือ $\tan \delta \ll 1$ ค่าเก็บประจุทั้งสองจะเท่ากัน คือ $c_p = c_s$ และจะได้ $\epsilon_r \rightarrow \epsilon_r = \epsilon'$ นั่นก็คือ ϵ' จะเป็นค่าคงตัว ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (relative dielectric constant, ϵ_r) ที่ใช้กัน

ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ ϵ_r นี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยทั่วไปฉนวนที่มีใช้ทั่วไปในถ้าอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ϵ_r จะเพิ่มสูงขึ้น

2.4.3 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก (dielectric strength)

ความคงทนของการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า หมายถึง ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (electric field stress) สูงสุดที่ฉนวนนั้นสามารถทนอยู่ได้ โดยไม่เกิดความเสียหายหรือเกิดเบรกดาวน หรือทำให้การฉนวนเสื่อมสภาพซึ่งมีหน่วยเป็น V/cm หรือ kV/cm คือ มีหน่วยเป็นค่าแรงดันต่อหน่วยความหนาของฉนวนหรือระยะห่างของอิเล็กโทรด หาได้โดยป้อนแรงดันเพิ่มขึ้นจนเกิดเบรกดาวน ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่มีโครงสร้างทางเคมีและทางฟิสิกส์ต่างกัน สารประเภทมีโครงสร้างเป็นผลึกจะเกิดเบรกดาวนตามแนวที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมน้อยที่สุด ซึ่งมักจะสังเกตเห็นว่าร่องรอยของการเกิดเบรกดาวนในฉนวนจะไม่เป็นแนวเส้นตรง โดยปกติฉนวนแข็งจะทนต่อแรงดันเบรกดาวนได้สูงกว่าฉนวนเหลว เบรกดาวนในฉนวนเหลวสภาพการฉนวนจะกลับสู่สภาพปกติได้หลังจากเบรกดาวนผ่านไปแล้ว แต่ในฉนวนแข็งเมื่อเกิดเบรกดาวนแล้วสภาพการฉนวนจะเสียไป ใช้งานเพื่อการฉนวนอีกไม่ได้ อย่างไรก็ตามฉนวนเหลวหรือฉนวนแข็งก็อาจมีค่าแรงดันเบรกดาวนต่ำถ้าหากมีสิ่งเจือปน

ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ใช้กำหนดค่าความคงทนของการฉนวนทางไฟฟ้า โดยทั่วไปจะหาจากสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (uniform field) คือ เป็นสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดที่มีลักษณะเป็นแผ่นระนาบ (plate – to – plate)

ความคงทนของการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า E_b ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ หลายประการ ซึ่งพอจะเขียนเป็นเกณฑ์ทั่วไปได้ว่า

$E_b = f$ (ลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโทรด, ลักษณะสมบัติของไดอิเล็กตริก และเวลา)

ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน (Dielectric strength) ซึ่งเป็นตัวชี้บอกรับทราบว่าไดอิเล็กตริกสามารถทนต่อแรงดันได้มากหรือน้อยเพียงใด กำหนดด้วยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่จะทำให้ไดอิเล็กตริกเบรกดาวน หาได้โดยป้อนแรงดันเพิ่มขึ้นจนเกิดเบรกดาวน ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่มีโครงสร้างทางเคมีและทางฟิสิกส์ต่างกัน สารประเภทที่มีโครงสร้างเป็นผลึกจะเกิดเบรกดาวนตามแนวที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมน้อยที่สุด ซึ่งจะสามารถสังเกตเห็นว่าร่องรอยของการเกิดเบรกดาวนในฉนวนจะไม่เป็นเส้นตรง โดยปกติไดอิเล็กตริกแข็งจะทนต่อแรงดันเบรกดาวนได้สูงกว่าไดอิเล็กตริกเหลว การเบรกดาวนในฉนวนเหลวสภาพการฉนวนจะกลับสู่สภาพปกติได้หลังจากเบรกดาวนผ่านไปแล้ว แต่ในฉนวนแข็งเกิดเบรกดาวนแล้วสภาพการฉนวนจะเสียไป ใช้งานเพื่อการฉนวนอีกไม่ได้ อย่างไรก็ตามฉนวนเหลวหรือฉนวนแข็งก็อาจมีค่าแรงดันเบรกดาวนต่ำถ้าหากมีสิ่งเจือปน

2.4.4 แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$)

พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกอาจแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ พลังงานสูญเสียเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าของไดอิเล็กตริกที่ความต้านทานไม่ถึงค่าอนันต์ และอีกส่วนหนึ่งเป็นพลังงานสูญเสียเนื่องจากโพลาไรเซชันของไดอิเล็กตริก จัดเป็นพลังงานสูญเสียทางไฟฟ้า เพราะโมเมนต์ขงไดอิเล็กตริกต้องกับขั้วไปมาตามการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า เช่น แรงดันกระแสสลับ

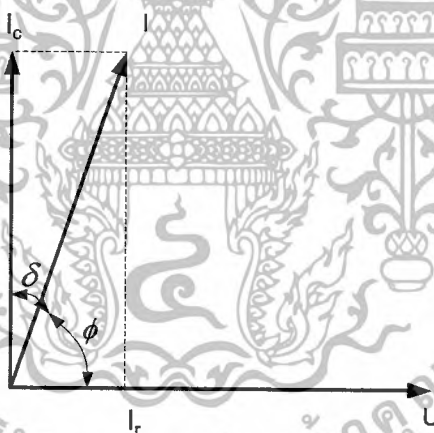
ถ้าป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์กับตัวเก็บประจุที่สมบูรณ์ ไม่มีกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก กระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีเฟสหน้าหน้าแรงดันเป็นมุม 90 องศา

$$u = U_m \sin \omega t \quad (2.11)$$

$$i = \omega C U_m \cos \omega t$$

$$I = \omega C U$$

ในความเป็นจริงกระแสที่ไหลในตัวเก็บประจุจะนำหน้าแรงดันน้อยกว่า 90 องศา ดังรูปที่ 2.9 ϕ เป็นมุมเฟสของตัวเก็บประจุ ดังนั้น แฟกเตอร์กำลัง = $\cos \phi$ หรืออีกทางหนึ่ง = $\sin \delta$



รูปที่ 2.9 มุมเฟสกระแสในตัวเก็บประจุ

ฉะนั้น กำลังไฟฟ้าสูญเสียในตัวเก็บประจุที่ไม่สมบูรณ์ คือ

$$\begin{aligned} P_d &= UI \cos \phi \\ &= UI \sin \delta \end{aligned} \quad (2.12)$$

เมื่อ U = ค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันที่ป้อน

โดยที่ δ = $90 - \phi$ เป็นมุมเล็ก ๆ

ฉะนั้น $\sin \delta$ = $\tan \delta$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\delta &= \text{มุมพลังงานสูญเสียต่อไดอิเล็กตริก} \\ \tan \delta &= \text{แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียต่อไดอิเล็กตริก}\end{aligned}$$

จากรูปที่ 2.9 จะหาค่า $\tan \delta$ ได้จากสมการ

$$\tan \delta = \frac{I_r}{I_c} = \frac{U/R_p}{\omega C_p U} = \frac{1}{\omega C_p R_p} \quad (2.13)$$

ฉะนั้น กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกจะเขียนได้ว่า

$$P_d = \frac{U^2}{R} \quad (2.14)$$

$$= U^2 \omega C_p \tan \delta \quad (2.15)$$

ถ้าคิดเป็นกำลังสูญเสียต่อปริมาตรของฉนวน จะได้

$$P_d' = E^2 \omega \epsilon \cdot \tan \delta \quad (2.16)$$

เมื่อ	P_d'	=	พลังงานสูญเสียต่อปริมาตร
	E	=	ความเครียดสนามไฟฟ้า
	C	=	ค่าเก็บประจุไฟฟ้า
	U	=	ค่าแรงดันที่ป้อน

2.5 ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสีย [5]

ค่า $\tan \delta$ เป็นค่าพารามิเตอร์ของไดอิเล็กตริกอย่างหนึ่งซึ่งช่วยบอกคุณสมบัติของสาร และเป็นค่าที่ไม่คงที่ แต่ขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอกหลายชนิด ดังนี้

2.5.1 ค่า $\tan \delta$ กับความถี่

พิจารณาค่า $\tan \delta$ กับความถี่ของไดอิเล็กตริกที่ป้อนแรงดันกระแสสลับ ปัญหานี้สามารถวิเคราะห์ได้จากสมการ

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega RC} \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2.17) จะได้

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \tan \delta = \infty$$

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \tan \delta = 0$$

ความหมายทางฟิสิกส์ของค่าลิมิตจะเป็นดังนี้ คือ ทั้ง $\omega = 0$ และ $\omega = \infty$ ตามสมการ (2.15) จะเป็นการจำกัดค่าของ P ; เมื่อ $\omega = 0$ สมการ (2.15) จะแปลงมาจากสมการ (2.14)

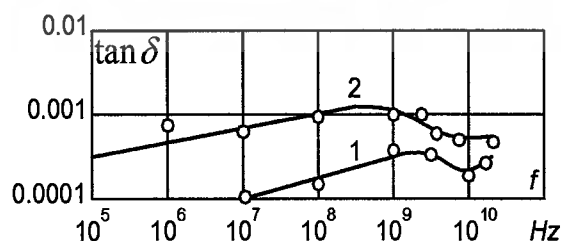
ถ้าพิจารณาในกรณีที่พลังงานสูญเสียไปจากไดอิเล็กตริกจะเกิดขึ้นเนื่องจากการนำไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว พลังงานสูญเสียดังสมการ (2.15) คือ ค่า P จะไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ ซึ่งเราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $\tan \delta$ กับความถี่ ดังนี้

$$\tan \delta = \frac{1.8 \times 10^{10}}{f \epsilon \rho} \quad (2.18)$$

ค่า $\tan \delta$ จะเป็นสัดส่วนผกผันกับความถี่ ตัวอย่างของไดอิเล็กตริกที่มีลักษณะเป็นไปตามสมการ (2.18) คือ น้ำมันฉนวน (a thorough purified insulating petroleum oil)

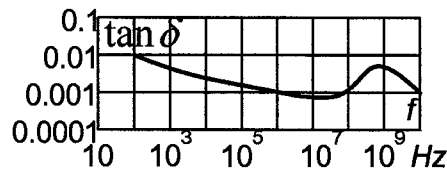
แต่สมการ (2.18) ก็ไม่สามารถใช้ได้กับโพลีเอทิลีน, โพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีน และไดอิเล็กตริกแข็งชนิดนอนโพลาร์ได้ (ดูรูปที่ 2.10) อย่างไรก็ตาม ก็ยังไม่สามารถสรุปได้เมื่อค่า $\tan \delta$ ในวัสดุเหล่านี้มีค่าน้อยมากจนไม่สามารถวัดได้อย่างละเอียด จากรูปที่ 2.10 ถ้าสารนอนโพลาร์โพลีเมอร์มีสารเจือปนชนิดโพลาร์ เช่น สเตบิลไลเซอร์ (stabilizers) หรือตัวช่วยทำปฏิกิริยา (catalysts) ของโพลีเมอร์ไรเซชัน ทำให้กราฟระหว่าง $\tan \delta$ กับความถี่ไม่เป็นไปตามสมการ (2.18)

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่า $\tan \delta$ หรือ $\epsilon \tan \delta$ ของวัสดุฉนวนไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ ก็สังเกตเห็นว่ามีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันในช่วงความถี่ที่เปลี่ยนไป คือ จะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงที่ความถี่ที่สูงขึ้น ตัวอย่างวัสดุต่างๆ แสดงในรูปที่ 2.10 ถึง 2.12

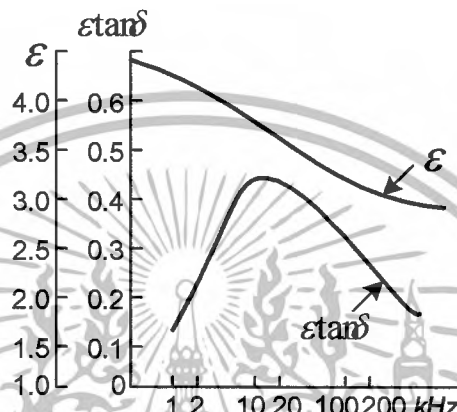


รูปที่ 2.10 กราฟแสดงค่า $\tan \delta$ ของนอนโพลาร์ไดอิเล็กตริกและความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



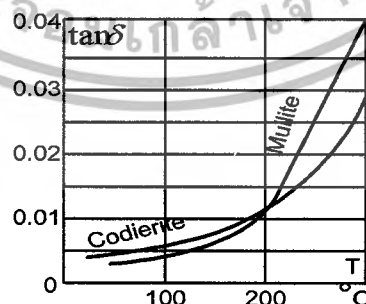
รูปที่ 2.11 กราฟแสดงค่า $\tan \delta$ ของโพลีเมทิลเมเตอะครายเลตและความถี่ ที่อุณหภูมิ 20°C (แกนตั้งและแกนนอนเป็นลอการิทึม)



รูปที่ 2.12 กราฟแสดงค่า ϵ กับ $\epsilon \tan \delta$ กับความถี่ของโพลีบิวทิลเมเตอะครายเลต (แกนนอน เป็นลอการิทึม)

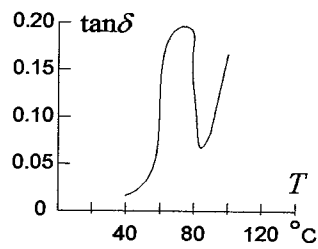
2.5.2 ค่า $\tan \delta$ กับอุณหภูมิ

ค่า $\tan \delta$ จะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (ดูรูปที่ 2.13) ในสารโพลาร์หรือสารผสมของมินกับสารที่เป็นกลาง พลังงานสูญเสียจะเกิดขึ้นเนื่องจากการนำไฟฟ้าซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และจะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดที่อุณหภูมิต่ำหนึ่ง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไป จะทำให้ค่า $\tan \delta$ ลดลง (ดูรูปที่ 2.14)

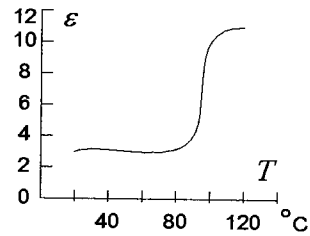


รูปที่ 2.13 กราฟแสดงค่า $\tan \delta$ ของ $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ และ $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$ ที่ความถี่ 1 MHz กับอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



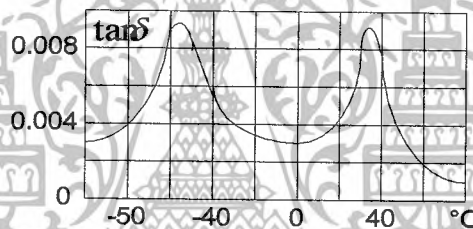
(ก)



(ข)

รูปที่ 2.14 (ก) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า $\tan \delta$ กับอุณหภูมิของโพลาร์โพลีเมอร์
(ข) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า $\tan \delta$ กับอุณหภูมิของโพลาร์โพลีไวนิลคลอไรด์ ที่ 50 Hz

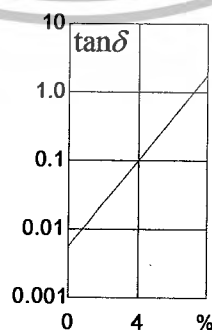
ถ้าไดอิเล็กตริกเป็นสารผสมของสารโพลาร์ ก็จะเกิดค่าสูงสุดได้หลายค่า ซึ่งเกิดจากผลของส่วนประกอบในสารผสม เช่น รูปที่ 2.15 ซึ่งค่าสูงสุดค่าแรก (ที่ -55°C) เกิดขึ้นเนื่องจากพลังงานสูญเสียในกระดาษ (cellulose) เอง ค่าสูงสุดที่สอง (ที่ 35°C) เกิดขึ้นโดยพลังงานสูญเสียในสารประกอบที่ชุ่ม (impregnating compound คือ oil-colophony composition)



รูปที่ 2.15 กราฟที่แสดงค่า $\tan \delta$ ของกระดาษที่ชุ่มด้วยน้ำมันผสมโคโลโพนี กับอุณหภูมิที่ 50 Hz

2.5.3 ค่า $\tan \delta$ กับความชื้น

ค่า $\tan \delta$ ของสารไดอิเล็กตริก จะเพิ่มขึ้นตามความชื้น ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.16 ซึ่งจากกราฟที่แสดง ทำให้ทราบว่าค่าความชื้นที่สูงๆ มีผลทำลายคุณสมบัติของการฉนวนไฟฟ้า



รูปที่ 2.16 กราฟแสดงค่า $\tan \delta$ ของกระดาษกับความชื้นในรูปเปอร์เซ็นต์ปริมาณ ที่ความถี่ 1 MHz (แกนตั้งเป็นลอการิทึม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4 ค่า $\tan \delta$ กับแรงดัน

เมื่อคุณภาพของฉนวน (โดยเฉพาะในเคเบิลแรงสูง, อุปกรณ์ต่างๆ และเครื่องจักรกลไฟฟ้า) ถูกคาดคะเนขึ้นโดยส่วนที่สำคัญจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของ $\tan \delta$ ซึ่ง $\tan \delta$ ขึ้นกับค่าแรงดัน U ที่ป้อนให้

ในหลายๆ กรณี ค่า $\tan \delta$ จะไม่ขึ้นกับแรงดัน เมื่อให้เงื่อนไขอื่นๆ เท่ากัน ค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของแรงดันที่ป้อนให้ฉนวน ดูได้จากสมการ (2.15)

อย่างไรก็ตามค่า $\tan \delta$ ที่ขึ้นกับแรงดัน บางครั้งสามารถอธิบายได้โดยกราฟที่แสดงในรูปที่ 2.17 โดยค่า $\tan \delta$ นี้เกือบจะคงที่ในบางค่ากับแรงดัน แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก เมื่อแรงดันเกิดค่า U_{ion} กราฟที่แสดงในรูปที่ 2.17 เรียกว่า เส้นโค้งไอออไนเซชัน



รูปที่ 2.17 กราฟเส้นโค้งไอออไนเซชัน

จุด A บนเส้นโค้ง เรียกว่า จุดไอออไนเซชัน และจะเป็นไปตามการเกิดไอออไนเซชัน (การเกิดของโคโรนาหรือชนิดอื่นๆ ของพาร์เซียลดีสชาร์จ) ในอากาศหรือก๊าซอื่นๆ ในฉนวน ตัวอย่างเช่น อากาศและก๊าซในฉนวนเส้นใยที่มีความหนาแน่นน้อยและฉนวนที่ได้รับแรงกดดัน ซึ่งไม่ได้ทำการอบแห้ง (deep vacuum drying)

หลังจากผ่านจุดสูงสุด (จุด B) กราฟจะลาดลงเล็กน้อย เพราะเป็นส่วนประกอบของอากาศมีค่าความนำสูงและแรงดันตกคร่อมสารนั้นมีค่าน้อยลง การไอออไนเซชันของอากาศจะเกี่ยวพันกับเงื่อนไขที่สำคัญ 2 ประการ คือ

1) พิจารณาการดูดซับของพลังงาน คือ การเพิ่มอย่างมากของพลังงานสูญเสียเปล่าและ $\tan \delta$

2) ขบวนการทางเคมีเมื่อจุดเดือดต่ำลง บางส่วนของออกซิเจนในอากาศจะเปลี่ยนเป็นโอโซนและไนโตรเจนออกไซด์ สารเหล่านี้จะทำให้เนื้อฉนวนถูกทำลาย

ตามหลักการแล้ว แรงดันที่ใช้ควรมีค่าต่ำกว่าไอออไนเซชัน ซึ่งสอดคล้องกับจุด A (รูปที่ 2.17) คุณสมบัติที่ดีขึ้นจะเกิดกับฉนวนซึ่ง U_{ion} สูงขึ้น และการเพิ่มขึ้นของกราฟไอออไนเซชันหลังจากจุด A จะมีความชันเพิ่มขึ้น บางครั้งคุณสมบัติของการเป็นฉนวนที่แรงดัน

แรงสูงสามารถประเมินได้โดยการกำหนดค่าที่เพิ่มขึ้นของ $\Delta \tan \delta$ (loss tangent) เมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นจากขนาดที่กำหนด

ในไม่กี่ปีที่ผ่านมา ได้มีผู้ให้ความสนใจมากในการศึกษาเกี่ยวกับพาร์เซี่ยลดีสซาร์จในฉนวนก๊าซและฉนวนของแข็ง เนื่องจากการเกิดขึ้นของพาร์เซี่ยลดีสซาร์จเหล่านี้จะลดความน่าเชื่อถือในการทำงานของฉนวนลง โดยเฉพาะวิธีที่ถูกรับปรุงขึ้นได้ถูกนำมาใช้กับการประมาณค่าเชิงตัวเลขของความเข้มของพาร์เซี่ยลดีสซาร์จ

2.6 กลไกการเกิดเบรกดาวนในฉนวนเหลว [1,4,7]

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดที่จุ่มอยู่ในฉนวนเหลว จะเกิดกระแสไหล และเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้น จะเกิดการสปาร์ค (spark) ระหว่างอิเล็กโทรด การสปาร์คระหว่างอิเล็กโทรดในของเหลว ทำให้เกิดการไหลของกระแสมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความต้านทานของวงจร นอกจากนี้ยังทำให้เกิดแสงเรืองระหว่างอิเล็กโทรด เกิดฟองก๊าซ, เกิดเขม่า, และส่วนประกอบของสารอย่างอื่น อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมี เกิดรูเล็ก ๆ (spot) ที่หน้าอิเล็กโทรด และความดันในของเหลวเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด ลักษณะการเกิดการสปาร์คดังกล่าวเรียกว่า ฉนวนเหลวเกิดการเบรกดาวน ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า ที่ทำให้ฉนวนนั้นเกิดเบรกดาวนถูกกำหนดให้เป็นค่าความคงทนของการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า E_b ของฉนวนเหลว

การเบรกดาวนของฉนวนเหลวเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้น เนื่องจากสาเหตุหลายประการและก็ไม่มีความถี่ที่แน่นอนที่สามารถอธิบายการทดลองได้อย่างแจ่มชัด ทุกผลการทดลองเหมือนอย่างในก๊าซ

เมื่อพิจารณาจาก โครงสร้างและองค์ประกอบของฉนวนเหลว อาจแยกได้เป็น 2 ประเภท คือ ฉนวนเหลวบริสุทธิ์ (pure liquids) และฉนวนเหลวเชิงการค้า (commercial liquids) ฉนวนเหลวบริสุทธิ์ หมายถึง ฉนวนเหลวที่มีองค์ประกอบทางเคมีของโมเลกุลปราศจากสิ่งเจือปน หรือมีน้อยกว่าค่าที่กำหนดยอมให้มี เช่น n-Hexane (C_6H_{14}), n-Heptane (C_7H_{16}) และฟาราฟินไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ ส่วนฉนวนเหลวเชิงการค้า นั้น หมายถึง ฉนวนเหลวที่มีองค์ประกอบทางเคมีไม่บริสุทธิ์ มีโครงสร้างหรือส่วนผสมของโมเลกุลยุ่งยากซับซ้อน และอาจมีสารไม่บริสุทธิ์เจือปนอยู่ ซึ่งสามารถแบ่งพิจารณาออกได้เป็น ฟองอากาศ, น้ำ และอนุภาคของแข็ง

จากการให้ความสนใจคุณสมบัติเคมีและฟิสิกส์ของฉนวนเหลวผสมกับเทคนิค (Technique) ใหม่ในการกรองและการแยกก๊าซ (Filtering and degassing) ในของเหลวทดสอบ การใช้เทคนิคการถ่ายภาพของระบบ SCHLIEREN หรือ SHADOWGRAPHIC ในการตรวจสอบปรากฏการณ์ในช่วงก่อนการเกิดเบรกดาวน, ขณะเกิดเบรกดาวน และการใช้แรงดันทดสอบเป็นแบบพัลส์ ทำให้สามารถวัดค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรเฉพาะตัวใดตัวหนึ่ง โดยตัวแปรอื่นถูกควบคุมให้คงที่ ทำให้รู้ถึงปัจจัยที่มีผลต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหลวหลายประการ เช่น ลักษณะสมบัติทางฟิสิกส์ของฉนวนเหลว, ชนิดและปริมาณสิ่งเจือปนของแข็งและก๊าซ ตลอดจนสภาพของอิเล็กโตรดและลักษณะแรงดันไฟฟ้า มีหลายทฤษฎีและแนวความคิดที่อธิบายกลไกการเบรกดาว์นของฉนวนเหลว ซึ่งพอแยกออกได้เป็น 2 แนวทฤษฎีด้วยกัน คือ ทฤษฎีหนึ่งสมมุติพิจารณาว่าฉนวนเหลวเป็นเนื้อเดียวกันตลอด (intrinsic liquid) และอธิบายการเกิดเบรกดาว์นในลักษณะเดียวกับ กลไกเบรกดาว์นในก๊าซ โดยอาศัยการเกิดอะวาลานซ์ (avalanche) จากการไอออไนเซชัน (ionization) เนื่องจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้า ส่วนอีกทฤษฎีหนึ่ง อธิบายการเกิดเบรกดาว์นในของเหลว เนื่องจากสารไม่บริสุทธิ์

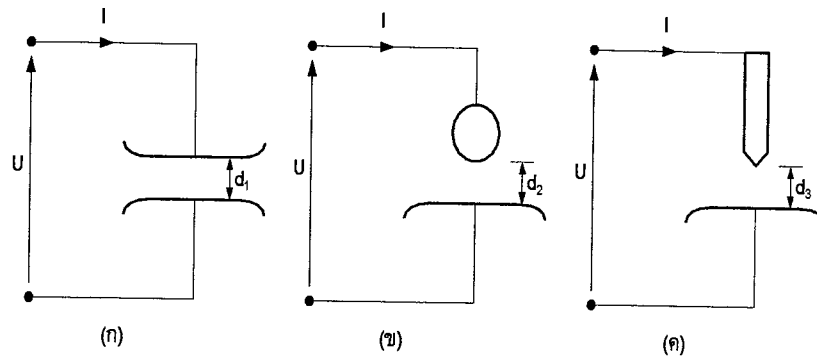
กลไกการเกิดเบรกดาว์นของฉนวนเหลวบริสุทธิ์ เช่น น้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์สามารถอธิบายได้ เช่นเดียวกับกรณีการเกิดเบรกดาว์นในฉนวนก๊าซ แต่ถ้าเป็นฉนวนเหลวชนิดผสม (Impurities) การเกิดเบรกดาว์นจะอธิบายได้ด้วยผลของสิ่งเจือปนที่มีอยู่ ทั้งนี้เพราะว่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์หลาย ๆ อย่างประกอบกัน เช่น ลักษณะคุณสมบัติทางฟิสิกส์, ทางเคมี, ทางไฟฟ้า, ชนิดและปริมาณของสิ่งเจือปน ตลอดจนลักษณะของรูปทรงอิเล็กโตรด (Electrodes Configuration) ดังนั้นจึงมีทฤษฎีอธิบายการเกิดเบรกดาว์นในฉนวนเหลวแบ่งออกเป็น 2 แนวทาง คือ

ทฤษฎีที่ 1 เสนอโดย Lewis Sharbaugh และ Watson Swan โดยสมมติว่าฉนวนเหลวเป็นแบบเนื้อเดียวกันตลอดไม่มีสิ่งเจือปน ซึ่งสามารถอธิบายการเกิดเบรกดาว์นได้ เช่นเดียวกับก๊าซที่อาศัยการเกิดอะวาลานซ์อิเล็กตรอนจากกระบวนการไอออไนเซชัน (Ionization) ในสนามไฟฟ้า (Field Emission) หรือกระบวนการ Thermionic Emission

ทฤษฎีที่ 2 พิจารณาจากผลของสิ่งแปลกปลอม ทฤษฎีนี้อาจแบ่งออกเป็นการเกิดเบรกดาว์นเนื่องจากโพรงหรือฟองก๊าซ, การเกิดเบรกดาว์นเนื่องจากหยดของเหลวเจือปนชนิดอื่นๆ และผลการเกิดเบรกดาว์นเนื่องจากสิ่งเจือปนที่เป็นของแข็ง

2.6.1 ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้า (electric field configuration) [1,4]

โดยทั่วไปลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้าอาจแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอและสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ชนิดไม่สม่ำเสมอนี้แบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยและแบบไม่สม่ำเสมอสูง สนามไฟฟ้าจะเป็นแบบไหนขึ้นอยู่กับรูปลักษณะของอิเล็กโตรดดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.18 อิเล็กโตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ กัน

(ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ(uniform field)

(ข) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (slightly nonuniform field)

(ค) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูง (Highly nonuniform field)

ถ้าป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ ที่วางอยู่ในอากาศดังรูปที่ 2.18 จะพบว่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาว์จะไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าจะจัดระยะ d_1 , d_2 และ d_3 ให้เท่ากันก็ตาม ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาว์สามารถวัดหาได้ง่าย ฉนวนแต่ละชนิดจะมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ามิใช่ตายตัวค่าใดค่าหนึ่ง ส่วนใหญ่จะเป็นค่าสถิติ หรือค่าโดยประมาณ มักกำหนดหรือระบุด้วยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_{max} ที่เกิดขึ้น ณ จุดใดจุดหนึ่งระหว่างอิเล็กโตรดในขณะที่เบรกดาว์เริ่มเกิดขึ้น ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ หลายประการ

2.6.2 อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ [1,4]

หมายถึง สนามไฟฟ้าเท่ากันทุกจุด ดังเช่นในช่องระหว่างอิเล็กโตรดระนาบ-ระนาบ ซึ่งคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_{max} = E = \frac{U}{d} \quad (2.19)$$

เมื่อ	U	=	แรงดันที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโตรด
	d	=	ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด
	E	=	ความเครียดสนามไฟฟ้า ณ จุดใดๆ ระหว่างอิเล็กโตรด
	E_{max}	=	ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

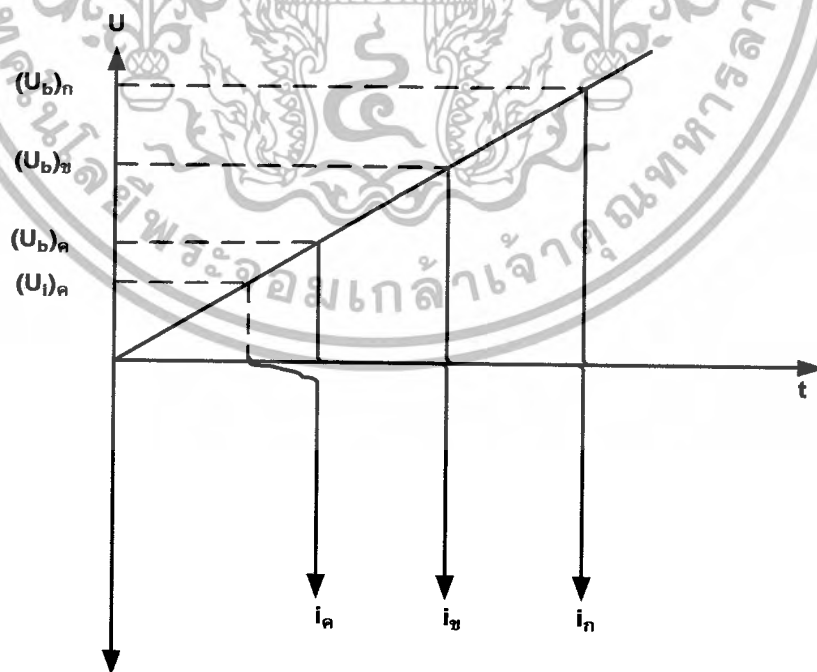
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นหมายความว่า เมื่อป้อนแรงดันให้กับอิเล็กทรอนิกส์สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ จะเกิดเบรกดาวร์หรือสปาร์คทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด (ซึ่งเท่ากันทุกจุด) ถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณและกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมากในทันทีทันใด ค่ากระแสเบรกดาวร์นี้จะถูกจำกัดด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของตัวจ่ายและวงจรภายนอกเท่านั้น ซึ่งก่อนจะเกิดเบรกดาวร์นั้นค่ากระแสนี้จะวัดไม่ได้ดังในรูป 2.18 (ก) และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันขณะจะเกิดเบรกดาวร์นี้ก็คือ ค่าความคงทนทางไฟฟ้า (dielectric strength) หรือความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของการฉนวนนั่นเอง ซึ่งคำนวณได้จาก

$$E_b = \frac{U_b}{d} \quad (2.20)$$

เมื่อ U_b = แรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวร์ด้วยสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ
 E_b = ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวร์ ซึ่งเรียกว่า ความคงทนไฟฟ้าของฉนวน

อย่างไรก็ตามค่า E_b นี้ของไดอิเล็กตริกชนิดหนึ่งก็มีค่าไม่คงตัวเสมอไป เพราะขึ้นอยู่กับแพกเตอร์ต่างๆ เช่น แม้แต่ความหนาหรือระยะห่าง d ที่ไม่เท่ากัน ค่า E_b ก็ไม่เท่ากันฉะนั้นในมาตรฐานที่กำหนดค่าความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวนมักจะกำหนดความหนาของไดอิเล็กตริกไว้เสมอ



รูปที่ 2.19 เปรียบเทียบแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวร์ในไดอิเล็กตริกตามลักษณะสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3 อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ [1,4]

