



อะปไซเคอร์แรงดันสูง

(HIGH VOLTAGE CAPACITOR)

สุรชัย นิมละออ 29-1232

(SURACHAI NIMLAOR)

สมเกียรติ วงศ์กุลเสเลิศ 29-1244

(SOMKIAT WONGKUSOLLERT)

อาจารย์ที่ปรึกษา  
อาจารย์นิตศน์ กฤษณจินดา

อาจารย์สมเจตน์ เทียมเมือง

ADVISOR

Mr. NITHAD KRISNACHINDA (B. Eng (KMIT) E. E (Ohio state))

Mr. SOMJET TIEMMUANG (B. Eng (KMIT) M. Eng (Tokai))

วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาตรี

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2532

22.พ.ย.2536

027015

ปริญญาานิพนธ์ ปีการศึกษา 25 32

เรื่อง

HIGH VOLTAGE CAPACITOR

ผู้จัดทำ

นายสุรชัย นิมละอ

29-12 32

นายสมเกียรติ วงศ์กุลเลิศ

29-12 44

.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์นิทัศน์ กฤษณจินดา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์สมเจตน์ เทียมเมือง)

027013

## บทคัดย่อ

Project High Voltage Capacitor นี้เป็น Project ทางด้าน Hardware ที่ได้ทำขึ้นเป็น Project ใหม่ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะสร้าง High Voltage Capacitor ขึ้นใช้งานเอง ด้วยวัสดุและอุปกรณ์ที่หาได้ภายในประเทศ แทนที่จะต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศในราคาที่สูง

High Voltage Capacitor ที่จะทำขึ้นนี้เป็นแบบที่ใช้แผ่นอลูมิเนียมบางๆ

(Aluminum Foil) เป็นอิเล็กโทรด วางทับบนสารไดอิเล็กทริกหลายๆชั้น ซึ่งจะต้องเป็น

กระดาษหรือพลาสติก แล้วชุบด้วยของเหลวที่เป็นสารอิมเพกแนนต์

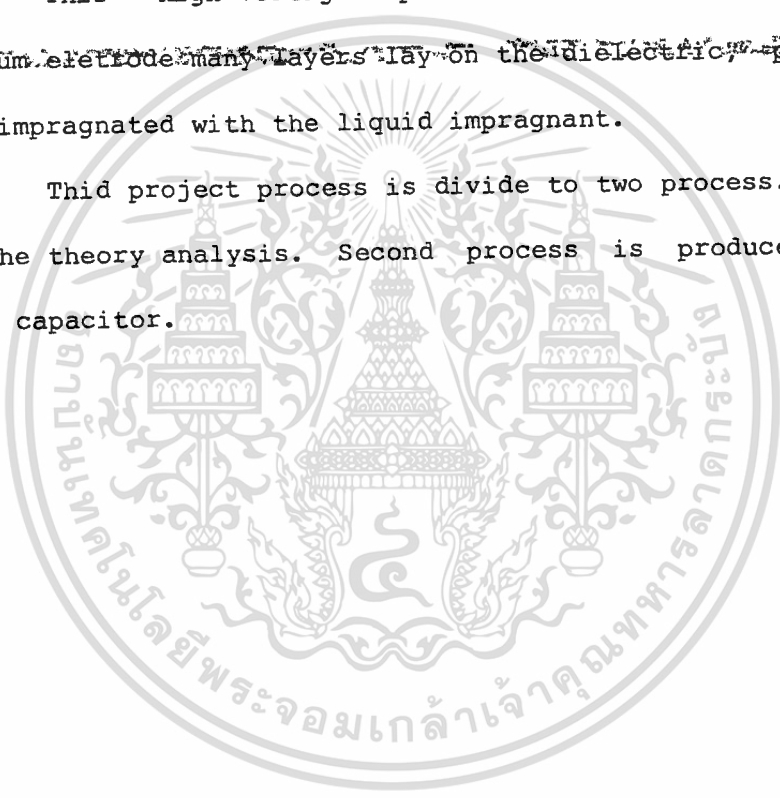
ขั้นตอนในการดำเนินงานของ Project นี้แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกจะเป็นการศึกษาทางด้านทฤษฎี โดยรวบรวมจากหนังสือเอกสารและรายงานต่าง รวมถึงการออกแบบโครงสร้าง และส่วนประกอบต่างๆของตัวอะแดปเตอร์ ขั้นตอนที่สองจะเป็นการสร้างและประกอบส่วนต่างๆให้ได้ตามความต้องการ

### ABSTRACT

The new project, high voltage capacitor, hardware concerned object to make high voltage capacitor by our country material instead of buying with high cost from the foreign country.

This high voltage capacitor consists of the plate thin aluminum electrode many layers lay on the dielectric, paper or plastic and impregnated with the liquid impregnant.

This project process is divide to two process. First process is the theory analysis. Second process is produce for high voltage capacitor.