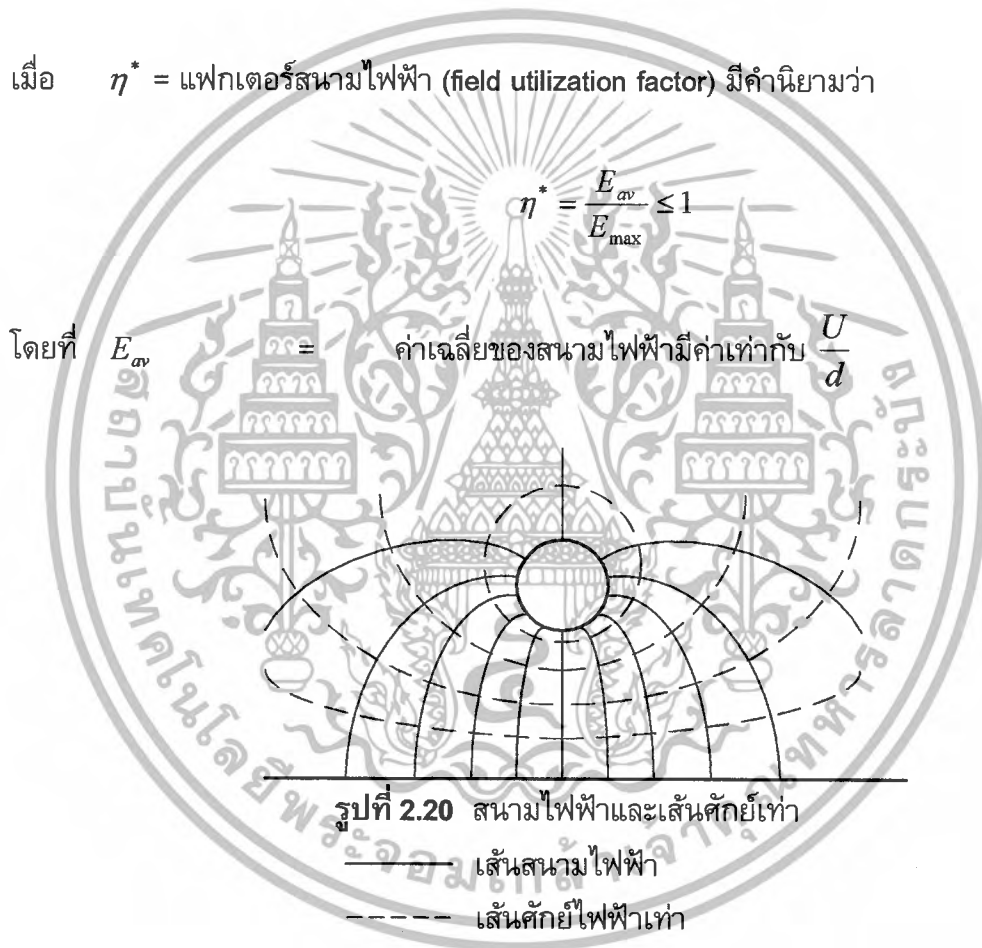
อิเล็กโทรดแบบที่ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้น ความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆ จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะทางเรขาคณิตของอิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย ดังเช่น อิเล็กโทรดในรูปที่ 2.18(ข) ถ้าเขียนเส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า จะได้ดังในรูปที่ 2.20 จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_{\max} จะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโทรดทรงกลม อาจคำนวณได้จากสมการ

$$E_{\max} = \frac{U}{d\eta^*} \quad (2.21)$$

เมื่อ η^* = แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (field utilization factor) มีคำนิยามว่า

$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}} \leq 1 \quad (2.22)$$

โดยที่ E_{av} = ค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ $\frac{U}{d}$



จึงอาจกล่าวได้ว่า η^* ก็คือ ธรรมชาติบอกให้ทราบว่าอิเล็กโทรดนั้นมีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากน้อยเพียงใด และโดยอาศัยแฟกเตอร์สนามไฟฟ้านี้เองจึงคำนวณความเครียดเบรกดาวน์ของฉนวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (แบบ ข) ได้คือ

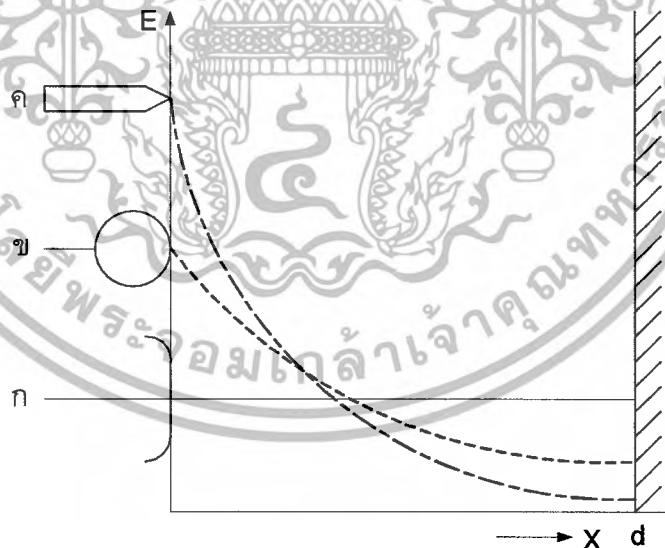
$$E_b = \frac{U_b}{d\eta^*} \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2.23) นี้ใช้ได้เฉพาะกรณีที่อิเล็กโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย หรือใช้กับกรณีที่ไม่มีโคโรนาหรือพรีดีสชาร์จ (predischarge) เกิดก่อนเบรกดาวน์ ดังอิเล็กโตรดในรูป 2.18 (ข) กล่าวคือ ก่อนเกิดเบรกดาวน์จะไม่ปรากฏว่ามีกระแสไฟฟ้าไหลระหว่างอิเล็กโตรดเลย และลักษณะสนามไฟฟ้าจะไม่มีเปลี่ยนแปลง จะเกิดเบรกดาวน์ทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าคงทน คือ $E_{\max} = E_b$

ในกรณีที่อิเล็กโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (highly nonuniform field) ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับผิวอิเล็กโตรดที่มีพื้นผิวน้อยที่สุด เช่น ปลายแหลมดังในรูปที่ 2.18 (ค) เมื่อระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโตรดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วดังในรูปที่ 2.21 อิเล็กโตรดแบบนี้ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤติแล้วก็ตาม จะไม่เกิดเบรกดาวน์แต่จะเกิดโคโรนา

ในบริเวณใกล้ๆ ผิวอิเล็กโตรด คือ บริเวณที่มีความเครียดไฟฟ้าสูงสุด ส่วนบริเวณอื่นๆ ยังมีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำจะไม่เกิดโคโรนา ฉะนั้นในแกประหว่างอิเล็กโตรดจะเกิดดีสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ เรียกว่าดีสชาร์จบางส่วน (partial discharge) ปรากฏการณ์อาจเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือเป็นช่วงๆ จึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรด กระแสนี้จะเกิดขึ้นและวัดได้ก่อนเกิดเบรกดาวน์ เรียกว่ากระแสโคโรนา (corona current) หรือกระแสพรีดีสชาร์จดังในรูปที่ 2.19 (ค)



รูปที่ 2.21 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ

การเกิดโคโรนาจึงทำให้สนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตเปลี่ยนไป เพราะมีประจุค้าง (space charge) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดคำนวณจากสมการ (2.23) ไม่ได้ แต่อย่างไร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก็ตามสมการ (2.23) นี้อาจใช้คำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดได้ เพราะสนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตยังไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือ

$$E_i = \frac{U_i}{d\eta^*} \quad (2.24)$$

เมื่อ E_i = ความเครียดสนามไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิด
 U_i = แรงดันป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด (corona inception voltage)

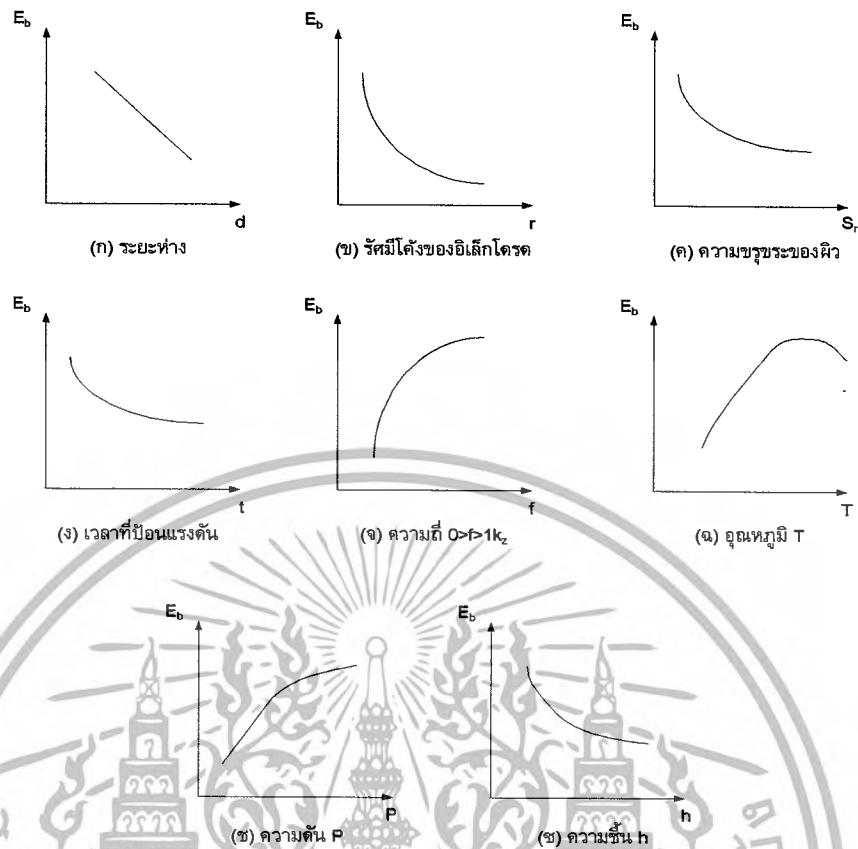
จากสมการ (2.24) จึงใช้ได้เฉพาะกรณีไม่มีประจุค้างระหว่างอิเล็กโทรด (free of space charge) หรือกล่าวง่าย ๆ ก็คือ สมการ (2.24) นี้ใช้สำหรับคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าหรือแรงดันเริ่ม (starting voltage, threshold voltage, inception voltage) ซึ่งหมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นในแก๊ป

ในช่องระหว่างอิเล็กโทรด อาจจะเป็นแรงดันเบรกดาวน (ในกรณีที่อิเล็กโทรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือไม่สม่ำเสมอเพียงเล็กน้อย) หรือเป็นแรงดันที่โคโรนาเริ่มเกิด (ในกรณีที่อิเล็กโทรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ค่าแรงดันเบรกดาวนจะมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเริ่มต้น) ค่าแรงดันเริ่มต้นจึงอาจเขียนในรูปสมการทั่วไปได้ว่า

$$U_i = E_i \cdot d \cdot \eta^* \quad (2.25)$$

เมื่อ U_i = แรงดันเริ่มต้น
 E_i = ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันเริ่มต้น U_i

ในกรณีที่อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ค่า U_i คือ U_b และ E_i คือ E_b ถ้าอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง $U_b > U_i$ ค่าแรงดันเบรกดาวนนี้อาจจะคำนวณได้ง่าย ๆ ทั้งนี้เพราะไม่ทราบถึงการกระจายของประจุค้าง ว่าเป็นอย่างใด ฉะนั้นการคำนวณความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของการฉนวนที่อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง มักกำหนดด้วยค่าแรงดันเริ่มต้น หรือความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มต้นเป็นตัวบอกถึงค่าความคงทนการฉนวนค่าแรงดันไฟฟ้า อย่างไรก็ตามความคงทนการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า นั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางเรขาคณิตของอิเล็กโทรด เช่น ระยะห่างของอิเล็กโทรด, รัศมีความโค้งของอิเล็กโทรด, ลักษณะพื้นผิวของอิเล็กโทรด แล้วยังขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์อื่นๆ อีกหลายประการ ดังที่ได้แสดงรวบรวมไว้โดยสังเขปในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของเหลว

2.6.4 กลไกการเกิดเบรกดาวนของฉนวนเหลวบริสุทธิ์ [7]

จากการพิจารณา ฉนวนเหลวบริสุทธิ์มีเนื้อเดียวตลอด ปราศจากสิ่งเจือปน จึงมีผู้เสนอการเบรกดาวนว่า มีลักษณะเดียวกับกลไกเบรกดาวนในก๊าซ โดยอธิบายไว้ว่า เมื่ออิเล็กตรอนเกิดขึ้นในของเหลว มันจะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า และถ้าอิเล็กตรอนได้รับพลังงานสูงพอ เมื่อไปชนกับโมเลกุลของของเหลวก็จะเกิดไอออนไนเซชัน ทำให้เกิดอะวาลนซ์ขึ้น และเกิดการเบรกดาวนเนื่องจากระยะอิสระเฉลี่ย (mean free path) ของอิเล็กตรอนในฉนวนเหลว ค่าความคงทนของการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า ควรมีค่าสูงกว่า $1,000 \text{ kV/cm}$ จากแนวความคิดดังกล่าว ได้มีนักวิจัยหลายท่านได้นำไปประยุกต์ใช้กับการทดลอง ซึ่งมีทั้งเห็นด้วยและเกิดความขัดแย้ง

จากตารางที่ 2.8 แสดงตัวอย่างของความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนบริสุทธิ์ต่างๆ ซึ่งมีส่วนประกอบของก๊าซเจือปนน้อยกว่าซีดจำกัด ถ้ามีก๊าซเจือปนมากพอ จะทำให้ค่าความคงทนลดน้อยลง โดยเฉพาะมีก๊าซออกซิเจนปนอยู่

ตารางที่ 2.9 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวบริสุทธิ์ Alston [7]

ชนิดของฉนวนเหลว	ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า MV.cm ⁻¹
Hexane	1.1-1.3
Decane	1.8
Benzene	1.1
Transformer oil	1.0
Silicone	1.0-1.2
Liquid Oxygen	1.4
Liquid Hydrogen	>1
Liquid Nitrogen	1.66-1.88
Liquid Helium	0.7
Liquid Argon	1.1-1.42

2.6.5 กลไกการเกิดเบรกดาวห์ในฉนวนเหลวบริสุทธิ์เนื่องจากสนามไฟฟ้า

ฉนวนเหลวบริสุทธิ์จะมีเนื้อเดียวกันตลอดปราศจากสิ่งเจือปน กลไกการเกิดเบรกดาวห์ของฉนวนเหลวบริสุทธิ์จึงอธิบายได้เช่นเดียวกับกับการเกิดเบรกดาวห์ในก๊าซ โดยอาศัยกระบวนการที่อิเล็กตรอนแตกตัวออกจากคาโทด (Field Emission and Thermionic Emission) เมื่อพิจารณาจากกระแสคาโทดจะเกิดสภาพการนำไฟฟ้าขึ้น เมื่อเราป้อนสนามไฟฟ้าให้กับอิเล็กโตรดจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการของชอคกี (Schottky's Equation) นั้น คือ

$$J = J_t \times e^{\left(\frac{4A\sqrt{E}}{T}\right)} \quad (2.26)$$

เมื่อ

$$J_t = AT^2 \times e^{\left(\frac{-e\phi}{kT}\right)} \quad (2.27)$$

โดยที่	J	=	ความหนาแน่นของกระแส
	T	=	อุณหภูมิของฉนวนเหลว
	A	=	พื้นที่หน้าตัดของฉนวนเหลว
	E	=	สนามไฟฟ้าที่ป้อนให้กับอิเล็กโตรด
	ϕ	=	เส้นแรงไฟฟ้า
	e	=	ประจุของอิเล็กตรอน
	k	=	Thermal Conductivity

เมื่อ J_t = ความหนาแน่นของกระแสเนื่องจากผลของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (Thermionic Current Density)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2.27) แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นกระแสขึ้นอยู่กับอลุนหภูมิ แต่จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ พบว่า อุนหภูมิจะมีผลน้อยมากในช่วงอุนหภูมิค่าสูงๆ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการเกิดการนำไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดนั้นขึ้นอยู่กับกระบวนการแตกตัวของอิเล็กตรอนภายใต้สนามไฟฟ้ามากกว่าหรือขึ้นอยู่กับแรงดันที่ป้อนให้กับอิเล็กโตรดนั่นเอง เมื่ออิเล็กตรอนหลุดออกจากขั้วอิเล็กโตรดเข้าไปชนโมเลกุลของฉนวนเหลวทำให้ฉนวนเหลวได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นเนื่องจากสนามไฟฟ้าในทฤษฎีการเกิดเบรกดาวนั้น สมมุติว่าอิเล็กตรอนบางตัวอาจมีพลังงานมากพอ กล่าวคือ มากกว่าการสูญเสียเนื่องจากการชนกันเองของอิเล็กตรอนในโครงสร้างโมเลกุลของฉนวนเหลว อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้า จนกระทั่งมีพลังงานมากพอที่จะสามารถไอออไนซ์โมเลกุลโดยการชนกันและเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดอะวาลานซ์ (avalanche) ของอิเล็กตรอน

เงื่อนไขการเกิดอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอน ได้จากการที่อิเล็กตรอนมีพลังงานสะสมมากกว่าพลังงานไอออไนเซชันของโมเลกุล นั่นคือ

$$e \cdot E \cdot \lambda = c \cdot hv \quad (2.28)$$

เมื่อ

e
 E
 λ
 hv
 c

= จำนวนอิเล็กตรอน
= สนามไฟฟ้าที่ป้อน
= ระยะอิสระของอิเล็กตรอน
= พลังงานควอนตัมที่สูญเสียในการไอออไนเซชันของโมเลกุล
= ความเร็วแสง ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

ทฤษฎีนี้จะสามารถทำนายความสัมพันธ์ของขนาดแรงดันเบรกดาวนี้ได้ แต่อย่างไรก็ตามยังไม่สามารถอธิบายเรื่องเวลาล่าช้า (time lag) ที่เกิดขึ้นในกลไกการเกิดเบรกดาวนี้กรณีแรงดันอิมพัลส์ได้ [1,4]

2.6.6 กลไกการเกิดเบรกดาวของฉนวนเชิงการค้ำ [7]

จากการทดลองวัด ค่าความคงทนของการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวเชิงการค้ำจะได้ค่าต่ำ ซึ่งโดยปกติจะมีค่ามากกว่า 1 MV/cm สำหรับฉนวนเหลวบริสุทธิ์ จึงมีการพิจารณาว่า กลไกการเบรกดาวของฉนวนเหลวเชิงการค้ำเกิดจากสารไม่บริสุทธิ์ โดยแยกพิจารณาออกตามประเภทของสารไม่บริสุทธิ์ ดังนี้

1) การเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากโพรงหรือฟองก๊าซ (Cavitation or Bubble Breakdown) [4]

ในฉนวนเหลวอาจมีฟองก๊าซเกิดขึ้นได้เนื่องจากหลายสาเหตุ เช่น มีโพรงก๊าซอยู่ที่ผิวอิเล็กโตรดหรือเนื่องจากแรงอิเล็กโตรสแตติกซ์ (Electrostatic) ระหว่างกลุ่มประจุด้วยกันเอง ซึ่งอาจมีค่ามากกว่าแรงดึงผิวที่อิเล็กโตรด หรือเกิดฟองก๊าซจากผลของโมเลกุลฉนวนเหลวเกิดการแตกตัว เนื่องจากการชนของอิเล็กตรอน หรือโคโรนาดีสชาร์จทำให้ฉนวนเหลวระเหยกลายเป็นไอ เป็นต้น เมื่อเกิดฟองก๊าซขึ้นในฉนวนของเหลวฟองก๊าซนั้นจะขยายยืดยาวออกตามแนวทิศทางของสนามไฟฟ้าเพื่อลดพลังงานศักย์ในสนามไฟฟ้า วิศวกรชื่อ “Kao” ได้พยายามคิดหาสมการของสนามไฟฟ้าสำหรับการคำนวณเบรกดาวน์ในฟองก๊าซโดยสมมุติให้ปริมาตรของฟองก๊าซที่ยืดยาวออกมีค่าคงที่ เบรกดาวน์จะเกิดขึ้นเมื่อแรงดันตกคร่อมความยาวของฟองก๊าซมีค่าเท่ากับค่าต่ำสุดของเส้นโค้งพาสเชน (Pachen's Curve) สำหรับฟองก๊าซชนิดนั้นๆ ซึ่งสมการของสนามไฟฟ้าสำหรับการเบรกดาวน์ของฟองก๊าซสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$E = \frac{1}{\epsilon_1 - \epsilon_2} \left\{ \frac{2\pi\sigma(2\epsilon_1 + \epsilon_2)}{r} \times \left[\frac{\pi}{4} \sqrt{\left(\frac{V_b}{2rE} \right)^2 - 1} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (2.29)$$

โดยที่	σ	=	ความตึงผิวของฉนวนเหลว
	ϵ_1, ϵ_2	=	เปอร์มิตติวิตีของฉนวนเหลวและฟองก๊าซตามลำดับ
	r	=	รัศมีเริ่มแรกของฟองก๊าซ (ตอนเริ่มแรกสมมุติให้เป็นรูปทรงกลม)
	V_b	=	แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมฟองก๊าซ

จะสังเกตเห็นว่าสนามไฟฟ้าในสมการที่ (2.29) ขึ้นอยู่กับขนาดของฟองก๊าซตอนเริ่มแรก ซึ่งขนาดของฟองก๊าซนี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดัน

2) การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนเหลวอันเนื่องมาจากหยดของเหลวปนเปื้อนชนิดอื่น [1.4]

การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนเหลวอันเนื่องมาจากหยดของเหลวปนเปื้อนชนิดอื่น เช่น หยดน้ำ, หรือของเหลวชนิดอื่น เป็นต้น การเกิดเบรกดาวน์อาจเกิดขึ้นจากความไม่คงรูปของหยดน้ำนี้ภายใต้สนามไฟฟ้า สมมุติว่าหยดน้ำรูปทรงกลมนี้มีค่าเปอร์มิตติวิตีเป็น ϵ_2 จมอยู่ในฉนวนเหลวที่มีค่าเปอร์มิตติวิตี ϵ_1 อยู่ระหว่างอิเล็กโตรดบนสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ เนื่องจากหยดรูปทรงกลมนี้ถูกอัดไม่ได้ผลของสนามไฟฟ้าจะทำให้หยดทรงกลมนี้ยืดตัวออกตามแนวของสนามไฟฟ้า ความเครียดสนามไฟฟ้าในหยดน้ำรูปทรงกลมที่อัดตัวไม่มีปริมาตร อาจคำนวณได้จากความสัมพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_2 = 2 \sqrt{\frac{2\pi\sigma\varepsilon_1}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2} \frac{\beta^{\frac{1}{3}}}{R} \left(2\beta - 1 - \frac{1}{\beta^2}\right)} \quad (2.30)$$

โดยที่	σ	=	ความตึงผิวของฉนวนเหลว
	ε_1	=	เปอร์มิตติวิตีของฉนวนเหลว
	ε_2	=	เปอร์มิตติวิตีของรูปทรงกลมเหลวเจือปน
	β	=	อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางส่วนแคบของหยดรูปทรงกลม
	R	=	รัศมีของหยดเจือปน

ความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าภายในหยดของเหลวเจือปนรูปทรงกลม E_2 กับสนามไฟฟ้าในฉนวนเหลวที่ปราศจากหยดเจือปนรูปทรงกลม E อาจเขียนได้ว่า

$$E_2 = \frac{\varepsilon_1 \cdot E}{\varepsilon_1 - (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot G} \quad (2.31)$$

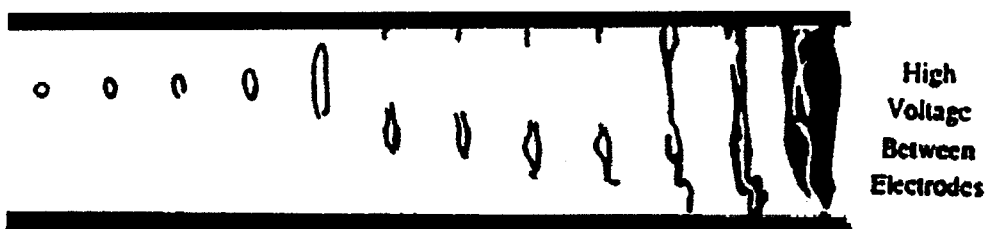
เมื่อ

$$G = \frac{1}{\beta^2 - 1} \left\{ \frac{\beta \cosh^{-1} \beta}{(\beta^2 - 1)^{\frac{1}{2}}} - 1 \right\} \quad (2.32)$$

จากสมการ (2.31) และ (2.32) สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้เป็นดังนี้

$$E = 600 \sqrt{\left(\frac{\pi\sigma}{\varepsilon_1 R}\right) \times \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} - G\right) \times H} \quad (2.33)$$

$$H = \sqrt{2\beta^{\frac{1}{3}} \left(2\beta - 1 - \frac{1}{\beta^2}\right)} \quad (2.34)$$



รูปที่ 2.23 ลักษณะกลไกการเกิดเบรกควานซ์ของหยดน้ำภายในฉนวนของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Alston ได้เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง β กับเทอม $\left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_1 - \epsilon_2} - G\right) \times H$

และชี้ให้เห็นว่าถ้าอัตราส่วน $\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$ มากกว่า 20 ค่า E จะเพิ่มขึ้นถึงค่าสูงสุดแล้วจะเริ่มลดลงเมื่อ β เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารูปร่างของหยดเจ็ปทรงกลมจะไม่เสถียรหรือไม่คงรูปร่างแน่นอนเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าถึงค่าวิกฤติ แต่ถ้าอัตราส่วน $\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$ ค่าน้อยกว่า 20 จะไม่มีสนามไฟฟ้าวิกฤติ แม้ว่า β จะเพิ่มขึ้นสูงมากก็ตามในกรณีหยดรูปทรงกลมเจ็ปเป็นตัวนำ นั่นคือ $\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \rightarrow \infty$ จากความสัมพันธ์ในสมการ (2.33) จะได้ว่า

$$E = 600 \sqrt{\left(\frac{\pi\sigma}{\epsilon_1 R}\right)} GH \quad (2.35)$$

นั่นคือเทอม GH จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.45865 เมื่อ β มีค่าประมาณ 1.85 ดังนั้นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติที่ทำให้หยดเจ็ปทรงกลมเสถียรภาพ (E_{cr}) จะมีค่าเป็น

$$E_{cr} = 487.7 \sqrt{\frac{\sigma}{\epsilon_1 R}} \quad V/cm \quad (2.36)$$

3) การเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากสิ่งเจ็ปนของแข็ง [1,4]

สารไม่บริสุทธิ์ เช่น ผงฝุ่น หรือ ไฟเบอร์ อาจเจ็ปนอยู่ในฉนวนเหลวในลักษณะของอนุภาคเล็กๆ ที่แขวนลอยกระจายอยู่ในเนื้อฉนวนเหลว โดย Kok และ Corbey ได้อธิบายโดยสมมุติว่าอนุภาคเป็นลูกทรงกลมมีรัศมี r และมีค่าเปอร์มิตติวิตีเป็น ϵ_2 จมอยู่ในฉนวนเหลวที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีเป็น ϵ_1 อนุภาคจะถูกโพลาไรซ์ (Polarized) ทำให้เกิดแรงกระทำต่ออนุภาคนั้น เนื่องจากสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ดังสมการ

$$F = \frac{1}{2} r^3 \frac{(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{(\epsilon_1 + \epsilon_2)} \cdot grad E^2 \quad (2.37)$$

จาก $\epsilon_2 > \epsilon_1$ ในกรณีนี้ซึ่งเป็นกรณีของการเจ็ปนด้วยอนุภาคของแข็งจะเกิดแรงกระทำกับอนุภาคให้เคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่มีความเครียดสูงกว่า ถ้า $\epsilon_2 < \epsilon_1$ ซึ่งจะทำให้เกิดแรงกระทำในทิศทางตรงกันข้ามผลของแรงนี้จะทำให้อนุภาคเรียงตัวกันเป็นลูกโซ่เชื่อมต่อระหว่างอิเล็กโตรดทำให้เกิดเบรกดาวน์ขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเบรกดาวนในฉนวนเหลว [4,6]

การเบรกดาวนในฉนวนเหลวมีกลไกการเกิดที่ซับซ้อนมาก ในปัจจุบันยังไม่มีทฤษฎีหรือข้อสรุปที่แน่นอนอธิบายกลไกการเกิดนี้ นักวิจัยหลายท่านได้นำเอาพื้นฐานของการเบรกดาวนในก๊าซและของแข็งเป็นแนวทางในการอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น เนื่องจากการเบรกดาวนในฉนวนเหลวมีปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการเบรกดาวนหลายตัว มีผลให้แรงดันเบรกดาวนในฉนวนเหลวลดลง ดังนั้นในการพัฒนาฉนวนเหลวตัวใหม่ขึ้นมาใช้งานในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต้องศึกษาผลกระทบจากปัจจัยนั้นๆ เพื่อจะได้ทำการป้องกันและปรับปรุงคุณภาพของฉนวนเหลวให้ดีขึ้นและมีความปลอดภัยในการใช้งานมากขึ้น สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อแรงดันเบรกดาวนในฉนวนเหลวพอสรุปได้ดังนี้

2.7.1 วิธีการทดลอง

การวางเงื่อนไขในการทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวนในฉนวนเหลวมีความสำคัญมากต่อผลการทดลอง ดังนั้นต้องกำหนดมาตรฐานในการทดสอบที่แน่นอน มีเงื่อนไขในการทดลองอย่างไร และแต่ละขั้นตอนควรมีการกำหนดกระแสไหลผ่านฉนวนเหลวเท่าใดหรือมีการสปาร์คข้ามระยะแคบ จึงเรียกว่าเกิดการเบรกดาวน และอุปกรณ์ในการทดลองต้องตรวจสอบว่าอยู่ในสภาพที่ใช้งานได้ดีและต้องปฏิบัติอย่างเคร่งครัดเพื่อข้อมูลที่ได้ออกมาถูกต้องและแม่นยำ จากการตรวจสอบแรงดันเบรกดาวนในไฮโดรคาร์บอนเหลวประเภทเดียวกันและซึ่งได้ผลไม่เท่ากัน แสดงว่าวิธีการทดลองและผู้ทดลองมีส่วนเกี่ยวข้องกับผลการทดลอง นอกจากนี้ต้องคำนึงถึงสภาพสิ่งแวดล้อมในบริเวณที่ทำการทดสอบด้วย

2.7.2 ระยะแคบ

ระยะแคบมีผลต่อแรงดันเบรกดาวนในฉนวนเหลว คือ แรงดันเบรกดาวนจะแปรตามระยะแคบ สาเหตุที่ทำให้แรงดันเบรกดาวนสูงขึ้น เนื่องมาจากการเดินทางของไอออนที่เป็นประจุบวกเดินทางมากขึ้นจึงต้องใช้แรงดันสูงกว่าเดิม ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ถ้าระยะแคบมากขึ้นสนามไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ นั่นคือสนามไฟฟ้าจะไม่แปรตามระยะแคบ และภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ สนามไฟฟ้าจะลดลงเมื่อระยะแคบมากขึ้น มีลักษณะเช่นเดียวกับสนามไฟฟ้าที่หาได้ การหาความสัมพันธ์ของระยะแคบ d และแรงดันเบรกดาวน U_b ถูกเสนอโดย M.S. Nainu และ V. Kamaraju สามารถเขียนได้ดังนี้

$$U_b = k \cdot d^n \quad (2.38)$$

โดยที่ k = ค่าคงที่
 n = ค่าคงที่ที่น้อยกว่า 1

ในการประมาณโดยวิธีนี้มีข้อผิดพลาดมาก เมื่อระยะแคบมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3 รัศมีความโค้งของอิเล็กโตรด

รัศมีความโค้งของอิเล็กโตรด มีผลต่อแรงดันเบรกดาวน์มากในกรณีที่ฉนวนเหลวอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ผลของรัศมีความโค้งที่มีผลต่อแรงดันเบรกดาวน์ คือ ถ้าลดรัศมีความโค้งของอิเล็กโตรดให้น้อยลง สนามไฟฟ้าจะเพิ่มมากขึ้น ความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าจะเพิ่มมากขึ้น ถ้าเพิ่มค่ารัศมีความโค้งของอิเล็กโตรดให้มากขึ้น สนามไฟฟาลดน้อย ความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟาลดลงและมีผลให้แรงดันเบรกดาวน์มีค่ามากขึ้น (ไม่คิดประจุค้าง)

2.7.4 รูปทรงเรขาคณิตของอิเล็กโตรด

ลักษณะรูปทรงเรขาคณิตของอิเล็กโตรดที่แตกต่างกัน มีผลให้การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าแตกต่างกัน เป็นแบบสม่ำเสมอ, แบบสม่ำเสมอเล็กน้อย และแบบไม่สม่ำเสมอ รูปทรงทางเรขาคณิตจะมีผลต่อแรงดันเบรกดาวน์มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะของสนามไฟฟ้าว่าเป็นแบบสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอ อธิบายได้โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าสามารถบอกการกระจายของสนามไฟฟ้าระหว่างแกป ถ้าสนามไฟฟ้าเป็นแบบไม่สม่ำเสมอมาก ๆ ค่าสัมประสิทธิ์แฟกเตอร์ไฟฟ้ามีค่าสูง แต่ถ้าเป็นแบบสม่ำเสมอค่านี้เท่ากับ 1 ความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้ามีผลทำให้มีความเครียดของสนามไฟฟ้าสูง เกิดประจุค้างง่าย มีผลให้แรงดันเบรกดาวน์เปลี่ยนไป กรณีป้อนแรงดันลบและลดลงกรณีป้อนแรงดันบวก ดังนั้นรูปทรงทางเรขาคณิตของอิเล็กโตรดที่แตกต่างกันทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าต่างกัน มีผลให้แรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวมียค่าต่างกันด้วย

2.7.5 สารโลหะที่ใช้ทำอิเล็กโตรด

เนื่องจากอิเล็กโตรดมีส่วนสำคัญต่อการเบรกดาวน์ แรงดันเบรกดาวน์เป็นฟังก์ชันของสารโลหะที่ใช้ทำอิเล็กโตรด สาเหตุที่ทำให้แรงดันเบรกดาวน์ในฉนวนเหลวมียค่าต่างกัน เนื่องมาจากอิเล็กโตรดจะปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาชนกับโมเลกุลของฉนวนเหลวมียการแตกตัวของฉนวนเหลวและเป็นสาเหตุการเบรกดาวน์ในที่สุด การปลดปล่อยอิเล็กตรอนเริ่มต้นด้วยการที่คาโทดจะผลิตอิเล็กตรอนเนื่องจากการให้พลังงานเข้าไป เมื่ออิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอที่จะเอาชนะแรงยึดเหนี่ยว (work function) ของผิวอิเล็กโตรด อิเล็กตรอนจะถูกปลดปล่อยออกมา และการเกิดอิเล็กตรอนโดยลักษณะนี้มีทฤษฎีอธิบาย 3 แบบ คือ การปลดปล่อยแบบความร้อนและสมการของชอติกี, การปลดปล่อยแบบโฟโตอิเล็กทริก ($h\nu \geq \phi$), และการปลดปล่อยแบบสนามไฟฟ้าในฉนวนเหลวภายใต้สนามไฟฟ้าสูง ๆ ของ Fowler และ Nordheim ($J = CE^2 e^{-D/E}$: C และ D เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของอิเล็กตรอน) จากสมการตัวแปรที่สำคัญ คือ ค่าแรงยึดเหนี่ยวภายในโลหะ ในโลหะแต่ละชนิดมีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวแตกต่างกันออกไปและเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าแรงดันเบรกดาวน์มีค่าต่างกัน เมื่อใช้โลหะต่างชนิดทำอิเล็กโตรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.10 รูปทรงทางเรขาคณิตของอิเล็กโทรด มีสัมประสิทธิ์แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

รูปทรงเรขาคณิต	สัมประสิทธิ์แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า
1) แบบใหม่	1
2) พื้นระนาบ (โรโกสกี)	1
3) จานกลม - จานกลม	1
4) ทรงกลม - พื้นระนาบ	$0.94(d/R) + 0.8$
5) ทรงกลม - ทรงกลม	$\frac{\left[\frac{d}{R}+1\right] + \sqrt{\left[\frac{d}{R}+1\right]^2 + 8}}{4}$
6) ทรงกระบอก	$0.25(d/R) + 1$
7) จุด - พื้นระนาบ	(d/r_0)

ตารางที่ 2.11 ค่าตัวแปรต่างๆ มีผลต่อแรงดันเบรกดาวนีย์ในฉนวนเหลวประเภทน้ำมันแร่

โลหะ	J ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	E_0 (kV/cm)	ϕ (eV)
1) เหล็กแอสแตนเลส	0.5 - 1.0	32 ± 2	7.9
2) แพ้ดีนัม	0.01 - 0.02	31 ± 4	9.0
3) อลูมิเนียม	0.8 - 1.5	28 ± 3	6.0

2.7.6 พื้นที่ผิวของอิเล็กโทรด

จากการศึกษาและวิเคราะห์ผลของพื้นที่ผิวของอิเล็กโทรดต่อค่าแรงดันเบรกดาวนีย์ในของเหลว n-hexane โดย Sharbaugh ได้ข้อสรุปว่า ถ้าพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าจะลดลง และเมื่อพื้นที่ผิวของอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นประมาณ 50% ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าจะลดลงประมาณ 20% ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ขณะเกิดการเบรกดาวนีย์จะเกิดประกายไฟและเกิดการสึกกร่อนมีรูพรุนที่ผิวของอิเล็กโทรด การเบรกดาวนีย์ครั้งต่อไปจะไม่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งเดิมแต่จะเกิดที่ตำแหน่งใหม่บนพื้นผิว ถ้าอิเล็กโทรดมีพื้นที่ผิวมากโอกาสที่เกิดความไม่เรียบหรือมีรูพรุนจะมีมาก ในขณะที่เดียวกันจะมีพื้นที่ผิวส่วนที่เรียบมากเช่นกัน โอกาสที่จะเกิดเบรกดาวนีย์ครั้งต่อไปได้ง่ายกว่าอิเล็กโทรดที่มีพื้นที่ผิวน้อย

2.7.7 อิเล็กโตรดโคตติง

การนำสารบางอย่างเคลือบบนผิวของอิเล็กโตรดด้านคาโธด มีผลต่อกลไกการเบรกดาวน สารเคลือบบนพื้นผิวมีพฤติกรรมเหมือนกำแพงกั้นระหว่างช่องอิเล็กโตรด สำหรับผลของแรงดันกระแสตรงต่ออิเล็กโตรดโคตติง ค่าแรงดันเบรกดาวนที่โคตติงขั้วคาโธดจะมีค่าสูงกว่าที่โคตติงด้านแอโนดและที่ไม่มีโคตติง สำหรับผลของแรงดันแบบพัลส์ แรงดันเบรกดาวนที่โคตติงขั้วแอโนดอย่างชัดเจน แต่จะน้อยกว่าที่ไม่มีโคตติง การโคตติงจะทำให้แรงดันเบรกดาวนสูงขึ้นในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ การโคตติงด้านแอโนดหรือคาโธดด้านใดด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้านมีแรงดันเบรกดาวนใกล้เคียงกัน และสามารถคำนวณหาแรงดันเบรกดาวน U_b ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$E_b = \frac{U_b}{\left[d_0 + \frac{\epsilon_0 d_p}{\epsilon_p} \right]} \quad (2.39)$$

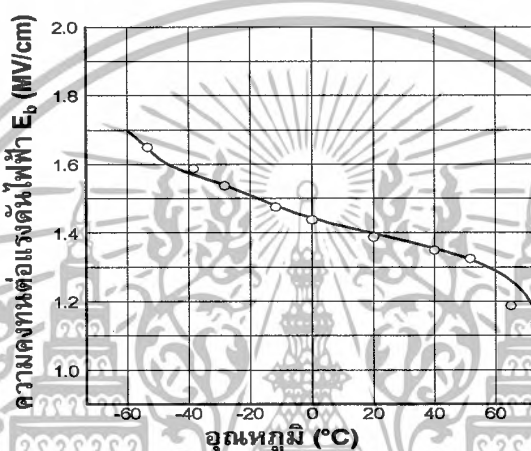
โดยที่ E_b = ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในน้ำมัน
 ϵ_0, ϵ_p = ค่าเปอร์มิตติวิตีของน้ำมันและฉนวนที่มาก็อตติง
 d_0, d_p = ความหนาของน้ำมันและฉนวนที่มาก็อตติง

2.7.8 อุณหภูมิ

คุณสมบัติของพาราเมเตอร์หลายตัวที่มีผลกระทบต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เช่น ความหนืด, ความตึงผิว และความหนาแน่น ทำให้กระบวนการเกิดฟองก๊าซและลักษณะการเคลื่อนที่ของน้ำมันหม้อแปลงเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิด้วย เช่นเดียวกับประมาณความชื้นที่สภาวะอิ่มตัวซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิและมีผลกระทบโดยตรงต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมินั้น โดยทั่วไปจะมีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วง 20 – 100 ppm เนื่องจากต้องพิจารณาถึงเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สถานะอยู่ตัวของความชื้นกับน้ำมันหม้อแปลงด้วย ในการศึกษาเราจึงควบคุมปริมาณความชื้นให้ใกล้เคียงกันในการทดลองแต่ละครั้ง และการทดลองผลกระทบของอุณหภูมิจะรอให้อุณหภูมิหนึ่งก่อนจะเริ่มทำการทดลอง

ความเครียดทางไฟฟ้าของฉนวนเหลวประเภทไฮโดรคาร์บอนจะความสัมพันธ์กับอุณหภูมิทั้งที่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรงและเป็นลูกคลื่น การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเบรกดาวนรอบๆ อุณหภูมิห้องมีน้อยมากและอย่างช้าๆ และจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่ออุณหภูมิมีค่าต่ำหรือสูงมากๆ มีการดูดกลืนพลังงานจากคาโธด การเปลี่ยนแปลงอธิบายโดยใช้สมการของช็อดกีหรือสมการการปลดปล่อยแบบความร้อน จะเห็นได้ว่ากระแสเริ่มต้นจะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และถ้ากระแสเริ่มต้นไหลมีมาก การแตกตัวของอิเล็กตรอนในโมเลกุล

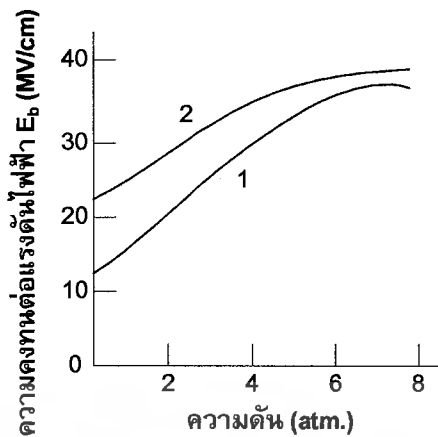
เพิ่มขึ้นเป็นสาเหตุของการเบรกดาวน เนื่องจาก การเบรกดาวนแต่ละครั้งขึ้นอยู่กับจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออน จะมีค่าแน่นอนในการทำให้เกิดเบรกดาวน ดังนั้นที่อุณหภูมิใกล้เคียงกัน กระแสเริ่มต้นไม่แตกต่างกันมาก เป็นผลให้ที่บริเวณอุณหภูมิใกล้เคียงกันมีแรงดันเบรกดาวนแตกต่างกันน้อย นอกจากนี้ อุณหภูมิยังทำให้ความหนาแน่นและความหนืดลดลง และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นยังทำให้เกิดการสันตะเหือน มีพลังงานสะสมในไซโฟนระของโมเลกุลในฉนวน เหลวตามหลังสมดุลพลังงานของ Von Hippel และมีผลสรุปว่าแรงดันเบรกดาวนจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังรูปที่ 2.24 แสดงถึงความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากับอุณหภูมิของ n-hexane โดย K.C. Kao และ Higham



รูปที่ 2.24 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของอุณหภูมิในเอกเซน

2.7.9 ความดัน

เมื่อเพิ่มความดันเข้าไปในภาชนะทดสอบ ทำให้ค่าความหนาแน่นของฉนวนเหลวเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าแรงดันเบรกดาวนจะเปลี่ยนแปลงมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการทดลองและการเกิดฟองก๊าซในฉนวนเหลว จำนวนก๊าซที่ถูกอิเล็กโตรดดูดกลืนหรือสถานะความเสถียรภาพของฉนวนเหลวที่มีก๊าซผสมอยู่จะมีผลให้แรงดันเบรกดาวนจากการทดสอบ ความดันเพิ่มขึ้น 1 เท่า ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นประมาณ 6.14% ถ้าความดันเพิ่มขึ้นมากกว่า 3 เท่า ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของความดันในน้ำมันหม้อแปลงทำมาจากปิโตรเลียม เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลข้างต้น ผลจะไม่ตรงกัน คือความดันในรูปที่ 2.25 เพิ่มขึ้น 3 เท่า ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าจะไม่คงที่ แต่จะเริ่มคงที่เมื่อความดันเพิ่มขึ้น 6 เท่า



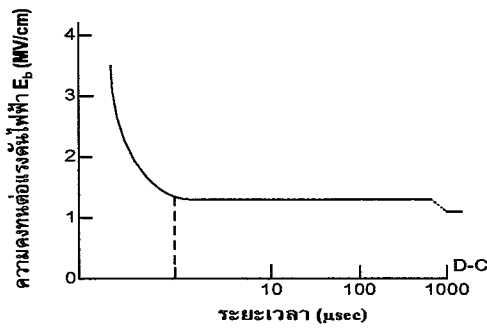
รูปที่ 2.25 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของความดันในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า

2.7.10 จำนวนอะตอมของคาร์บอน

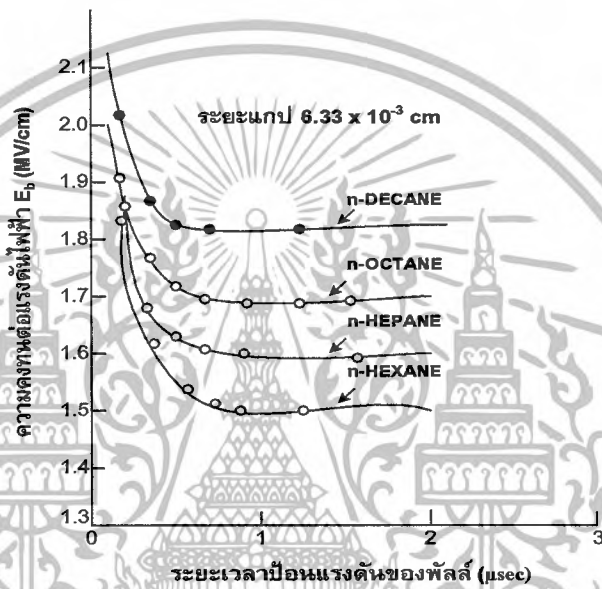
จากการศึกษาด้วยเรเซอร์สีทับทิม (Ruby Laser) พบว่าโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนเหลว แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ฉนวนเกิดเบรกทาวน์โดยการเหนี่ยวนำของเรเซอร์สีทับทิมจะลดลง เมื่อจำนวนอะตอมของคาร์บอนเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลมีคาร์บอนมากขึ้น การยึดเหนี่ยวภายในไม่แข็งแรงเหมือนโมเลกุลที่มีคาร์บอนน้อยๆ

2.7.11 ผลทางเวลา

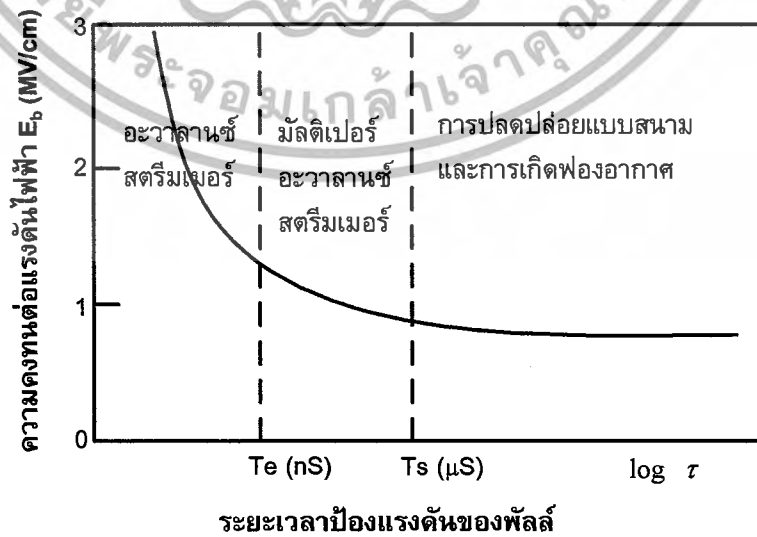
ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวเป็นฟังก์ชันของความยาวของพัลส์ (pulse length) ที่ป้อนและระยะเวลาในการป้อน (pulse duration) ถ้าพัลส์เป็นรูปฉาก (rectangular pulse) มีความยาวของพัลส์น้อยกว่าระยะเวลาป้อนพัลส์วิกฤติ (critical time, t_c) แล้วค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวจะมีค่ามากขึ้นเมื่อความยาวของพัลส์ลดลง ถ้าความยาวของพัลส์มากกว่า t_c แล้วค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวมีค่าเท่าเดิมและจะลดลงเมื่อความยาวของพัลส์มากกว่า $1,000 \mu\text{sec}$ ดังรูปที่ 2.26 และค่า t_c เพิ่มขึ้นเมื่อระยะแกปเพิ่มขึ้น เช่น $t_c = 1 \mu\text{sec}$ สำหรับที่ระยะแกป $50 \mu\text{m}$ และค่านี้ไม่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโมเลกุลดังรูปที่ 2.27 ผลของระยะเวลาในการป้อนต่อค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 2.28 เราแบ่งกราฟออกเป็น 3 ช่วง คือ $0 - T_e$ เป็นช่วงเวลาที่สั้นมากในระดับ $n\text{sec}$ มีการเกิดอะวาลานซ์สตรีมเมอร์ (multiple avalanche streamer region) ช่วงนี้ความแตกต่างของ E_b มีมาก ถ้าระยะเวลาที่ใช้ป้อนลดลง ช่วง $T_e - T_s$ ช่วงนี้มากกว่าช่วงแรก มีการเกิดมัลติเปิลอะวาลานซ์สตรีมเมอร์ (multiple avalanche streamer region) ในช่วงหลัง T_s ไปแล้วระยะเวลาในการป้อนจะไม่มีผลต่อค่า E_b เรียกช่วงนี้ว่าช่วงปลดปล่อยและการเกิดฟองอากาศ (field emission and bubble region)



รูปที่ 2.26 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของการบ่อนความยาวพัลส์



รูปที่ 2.27 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของระยะเวลาบ่อนแรงดันของพัลส์ในไฮโดรเจนเหลว



รูปที่ 2.28 ผลของระยะเวลาในการบ่อนต่อค่าความคงทนแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.12 ความชื้น

ความชื้นสามารถแทรกตัวอยู่ในฉนวนเหลวได้ 3 ลักษณะคือ

- 1) **dissolved water** คือ โมเลกุลของน้ำที่แทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของฉนวนเหลว
- 2) **condensed water** คือ โมเลกุลของน้ำที่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนอยู่ในฉนวนเหลว
- 3) **bound water** คือ โมเลกุลของน้ำที่ยึดเหนี่ยวอยู่กับโมเลกุลของฉนวนเหลว

ความชื้นมักจะละลายในฉนวนเหลว โดยอยู่ในรูปของ **dissolved water** จนถึงสภาวะอิ่มตัว ซึ่งเป็นสภาวะที่มีปริมาณความชื้นมากที่สุดที่สามารถอยู่ในรูปของ **dissolved water** ได้ และมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง ปริมาณความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงที่เกิดจากสภาวะอิ่มตัวจะอยู่ในรูปของ **condensed water** ส่วน **bound water** เกิดจากการกลั่นที่ไม่ดีพอ หรือการเกิดปฏิกิริยาเมื่อน้ำมันหม้อแปลงมีการเสื่อมสภาพ ในน้ำมันหม้อแปลงสามารถคำนวณค่าความสามารถในการละลายได้สูงสุดของความชื้นได้จากความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ดังสมการ

$$\log W = 7.0895 - \frac{1567}{T} \quad (2.40)$$

โดยที่ W = ความสามารถในการละลายได้สูงสุดของความชื้น (ppm)
 T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ ($^{\circ}K$)

จากสมการที่ (2.40) สามารถคำนวณหาความสามารถในการละลายได้สูงสุดของความชื้นในอุณหภูมิ $30^{\circ}C$ ได้เท่ากับ $82.77 ppm$

ปริมาณความชื้นหรือละอองไอน้ำที่ปะปนอยู่ในฉนวนเหลว มีผลทำให้ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าลดลง ค่าความชื้นที่มีอยู่ในฉนวนเหลวได้ไม่เกิน $35 ppm$ จากการศึกษาค่าความชื้นที่มีต่อแรงดันเบรกดาวนในน้ำมันพืช ปรากฏว่าที่ระดับความชื้น $35 ppm$ ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าระดับน้ำอยู่ในขอบเขตที่ใช้งานได้ สำหรับค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีหยดน้ำปะปนอยู่ในฉนวนเหลว สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

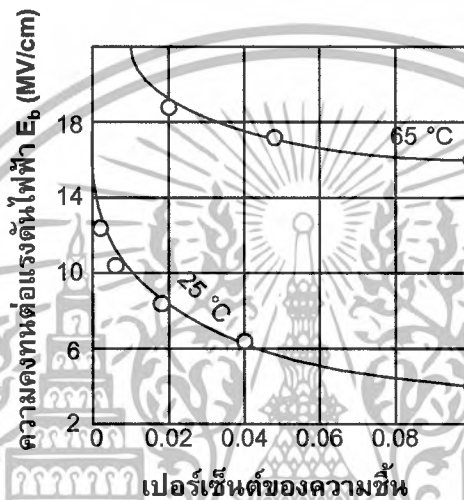
$$E_{CR} = 487.7(S/R\epsilon_1)^{1/2} \quad (2.41)$$

โดยที่ S = ความตึงผิวของหยดน้ำ
 ϵ_1 = ค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวนเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าของ E_{CR} ขึ้นอยู่กับรัศมีของหยดน้ำ ถ้ารัศมีมากหรือหยดน้ำมีขนาดใหญ่ ค่า E_{CR} จะลดลง จากรูปที่ 2.29 แสดงค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมปริมาณความชื้นปะปนของน้ำมันหม้อแปลงที่ทำมาจากน้ำมันปิโตรเลียม

ความชื้นที่เจือปนอยู่ในฉนวนแห้งจะทำให้ฉนวนมีคุณสมบัติสูงขึ้นเนื่องจากการสูญเสียไดอิเล็กตริกที่เพิ่มขึ้น ทำให้ฉนวนแห้งเกิดการเสื่อมสภาพ ถ้าเป็นหยดน้ำที่อยู่ในน้ำมันหม้อแปลงหยดน้ำจะยึดออกตามแนวสนามไฟฟ้าทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น เมื่อถึงค่าวิกฤติจะเกิดเบรกดาวน โดยแนวการเบรกดาวนจะเริ่มที่ปลายของหยดน้ำไปสู่อิเล็กโตรด

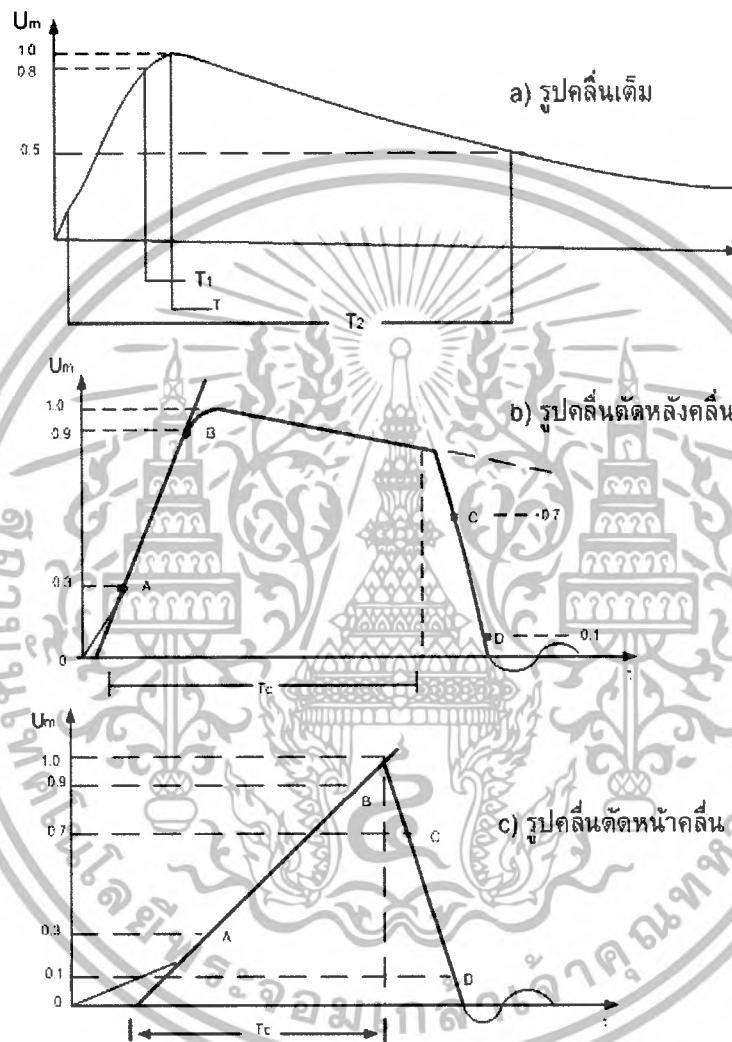


รูปที่ 2.29 ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมปริมาณความชื้นปะปนของน้ำมันหม้อแปลง

2.8 ทฤษฎีและหลักการสร้างแรงดันอิมพัลส์

2.8.1 หลักการทั่วไป

แรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันทรานเซียนต์ที่มีแรงดันเพิ่มขึ้นตามเวลาอย่างรวดเร็ว โดยอาจมีลักษณะเป็นรูปคลื่นเต็มหรือรูปคลื่นตัด คุณลักษณะต่างๆ ของแรงดันอิมพัลส์ ถูกกำหนดโดยมาตรฐาน IEC 60-1 ดังแสดงในรูปที่ 2.30 ซึ่งมีการกำหนดค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.30 รูปคลื่นอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 60-1

- ขั้วของแรงดัน หมายถึง ชนิดของแรงดันเป็นขั้วบวกหรือขั้วลบ
- ขนาดแรงดัน U_m หมายถึง ค่าแรงดันสูงสุดของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์
- เวลาหน้าคลื่น T_1 หมายถึง ช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มต้นดังแสดงในรูปที่ 2.30 a) โดยมีค่าเป็น 1.67 เท่าของช่วงเวลาที่แรงดันมีค่า 30% ไปถึง 90%
- เวลาหางคลื่น T_2 หมายถึง ช่วงเวลาตั้งแต่จุดเริ่มต้นเสมือนของรูปคลื่นผ่าน ค่ายอดของแรงดัน จนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.30 a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ช่วงเวลาคลื่นตัด T_c หมายถึง ช่วงเวลาตั้งแต่จุดเริ่มต้นเสมือนจนกระทั่งถึงจุดที่รูปคลื่นตัดลง ดังรูปที่ 2.30 b)

สำหรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ตามมาตรฐาน IEC 60-1 กำหนดไว้ดังนี้

เวลาหน้าคลื่น (T_1)	$1.2 \mu s \pm 0.36 \mu s$
เวลาหางคลื่น (T_2)	$50 \mu s \pm 10 \mu s$

2.8.2 การวัดแรงดันอิมพัลส์

หลักการวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยแก๊ปทรงกลมก็มีหลักปฏิบัติเช่นเดียวกับการวัดแรงดันกระแสสลับ และแรงดันกระแสตรง กล่าวคือ ค่าแรงดันเบรกดาวนซ์ของแก๊ปทรงกลมนั้นขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างทรงกลม, เส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม และสภาวะอากาศรอบ ๆ ทรงกลม การเกิดเบรกดาวนซ์อย่างสมบูรณ์ในช่องว่างที่เป็นช่องว่างที่เป็นอากาศใช้เวลาเพียงไม่กี่ไมโครวินาที เมื่อค่ายอดแรงดันกระแสสลับถึงค่าแรงดันเบรกดาวนซ์ U_b เบรกดาวนซ์จะเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าถึงค่าหนึ่งและมีเวลาเพียงพอในการหาอิเล็กทรอนิกส์เริ่มต้นการเกิดไอออนซ์ และเวลาในการสร้างอะวาลานซ์ ดังที่ได้กล่าวถึงในบทที่แล้ว ซึ่งเวลาดังกล่าวเป็นเชิงสถิติ คือ ใช้เวลาในการสร้างอะวาลานซ์จนเกิดเบรกดาวนซ์นี้ช้าเร็วต่างกัน เวลาที่ใช้เพื่อหาตัวอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสม ทำให้เกิดการแตกตัว อาจลดลงได้โดยการฉายรังสีอุลตราไวโอเล็ตเข้าไปในแก๊ปทรงกลม หรือใช้สารกัมมันตรังสีช่วยให้เกิดอิเล็กทรอนิกส์เริ่มต้นมีมากพอ ซึ่งจะเป็นการช่วยให้การกระจาย (dispersion) ของเวลาที่ทำให้เกิดเบรกดาวนซ์ลดลง

วิธีการวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยแก๊ปทรงกลม มีความแตกต่างที่สำคัญจากการวัดแรงดันกระแสตรงและแรงดันกระแสสลับ คือ การวัดแรงดันอิมพัลส์นั้นไม่สามารถใช้วิธีค่อยๆ เพิ่มแรงดันสูงจนกระทั่งเกิดเบรกดาวนซ์ หากแต่ต้องใช้การอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุแรงสูงของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ให้ได้ แรงดันอัดประจุตามที่ต้องการก่อน แล้วจึงเก็บดิสชาร์จออกไปที่แก๊ปทรงกลม ซึ่งอาจจะเกิดเบรกดาวนซ์หรือไม่เกิดก็ได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็นและขนาดแรงดัน ถ้าแรงดันอัดประจุต่ำเกินไปจะไม่เกิดเบรกดาวนซ์ในแก๊ปทรงกลม แต่ถ้าแรงดันอัดประจุสูงมากเกินไปก็จะเกิดเบรกดาวนซ์ทุกครั้งทีดิสชาร์จออกไป ด้วยเหตุนี้เองการวัดแรงดันอิมพัลส์จึงกำหนดเป็นแรงดันเบรกดาวนซ์ 50 เปอร์เซ็นต์ $U_{50\%}$ อันหมายถึงค่ายอดแรงดันอิมพัลส์เกณฑ์กลาง ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้จำนวนครั้งที่เกิดเบรกดาวนซ์ที่แก๊ปทรงกลมเป็นครึ่งหนึ่งของจำนวนครั้งที่ดิสชาร์จออกไป เช่น ดิสชาร์จ 10 ครั้ง แล้วเกิดเบรกดาวนซ์ที่แก๊ปทรงกลม 5 ครั้ง ค่าแรงดันนั้นก็คือ $U_{50\%}$ แต่การที่จะอัดประจุให้ได้แรงดันอัดประจุพอดีที่จะทำได้ค่าแรงดันเบรกดาวนซ์ 50 เปอร์เซ็นต์พอดีนั้นทำได้ยากและเสียเวลา โดยทั่วไปจึงวัดค่าแรงดัน $U_{50\%}$ ด้วยวิธีที่นิยม มีด้วยกัน 2 วิธี คือ วิธีเส้นกราฟแรงดันหลายระดับ และวิธีปรับขึ้นลง

บทที่ 3

การออกแบบและประกอบสร้างชุดทดสอบน้ำมัน

ในการออกแบบสร้างชุดทดสอบ จะแบ่งออกเป็น 3 กรณี คือ

1) ชุดทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

โดยชุดทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าจะออกแบบให้สอดคล้องตามที่มาตรฐาน IEC156

2) ชุดทดสอบค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก

โดยจะใช้ชุดทดสอบ Electric Insulation Material C & tan δ Meter DAC-IM-D6 ซึ่งมีอยู่ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3) ชุดทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าแบบอิมพัลส์

โดยจะใช้ชุดอุปกรณ์การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าแบบอิมพัลส์ ซึ่งมีอยู่ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยสอดคล้องกับมาตรฐาน ASTM D3300-00

3.1 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์

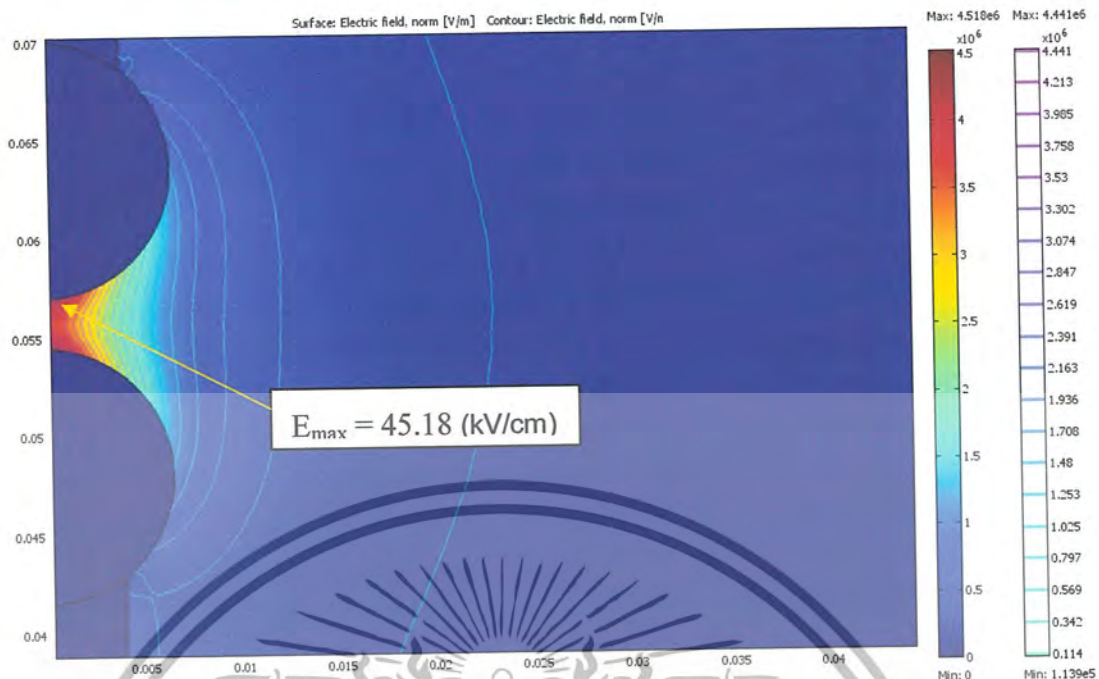
3.1.1 การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธ์ที่ใช้หัวอิเล็กโตรดแบบ sphere-sphere



ϵ_r = relative permittivity σ = Conductivity

รูปที่ 3.1 วัสดุและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ทดสอบสนามไฟฟ้าที่ใช้อิเล็กโตรดแบบ sphere-sphere

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



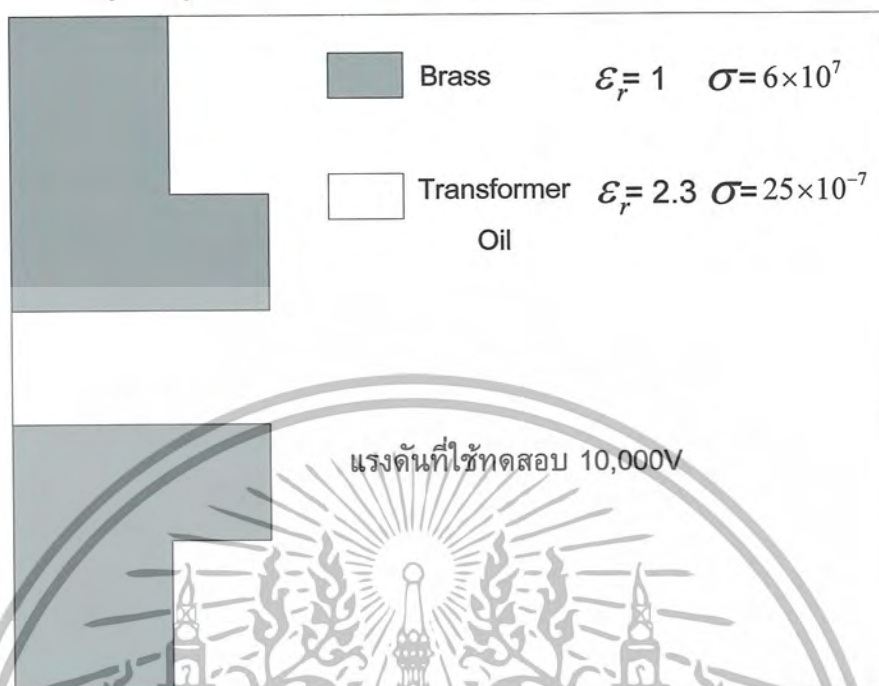
รูปที่ 3.2 สนามไฟฟ้าที่ใช้อิเล็กโตรดแบบ sphere-sphere ในน้ำมันหม้อแปลงแบบมีระยะแคบ 2.5 mm.



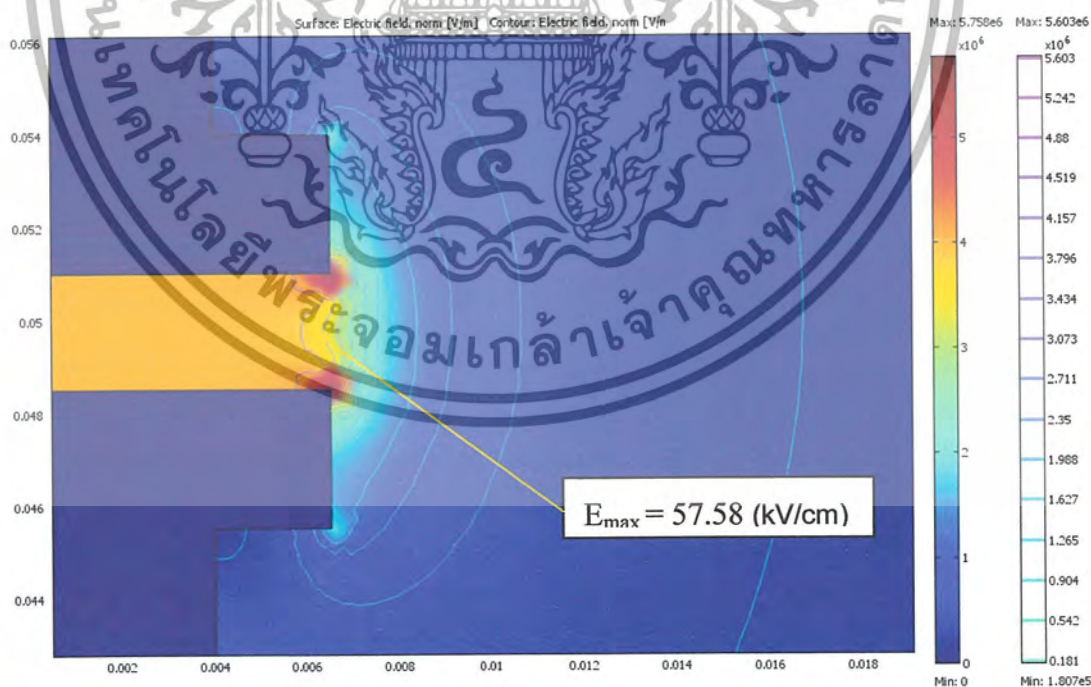
รูปที่ 3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดแบบ sphere-sphere

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์ที่ใช้หัวอิเล็กโทรดแบบ plate-plate

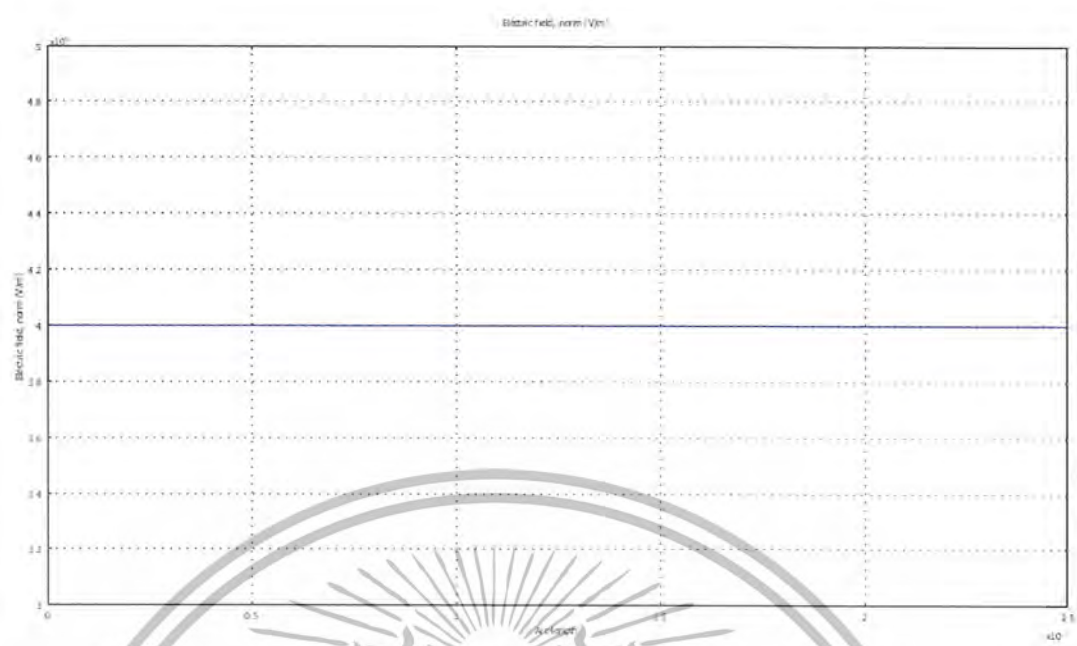


รูปที่ 3.4 วัสดุและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ทดสอบสนามไฟฟ้าที่ใช้อิเล็กโทรดแบบ plate-plate



รูปที่ 3.5 สนามไฟฟ้าที่ใช้อิเล็กโทรดแบบ plate-plate ในน้ำมันหม้อแปลงแบบมีระยะแกป 2.5 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดแบบ plate-plate

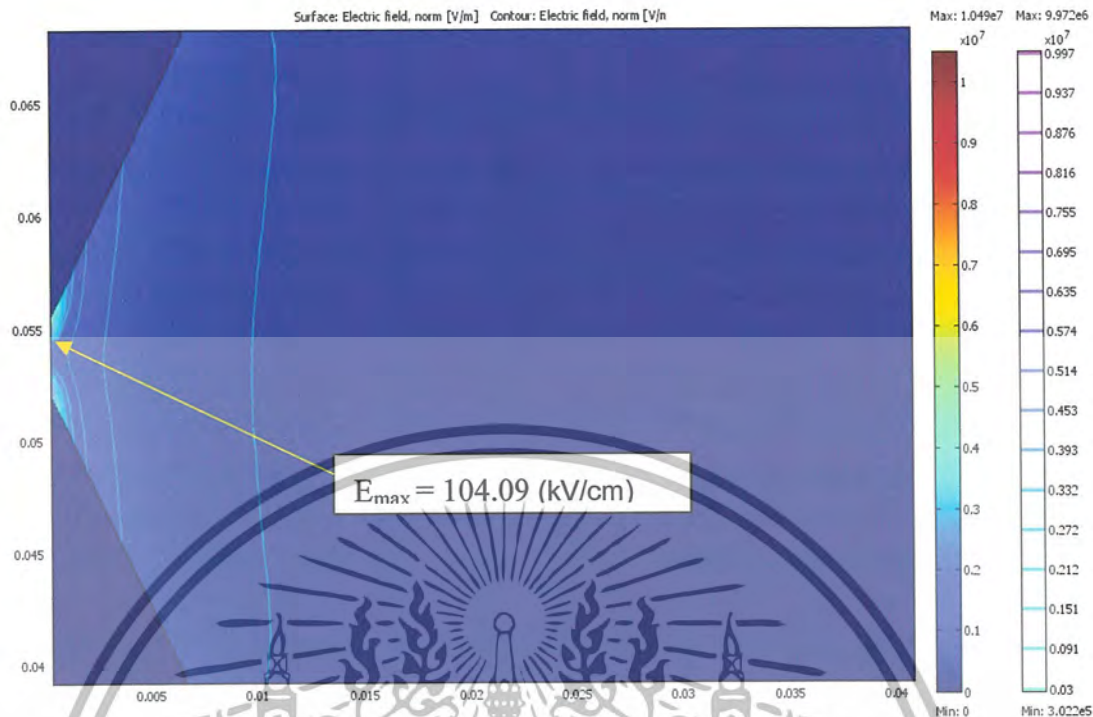
3.1.3 การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันหม้อแปลงบริษัทที่ใช้หัว

อิเล็กโทรดแบบ rod-rod

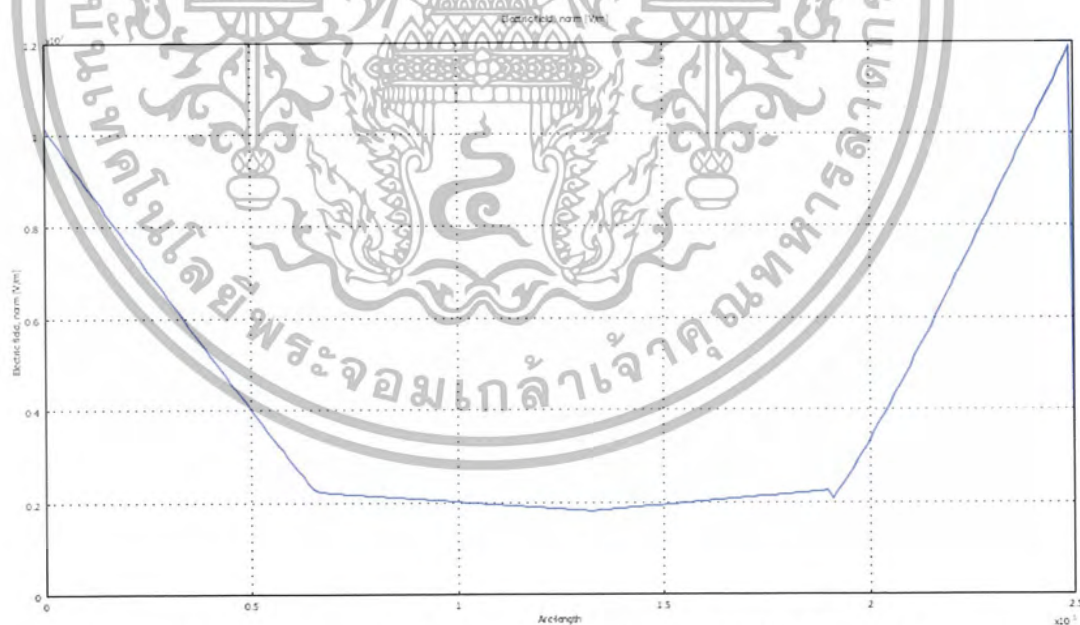


รูปที่ 3.7 วัสดุและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ทดสอบสนามไฟฟ้าที่ใช้ อิเล็กโทรดแบบ rod-rod

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



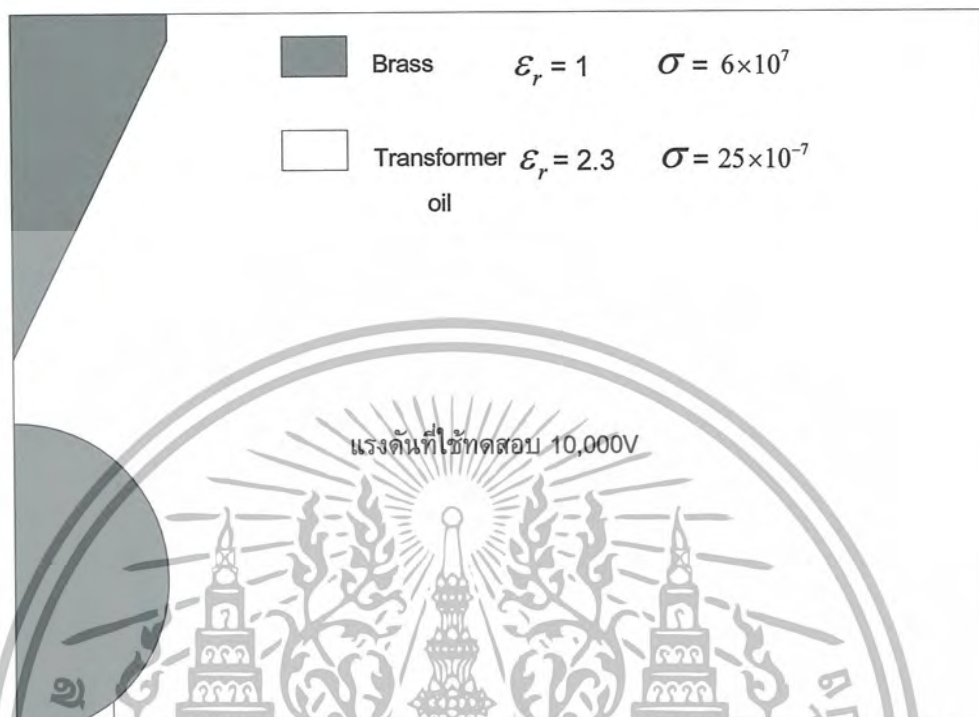
รูปที่ 3.8 สนามไฟฟ้าที่ใช้อิเล็กโตรดแบบ rod-rod ในน้ำมันหม้อแปลงแบบมีระยะแคบ 2.5 mm



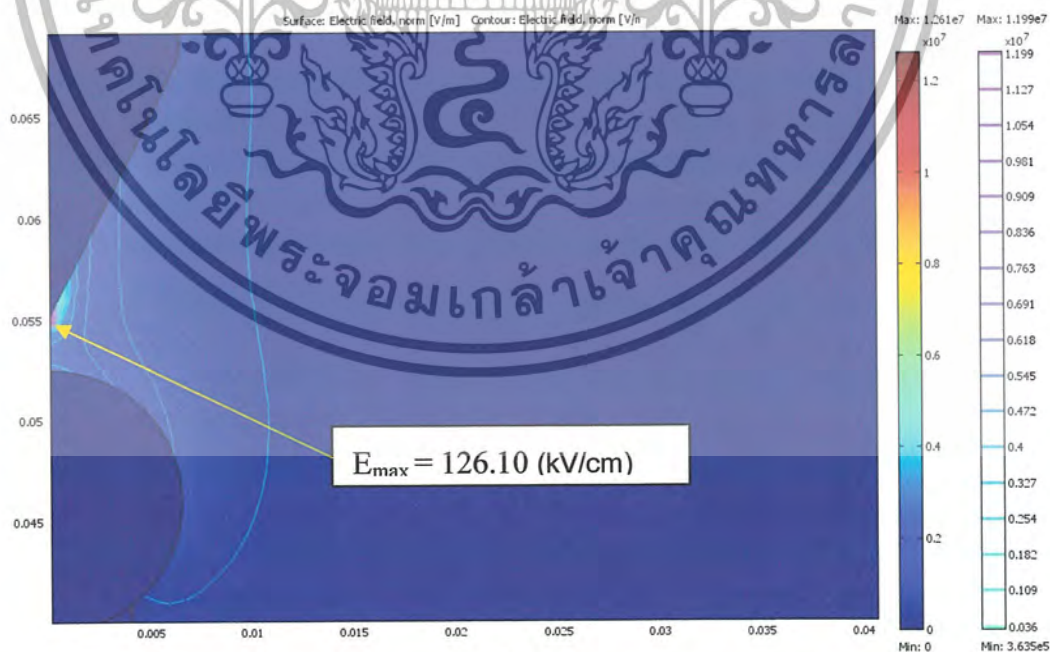
รูปที่ 3.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดแบบ rod-rod

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์ที่ใช้หัวอิเล็กโทรดแบบ rod-sphere

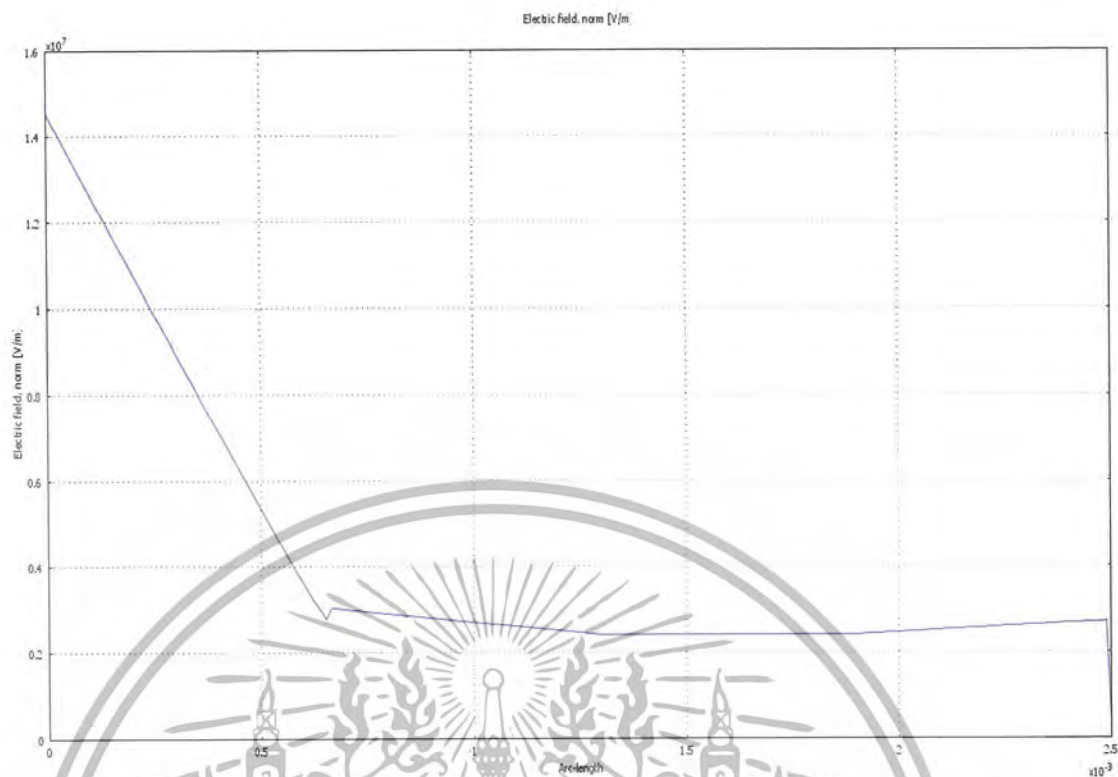


รูปที่ 3.10 วัสดุและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ทดสอบสนามไฟฟ้าที่ใช้อิเล็กโทรดแบบ rod-sphere



รูปที่ 3.11 สนามไฟฟ้าที่ใช้อิเล็กโทรดแบบ rod-sphere ในน้ำมันหม้อแปลงแบบมีระยะแกป 2.5 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

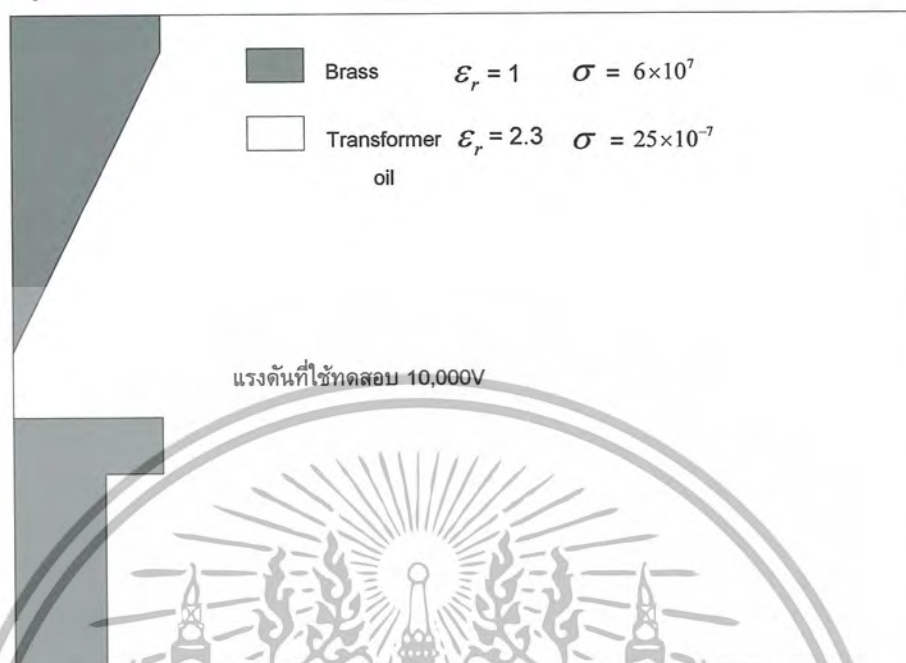


รูปที่ 3.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดแบบ rod-sphere

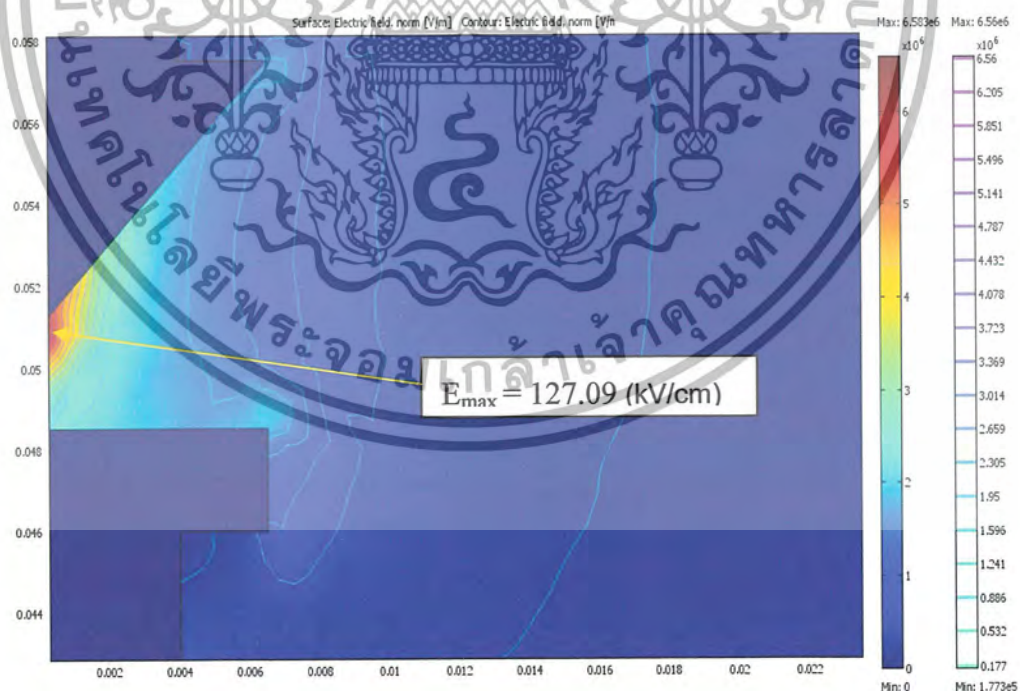
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 การจำลองหาสนามไฟฟ้าในน้ำมันหม้อแปลงบรสิทุธิ์ที่ใช้หัวอิเล็กโทรด

แบบ rod-plate

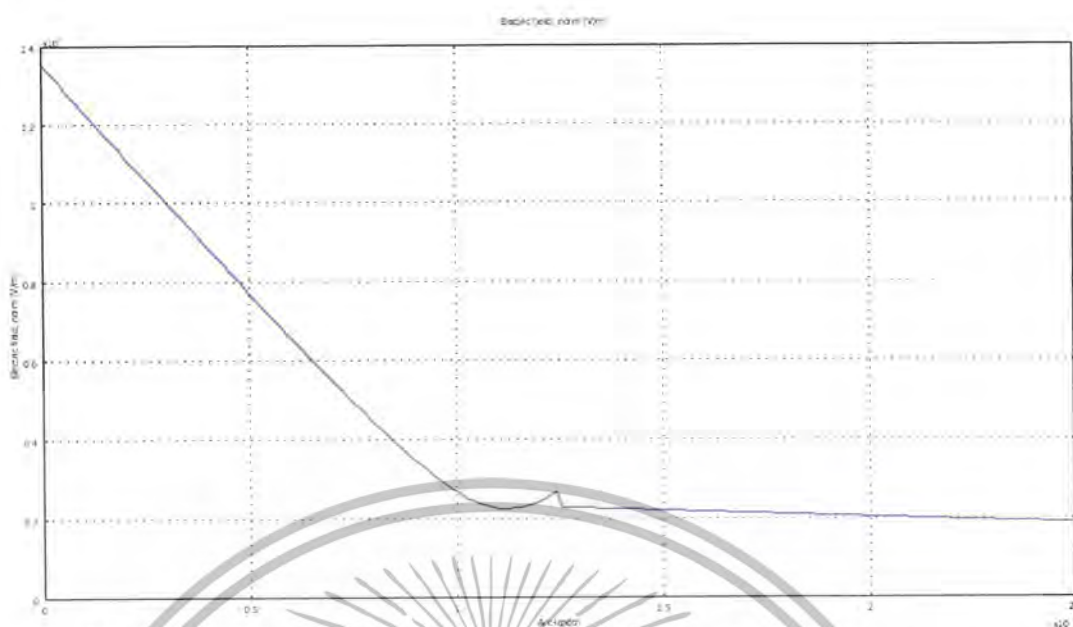


รูปที่ 3.13 วัสดุและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ทดสอบสนามไฟฟ้าที่ใช้
อิเล็กโทรดแบบ rod-plate



รูปที่ 3.14 สนามไฟฟ้าที่ใช้อิเล็กโทรดแบบ rod-plate
ในน้ำมันหม้อแปลงแบบมีระยะแกบ 2.5 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดแบบ rod-plate

ตารางที่ 3.1 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดและลักษณะสนามไฟฟ้ากับรูปแบบอิเล็กโทรด

Electrodes	ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด (kV/cm)	ลักษณะสนามไฟฟ้าระหว่างช่องว่างอิเล็กโทรด
sphere - sphere	45.18	ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย
plate - plate	57.58	สม่ำเสมอ
rod - rod	104.9	ไม่สม่ำเสมอสูง
rod-sphere	126.1	ไม่สม่ำเสมอสูง
rod - plate	127.29	ไม่สม่ำเสมอสูง

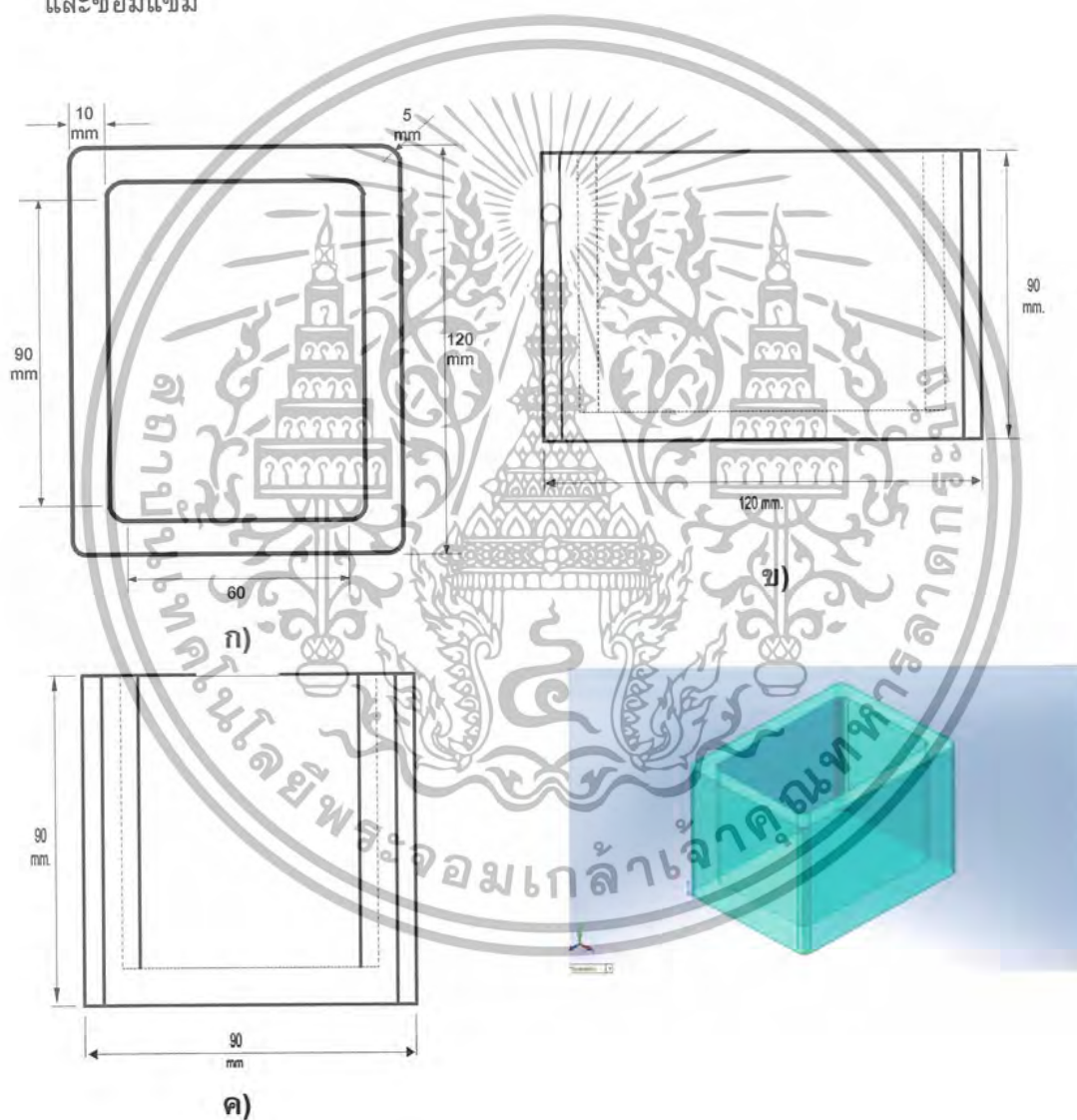
จากค่าในตาราง จะเห็นว่า อิเล็กโทรดแบบ plate-plate มีค่าสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ แต่เนื่องจากการทดสอบ จะกระทำตามมาตรฐาน IEC 156 ซึ่งแนะนำให้ใช้อิเล็กโทรดแบบ sphere-sphere ซึ่งมีลักษณะความเครียดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย แต่มีค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดต่ำที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 42.22 kV/cm ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.2 และ 3.5

3.2 ชุดทดสอบน้ำมันหม้อแปลง

ในการออกแบบชุดทดสอบน้ำมัน จะทำตามมาตรฐาน IEC 156 เป็นหลัก ซึ่งมี ส่วนประกอบ ดังนี้

3.2.1 กล่องบรรจุน้ำมัน

กล่องบรรจุน้ำมันต้องเป็นวัสดุที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้า โปร่งแสงและไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมี ทนต่อน้ำมันที่จะนำมาทดสอบ และทนต่อน้ำยาที่ล้าง กล่องทดสอบต้องเป็นภาชนะปิด และต้องถูกออกแบบให้ชุดอิเล็กทรอนิกส์สามารถถอดออกได้สำหรับทำความสะอาดและซ่อมแซม



รูปที่ 3.16 แบบจำลองกล่องบรรจุน้ำมัน

ก) มุมมองด้านบน ข) มุมมองด้านหน้า ค) มุมมองด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 กล่องบรรจุน้ำมัน

3.2.2 อีเล็กโตรด

โลหะที่ถูกนำมาใช้งานทั่วไปในปัจจุบัน ส่วนใหญ่จะเป็นโลหะที่มีโลหะอื่นผสมอยู่ด้วย เพราะว่าโลหะบริสุทธิ์อาจมีสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางกลอยู่ในระดับหนึ่ง เช่น ทองแดงมีสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดีมาก แต่สมบัติทางกลอาจไม่ดี เป็นต้น ซึ่งถ้ามีการผสมโลหะอื่นๆ เข้าไปก็จะมีคุณสมบัติบางประการดีขึ้น ซึ่งโครงการงานวิศวกรรมนี้ได้ใช้อีเล็กโตรดที่ทำมาจากทองเหลือง ผิวของหัวอีเล็กโตรดควรเรียบ ไม่ขรุขระและสะอาด เพื่อให้สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีลักษณะเกือบสม่ำเสมอ



รูปที่ 3.18 แบบจำลองหัวอีเล็กโตรด



รูปที่ 3.19 หัวอีเล็กโตรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 แกนตัวนำไฟฟ้าทางด้านกราวด์

ทำจากทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm. ยาว 20 cm. ไว้เพื่อทำการต่อสายตัวนำกับกราวด์ พร้อมกับตัวปรับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด

3.2.4 ฉนวนไฟฟ้าแรงสูงด้านต่อกราวด์

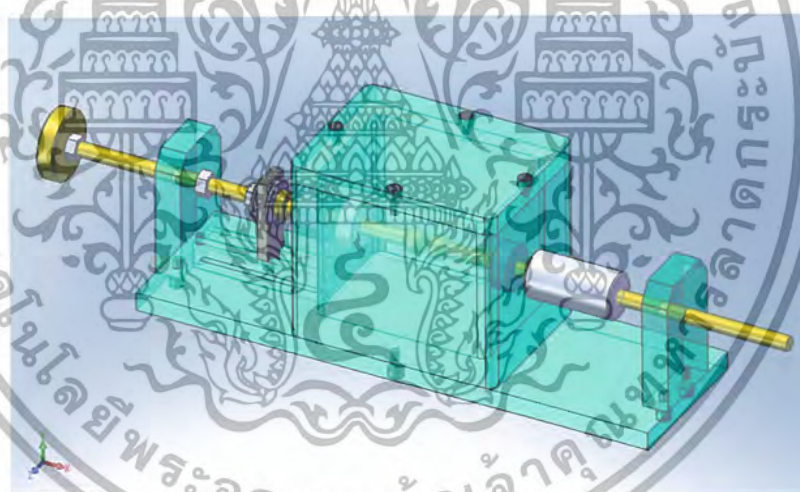
ทำจากซูปเปอร์สีนชนิดพิเศษทนแรงดันสูงอยู่ติดกับแกนตัวนำไฟฟ้าทางด้านกราวด์

3.2.5 ตัวยึดหัวอิเล็กโทรด

วัสดุที่ใช้ทำตัวยึดหัวอิเล็กโทรดคือ ซูปเปอร์สีนชนิดพิเศษซึ่งสามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้สูง ตัวยึดหัวอิเล็กโทรดจะถูกติดตั้งอยู่กับแกนตัวนำไฟฟ้าทางด้านแรงสูง

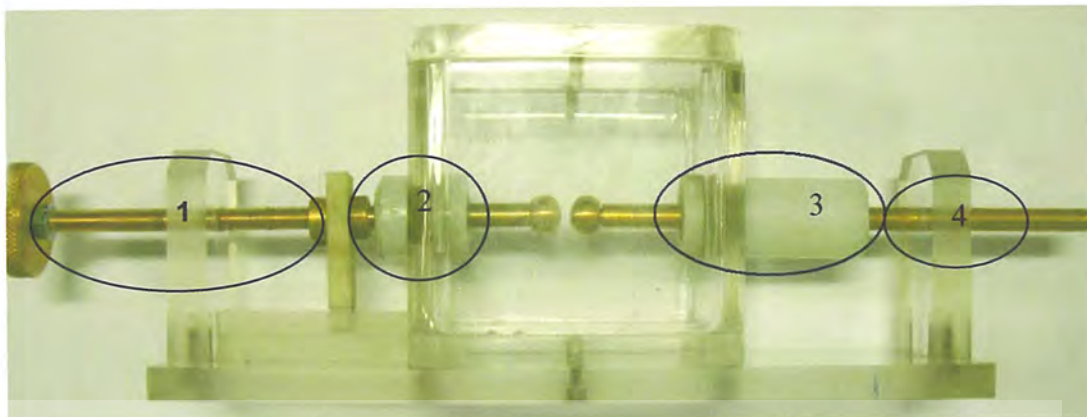
3.2.6 แกนตัวนำไฟฟ้าทางด้านไฟฟ้าแรงสูง

ทำจากทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm. ยาว 20 cm. ไว้เพื่อทำการต่อกับสายตัวนำไฟฟ้าแรงสูง



รูปที่ 3.20 แบบจำลองชุดทดสอบน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 แสดงส่วนต่างๆ ของชุดทดสอบน้ำมัน

1. แกนตัวนำไฟฟ้าทางด้านกราวด์ 2. ฉนวนไฟฟ้าแรงสูงด้านต่อกราวด์
3. ตัวยึดหัวอิเล็กโตรด 4. แกนตัวนำไฟฟ้าทางด้านแรงสูง

3.3 น้ำมันที่ใช้ในการทดสอบ

น้ำมันที่จะนำมาใช้ในการทดสอบจะต้องเป็นน้ำมันพืชที่หาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาด ติดไฟได้ยาก ซึ่งจากการสำรวจก็ได้ชนิดน้ำมันที่จะนำมาทดสอบ ดังนี้



รูปที่ 3.22 น้ำมันพืชที่ใช้ทดสอบ

- (1) น้ำมันปาล์ม (2) น้ำมันรำข้าว (3) น้ำมันถั่วเหลือง
- (4) น้ำมันข้าวโพด (5) น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การเตรียมน้ำมัน

สำหรับการเตรียมน้ำมันเพื่อนำมาทดสอบนั้น จะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

- 1) น้ำมันใหม่
- 2) น้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้ว

โดยในส่วนของน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้ว จะมีการเตรียมโดยนำน้ำมันไปผ่านการทอด ซึ่งจะแบ่งเป็น 4 ชนิด คือน้ำมันที่ผ่านการทอด 10, 20, 30 และ 40 ครั้ง ซึ่งในการทอดแต่ละครั้ง จะใช้ปริมาณข้าวเกรียบในการทอดเท่ากัน และใช้น้ำมันปริมาตร 1.5 ลิตร เท่ากันในทุกครั้ง และเมื่อทำการทอดครบจำนวนครั้งที่กำหนดแล้ว จะพักน้ำมันไว้ จากนั้นรอจนกว่าน้ำมันจะหายร้อน จึงทำการเก็บน้ำมัน โดยใส่ไว้ในกระบอกพลาสติกที่สามารถป้องกันความชื้นจากภายนอกเข้าสู่ภายในได้ พร้อมทั้งใส่พลาสติกซีลด์



รูปที่ 3.23 การเตรียมน้ำมัน

3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

3.5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

- 1) เครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับ พิกัด 100 kV 50 mA
 - พิกัดกำลัง: 5 kVA
 - อินพุต แรงดัน: Max. 300 V 50 Hz
 - เอาท์พุท แรงดัน: 100 kV 1 PE
 - กระแส: 50 mA
 - ความถี่: 50 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

2) ชุดทดสอบน้ำมัน

เป็นชุดทดสอบน้ำมันตามมาตรฐาน IEC 156 สามารถปรับระยะห่างของหัวอิเล็กโทรดได้



รูปที่ 3.25 ชุดทดสอบน้ำมัน

3) โวลเตจดีไวเดอร์ พิกัด 100kV

- พิกัดแรงดัน: A.C./D.C./Impulse 100kV.
- อัตราส่วน: A.C. 980:1/D.C. 985:1/Impulse 993:1
- ค่าตัวเก็บประจุแรงสูง: 110 pF
- ค่าตัวเก็บประจุแรงต่ำ: 110 nF
- ค่าความต้านทานแรงสูง: 250 M Ω
- ค่าความต้านทานแรงต่ำ: 250 Ω
- ความถี่: 50 Hz บรรจุแก๊ส SF₆

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.26 โวลต์เตจดีไวเดอร์

4) ตัวต้านทานน้ำ

ตัวต้านทาน มีหน้าที่ป้องกันหม้อแปลงเนื่องจาก ในการทดลองทุกครั้งจะเกิดการเบรกดาวระหว่างหัวอิเล็กโตรดในชุดทดสอบเบรกดาวทำให้เกิดการลัดวงจร (Short Circuit) ซึ่งทำให้หม้อแปลงได้รับกระแสสูง ดังนั้นจึงใส่ตัวต้านทานน้ำเป็นตัวลดกระแสเพื่อป้องกันหม้อแปลงเกิดการเสียหาย

รูปที่ 3.27 ตัวต้านทานน้ำ

3.5.2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาค่าแพกเตอร์กำลังสูญเสียไดโอดีลิก

1) Temperature Adjust

แรงดันป้อนเข้า:	220 V
กำลังไฟฟ้าสูงสุด:	1500 W
ความถี่:	50/60 Hz

2) C and Tan δ Meter

ข้อมูล

แรงดันป้อนเข้า:	100 – 240 VAC \pm 10%
ความถี่ :	50/60 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Measurement Voltage

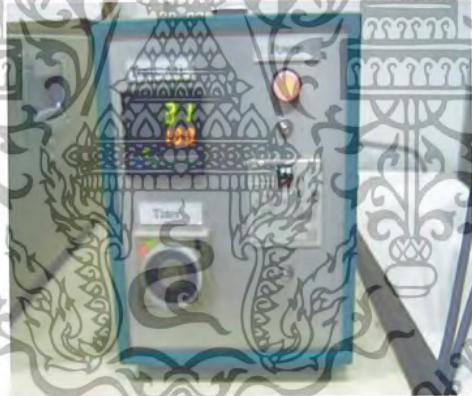
-Measuring Voltage:	0 – 2000V, 50/60 Hz
-Capacitance:	20 – 1000 pF
-Tan δ :	0 – 50 %
-Relative Permittivity:	0.02 – 50.0

Minimum Resolution

-Measuring Voltage:	1 V
-Capacitance:	0.1 pF
-tan δ :	0.0001% (1 ppm)
- Relative Permittivity:	0.01

Measuring Accuracy

-Measuring Voltage:	$\pm 3\%$
-Capacitance:	$\pm (0.5\% \text{ of reading} + 2 \text{ digits})$
-Tan δ :	$\pm (0.001\% + 1\% \text{ of reading} + 2 \text{ digits})$
-Relative Permittivity:	$\pm (1\% \text{ of reading} + 2 \text{ digits})$



รูปที่ 3.28 เครื่อง Temperature Adjust

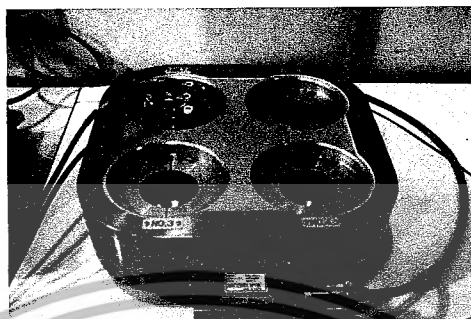


รูปที่ 3.29 Capacitance and Tan δ Meter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

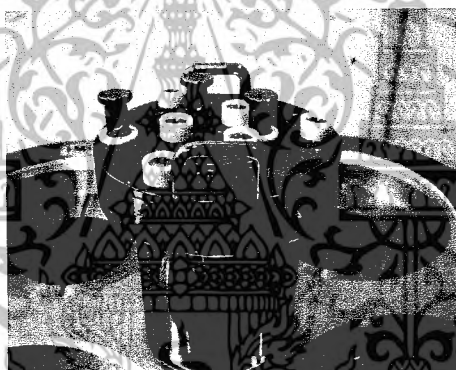
3) Test Cell

แรงดันป้อนเข้า: 220 V
กำลังไฟฟ้าสูงสุด: 1500 W



รูปที่ 3.30 Test Cell

4) Liquid Electrode



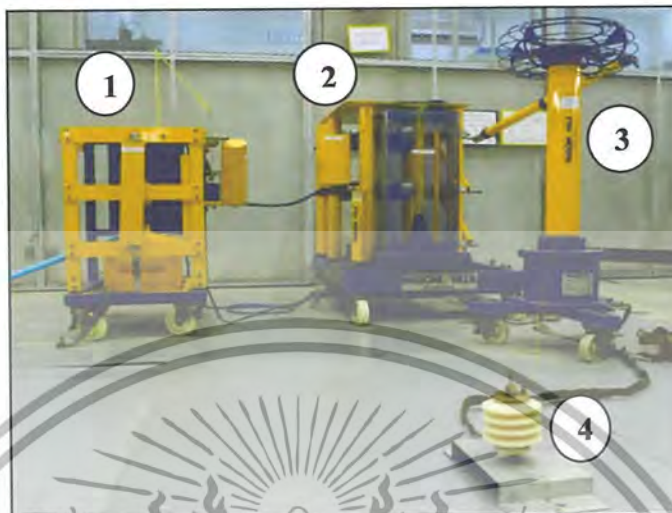
รูปที่ 3.31 Liquid Electrode

ตารางที่ 3.2 ข้อมูล Liquid Electrode

Surface Area of Electrode	100 cm ²
Constant of Electrode	996
Capacitance	88.1pF
Voltage Withstand	1500/1min. GOOD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าแบบอิมพัลส์



รูปที่ 3.32 วงจรการทดสอบความคงทนต่อแรงดัน IMPULSE

1. ชุดอัดประจุ 2. ชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ พิกัด 200 kV
3. โวลเตจดีไวเดอร์ 4. Test Cell

1) ชุดอัดประจุ

Direct Current Generator

Type 6 DC -100

Rated Voltage 100 kV

Supply Voltage 220 kV

Maximum current 0.02 A

Middle Current 0.01 A

2) Impulse Generator

Test set 200 kV, 7 kJ

3) Capacitor Voltage divider

Scale factor 26530

-Rated Capacitance : 4200 pF

-Rated Voltage L.I. : 200 kV

-Rated Voltage to 50 Hz : 50 kV

-Connector type : LEMO RA 4250

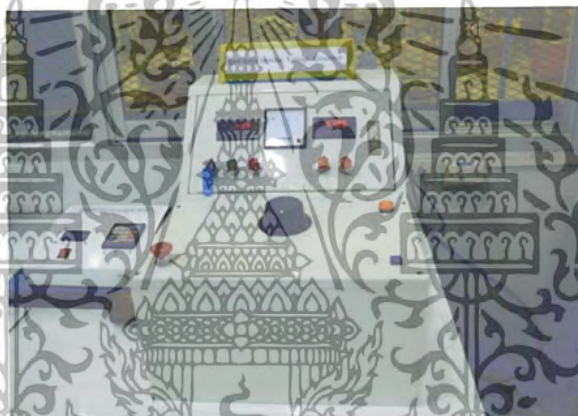
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ชุดบรรจุน้ำมัน (Test cell)



รูปที่ 3.33 Test Cell

5) ชุดควบคุม Impulse Voltage Generator



รูปที่ 3.34 ชุดควบคุม Impulse Voltage Generator

6) Tektronix DPO 4054 Digital Phosphor Oscilloscope



รูปที่ 3.35 Tektronix DPO 4054 Digital Phosphor Oscilloscope

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบและประเมินผล

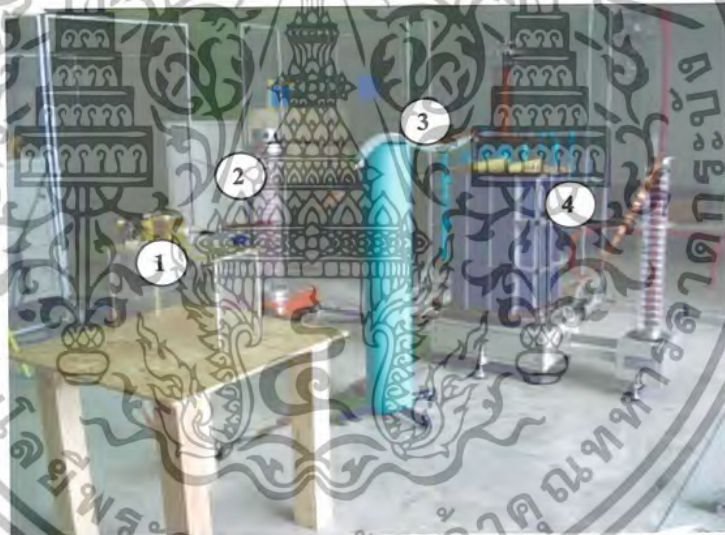
ในส่วนของการทดสอบหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนน้ำมัน ในกรณีนี้ศึกษา
นี้จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

- 1) การทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า
- 2) การทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก
- 3) การทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์

ซึ่งรายละเอียดการทดสอบทั้ง 3 ส่วนนี้ จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

4.1 การทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

4.1.1 การต่อวงจรที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 4.1 วงจรการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

1. ชุดทดสอบน้ำมัน 2. โวลเตจดีไวเดอร์ 3. ตัวต้านทานจำกัดกระแส
4. แหล่งกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับ 100 kV

4.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ทำการต่อวงจรทดสอบตามรูปที่ 4.1
- 2) นำน้ำมันที่จะทดสอบเทลงในชุดทดสอบน้ำมัน โดยให้น้ำมันอยู่ในระดับที่ห่างจากขอบบนของชุดทดสอบน้ำมัน 0.8-1.0 cm.

3) ตรวจสอบน้ำมันที่ถูกเทลงในชุดทดสอบน้ำมันว่ามีฟองอากาศอยู่หรือไม่ ถ้ามีฟองอากาศก็ควรใช้แท่งคนแล้วค่อยๆ คนจนไม่มีฟองอากาศเหลืออยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) เมื่อน้ำมันไม่มีฟองอากาศแล้ว ก็นำเอาชุดทดสอบน้ำมันที่บรรจุน้ำมันแล้วไปต่อเข้ากับวงจรทดสอบ
- 5) จดบันทึกค่าอุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันบรรยากาศ
- 6) จากนั้นเริ่มขึ้นแรงดัน โดยค่อยๆ ขึ้นแรงดันและควรรู้ให้ได้อัตราที่คงที่ โดยให้อยู่ในระดับที่ 2 kV/s ขึ้นไปเรื่อยๆ จนกระทั่งน้ำมันเกิดการเบรกดาวน
- 7) บันทึกค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากมิเตอร์วัดแรงดัน
- 8) เมื่อน้ำมันที่ใช้ทดสอบเกิดการเบรกดาวนแล้ว ให้ตั้งพักระยะเวลาไว้ 2 นาที ระหว่างนั้นก็ทำการคบน้ำมันที่ใช้ทดสอบ เพื่อไม่ให้เขม่าติดที่หัวอิเล็กโตรด
- 9) เมื่อครบ 2 นาทีแล้ว ก็เริ่มทำการขึ้นแรงดันต่อ ตามขั้นตอนที่ 6-8 ไปเรื่อยๆ จนครบ 6 ครั้ง

4.1.3 ผลการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันแต่ละชนิด

1) น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน

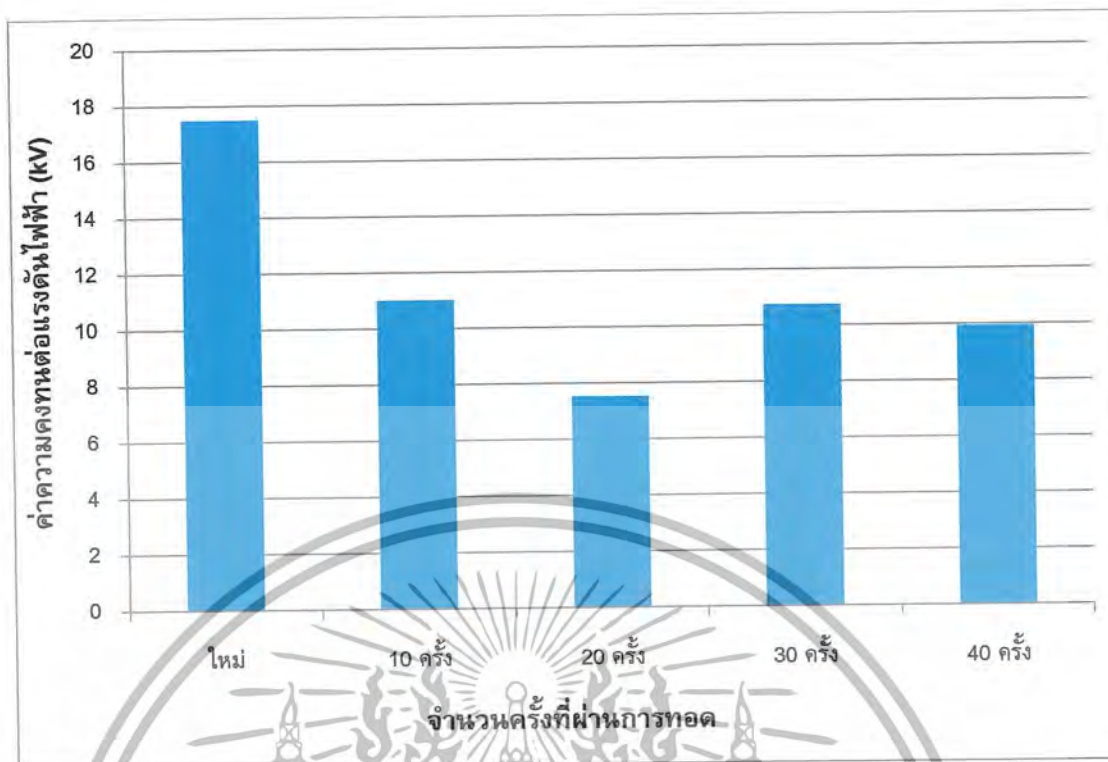
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงผลการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน

ครั้งที่	จำนวนครั้งที่ผ่านการทดสอบ				
	ใหม่	10 ครั้ง	20 ครั้ง	30 ครั้ง	40 ครั้ง
1	39.27	10.33	11.41	10.13	9.19
2	53.82	14.72	13.02	11.70	10.18
3	47.75	13.75	9.86	9.07	10.33
4	44.83	13.50	13.44	11.06	10.29
5	47.78	14.55	14.07	9.82	10.72
6	56.67	12.58	13.70	9.38	9.29
Average	48.353	13.240	12.583	10.195	10.001
SD *	6.242	1.622	1.624	1.009	0.617
CV *	0.129	0.122	0.129	0.099	0.062

หมายเหตุ SD* = Standard Deviation

CV* = Coefficient of Variation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



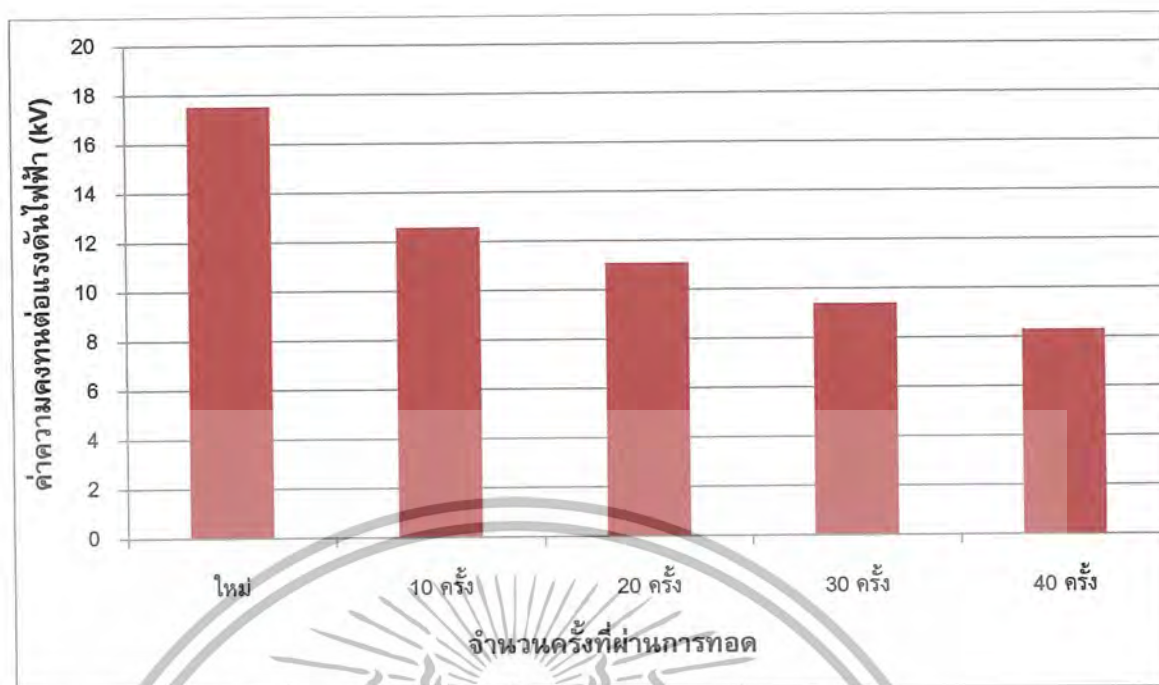
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากับจำนวนครั้งที่ผ่านการทอดของน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน

2) น้ำมันรำข้าว

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงผลการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันรำข้าว

ครั้งที่	จำนวนครั้งที่ผ่านการทอด				
	ใหม่	10 ครั้ง	20 ครั้ง	30 ครั้ง	40 ครั้ง
1	14.72	13.38	10.08	8.67	7.88
2	19.84	12.95	12.43	9.01	6.30
3	16.85	12.70	10.59	10.32	6.87
4	16.58	12.77	10.20	10.31	8.69
5	16.29	11.46	11.75	8.98	10.01
6	20.89	12.23	11.45	9.05	10.03
Average	17.527	12.580	11.084	9.388	8.296
SD	2.343	0.664	0.938	0.729	1.566
CV	0.134	0.053	0.085	0.078	0.189

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



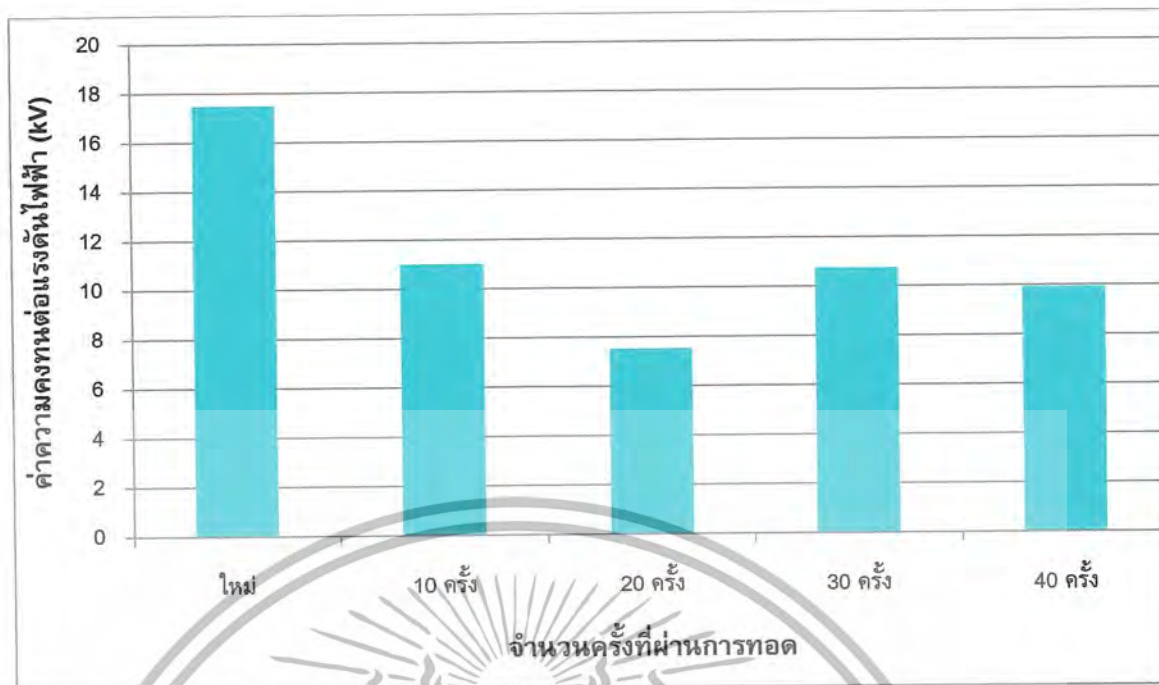
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากับจำนวนครั้งที่ผ่านการทอดของน้ำมันรำข้าว

3) น้ำมันถั่วเหลือง

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงผลการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันถั่วเหลือง

ครั้งที่	จำนวนครั้งที่ผ่านการทอด				
	ใหม่	10 ครั้ง	20 ครั้ง	30 ครั้ง	40 ครั้ง
1	16.70	11.72	7.03	10.84	10.38
2	17.28	11.59	7.37	12.46	9.43
3	17.67	9.72	6.09	10.91	9.35
4	19.33	10.43	8.06	10.70	10.42
5	16.58	11.69	8.13	10.18	10.29
6	17.37	10.95	8.49	9.37	9.75
Average	17.486	11.017	7.526	10.742	9.936
SD	0.991	0.814	0.886	1.017	0.488
CV	0.057	0.074	0.118	0.095	0.049

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



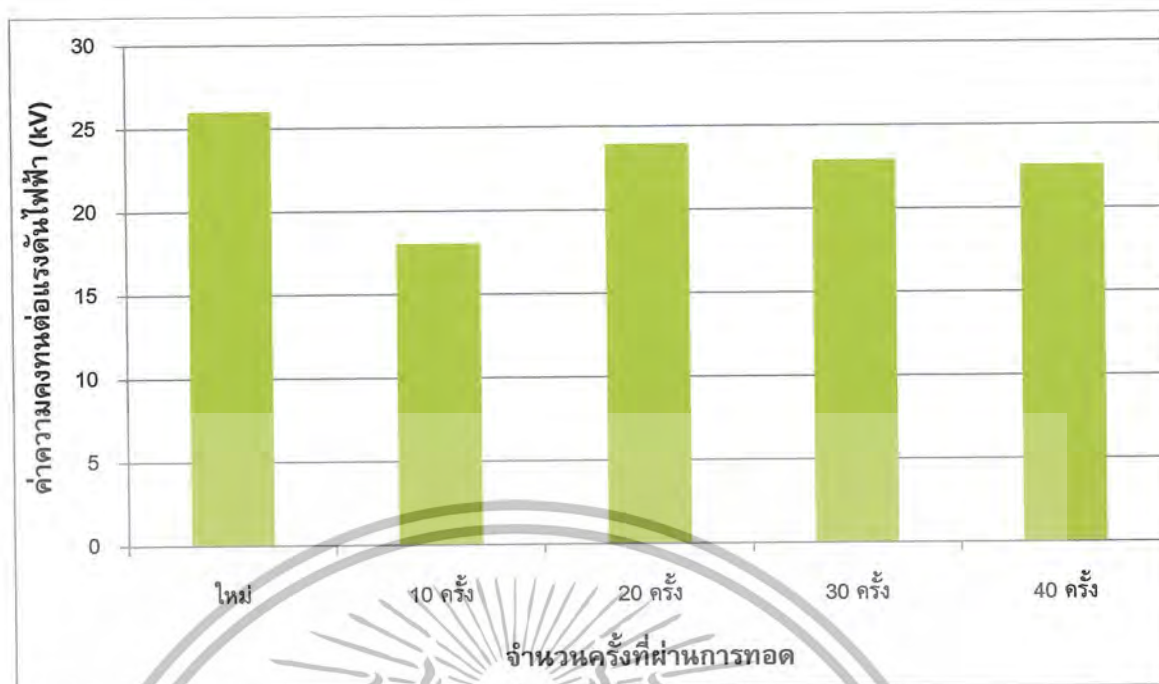
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากับจำนวนครั้งที่ผ่านการทดสอบของน้ำมันตัวเหลือง

4) น้ำมันข้าวโพด

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงผลการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันข้าวโพด

ครั้งที่	จำนวนครั้งที่ผ่านการทดสอบ				
	ใหม่	10 ครั้ง	20 ครั้ง	30 ครั้ง	40 ครั้ง
1	29.83	20.58	25.82	24.95	23.38
2	24.71	16.44	27.78	19.93	19.80
3	26.35	21.14	21.40	23.55	20.93
4	24.23	14.53	23.52	25.98	24.57
5	24.46	13.19	21.98	21.31	22.87
6	26.39	22.27	23.14	21.78	23.83
Average	26.00	18.03	23.94	22.92	22.56
SD	2.103	3.804	2.424	2.311	1.827
CV	0.081	0.211	0.101	0.101	0.081

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



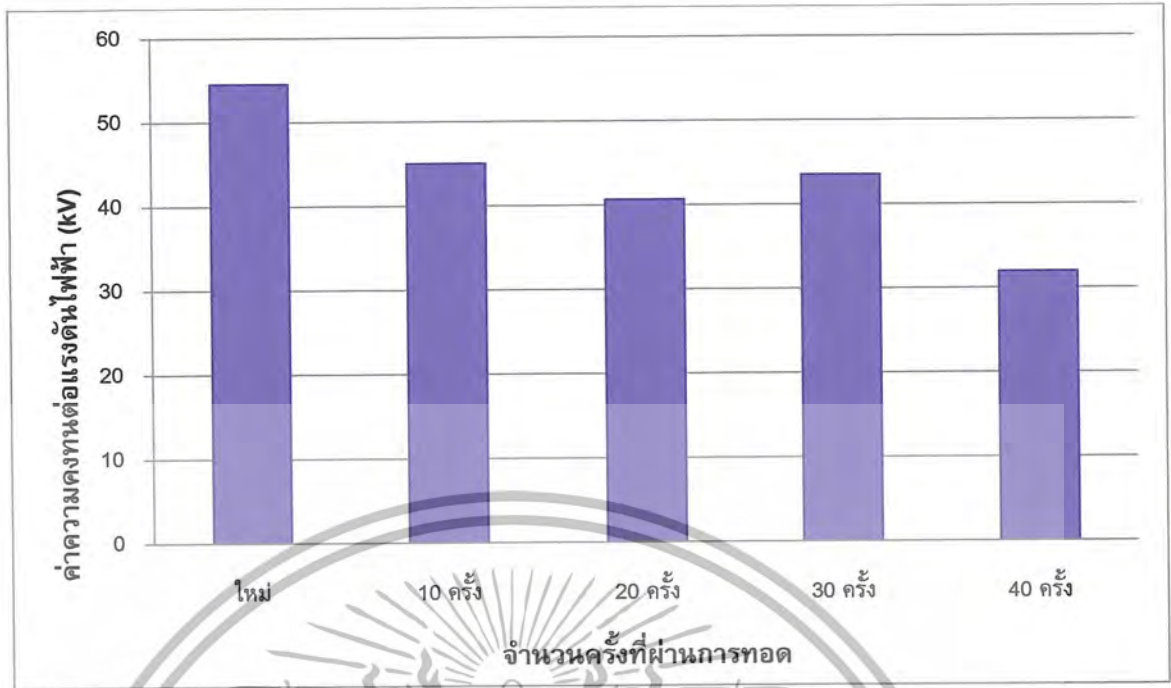
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากับจำนวนครั้งที่ผ่านการทอดของน้ำมันข้าวโพด

5) น้ำมันปาล์ม

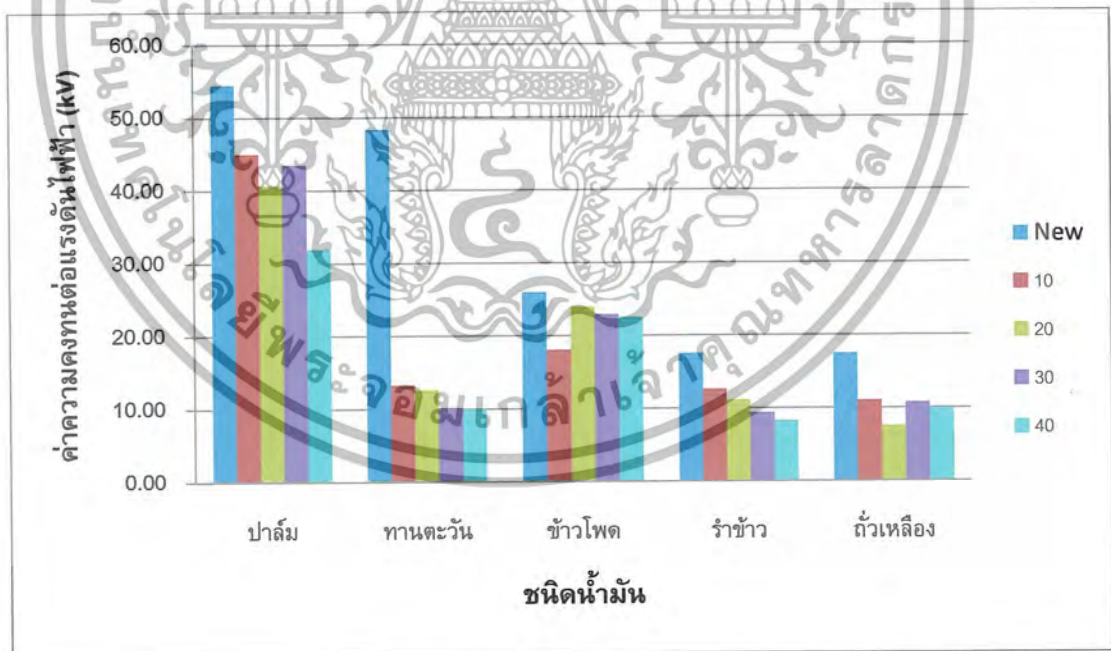
ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงผลการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันปาล์ม

ครั้งที่	จำนวนครั้งที่ผ่านการทอด				
	ใหม่	10 ครั้ง	20 ครั้ง	30 ครั้ง	40 ครั้ง
1	55.18	45.34	44.48	41.39	34.73
2	61.68	40.72	39.71	48.05	31.01
3	57.39	48.44	42.39	38.70	29.69
4	44.47	48.67	38.64	42.56	28.75
5	51.38	44.13	38.55	43.67	36.54
6	57.05	42.82	40.08	46.59	30.93
Average	54.526	45.020	40.644	43.492	31.943
SD	5.952	3.139	2.340	3.425	3.036
CV	0.109	0.070	0.058	0.079	0.095

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากับจำนวนครั้งที่ผ่านการทดสอบของน้ำมันปาล์ม

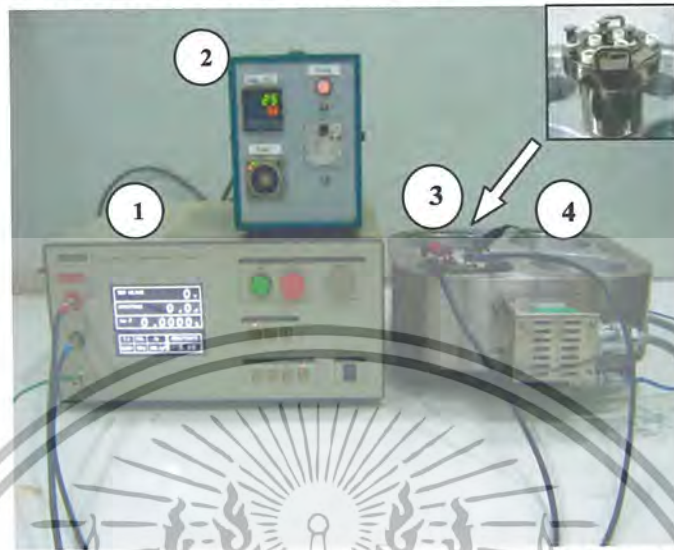


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากับชนิดน้ำมันทั้งที่ผ่านการทดสอบ 10, 20, 30, 40 ครั้ง และน้ำมันใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก

4.2.1 การต่อวงจรที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 4.8 วงจรการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก

1. C & Tan δ Meter 2. Temperature Adjust 3. Liquid Electrode 4. Test Cell

4.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ทำการต่อวงจรทดสอบตามรูปที่ 4.8
- 2) นำน้ำมันที่ต้องการทดสอบเทลงในกระบอกของ Liquid Electrode
- 3) นำ Liquid Electrode ที่บรรจุน้ำมันแล้ว ใส่ลงในช่องใดช่องหนึ่งของ Test Cell
- 4) จากนั้นเปิดเครื่อง Temperature Adjust ปรับอุณหภูมิที่ต้องการ ซึ่งในการทดสอบได้กำหนดให้วัดค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันที่อุณหภูมิ 30°C, 40°C, 50°C, 60°C, 70°C, 80°C, 90°C และ 100°C
- 5) เมื่อปรับอุณหภูมิตามค่าที่ต้องการแล้ว รอจนอุณหภูมิของ Test Cell ถึงค่าที่ตั้งไว้ ซึ่งสามารถดูได้จากเครื่อง Temperature Adjust จากนั้นก็ทำการจดบันทึกค่า Tan δ , ค่าความจุไฟฟ้าและค่าเปอร์มิตติวิตี
- 6) หลังจากจดบันทึกค่า Tan δ , ค่าความจุไฟฟ้า และค่าเปอร์มิตติวิตี ณ อุณหภูมิที่ต้องการ แล้วก็ปรับเพิ่มอุณหภูมิไปยังค่าใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก

4.2.3.1 น้ำมันใหม่

1) น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน

Temperature (°C)	Capacitance (pF)	Tan δ (%)	Permittivity
30	273.0	0.112	3.10
40	269.0	0.138	3.06
50	268.0	0.170	3.04
60	264.0	0.313	3.00
70	261.0	0.473	2.96
80	259.0	0.647	2.94
90	257.0	0.908	2.92
100	252.0	1.550	2.86

2) น้ำมันถั่วเหลือง

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันถั่วเหลือง

Temperature (°C)	Capacitance (pF)	Tan δ (%)	Permittivity
30	275.0	0.126	3.12
40	272.0	0.156	3.09
50	269.0	0.230	3.05
60	266.0	0.349	3.02
70	262.0	0.503	2.97
80	259.0	0.744	2.94
90	256.0	0.994	2.91
100	254.0	1.040	2.88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) น้ำมันปาล์ม

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันปาล์ม

Temperature (°C)	Capacitance (pF)	Tan δ (%)	Permittivity
30	275.0	0.300	3.13
40	273.0	0.393	3.10
50	272.0	0.545	3.08
60	270.0	0.958	3.06
70	268.0	1.210	3.04
80	265.0	1.760	3.00
90	264.0	2.220	2.99
100	260.0	3.300	2.95

4) น้ำมันรำข้าว

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันรำข้าว

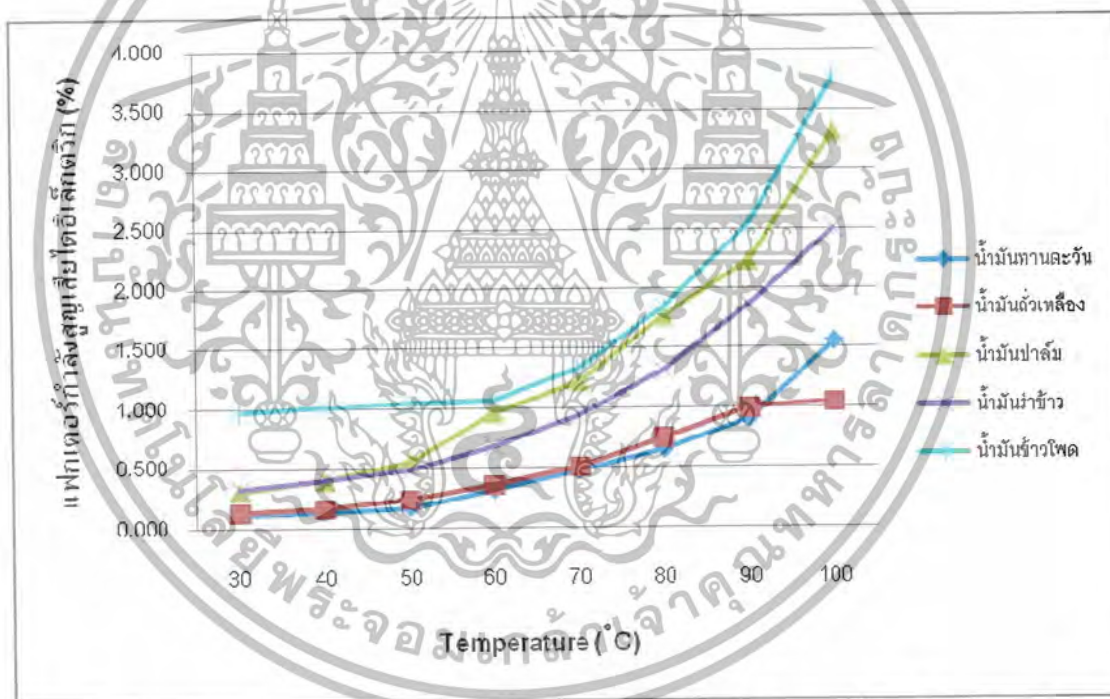
Temperature (°C)	Capacitance (pF)	Tan δ (%)	Permittivity
30	275.0	0.322	3.12
40	271.0	0.398	3.08
50	268.0	0.486	3.04
60	265.0	0.677	3.01
70	262.0	0.932	2.97
80	259.0	1.310	2.94
90	256.0	1.860	2.91
100	253.0	2.500	2.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) น้ำมันข้าวโพด

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันข้าวโพด

Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Capacitance (pF)	Tan δ (%)	Permittivity
30	275.0	0.966	3.12
40	273.0	1.010	3.10
50	270.0	1.040	3.06
60	266.0	1.060	3.02
70	262.0	1.330	2.97
80	260.0	1.840	2.95
90	256.0	2.530	2.91
100	254.0	3.750	2.88



รูปที่ 4.9 กราฟผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันใหม่แต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3.2 น้ำมันที่ผ่านการทอด 10 ครั้ง

1) น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน
ที่ผ่านการทอด 10 ครั้ง

Temperature (°C)	Capacitance (pF)	Tan δ (%)	Permittivity
30	274.0	0.101	3.11
40	272.0	0.140	3.09
50	268.0	0.166	3.04
60	266.0	0.310	3.02
70	262.0	0.481	2.97
80	259.0	0.650	2.94
90	256.0	1.008	2.91
100	254.0	1.580	2.88

2) น้ำมันถั่วเหลือง

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันถั่วเหลือง
ที่ผ่านการทอด 10 ครั้ง

Temperature (°C)	Capacitance (pF)	Tan δ (%)	Permittivity
30	276.0	0.397	3.13
40	274.0	0.540	3.11
50	271.0	0.750	3.08
60	267.0	1.060	3.03
70	264.0	1.440	3.00
80	261.0	1.930	2.96
90	259.0	2.370	2.94
100	257.0	2.930	2.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) น้ำมันปาล์ม

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันปาล์ม
ที่ผ่านการทอด 10 ครั้ง

Temperature (°C)	Capacitance (pF)	Tan δ (%)	Permittivity
30	273.0	0.350	3.10
40	272.0	0.444	3.09
50	269.0	0.638	3.05
60	265.0	0.977	3.01
70	262.0	1.340	2.97
80	259.0	1.860	2.94
90	257.0	2.450	2.92
100	254.0	3.320	2.88

4) น้ำมันรำข้าว

ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันรำข้าว
ที่ผ่านการทอด 10 ครั้ง

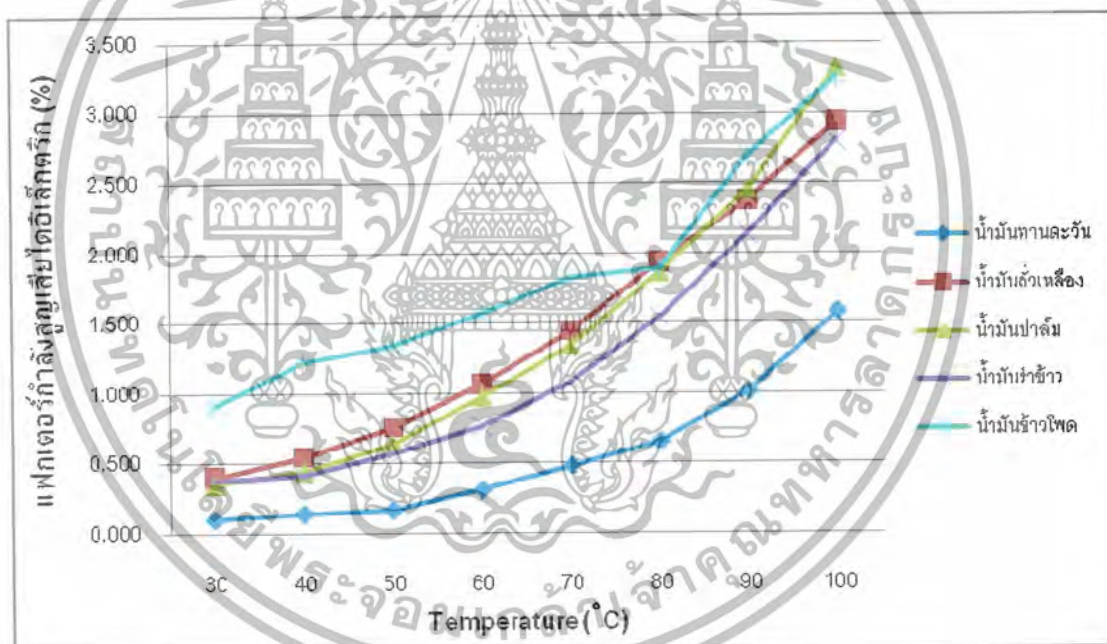
Temperature (°C)	Capacitance (pF)	Tan δ (%)	Permittivity
30	277.0	0.374	3.14
40	275.0	0.410	3.12
50	272.0	0.566	3.09
60	269.0	0.761	3.05
70	266.0	1.080	3.02
80	263.0	1.540	2.99
90	260.0	2.130	2.95
100	257.0	2.800	2.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) น้ำมันข้าวโพด

ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันข้าวโพด
ที่ผ่านการทอด 10 ครั้ง

Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Capacitance (pF)	Tan δ (%)	Permittivity
30	275.0	0.910	3.13
40	273.0	1.220	3.11
50	270.0	1.340	2.99
60	269.0	1.571	2.97
70	266.0	1.822	2.96
80	256.0	1.891	2.90
90	255.0	2.690	2.89
100	254.0	3.250	2.88



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลการทดสอบ Tan δ ของน้ำมันที่ผ่านการทอด 10 ครั้งแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3.3 น้ำมันที่ผ่านการทอด 20 ครั้ง

1) น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน

ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน ที่ผ่านการทอด 20 ครั้ง

Temperature (°C)	Capacitance (pF)	Tan δ (%)	Permittivity
30	275.0	0.260	3.12
40	273.0	0.290	3.10
50	270.0	0.302	3.06
60	266.0	0.444	3.02
70	262.0	0.502	2.97
80	259.0	0.720	2.94
90	257.0	1.202	2.92
100	255.0	1.670	2.89

2) น้ำมันถั่วเหลือง

ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันถั่วเหลือง ที่ผ่านการทอด 20 ครั้ง

Temperature (°C)	Capacitance (pF)	Tan δ (%)	Permittivity
30	276.0	0.377	3.13
40	274.0	0.481	3.11
50	270.0	0.741	3.06
60	268.0	0.911	3.04
70	265.0	1.230	3.01
80	262.0	1.710	2.97
90	259.0	2.500	2.94
100	256.0	3.060	2.91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) น้ำมันปาล์ม

ตารางที่ 4.18 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันปาล์ม
ที่ผ่านการทอด 20 ครั้ง

Temperature (°C)	Capacitance (pF)	Tan δ (%)	Permittivity
30	276.0	0.473	3.13
40	275.0	0.566	3.12
50	271.0	0.692	3.08
60	268.0	0.923	3.04
70	265.0	1.250	3.01
80	261.0	1.740	2.96
90	258.0	2.280	2.93
100	255.0	3.110	2.89

4) น้ำมันรำข้าว

ตารางที่ 4.19 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันรำข้าว
ที่ผ่านการทอด 20 ครั้ง

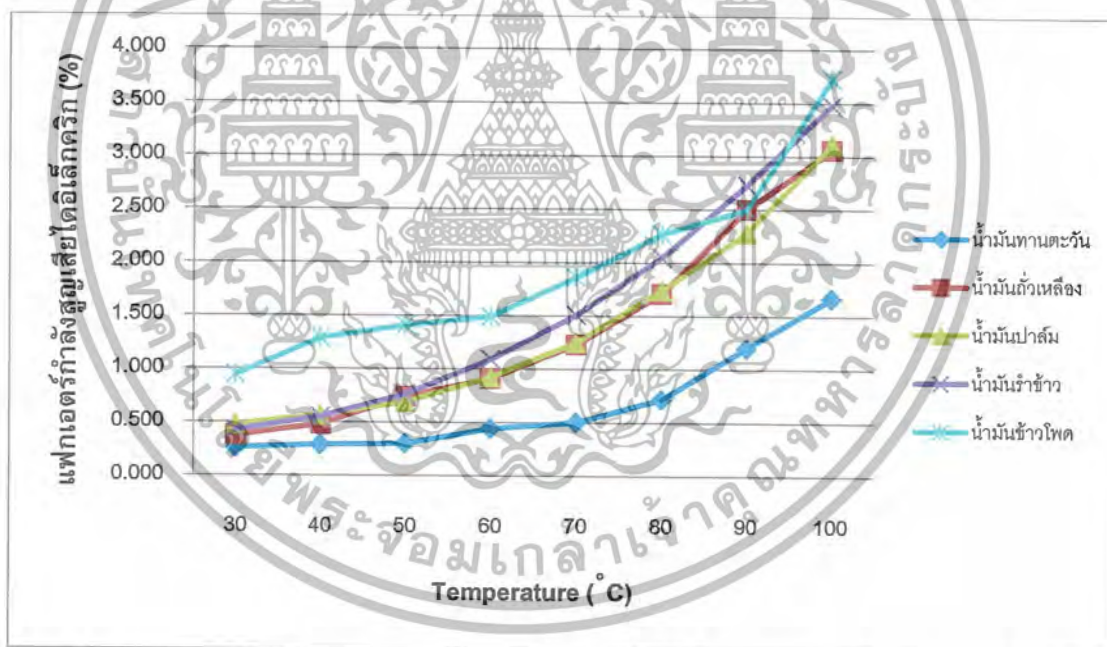
Temperature (°C)	Capacitance (pF)	Tan δ (%)	Permittivity
30	279.0	0.426	3.17
40	276.0	0.553	3.13
50	273.0	0.763	3.10
60	269.0	1.090	3.05
70	266.0	1.510	3.02
80	263.0	2.050	2.99
90	260.0	2.730	2.95
100	257.0	3.480	2.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) น้ำมันข้าวโพด

ตารางที่ 4.20 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันข้าวโพด
ที่ผ่านการทอด 20 ครั้ง

Temperature (°C)	Capacitance (pF)	Tan δ (%)	Permittivity
30	275.0	0.944	3.13
40	273.0	1.290	3.10
50	271.0	1.410	3.07
60	270.0	1.494	3.06
70	267.0	1.862	3.03
80	265.0	2.270	3.00
90	261.0	2.500	2.96
100	255.0	3.730	2.89



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผลการทดสอบ Tan δ ของน้ำมันที่ผ่านการทอด 20 ครั้งแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3.4 น้ำมันที่ผ่านการทอด 30 ครั้ง

1) น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน

ตารางที่ 4.21 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน ที่ผ่านการทอด 30 ครั้ง

Temperature (°C)	Capacitance (pF)	Tan δ (%)	Permittivity
30	276.0	0.550	3.13
40	275.0	0.405	3.12
50	271.0	0.323	3.08
60	266.0	0.442	3.02
70	264.0	0.574	3.00
80	261.0	0.770	2.96
90	259.0	1.039	2.94
100	255.0	1.460	2.89

2) น้ำมันถั่วเหลือง

ตารางที่ 4.22 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันถั่วเหลือง ที่ผ่านการทอด 30 ครั้ง

Temperature (°C)	Capacitance (pF)	Tan δ (%)	Permittivity
30	276.0	0.408	3.13
40	275.0	0.513	3.12
50	271.0	0.843	3.08
60	268.0	0.872	3.04
70	264.0	1.431	3.00
80	261.0	2.090	2.96
90	259.0	2.610	2.94
100	255.0	3.200	2.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) น้ำมันปาล์ม

ตารางที่ 4.23 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันปาล์ม
ที่ผ่านการทอด 30 ครั้ง

Temperature (°C)	Capacitance (pF)	Tan δ (%)	Permittivity
30	272.0	0.513	3.09
40	271.0	0.607	3.08
50	268.0	0.858	3.04
60	266.0	1.300	3.02
70	263.0	1.920	2.99
80	256.0	3.630	2.99
90	255.0	4.120	2.89
100	254.0	5.450	2.88

4) น้ำมันรำข้าว

ตารางที่ 4.24 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันรำข้าว
ที่ผ่านการทอด 30 ครั้ง

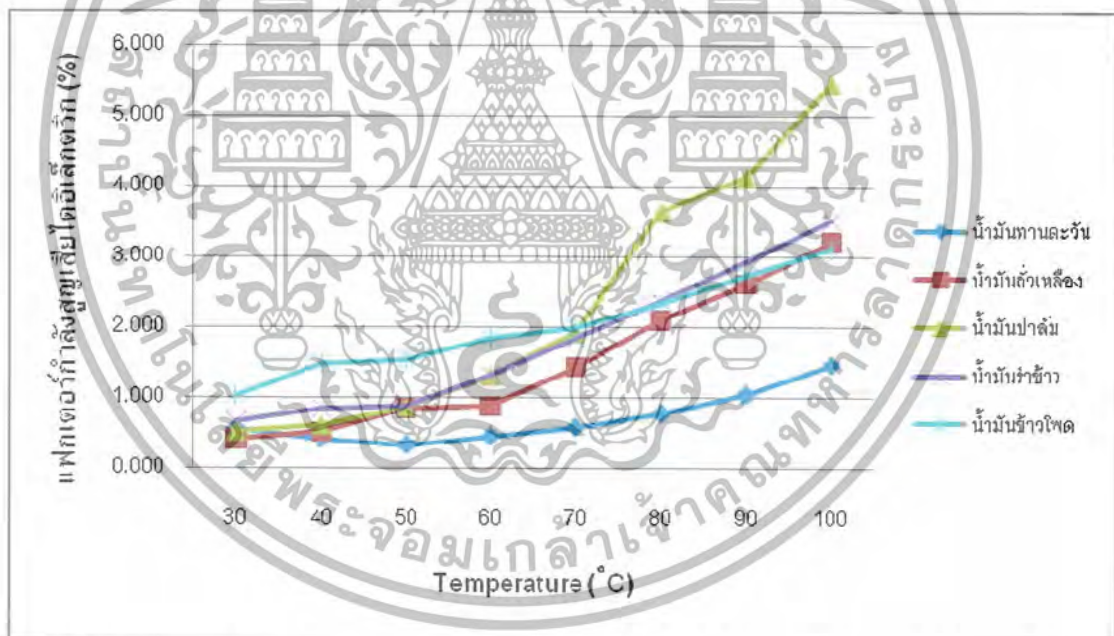
Temperature (°C)	Capacitance (pF)	Tan δ (%)	Permittivity
30	276.0	0.665	3.13
40	275.0	0.850	3.12
50	272.0	0.887	3.09
60	268.0	1.320	3.04
70	265.0	1.840	3.01
80	262.0	2.370	2.97
90	259.0	2.930	2.94
100	256.0	3.520	2.91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) น้ำมันข้าวโพด

ตารางที่ 4.25 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันข้าวโพด
ที่ผ่านการทอด 30 ครั้ง

Temperature (°C)	Capacitance (pF)	Tan δ (%)	Permittivity
30	275.0	1.020	3.12
40	271.0	1.477	3.07
50	269.0	1.538	3.05
60	266.0	1.839	3.01
70	264.0	1.992	2.99
80	261.0	2.340	2.96
90	258.0	2.740	2.92
100	256.0	3.120	2.90



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงผลการทดสอบ Tan δ ของน้ำมันที่ผ่านการทอด 30 ครั้งแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3.5 น้ำมันที่ผ่านการทอด 40 ครั้ง

1) น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน

ตารางที่ 4.26 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน ที่ผ่านการทอด 40 ครั้ง

Temperature (°C)	Capacitance (pF)	Tan δ (%)	Permittivity
30	277.0	0.187	3.14
40	274.0	0.272	3.11
50	271.0	0.376	3.08
60	268.0	0.514	3.04
70	264.0	0.855	3.00
80	261.0	1.170	2.96
90	259.0	1.550	2.94
100	256.0	1.920	2.91

2) น้ำมันถั่วเหลือง

ตารางที่ 4.27 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันถั่วเหลือง ที่ผ่านการทอด 40 ครั้ง

Temperature (°C)	Capacitance (pF)	Tan δ (%)	Permittivity
30	278.0	0.653	3.16
40	276.0	0.715	3.13
50	272.0	0.887	3.09
60	268.0	0.924	3.04
70	265.0	1.573	3.01
80	262.0	2.465	2.97
90	259.0	3.170	2.94
100	256.0	3.740	2.91

3) น้ำมันปาล์ม

ตารางที่ 4.28 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันปาล์ม
ที่ผ่านการทอด 40 ครั้ง

Temperature (°C)	Capacitance (pF)	Tan δ (%)	Permittivity
30	276.0	0.514	3.13
40	274.0	0.609	3.11
50	271.0	0.898	3.08
60	270.0	1.410	3.07
70	256.0	2.080	2.92
80	254.0	3.740	2.90
90	253.0	4.600	2.89
100	251.0	5.730	2.87

4) น้ำมันรำข้าว

ตารางที่ 4.29 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันรำข้าว
ที่ผ่านการทอด 40 ครั้ง

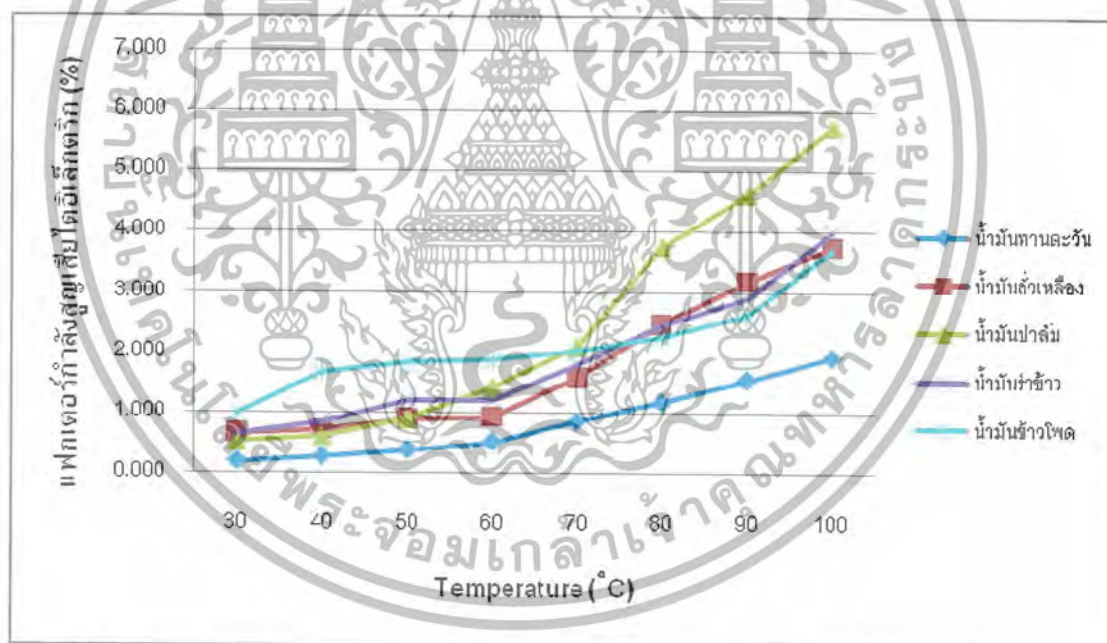
Temperature (°C)	Capacitance (pF)	Tan δ (%)	Permittivity
30	277.0	0.640	3.14
40	275.0	0.832	3.12
50	272.0	1.198	3.09
60	268.0	1.201	3.04
70	266.0	1.780	3.02
80	262.0	2.440	2.97
90	259.0	2.890	2.94
100	256.0	4.000	2.91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) น้ำมันข้าวโพด

ตารางที่ 4.30 ผลการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันข้าวโพด
ที่ผ่านการทอด 40 ครั้ง

Temperature (°C)	Capacitance (pF)	Tan δ (%)	Permittivity
30	276.0	0.980	3.13
40	275.0	1.667	3.12
50	272.0	1.817	3.09
60	269.0	1.860	3.05
70	266.0	2.010	3.02
80	262.0	2.260	2.97
90	259.0	2.620	2.94
100	255.0	3.690	2.89

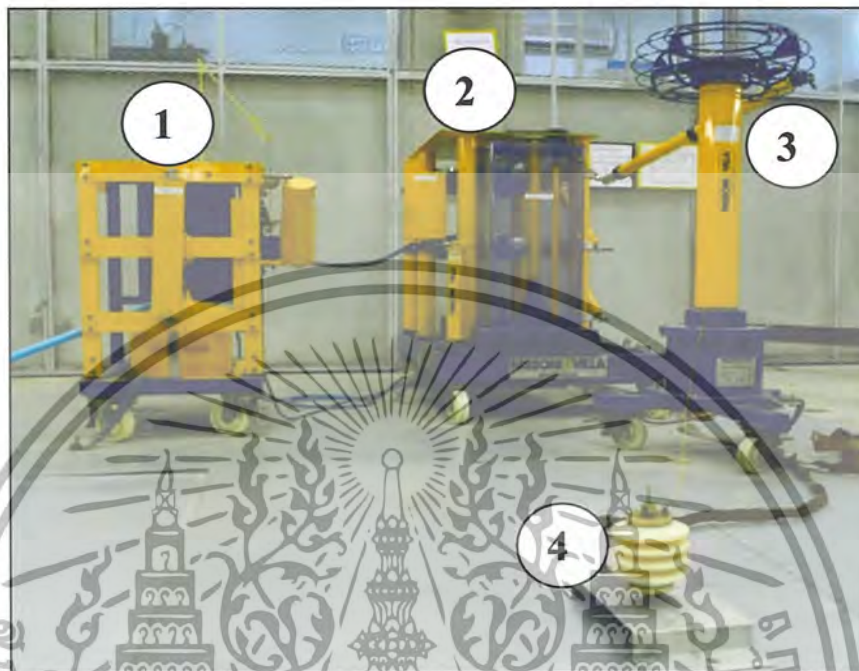


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงผลการทดสอบ Tan δ ของน้ำมันที่ผ่านการทอด 40 ครั้งแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์

4.3.1 การต่อวงจรที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 4.14 วงจรการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์

1. ชุดยึดประจุ
2. ชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ พิกัด 200 kV
3. โวลเตจดีไวเดอร์
4. Test Cell

4.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ตั้งระยะห่างอิเล็กโทรดให้ได้ ระยะ 1 นิ้ว
- 2) ล้าง Test Cell ด้วยน้ำมันที่นำมาทดสอบ แล้วค่อยๆ เทน้ำมันที่นำมาทดสอบลงไป เพื่อไม่ให้เกิดฟองอากาศ
- 3) ต่อขั้วอิเล็กโทรดด้านล่างเข้ากับกราวด์ และต่อขั้วอิเล็กโทรดด้านบนเข้ากับลวดทองแดงที่โวลเตจดีไวเดอร์
- 4) ป้อนแรงดันอิมพัลส์ตามขั้วที่กำหนด ด้วยค่าที่ต่ำกว่าค่าที่คาดคะเนไว้ 40 kV ป้อนที่ระดับแรงดันค่านี้ 3 ครั้ง โดยทิ้งช่วงห่าง 30 วินาที
- 5) เพิ่มระดับแรงดันทีละ 10 kV จนกระทั่งน้ำมันเกิดการเบรกดาวน
- 6) ถ้าเกิดการเบรกดาวนแล้ว ต้องเปลี่ยนน้ำมันและเข็มอิเล็กโทรด
- 7) เริ่มทำการทดสอบตามขั้นตอนทั้งหมดใหม่
- 8) เมื่อน้ำมันเบรกดาวนครบ 5 ครั้ง หยุดการทดสอบ
- 9) นำค่าเบรกดาวนทั้ง 5 ค่า มาหาค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ผลการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์(kV)

1) ขั้วลบ

ตารางที่ 4.31 ผลการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบ

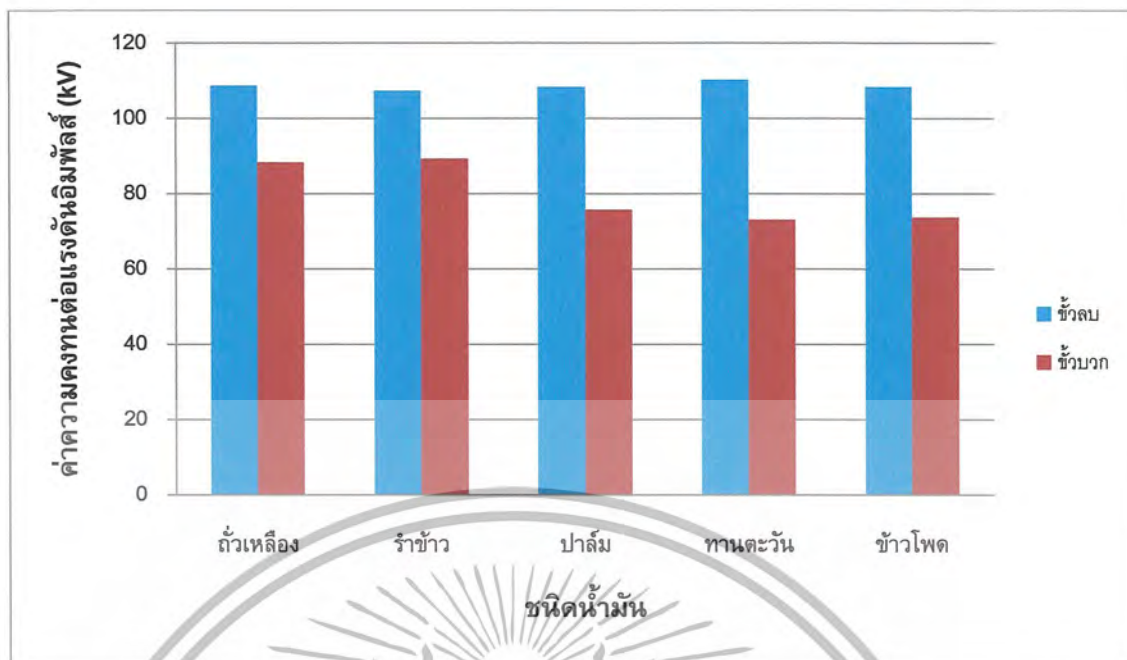
No.	น้ำมัน ถั่วเหลือง	น้ำมัน รำข้าว	น้ำมัน ปาล์ม	น้ำมันเมล็ด ดอก ทานตะวัน	น้ำมัน ข้าวโพด
1	110.7	102.9	109.8	111.5	106.3
2	108.0	109.0	115.9	115.0	106.3
3	108.0	109.0	100.2	108.1	107.2
4	108.0	108.1	108.1	108.1	115.0
5	109.0	108.1	108.1	109.0	107.2
Average	108.7	107.4	108.4	110.3	108.4

2) ขั้วบวก

ตารางที่ 4.32 ผลการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวก

No.	น้ำมัน ถั่วเหลือง	น้ำมัน รำข้าว	น้ำมัน ปาล์ม	น้ำมันเมล็ด ดอก ทานตะวัน	น้ำมัน ข้าวโพด
1	71.4	89.5	90.4	69.2	71.5
2	81.7	100.7	72.2	69.6	71.3
3	102.5	91.2	72.2	83.4	83.4
4	83.4	82.6	72.2	72.2	71.3
5	102.5	82.6	72.2	71.3	71.3
Average	88.3	89.3	75.8	73.1	73.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงผลการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ของน้ำมันแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

จากผลการทดลองพบว่า การหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันพีช ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน IEC 156 เมื่อนำค่ามาเปรียบเทียบกับค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงตามมาตรฐาน ซึ่งกำหนดว่าต้องมีค่ามากกว่า 25-30 kV พบว่า ในส่วนของน้ำมันใหม่ น้ำมันปาล์มมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงที่สุดที่ระดับแรงดัน 54.53 kV ซึ่งมีค่ามากกว่าน้ำมันหม้อแปลง 2.18 เท่า และสำหรับน้ำมันที่ผ่านการทอด ในแต่ละครั้ง น้ำมันปาล์มยังคงมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงที่สุด และค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าจะลดลงตามจำนวนครั้งที่ผ่านการทอดที่มากขึ้น

สำหรับการทดสอบแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก โดยทำตามมาตรฐาน ASTM D924-03A เมื่อนำค่ามาเปรียบเทียบกับค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันหม้อแปลงตามมาตรฐาน ซึ่งกำหนดให้มีค่าไม่เกิน 0.3% พบว่า น้ำมันข้าวโพดมีค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกที่สูงที่สุด ทั้งในส่วนของน้ำมันพีชใหม่ และน้ำมันพีชที่ผ่านการทอดแล้ว และน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันให้ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ต่ำที่สุด ทั้งในส่วนของน้ำมันพีชใหม่ และน้ำมันพีชที่ผ่านการทอดแล้ว

สำหรับการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ โดยทำตามมาตรฐาน ASTM D3300-00 เมื่อนำค่ามาเปรียบเทียบกับค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ ของน้ำมันหม้อแปลง ตามมาตรฐานกำหนดว่าต้องมีค่ามากกว่า 145 kV พบว่า การทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ ชั่วลบ น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันมีค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์สูงที่สุดที่ระดับแรงดัน 110.3 kV ซึ่งสูงกว่าน้ำมันพีชชนิดอื่น และการทดสอบชั่วคราว น้ำมันรำข้าวให้ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์สูงที่สุดที่ระดับแรงดัน 89.3 kV ซึ่งสูงกว่าน้ำมันพีชชนิดอื่น จากการทำโครงการนี้สังเกตได้ว่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของน้ำมันพีชมีแนวโน้มที่ลดลงตามจำนวนครั้งที่ผ่านการทอดมากขึ้น

สำหรับโครงการนี้สามารถสรุปได้ว่า น้ำมันที่มีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับน้ำมันหม้อแปลงมากที่สุด คือ น้ำมันปาล์ม ซึ่งผลการทดลองเป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าเท่านั้น ยังคงต้องมีการวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านอื่น ๆ อีก เช่น คุณสมบัติทางด้านเคมี, คุณสมบัติทางด้านกายภาพ เป็นต้น ซึ่งในการนำน้ำมันพีชไปใช้งานเป็นฉนวนในหม้อแปลงและอุปกรณ์อื่น ๆ นั้น ต้องนำน้ำมันพีชดังกล่าวไปทำการพัฒนาและปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านไฟฟ้า และทางด้านอื่น ๆ เพิ่มเติม เพื่อที่จะสามารถนำน้ำมันพีชไปใช้งานแทนน้ำมันหม้อแปลงได้จริงต่อไปในอนาคต

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรมีการสร้างเครื่องป้องกันแรงดันแบบอัตโนมัติ ให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดเอาไว้ เพราะถ้าอัตราการขึ้นแรงดันในการทดสอบแต่ละครั้งที่ไม่เท่ากัน ก็จะทำให้ได้ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่มีผิดเพี้ยนไปได้

2) ควรมีการควบคุมความชื้น เพราะความชื้นมีผลอย่างมากต่อ ที่การทดสอบ เพราะจะทำให้ค่าที่ได้ผิดเพี้ยนไป

3) ภาชนะที่ใช้บรรจุน้ำมันควรสะอาดและปิดให้มิดชิดเพื่อป้องกันความชื้น

4) ในการทดสอบแต่ละครั้งควรทำให้น้ำมันมีตะกอนน้อยที่สุด

5) ในการทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ ควรป้องกันแรงดันอิมพัลส์ โดยไม่ต้องต่ออุปกรณ์ทดสอบเสียก่อน เพื่อหาอัตราส่วนแรงดันที่เราป้องกันกับแรงดันที่ออกจริง ซึ่งจะทำให้การทดสอบแม่นยำยิ่งขึ้น



เอกสารอ้างอิง

- [1] ดร.สำราญ สังข์สะอาด, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**, พิมพ์ครั้งที่3: 2549.
- [2] นรเศรษฐ พัฒนเดช, **วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า**, เล่ม1: ฉนวนและวัสดุฉนวนไฟฟ้า, 2550.
- [3] พิณิจ ศรีธร, “การออกแบบและสร้างชุดทดสอบความคงทนไดอิเล็กตริกกระแสสลับของน้ำมันหม้อแปลง,” **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- [4] กิตติ หุตะวานิชย์, เฉลิมพล รุ่งโรจน์, ชัยวัชร ภาวังคะนันท์ และสุกฤต วัฒนพานิช, “การศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง,” **ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.
- [5] กำพล ทรวงบุญธนกุล, ทวีศักดิ์ ศรีวงศ์ทอง, นภดล นิมพัชราวุธ, และปรีชา โทการกุล, “เทคนิคการวัดค่าคาปาซิแตนซ์และแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกในฉนวน,” **ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2539.
- [6] จงรักษ์ บุญเลี้ยง, “การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อแรงดันเบรกดาวน์ในน้ำมันพีช,” **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2532.
- [7] สมเกียรติ คุณเผือก, “การศึกษาความคงทนของการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันพีชด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ,” **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2528.
- [8] พลับปลืง กุลเกตุ และ สุมนต์ พุ่มโกมุท, “เครื่องปรับสภาพความเป็นน้ำมันฉนวน,” **ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2540.
- [9] พงษ์ศักดิ์ มฤคทัต, “ผลของความชื้นแรงดันเบรกดาวน์และอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าของแกปทรงกลมมาตรฐาน,” **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [10] ชนันันท์ หมุ่มสุวรรณ, “การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบพกพาได้ ขนาด 800V,” **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [11] ปกรณ์ ชุมมงคล, “การทดสอบเสถียรภาพระยะยาวของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงขนาด 300 กิโลโวลต์ ตามมาตรฐาน IEC 60060-2,” **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] **IEC 156: Insulating Liquid Determination of the breakdown Voltage at power frequency Test method**, Second edition 1995-07.
- [13] **IEC 247: Measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor and d.c. resistivity of insulating liquid**, Second edition 1978.
- [14] **D924-03a: Standard Test Method for Dissipation Factor (or Power factor) and Relative Permittivity(Dielectric constant) of Electrical Insulating Liquid**, 2003.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD

CEI
IEC
156

Deuxième édition
Second edition
1995-07



Isolants liquides –
Détermination de la tension de claquage
à fréquence industrielle –
Méthode d'essai

Insulating liquids –
Determination of the breakdown voltage
at power frequency –
Test method

© CEI 1995 Droits de reproduction réservés — Copyright — all rights reserved

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale 3, rue de Varembe Genève, Suisse



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

L

Pour prix, voir catalogue en vigueur
For price, see current catalogue

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
INTRODUCTION	7
Clause	
1 Scope	9
2 Normative references	9
3 Electrical apparatus	9
3.1 Voltage regulator	9
3.2 Step-up transformer	11
3.3 Current-limiting resistors	11
3.4 Switching system	11
3.5 Measuring device	13
4 Test assembly	13
4.1 Test cell	13
4.2 Electrodes	13
4.3 Stirring (optional)	15
5 Preparation of electrodes	15
6 Test assembly preparation	15
7 Sampling	17
7.1 Sample containers	17
7.2 Sampling technique	17
8 Condition of the sample	17
9 Test procedure	17
9.1 Sample preparation	17
9.2 Filling of the cell	19
9.3 Application of voltage	19
10 Report	19
11 Test data dispersion	19
Figures	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

INSULATING LIQUIDS – DETERMINATION OF
THE BREAKDOWN VOLTAGE AT POWER FREQUENCY –

TEST METHOD

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international cooperation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. The IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by technical committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 3) They have the form of recommendations for international use published in the form of standards, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.

International Standard IEC 156 has been prepared by IEC technical committee 10: Fluids for electrotechnical applications.

This second edition cancels and replaces the first edition published in 1963 and constitutes a technical revision.

The text of this standard is based on the following documents:

DIS	Report on voting
10/338/DIS	10/346/RVD

Full information on the voting for the approval of this standard can be found in the report on voting indicated in the above table.

INTRODUCTION

As normally applied, breakdown voltage of insulating liquids is not a basic material property but an empirical test procedure intended to indicate the presence of contaminants such as water and solid suspended matter, and the advisability of carrying out drying and filtration treatment.

The breakdown voltage value of insulating liquids strongly depends on the particular set of conditions used in its measurement. Therefore, standardized testing procedures and equipment are essential for the unambiguous interpretation of test results.

The method described in this International Standard applies to either acceptance tests on new deliveries of insulating liquids, or testing of treated liquids prior to or during filling into electrical equipment, or to the monitoring and maintenance of oil-filled apparatus in service. It specifies rigorous sample-handling procedures and temperature control that should be adhered to when certified results are required. For routine tests, especially in the field, less stringent procedures may be practicable and it is the responsibility of the user to determine their effect on the results.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INSULATING LIQUIDS – DETERMINATION OF THE BREAKDOWN VOLTAGE AT POWER FREQUENCY – TEST METHOD

1 Scope

This International Standard specifies the method for determining the dielectric breakdown voltage of insulating liquids at power frequency. The test portion, contained in a specified apparatus, is subjected to an increasing a.c. electrical field by means of a constant rate of voltage rise until breakdown occurs.

The method applies to all types of insulating liquids of nominal viscosity up to $350 \text{ mm}^2\text{s}^{-1}$ at $40 \text{ }^\circ\text{C}$. It is appropriate both for acceptance testing on unused liquids at the time of their delivery and for establishing the condition of samples taken in monitoring and maintenance of equipment.

2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this International Standard. At the time of publication, the editions indicated were valid. All normative documents are subject to revision, and parties to agreements based on this International Standard are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents indicated below. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 52: 1960, *Recommendations for voltage measurement by means of sphere-gaps (one sphere earthed)*

IEC 60, *High-voltage test techniques*

IEC 475: 1974, *Method of sampling liquid dielectrics*

3 Electrical apparatus

The electrical apparatus consists of the following units:

- a) Voltage regulator
- b) Step-up transformer
- c) Switching system
- d) Energy limiting devices

Two or more of these units may be integrated in any equipment system.

3.1 Voltage regulator

Uniform increase of voltage with time by manual means is difficult and, for this reason, automatic control is essential.

Voltage control may be achieved by one of the following methods:

- a) Variable ratio auto-transformer
- b) Electronic regulator
- c) Generator-field regulation
- d) Induction regulator
- e) Resistive type voltage divider

3.2 Step-up transformer

The test voltage is obtained by using a step-up transformer supplied from an a.c. (48 Hz to 62 Hz) voltage source whose value is gradually increased. The controls of the variable low-voltage source shall be capable of varying the test voltage smoothly, uniformly and without overshoots or transients. Incremental increases (produced, for example, by a variable auto-transformer) shall not exceed 2 % of the expected breakdown voltage.

The voltage applied to the electrodes of the liquid-filled cell shall have an approximately sinusoidal waveform, such that the peak factor is within the following limits: $1,41 \pm 0,07$.

The centre-point of the secondary winding of the transformer should be connected to earth.

3.3 Current-limiting resistors

To protect the equipment and to avoid excessive decomposition of the liquid at the instant of breakdown, a resistance limiting the breakdown current may be inserted in series with the test cell.

The short-circuit current of the transformer and associated circuits shall be within the range of 10 mA to 25 mA for all voltages higher than 15 kV. This may be achieved by a combination of resistors in either or both the primary and secondary circuits of the high-voltage transformer.

3.4 Switching system

3.4.1 Basic requirements

The circuit shall be opened automatically if an established arc occurs. The primary circuit of the step-up transformer shall be fitted with a circuit-breaker operated by the current resulting from the breakdown of the sample, and shall break the voltage within 10 ms. The circuit may be opened manually if a transient spark (audible or visible) occurs between the electrodes.

NOTE – The sensitivity of the current-sensing element depends on the energy-limiting device employed and only approximate guidance can be given. Normally, triggering of cut-off by a current of 4 mA maintained for 5 ms is acceptable, while fast energy-limiting (see 3.4.2) triggering by a transient current of 1 A maintained for 1 μ s has been found satisfactory.

3.4.2 Special requirements for silicone liquids

Silicone liquids can give rise to solid decomposition products through the action of electric discharges, which may cause gross errors in the observed results. In such cases, all feasible steps shall be taken to minimize the energy available for dissipation in the breakdown discharge.

Whilst current limiting as above, combined with isolation of the step-up transformer primary within 10 ms, is adequate for hydrocarbons. More satisfactory performance for silicone liquids is obtained by short circuiting of the primary circuit of the transformer by a low-impedance or by use of a low-voltage device for detection of breakdown acting within a few microseconds. This device may be of either analogue (for example, modulating amplifier) or switching (for example, thyristor) type. By the use of this device, the output voltage of the step-up transformer shall be reduced to zero within 1 ms of detection of breakdown, and shall not thereafter increase again until the next step of the test sequence is commenced.

3.5 Measuring device

For the purpose of this standard, the magnitude of the test voltage is defined as its peak value divided by $\sqrt{2}$.

This voltage may be measured by means of a peak-voltmeter or by means of another type of voltmeter connected to the input or output side of the testing transformer, or to a special winding provided thereon; the instrument then used shall be calibrated against a standard up to the full voltage which it is desired to measure.

A method of calibration which has been found satisfactory is the use of a transfer standard. This is an auxiliary measuring device which is connected in place of the test cell between the high-voltage terminals to which it presents the same impedance as the filled test cell. The auxiliary device is separately calibrated against a primary standard, for example, a sphere gap in accordance with IEC 52 (see also IEC 60).

4 Test assembly

4.1 Test cell

The volume of the cell shall be between 350 ml and 600 ml.

The cell shall be made of material that is electrically insulating, transparent and chemically inert, resistant to the insulating liquid and the cleaning agents which may be used.

The cell shall be provided with a cover and shall be designed to permit easy removal of the electrodes for cleaning and maintenance.

Examples of suitable cell designs are given in figures 1 and 2.

4.2 Electrodes

The electrodes shall be made either of brass, bronze or austenitic stainless steel. They shall be polished and, in shape, either spherical (12,5 mm to 13,0 mm diameter) as shown in figure 1 or partially spherical of the shape and dimensions given in figure 2. The axis of the electrode system shall be horizontal, and at least 40 mm below the surface of the test liquid in the cell. No part of the electrode shall be closer than 12 mm to the cell wall or stirrer. The gap between the electrodes shall be $2,50 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$.

The electrodes shall be examined frequently for pitting or other damage, and shall be maintained or replaced as soon as such damage is observed.

4.3 *Stirring* (optional)

The test may be conducted with or without stirring. Differences between tests with or without stirring have not been found statistically significant. A stirrer, however, may be convenient especially with apparatus capable of automatic operation.

Stirring may be achieved by means of a two-bladed impeller of effective diameter 20 mm to 25 mm, axial depth 5 mm to 10 mm, rotating at a speed of 250 r.p.m to 300 r.p.m. The impeller shall not entrain air bubbles and preferably rotate in such a direction that the resulting liquid flow is directed downward. It shall be constructed so that it is easily cleaned.

Stirring by means of a magnetic bar (20 mm to 25 mm in length and 5 mm to 10 mm in diameter) is an acceptable alternative when there is no risk of removing magnetic particles.

The dimensions of the stirring device shall conform to the clearance requirements in 4.2.

5 Preparation of electrodes

New electrodes, pitted electrodes, electrodes which have not been properly stored for a considerable time shall be cleaned by the following procedure:

- clean all surfaces with a suitable volatile solvent and allow the solvent to evaporate;
- polish with fine abrasive powder (for example, jeweller's rouge) or abrasive paper or cloth (for example, crocus cloth);
- after polishing, clean with petroleum spirit (reagent quality: boiling range 60 °C - 80 °C) followed by acetone (reagent quality);
- assemble the electrodes in the cell, fill with a clean, unused insulating liquid of the type to be tested next, and raise the electrode voltage to breakdown 24 times.

6 Test assembly preparation

It is recommended that a separate test cell assembly be reserved for each insulating liquid type.

Test assemblies shall be stored in a dry place, covered and filled with dry insulating liquid of the type in regular use in the cell.

On change of the type of liquid under test, remove all residues of the previous liquid with an appropriate solvent, rinse the assembly with clean, dry liquid of the same type as that to be tested, drain and refill.

7 Sampling

7.1 Sample containers

Sample size should be approximately three times the capacity of the test cell.

Appropriate sample containers shall comply with IEC 475. An amber glass bottle is the preferred container. Clear glass bottles may be used but they shall be shielded from direct light until ready to be tested. Plastic containers which are not attacked by the liquid to be tested may be used, but these shall not be used more than once. For sealing, screw caps with polyolefine or polytetrafluoroethylene insert are preferred.

Containers and caps shall be cleaned by washing with a suitable solvent to remove residues of an earlier sample. Containers shall next be rinsed with acetone, traces of which shall be removed by blowing with warm air.

After cleaning, containers shall be immediately capped and kept sealed until used.

7.2 Sampling technique

Sampling of new and used insulating liquids shall be carried out in full compliance with procedures detailed in IEC 475.

When sampling, containers should be almost filled with sample, leaving about 3 % of the container volume as free air space.

Breakdown voltage is extremely sensitive to the slightest contamination of the sample by water and particulate matters. Special reference is made to precautions necessary to avoid contamination of the sample and the need for trained personnel and experienced supervision.

Unless otherwise required, the sample is taken where the liquid is likely to be most contaminated, usually at the lowest point of the container holding it.

8 Condition of the sample

The test is carried out, unless otherwise specified, on the sample as received without drying or degassing.

At the time of test, the temperatures of the test liquid and ambient air shall not differ by more than 5 °C and for referee tests the liquid temperature shall be 20 °C ± 5 °C.

9 Test procedure

9.1 Sample preparation

Immediately before filling the test cell, the sample container is gently agitated and turned over several times in such a way as to ensure as far as possible a homogeneous distribution of the impurities contained in the liquid without causing the formation of air bubbles.

Unnecessary exposure to the ambient air of the sample shall be avoided.

9.2 Filling of the cell

Immediately before commencing the test, drain the test cell and rinse the walls, electrodes and other component parts, with the test sample. Drain and slowly fill with the test sample avoiding the formation of air bubbles.

Measure and record the temperature of the liquid.

Position the cell in the test equipment and start the stirrer if used.

9.3 Application of voltage

The first application of voltage is started approximately 5 min after completion of filling and checking that no air bubbles are visible in the electrode gap.

Apply voltage to the electrodes and uniformly increase voltage from zero at the rate of $2,0 \text{ kV s}^{-1} \pm 0,2 \text{ kV s}^{-1}$ until breakdown occurs. The breakdown voltage is the maximum voltage reached at the time the circuit is opened either automatically (established arc) or manually (visible or audible discharge detected).

Record the value.

Carry out six breakdowns on the same cell filling allowing a pause of at least 2 min after each breakdown before re-application of voltage. Check that no gas bubbles are present within the electrode gap. If a stirrer is used, it shall run continuously throughout the test.

Calculate the mean value of the six breakdowns in kilovolts.

10 Report

Report the mean value, in kilovolts, of the six breakdowns as the test result.

The report shall also include: the sample identification, the value of each individual breakdown, the type of electrodes used, the frequency of the test voltage, the temperature of the liquid, the use of a stirrer (if any).

11 Test data dispersion

The scatter of individual breakdown voltages has been found to be very dependent on the value of the result. The graphical representation of figure 3 indicates the values of standard deviation/mean ratio which have been found in a large body of test data in several laboratories using transformer oil.

The full line in the graph shows the distribution of the median value of SD/mean as a function of the value of the mean. The dotted lines indicate the expected 95 % range of values of SD/mean as a function of the value of the mean.

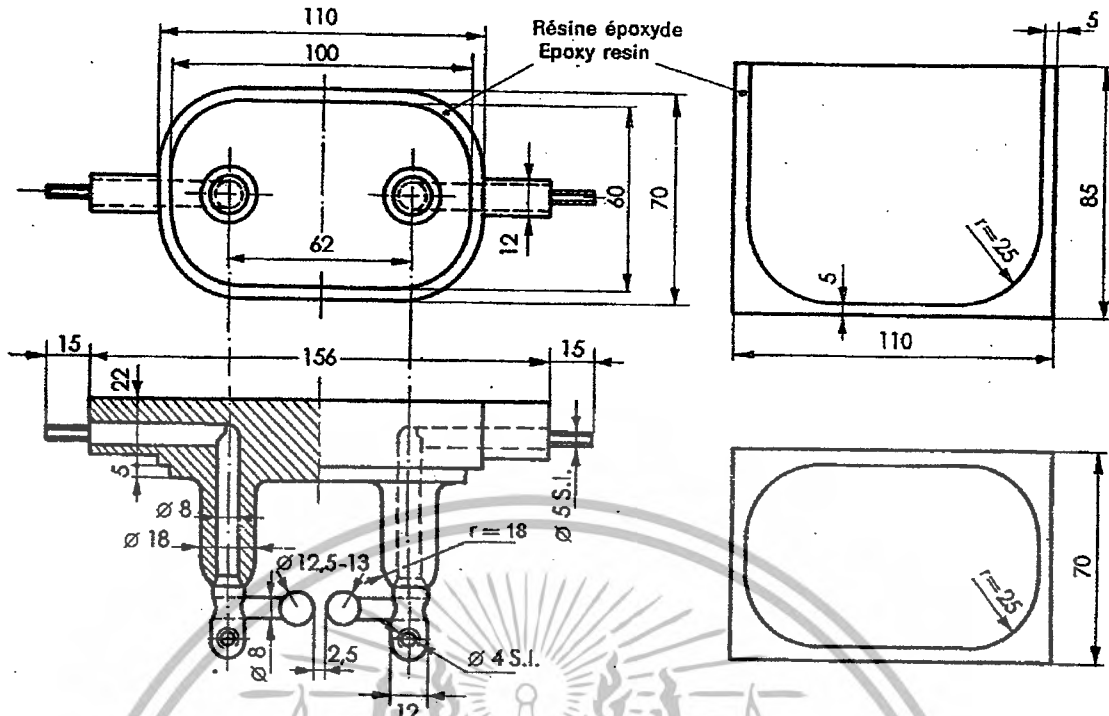


Figure 1 – Exemple d'une cellule et d'électrodes sphériques appropriées
Example of suitable cell and spherical electrodes

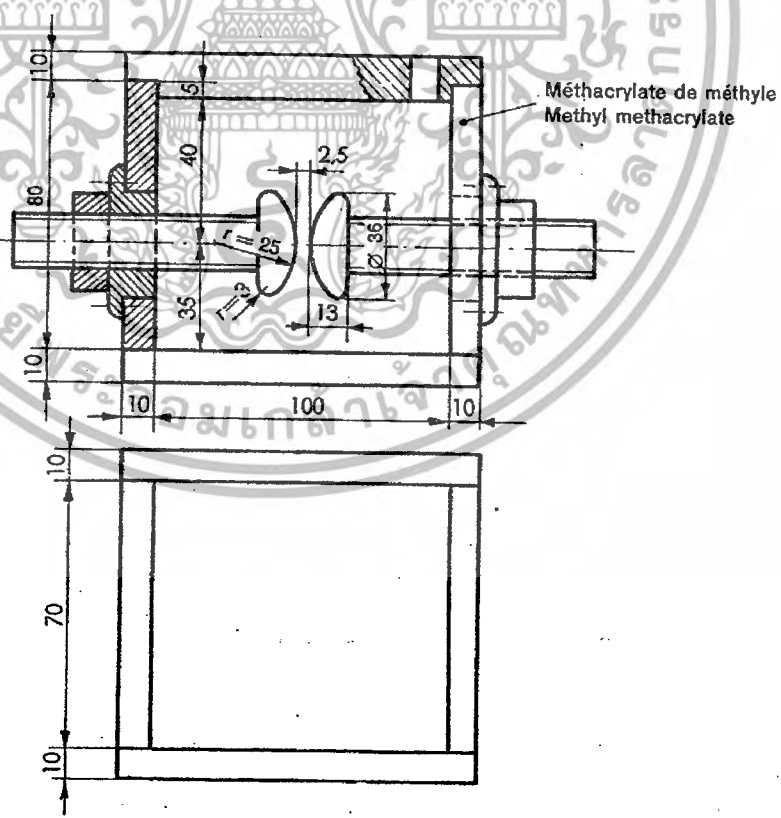


Figure 2 – Exemple d'une cellule et d'électrodes hémisphériques appropriées
Example of suitable cell and partially spherical electrodes

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติเห็นาเป็ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

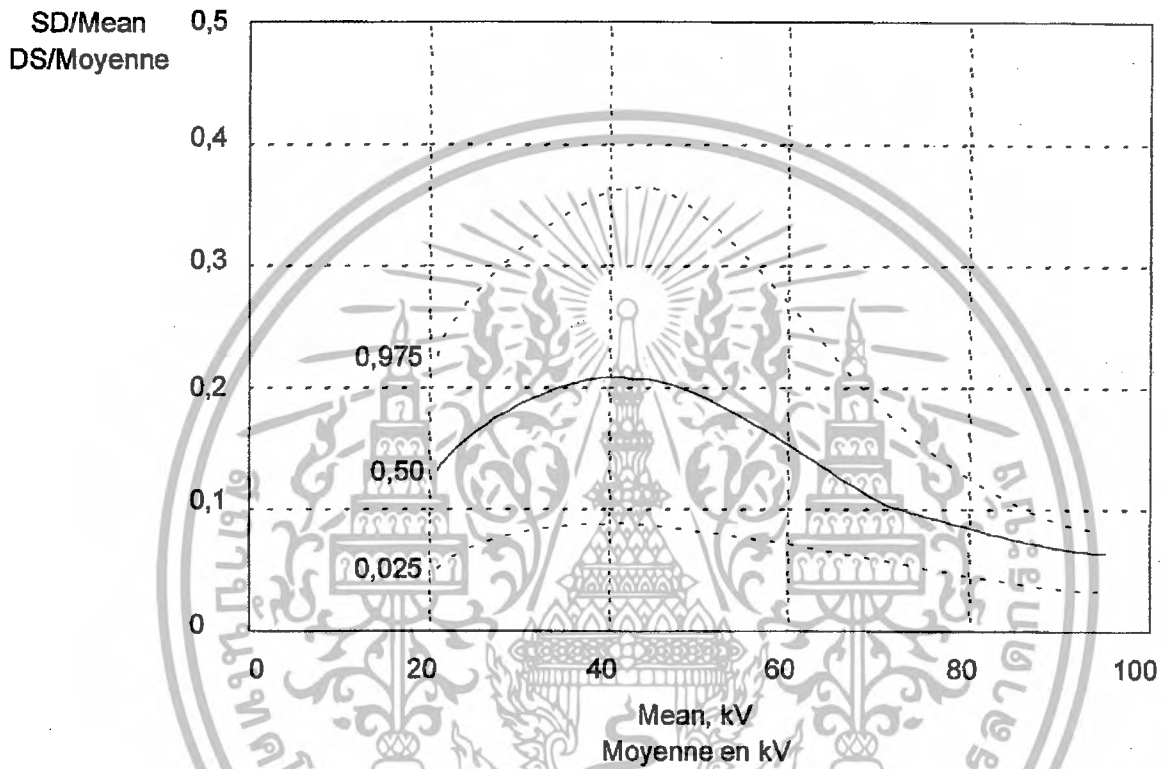


Figure 3 – Représentation graphique du coefficient de variation (rapport de l'écart type à la valeur moyenne) en fonction de la moyenne de tension de claquage
Graphical representation of coefficient of variation (standard deviation/mean ratio) versus mean breakdown voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Standard Test Method for Dissipation Factor (or Power Factor) and Relative Permittivity (Dielectric Constant) of Electrical Insulating Liquids¹

This standard is issued under the fixed designation D 924; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method describes testing of new electrical insulating liquids as well as liquids in service or subsequent service in cables, transformers, oil circuit breakers, and other electrical apparatus.

1.2 This test method provides a procedure for making dielectric tests at a commercial frequency of between 45 and 65 Hz.

1.3 Where it is desired to make routine determinations requiring less accuracy, certain modifications to this test method are permitted as described in Sections 16 to 24.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and to determine the applicability of regulatory limitations prior to use.* Specific warnings are given in 11.3.3.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

D 150 Test Methods for AC Loss Characteristics and Permittivity (Dielectric Constant) of Solid Electrical Insulating Materials

D 923 Practices for Sampling Electrical Insulating Liquids
D 2864 Terminology Relating to Electrical Insulating Liquids and Gases

D 2865 Practice for Calibration of Standards and Equipment for Electrical Insulating Materials Testing

E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method

2.2 IEEE Standard:

Standard 4 IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing³

3. Terminology

3.1 Definitions—Definitions of terms used in this test method are given in Terminology D 2864. Also refer to Test Methods D 150 for detailed discussion of terms.

4. Significance and Use

4.1 *Dissipation Factor (or Power Factor)*—This is a measure of the dielectric losses in an electrical insulating liquid when used in an alternating electric field and of the energy dissipated as heat. A low dissipation factor or power factor indicates low ac dielectric losses. Dissipation factor or power factor may be useful as a means of quality control, and as an indication of changes in quality resulting from contamination and deterioration in service or as a result of handling.

4.1.1 The loss characteristic is commonly measured in terms of dissipation factor (tangent of the loss angle) or of power factor (sine of the loss angle) and may be expressed as a decimal value or as a percentage. For decimal values up to 0.05, dissipation factor and power factor values are equal to each other within about one part in one thousand. In general, since the dissipation factor or power factor of insulating oils in good condition have decimal values below 0.005, the two measurements (terms) may be considered interchangeable.

4.1.2 The exact relationship between dissipation factor (*D*) and power factor (*PF*) is given by the following equations:

$$PF = \frac{D}{\sqrt{1 + D^2}} \quad D = \frac{PF}{\sqrt{1 - (PF)^2}} \quad (1)$$

The reported value of *D* or *PF* may be expressed as a decimal value or as a percentage. For example:

$$D \text{ or } PF \text{ at } 25^\circ C = 0.002 \text{ or } 0.2\% \quad (2)$$

4.2 *Relative Permittivity (Dielectric Constant)*—Insulating liquids are used in general either to insulate components of an electrical network from each other and from ground, alone or

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D27 on Electrical Insulating Liquids and Gases and is the direct responsibility of Subcommittee D27.05 on Electrical Tests.

Current edition approved Oct. 1, 2003. Published December 2003. Originally approved in 1947 as D 924–47 T. Last previous edition approved in 2003 as D 924–03.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

³ Available from Institute of Electrical and Electronic Engineers, 445 Hoes Lane, Piscataway, NJ 08854.

in combination with solid insulating materials, or to function as the dielectric of a capacitor. For the first use, a low value of relative permittivity is often desirable in order to have the capacitance be as small as possible, consistent with acceptable chemical and heat transfer properties. However, an intermediate value of relative permittivity may sometimes be advantageous in achieving a better voltage distribution of a-c electric fields between the liquid and solid insulating materials with which the liquid may be in series. When used as the dielectric in a capacitor, it is desirable to have a higher value of relative permittivity so the physical size of the capacitor may be as small as possible.

4.3 Theory relating to dielectric measurement techniques and to sources of dielectric loss is given in Test Methods D 150.

5. Sampling

5.1 Sample electrical insulating liquids in accordance with Practices D 923. Samples to be subjected to this test should preferably be obtained through a closed system. If exposed to atmospheric conditions, it is preferable to take the sample when the relative humidity is 50 % or less. If it is not feasible, the length of time the sample is exposed to atmospheric conditions must be kept to a minimum.

5.2 Some liquids, in certain applications, require special handling and processes in the sampling, and these will be found in the governing procedures. Consult such procedures before samples are taken.

5.3 The quantity of sample taken for this test shall be sufficient for at least three separate determinations of loss characteristics and relative permittivity.

5.4 The loss characteristic measurement (dissipation factor or power factor) may be affected by contamination introduced during sampling and subsequent handling.

PROCEDURE FOR MAKING REFEREE TESTS

6. Apparatus

6.1 Measuring equipment used in these procedures shall be in accordance with Test Methods D 150.

6.2 Use only a three-terminal cell for these tests.

6.3 The design of test cells that conform to the general requirements given in the Annex are considered suitable for use in making these tests.

6.4 *Forced-Draft Oven:*

6.4.1 When the tests are to be made above room temperature, a suitable forced-draft, thermostatically controlled oven shall be used as the test chamber. The oven must be capable of meeting the temperature requirements set out in Section 11. For tests at room temperature the unheated oven can be conveniently used as the test chamber.

6.4.2 Provide the test chamber with an opening in the wall through which two lengths of TFE-fluorocarbon-insulated (or similar) shielded cable pass to make electrical connection from the measuring equipment and high-voltage transformer, respectively, to the test cell. Use a perforated ceramic plate or disk to insulate the test cell from the metal flooring of the oven if the flooring is not insulated from the oven. Provide a safety interlock on the door of the oven so that the electrical circuit supplying voltage to the test cell will be broken when the oven door is opened.

6.4.3 A cross-sectional view of the test chamber with a three-electrode test cell in place and with test cables connected is shown in Fig. 1.

6.5 *Automatic Thermo-Regulator Cell:*

6.5.1 When tests are to be made above room temperature but below the flash point, an automatic thermo-regulator cell can be used as long as it provides uniform heating of the test cell.

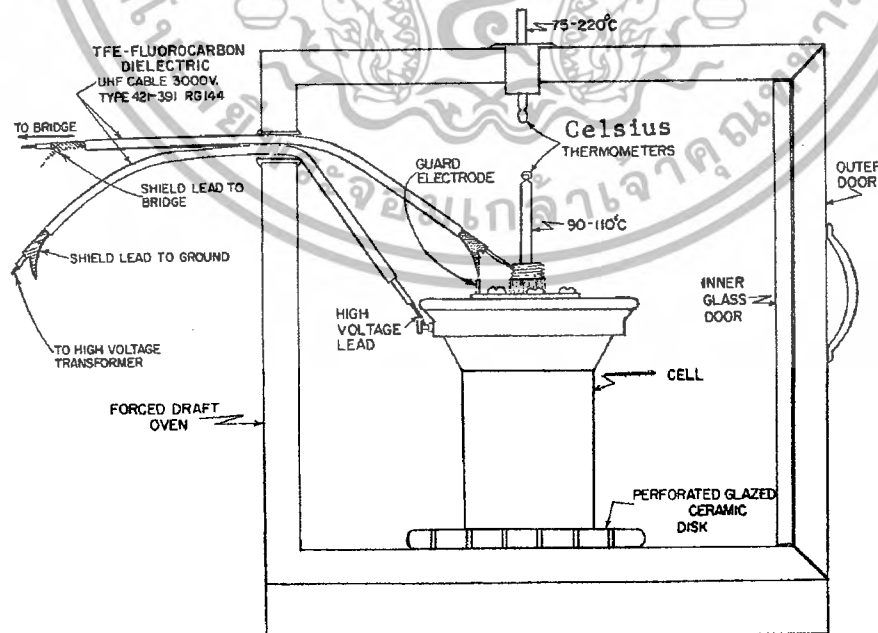


FIG. 1 Test Set-Up for Dissipation Factor Measurements at Elevated Temperatures Using Three-Electrode Test Cell

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.5.2 The automatic thermo-regulator cell must be able to provide rapid, controlled rate of temperature rise, and be able to maintain a liquid temperature constant to within $\pm 1^\circ\text{C}$.

Calibration

7.1 Calibration of test instruments shall be traceable to national standards.

7.2 Verify the calibration at least annually using reference devices that are traceable to national standards.

7.3 Refer to Practice D 2865 and IEEE Standard 4 for guidelines on calibrating test equipment.

Test Temperature

8.1 The temperature at which a referee test is made shall be mutually agreed upon between the purchaser and the seller. Measurements are made at many different temperatures. For acceptance tests, it is generally made at a temperature of 00°C , while for routine testing it is usually made at 25, 85 or 00°C . In some research investigations, tests may be made at considerably higher temperatures while in other cases, particularly for tests on cable oils in service, tests may be made over range of temperatures.

Test Voltage

9.1 The average stress to which the specimen is subjected shall not be less than 200 V/mm (5 V/mil) (rms). Tests at higher stresses are desirable but shall not reach such values that electrical discharges across the cell insulating surfaces occur or that internal ionization of the specimen may be expected. Stress ranges in normal usage for referee tests are 200 to 1200 V/mm (5 to 30 V/mil) (rms).

9.2 Because the ac loss characteristics can vary with voltage stress, for reference purposes it is desirable to make the measurements at a specific value of voltage stress within the limits in 9.1.

9.3 Referee tests should be carried out in the frequency range 45–65 Hz.

Cleaning Test Cell

10.1 The cleanliness of the test cell is of paramount importance when measuring loss characteristics because of the inherent susceptibility of most insulating liquids to contaminating influences of the most minute nature. For this reason, clean and dry the cell immediately prior to making the test, and strictly observe the procedures and precautions outlined in 10.2 to 10.5.

10.2 Dismantle the cell completely and wash all the component parts thoroughly with a technical grade of a suitable solvent (such as acetone, pentane, petroleum ether, or heptane). Wash the component parts with a mild abrasive soap or detergent. Take care not to lay the electrodes on any surface. Rinse all parts thoroughly with hot tap water, then with cold tap water, followed by several rinses with distilled water. Take extreme care during the washing and rinsing of some test cells to prevent any moisture from entering the thermometer well in the inner electrode. As a precaution against this eventuality, use a suitable stopper to plug this opening prior to starting the cleaning operation.

10.3 After the surfaces of the measuring, guard, and high voltage electrodes have been washed, do not touch these surfaces during the rinsing or any subsequent operation.

10.4 Place the component parts of the test cell in an oven maintained at 110°C for a period of not less than 60 min. Do not dry test cells made of Monel at this elevated temperature for more than 90 min as oxidation will take place causing erroneous results. Take care that the surfaces on which the component parts of the cell are placed in the oven are clean.

10.5 At the expiration of the drying period, assemble the cell using clean cotton gloves as protection for the hands and to prevent contamination from skin oils and salt.

11. Preparation of Specimen and Filling Test Cell

11.1 Store the sample in its original sealed container, shielded from light. Some liquids, such as oils of petroleum origin, undergo changes when exposed to sunlight. Allow the sealed container to stand undisturbed in the room in which the test is to be made for a sufficient period of time to permit the sample to attain room temperature before it is opened.

11.2 When insulating liquids are heated to elevated temperatures, some of their characteristics undergo a change with time and the change, even though of the minutest nature, may be reflected in the loss measurement. It is therefore desirable that the elapsed time necessary for the test specimen to attain temperature equilibrium with the test cell be held to a minimum. For optimum procedure do not exceed 20 min for this time. It is essential, therefore, that the procedures outlined below be closely followed.

11.3 Forced-Draft Oven:

11.3.1 In order that representative test specimens may be obtained, gently tilt or invert the sample container and swirl the liquid several times. Immediately after mixing the sample, pour a quantity of liquid sufficient for four fillings of the test cell into a chemically clean dry beaker and heat on a hot plate to a temperature 2°C below the desired test temperature. Stir the fluid frequently during heating.

11.3.2 Remove the cell from the test chamber, lift out the inner electrode, but do not rest it on any surface, and fill the cell with a portion of the heated specimen. Replace the beaker with the remainder of the heated sample on the hot plate. Insert the inner electrode and rinse the electrodes by twice raising and lowering the inner electrode. Remove the inner electrode and hold it suspended in air; then decant the rinsing liquid and immediately fill the cell from the remainder of the heated specimen. Replace the inner electrode.

11.3.3 Insert a mercury thermometer graduated in 0.25°C increments, or other temperature measuring devices (for example, thermocouples) that provide equal accuracy, in the thermometer well provided in the inner electrode (**Warning**—A spring-loaded thermocouple may be used for measuring the temperature of the inner electrode, but extreme caution shall be exercised that these wires do not come in contact with the high-voltage lead and do not pick up stray emfs). Immediately return the filled cell to the test chamber (adjusted to a temperature above the desired test temperature) and make the necessary electrical connections to the cell.

11.3.4 Perform the operations described in 11.3.2 and 11.3.3 as rapidly as possible.

11.4 Automatic Thermo-Regulator Cell:

11.4.1 Gently swirl or invert the sample container to obtain a representative test specimen.

11.4.2 Fill the test cell and flush to rinse thoroughly both the inner and outer electrodes with a portion of the sample. Decant the rinsing liquid and immediately fill the cell with a new aliquot of sample.

11.4.3 Replace inner electrode and make all necessary electrical connections to the cell. On some instruments the cell must be in place before filling with specimen.

11.4.4 Set the automatic thermo-regulator for the test temperature and initiate heating. Record data as soon as the test temperature is reached.

12. Procedure—Loss Characteristics

12.1 Make the measurements while the temperature of the inner electrode is within ±0.5°C of the desired test temperature.

12.2 On completing the initial measurement, pour off the liquid, and refill the cell, following the same procedure and exercising the same precautions used in making the first filling, and take another measurement. If the difference in the measurements of the two test specimens is equal to or less than 0.0001, plus 10 % of the higher of the two values, no further tests are required, and the reported value for the sample shall be taken as the average of the two measurements. If the difference in the measurements of the two test specimens is greater than 0.0001, plus 10 % of the higher of the two values, refill the cell and take a third measurement. If the difference between the third measurement and either the first or second is not within 0.0001, plus 10 % of the higher of the two values used in this computation, discard these results, reclean the cell, obtain another sample, and repeat the procedure until two measurements from a sample are obtained that do meet the prescribed limits.

13. Procedure—Relative Permittivity

13.1 Measure the capacitance of the test cell with air as the dielectric and then with the cell filled with the liquid. Use these measurements in calculating the relative permittivity from the following equation:

$$K' = C_x / C_v \tag{3}$$

where:

- K' = relative permittivity of the liquid,
- C_x = capacitance of test cell with the liquid as the dielectric, and
- C_v = capacitance of test cell with air as the dielectric.

14. Report

14.1 Report the following information:

- 14.1.1 Sample identification,
- 14.1.2 Type of test cell used,
- 14.1.3 Measurement procedure: referee,
- 14.1.4 Average voltage gradient in the sample while under test, in volts per millimeter (volts per mil) (rms),
- 14.1.5 Frequency of applied voltage,
- 14.1.6 Temperature of the sample while under test,
- 14.1.7 Temperature and humidity of the room during test,

14.1.8 Dissipation factor or power factor of the sample, usually expressed as a percentage (%), and

14.1.9 Relative permittivity (dielectric constant) of the sample, when required.

15. Precision and Bias

15.1 Interlaboratory Test Program—An interlaboratory study of dissipation factor in mineral insulating oil was conducted in accordance with Practice E 691 in twelve laboratories with four different oils. Each sample was tested using the referee procedure at 25°C and at 100°C. The results are documented in a research report available from ASTM International Headquarters.⁴

15.2 Precision—The precision information given below for referee testing of dissipation factor is for the comparison of two test results, each of which is the average of two test determinations.

15.2.1 95 % Repeatability Limit (within laboratory)—The absolute difference between two results obtained in the same laboratory by the same analyst may be expected to be below these calculated values 95 % of the time:

$$r_{25C} = 0.06 X^{0.65} \% \tag{4}$$

$$r_{100C} = 0.237 X^{0.609} \% \tag{5}$$

where X is the average of the two results being compared.

15.2.2 95 % Reproducibility Limit (between laboratories)—The absolute difference between two results obtained in different laboratories by different analysts may be expected to be below these calculated values 95 % of the time:

$$R_{25C} = 0.384 X^{0.65} \% \tag{6}$$

$$R_{100C} = 0.467 X^{0.609} \% \tag{7}$$

where X is the average of the two results being compared.

15.2.3 Calculated values of repeatability and reproducibility are shown in the table below:

%DF@25C	r	R	%DF@100C	r	R
0.005	0.002	0.012	0.1	0.058	0.115
0.05	0.009	0.055	0.5	0.155	0.306
0.1	0.013	0.086	1.0	0.237	0.467
0.3	0.027	0.176	4.0	0.551	1.086

15.3 Bias:

15.3.1 As there is no accepted reference material available for dissipation factor (or power factor), no bias statement can be made.

15.3.2 As there is no accepted reference available for relative permittivity, no bias statement can be made.

PERMISSIBLE MODIFICATIONS WHEN MAKING ROUTINE TESTS

16. General

16.1 The following sections outline certain modifications to the Procedure for Making Referee Tests, permissible (I) when it is desirable to get an approximation of the dissipation factor

⁴ Available from ASTM International. Request RR: D27-1015.

26.2 *Bias*—As there is no accepted reference material available for dissipation factor (or power factor), no bias statement can be made.

27. Keywords

27.1 dielectric constant; dissipation factor; power factor; relative humidity

ANNEX

(Mandatory Information)

A1. CELLS USED FOR MEASURING DISSIPATION FACTOR (OR POWER FACTOR) AND RELATIVE PERMITTIVITY (DIELECTRIC CONSTANT) OF ELECTRICAL INSULATING LIQUIDS

A1.1 *Design of Cell*—A cell for the purpose of measuring the loss characteristic and relative permittivity (dielectric constant) of electrical insulating liquids shall meet the following general requirements:

A1.1.1 The design of the cell shall be such as to facilitate easy and thorough cleaning of its component parts, permit the use of the cell in a suitable temperature bath, and provide means for measuring the temperature of the liquid under test.

A1.1.2 The materials used in constructing the cell shall be nonporous and capable of satisfactorily withstanding the temperature to which the cell will be subjected under test. The alignment of the electrodes shall not be influenced by this temperature nor by the operation of filling the cell with the test liquid.

A1.1.3 The electrodes or their surfaces shall be made of a metal capable of resisting attack by mild acids such as are found in oils of petroleum origin, particularly after prolonged exposure at elevated temperatures. Metals that have been found satisfactory from this standpoint are gold, nickel, Monel, platinum, and stainless steel. In general, plated surfaces have been found less satisfactory than solid metal electrodes when testing liquids having low loss. Plated surfaces that may be satisfactory for testing liquids having low acidity and for short periods of time are gold, platinum, nickel, chromium over nickel, or rhodium.

A1.1.4 In order to achieve a high order accuracy in determining the dissipation factor (or power factor) or dielectric constant, a guard electrode shall be provided which adequately shields the measuring electrode. Use a shielded wire or coaxial cable for connecting the guard and measuring electrodes to the bridge.

A1.1.5 The solid insulation used to support the guard electrode relative to the measuring electrode shall not extend into the portion of the sample being tested.

A1.1.6 The insulating materials used in constructing the cell shall not absorb or be adversely affected by the test liquids or cleaning solvents. The dissipation factor of these insulating materials must necessarily be low, particularly that between the guard and measuring electrodes; otherwise difficulty may be experienced in balancing the guard circuits at elevated temperatures. Insulating materials that have proven satisfactory are boron nitride, borosilicate glass, quartz, steatite, and TFE-fluorocarbon. Thermoplastic materials such as hard rubber and polystyrene, although having good electrical properties, are not suitable as they soften below 130°C. Insulating materials of the molded mica-dust type, have been found to absorb solvents and therefore are not considered as satisfactory in the measurement of low loss liquids.

A1.1.7 In designing the cell, the distance across the surface of the test specimen and across the solid insulating material between the guard and the measuring electrode shall be great enough adequately to withstand the test potential used. Leakage across these paths has been found to produce an unsteady bridge balance on some bridges.

A1.1.8 Fig. A1.1 The surface area of the measuring electrode and the gap spacing between the measuring electrode and high-voltage electrode shall be such that the ratio of surface area to thickness of the test sample shall be large enough to provide sufficient current for adequate operation of the measuring equipment. No minimum capacitance is therefore suggested. It is required, however, that the precision of the measurements meets the intended accuracy of this test method.

A1.2 *Fig. A1.1*—The cell shown in Fig. A1.1 is a two-terminal cell intended solely for making routine tests. The concentric cylinders are of nickel-plated brass which are mounted on a TFE-fluorocarbon base and contained in an 800-mL borosilicate glass beaker. The volume of oil required when using this cell is 500 mL. The cell is suitable for use at voltages up to 5 kV and temperatures up to 150°C.

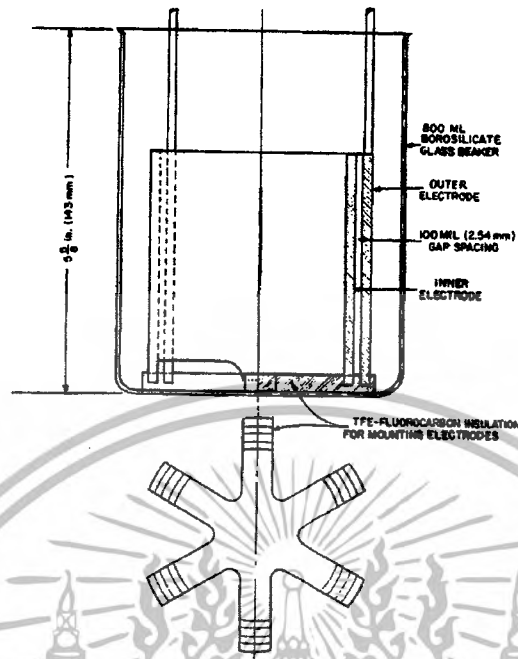


FIG. A1.1 Two-Terminal Cell for Routine Tests

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).



ภาคผนวก ค
มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Designation: D 3300 – 00

Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Oils of Petroleum Origin Under Impulse Conditions¹

This standard is issued under the fixed designation D 3300; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

1. Scope

1.1 This test method covers the determination of the dielectric breakdown voltage of insulating oils in a highly divergent field under impulse conditions.

1.2 The values stated in inch-pound units are to be regarded as the standard.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

D 923 Practices for Sampling Electrical Insulating Liquids²
D 2864 Terminology Relating to Electrical Insulating Liquids and Gases²

2.2 IEEE Documents:

IEEE Standard 4-1995 Techniques for High-Voltage Testing³

3. Significance and Use

3.1 This test method is most commonly performed using a negative polarity point opposing a grounded sphere (NPS). The NPS breakdown voltage of fresh unused oils measured in the highly divergent field in this configuration depends on oil composition, decreasing with increasing concentration of aromatic, particularly polyaromatic, hydrocarbon molecules.

3.2 This test method may be used to evaluate the continuity of composition of an oil from shipment to shipment. The NPS impulse breakdown voltage of an oil can also be substantially lowered by contact with materials of construction, by servicing, and by other impurities. Test results lower than those

expected for a given fresh oil may also indicate use or contamination of that oil.

3.3 Although polarity of the voltage wave has little or no effect on the breakdown strength of an oil in uniform fields, polarity does have a marked effect on the breakdown voltage of an oil in nonuniform electric fields.

3.4 Transient voltages may also vary over a wide range in both the time to reach crest value and the time to decay to half crest or to zero magnitude. The IEEE standard lightning impulse test (see 2.2) specifies a 1.2 by 50- μ s negative polarity wave.

4. Apparatus

4.1 *Impulse Generator*, capable of producing a standard 1.2 by 50- μ s full wave adjustable to positive or negative polarity. The generator shall have a nominal voltage rating of at least 300 kV adjustable in 10-kV steps. Generators having a capability of 1000 W·s (1000 J) at 300 kV have been found satisfactory.

4.2 *Voltage-Control Equipment*—The controls shall include a suitable measuring device for predetermining the crest voltage to within $\pm 5\%$. A voltage stabilizer is desirable at the input to the d-c power supply used for charging the impulse-generator capacitors.

4.3 Electrodes:

4.3.1 The electrodes shall consist of a polished steel or brass sphere of 0.5 in. (12.7 mm) diameter and a steel point. The point may be an ordinary steel phonograph needle with a 0.06 mm $\pm 20\%$ radius of curvature of point or a No. 18 Filter Point needle.⁴ Needles with drawn tips are *not* recommended.

4.3.2 The effect of variation in the radius of curvature of point is subject to further investigation. Both electrodes shall be easily replaceable.

4.4 Test Cell:

4.4.1 The test cell shall be made of a material of high dielectric strength and of such dimensions that the electrical breakdown is restricted to the electrode gap. Test cell materials shall resist attack by, and be insoluble in, any of the cleaning

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D27 on Electrical Insulating Liquids and Gases and is the direct responsibility of Subcommittee D27.05 on Electrical Test.

Current edition approved Dec. 10, 2000. Published February 2001. Originally published as D 3300 – 74. Last previous edition D 3300 – 94.

² *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 10.03.

³ Available from the Institute of Electrical and Electronics Engineers, 445 Hoes Lane, Piscataway, NJ 08855-1331.

⁴ The following steel needle has been found satisfactory for this method: Dean No. 18 Filter Point Needle, available from John Dean, Inc., 20 Mechanic St., Putnam, CT 06260.

or test liquids used. Test cells such as those shown in Fig. 1 and Fig. 2 have been found satisfactory.

4.4.2 The sphere electrode shall be rigidly fixed and the point electrode mounted such that the gap may be adjusted from zero to the required value.

5. Sampling

5.1 Obtain a sample of the liquid to be tested using appropriate ASTM sampling apparatus in accordance with Practices D 923.

6. Adjustments and Care of Electrodes and Test Cell

6.1 Electrode Spacing:

6.1.1 For the cell shown in Fig. 1, reduce the electrode gap to zero spacing. Proceed very carefully to avoid damaging the point. The point of contact shall be established electrically with an ohmmeter. Open the gap to the specified spacing using a dial micrometer or other suitable method.

6.1.2 For the cell shown in Fig. 2, the gap may be set with a go-no-go gage.

6.1.3 The gap spacings shall be 1.0 in. (25.4 mm) for point-to-sphere and 0.15 in. (3.8 mm) for sphere-to-sphere electrode configuration.

6.2 *Cleaning*—Degrease the cell and electrodes by rinsing them with reagent grade petroleum ether, washing with detergent and hot water, rinsing thoroughly in hot tap water, and then rinsing them with distilled water. Dry the cell and hardware in an oven for 2 h at approximately 105 to 110°C, remove, and store in a desiccator until needed.

6.3 *Daily Use*—Use new or polished sphere electrodes at the beginning of each day's testing. Discard the point electrode and replace it after each breakdown; replace the sphere electrodes after every five breakdowns when testing point-to-sphere. More frequent replacement may be necessary when testing sphere-to-sphere. Sphere electrodes may be cleaned and polished for reuse in point-to-sphere testing. However, the use of polished spheres is not recommended for sphere-to-sphere testing. When not in use, clean and store the cell in accordance with 6.2.

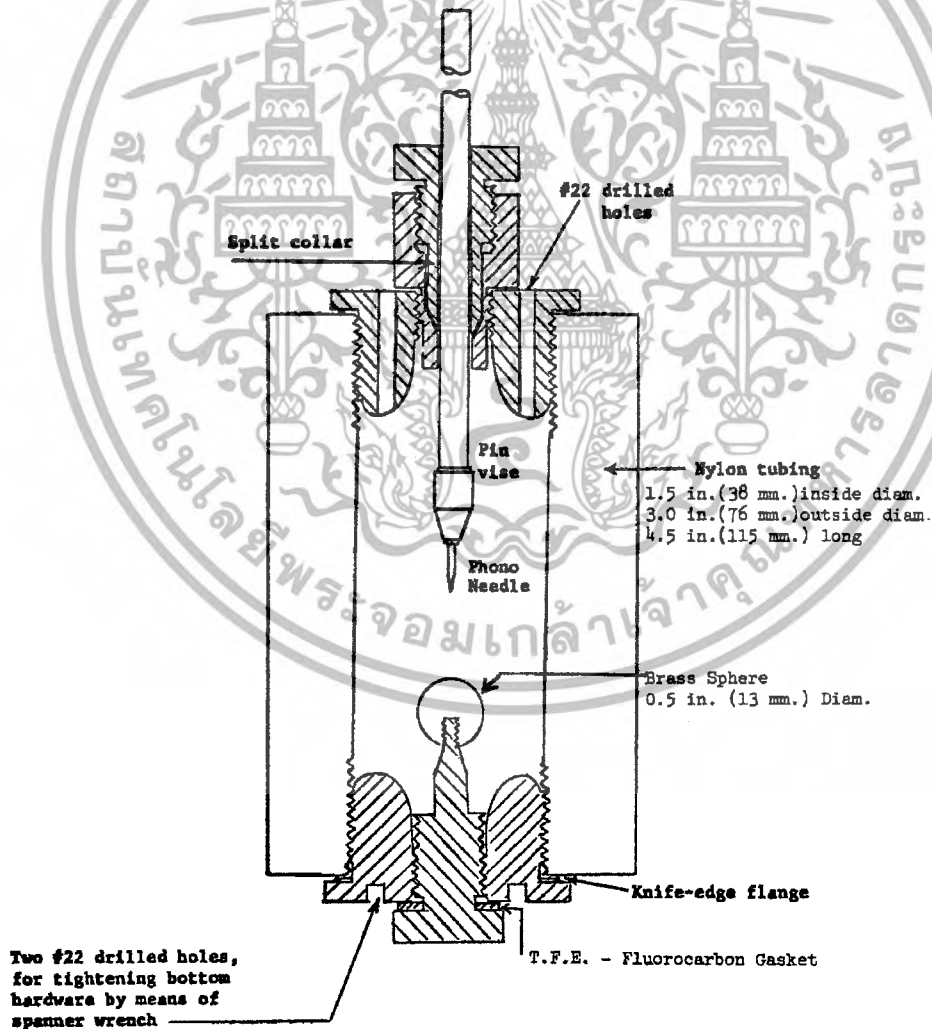


FIG. 1 Test Cell

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

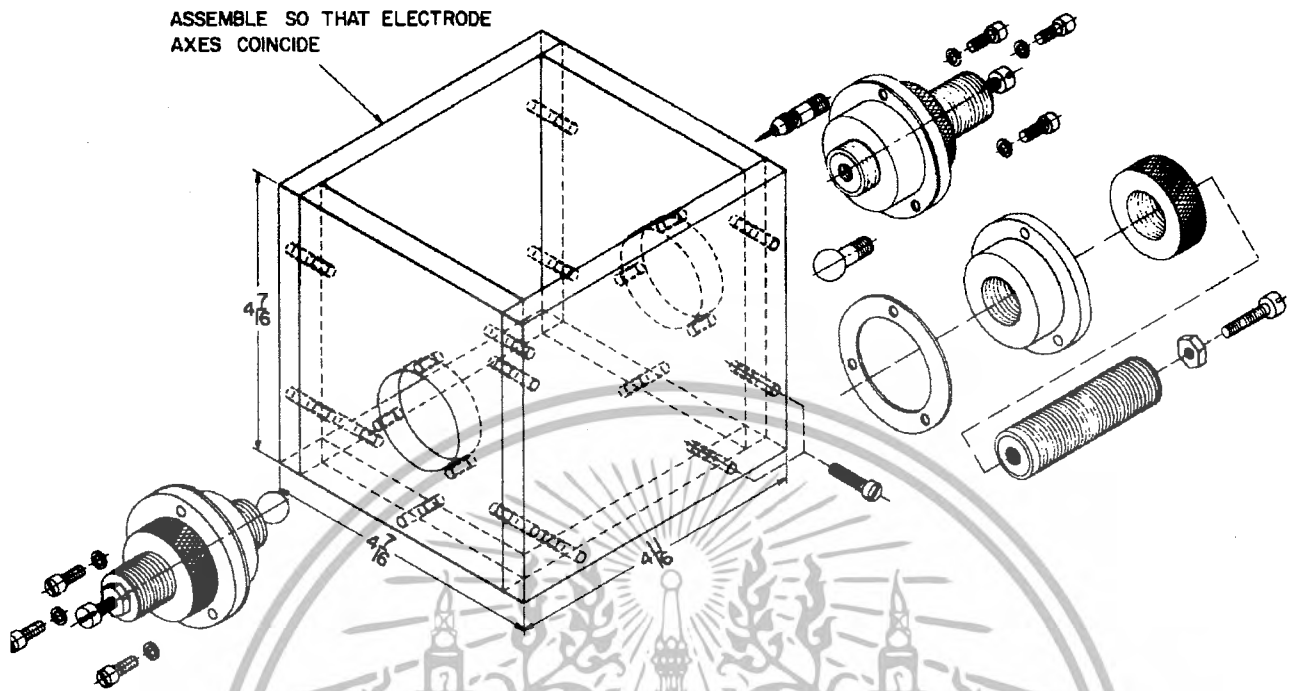


FIG. 2 Test Cell

Test Temperature

7.1 Conduct the tests with the specimen at room temperature as defined in Terminology D 2864. Testing liquids at temperatures lower than that of the room may give variable and unsatisfactory results. Record the test temperature.

Procedure

- 8.1 Set the electrode spacing to the desired value.
- 8.2 Rinse the test cell with a portion of the sample and discard this liquid. Slowly fill the cell with the test liquid, being careful to avoid entraining air bubbles. Allow it to set undisturbed for 2 min prior to testing.
 - 8.2.1 For the test cell shown in Fig. 1, unscrew the upper electrode holding assembly to fill it with the sample oil while holding the cell at an angle to prevent splashing, which could create air bubbles. Screw the top portion down until the metal rings seats firmly.
- 8.3 Connect the fixed electrode to ground and the movable electrode to the impulse generator.
- 8.4 Apply the impulse wave of specified polarity starting approximately 40 kV below the expected breakdown level. Apply three impulse waves at each voltage level. Allow a minimum of 30 s between each test.
- 8.5 Increase the voltage level in steps of 10 kV or less until breakdown occurs, noting the crest voltage level at breakdown. It is necessary to have at least three withstand levels prior to breakdown.
 - 8.5.1 Measure the breakdown voltage using techniques specified in IEEE Standard 4.
- 8.6 After each breakdown, change the point electrode and follow 8.1 and 8.2.

8.7 Make five breakdown tests on five specimens from the same sample. Maintain at least two significant digits in the results.

8.8 Criterion for Statistical Consistency:

8.8.1 Calculate the mean and standard deviation of the five breakdowns as follows:

$$\bar{X} = n^{-1} \left(\sum_{i=1}^n X_i \right) \quad (1)$$

where:

- \bar{X} = mean of the five individual values,
- X_i = i th breakdown voltage, and
- n = number of breakdowns either 5 or 10.

8.8.2 Using the impulse crest voltage breakdown values determined in 8.7, calculate the mean value using the equation in 8.8.1. Determine that the range of the five breakdowns is no greater than 33.3 % of the mean value. If the range is acceptable, report this mean value as the impulse breakdown voltage. If the range exceeds 33.3 % of the mean value of the five breakdowns, then conduct five additional breakdowns and obtain a new mean breakdown value for the ten breakdowns. Determine the range of the ten breakdowns and if the range is less than 54.6 % of the mean of the ten breakdowns, report this mean value as the impulse breakdown voltage. If the allowable range is exceeded, the error is too large. Investigate the cause of the error and repeat the tests.

NOTE 1—The criterion for statistical consistency specified apply only to negative polarity waves if point-to-sphere electrodes are used.

8.9 It may be necessary to partially immerse the test cell in oil to prevent external flashover. This is necessary with the cell shown in Fig. 1.

8.10 If a second insulating liquid is to be tested, thoroughly clean the test cell in accordance with 6.2.

9. Report

9.1 Report the following information:

- 9.1.1 Sample identification,
- 9.1.2 Electrode configuration, polarity, and electrode spacing,
- 9.1.3 Impulse crest voltage for each breakdown (do not discard any data),
- 9.1.4 Wave shape identification,
- 9.1.5 Starting voltage crest level, voltage steps, and highest voltage withstand level,
- 9.1.6 Mean impulse breakdown value,
- 9.1.7 Sample water content,
- 9.1.8 Barometric pressure, and
- 9.1.9 Date of test.

10. Precision and Bias

10.1 This precision statement applies to new oil received from a supplier. Using the point-to-sphere electrode configuration, the following precision statements are applicable to both positive and negative polarity:

10.1.1 *Single Operator Precision*—The single operator % coefficient of variance of a single test result comprised of five breakdowns has been found to be 3.9 %. Therefore, results of two properly conducted tests by the same operator on the same sample should not differ by more than 11 % of the average of the two tests. The maximum allowable range for the series of five breakdowns comprising the test result should be less than 33.3 % of the average of the five breakdowns. In the case where a ten-breakdown average is used, the maximum allowable range of the individual tests comprising the result should be less than 54.6 % of the average of the ten breakdowns.

10.1.2 *Multilaboratory Precision*—The multilaboratory % coefficient of variance has been found to be 5.43 %. Therefore, results of two properly conducted tests in different laboratories on the same sample of oil should not differ by more than 15.4 % of the average of the two results.

10.2 No statement can be made about the bias of this test method because a standard reference material is not available.

11. Keywords

11.1 dielectric breakdown; impulse voltage; insulating oils

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).

ประวัติผู้เขียน



นายชุลสน บุนนueangsook เกิดวันที่ 27 ตุลาคม 2530 ที่จังหวัดขอนแก่น
สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสาธิต
มหาวิทยาลัยขอนแก่น(มอติณแดง)
อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น
มีความสนใจในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า แขนงวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง
ฝึกงานที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย



นายนคเรศ คะโน เกิดวันที่ 4 พฤศจิกายน 2530 ที่จังหวัดน่าน
สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสา
อำเภอเวียงสา จังหวัดน่าน
มีความสนใจในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า แขนงวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงและ
ระบบไฟฟ้ากำลัง
ฝึกงานที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย



นายปิยะพล ถือทอง เกิดวันที่ 10 เมษายน 2531 ที่จังหวัด
ประจวบคีรีขันธ์
สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาจากโรงเรียนพรหมานุสรณ์
อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบุรี
มีความสนใจในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า แขนงวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง
และระบบไฟฟ้ากำลัง
ฝึกงานที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย



นายปิยะพันธ์ ตั้งวรกิจ เกิดวันที่ 7 มกราคม 2531 ที่จังหวัดสงขลา
สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนหาดใหญ่วิทยาลัย
อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา
มีความสนใจในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า แขนงวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง
และระบบไฟฟ้ากำลัง
ฝึกงานที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้