## สารบัญ

บทคัดย่อ		1
บทที่ 1	บทนำ	5
บทที่ 2	ลักษณะสมบัติของสารไดอิเล็กตริก	6
	2.1 ความต้านทาน	6
	2.2 เพอmittivity	7
	2.3 แฟคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก	8
	2.4 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก	9
	2.5 ฉนวนเหลว	10
บทที่ 3	คุณลักษณะและส่วนประกอบของกะแปซิเตอร์แรงสูง	13
	3.1 กะแปซิเตอร์แรงสูง	14
	3.2 โครงสร้างของกะแปซิเตอร์	16
	3.2.1 อิเล็กโตรด	16
	3.2.2 มุขชิง	17
	3.2.3 discharge resistors	17
	3.3 คุณสมบัติของกะแปซิเตอร์แรงสูง	20
บทที่ 4	การออกแบบและสร้างกะแปซิเตอร์	22
	4.1 การออกแบบกะแปซิเตอร์	22
	4.2 การคำนวณ	23
บทที่ 5	การทดสอบและการประเมินผล	26
	5.1 บทนำ	26
	5.2 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตามกำหนดของ	

5.3	การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า	27
5.4	การทดสอบการใช้งาน	30
5.5	การทดสอบหาค่าคะแพซิแตนซ์	31
<b>บทที่ 6</b>	<b>สรุป วิจารณ์และข้อเสนอแนะ</b>	<b>37</b>
	กิตติกรรมประกาศ	38
	เอกสารอ้างอิง	39
<b>ภาคผนวก</b>		<b>40</b>
-	มาตรฐาน IEC Publ. 296	
-	มาตรฐาน IEC Publ. 156	
-	JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD	
-	คุณลักษณะของน้ำมันหม้อแปลง CALTEX	

## บทที่ 1

### บทนำ

จุดประสงค์หลักของการทำ project high voltage capacitor นี้คือ พยายามที่จะสร้างตัวค้ำเก็บประจุแรงดันสูง ที่ใช้ในด้านอุตสาหกรรมขึ้นใช้เอง เนื่องจากว่าในปัจจุบันนี้ ตัวค้ำเก็บประจุแรงดันสูงที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไป จะต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ และมีราคาแพง

เมื่อพิจารณาตรงจุดนี้... ผู้สร้างจึงได้ออกแบบ และสร้างตัวค้ำเก็บประจุแรงดันสูงขึ้น ซึ่งชิ้นส่วนและวัสดุต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างตัวค้ำเก็บประจุนี้ เป็นวัสดุที่หาได้ภายในประเทศทั้งสิ้น ก่อนที่จะนำวัสดุต่างๆ ที่หามาได้ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ทำตัวค้ำเก็บประจุ จะต้องมีการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุต่างๆ เสียก่อน ยกตัวอย่างเช่น การทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของวัสดุที่ใช้ทำเป็นสารไดอิเล็กตริก เพื่อให้แน่ใจว่าจะนำวัสดุนี้มาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อมูลและเนื้อหาเกี่ยวกับตัวค้ำเก็บประจุแรงดันสูงนี้ พร้อมทั้งข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบของสารฉนวนที่ใช้ ได้ถูกบรรจุลงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ซึ่งคงจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับผู้สนใจ จะศึกษาค้นคว้าหรือทำการวิจัยทางด้านนี้ เพื่อทำการพัฒนาอุปกรณ์ทางด้านไฟฟ้าแรงสูง ให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นต่อไปอีก

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์นี้ แบ่งออกเป็น 6 บท ซึ่งในแต่ละบทมีเนื้อหาสาระดังนี้

- บทที่ 2 กล่าวถึง ลักษณะสมบัติของสารไดอิเล็กตริก
- บทที่ 3 กล่าวถึง คุณลักษณะและส่วนประกอบของค้ำเก็บประจุแรงสูง
- บทที่ 4 กล่าวถึง การออกแบบและสร้างค้ำเก็บประจุ
- บทที่ 5 กล่าวถึง การทดสอบและการประเมินผล
- บทที่ 6 กล่าวถึง สรุป วิจาร์ณ และข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2

### ลักษณะสมบัติของสารไดอิเล็กตริก

ไดอิเล็กตริกก็คือ ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้ทำหน้าที่คั่นระหว่างอิเล็กโตรด เพื่อกันหรือให้  
ทนแรงดันได้สูงขึ้นไปกว่าก๊าซรวมทั้งอากาศด้วย เช่น คั่นระหว่างแผ่นโลหะของคาปาซิเตอร์ คั่น  
ระหว่างตัวนำในกับตัวนำนอกของเคเบิล คั่นระหว่างขดลวดกับแกนเหล็กในหม้อแปลง เป็นต้น

ลักษณะที่สำคัญที่เป็นตัวบ่งบอกคุณสมบัติและคุณภาพของไดอิเล็กตริกมี 4 ประการ คือ

1. ความต้านทาน
2. เพอร์มิตทิวิตีหรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
3. แฟคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก
4. ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก

#### 2.1 ความต้านทาน

ไดอิเล็กตริกหรือฉนวนไฟฟ้าที่สมบูรณ์แล้ว จะต้องไม่นำกระแสเลยทั้งสิ้นถ้าหากได้รับ  
แรงดันกระแสตรง นั่นคือจะไม่มีสภาพนำไฟฟ้าอยู่เลย หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ สารฉนวนนั้น  
มีค่าความต้านทานสูงเป็นอนันต์ แต่ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในทางปฏิบัตินั้น มักจะนำกระแสแต่มีค่า  
น้อยมากเมื่อป้อนแรงดันกระแสตรง นั่นแสดงว่าสารฉนวนไฟฟ้ามียุคค่าความต้านทานไม่สูงเป็นอนันต์  
หากแต่มีค่าสูง ที่วัดค่าความต้านทานได้ยิ่งสูงก็แสดงว่าฉนวนนี้มีคุณภาพการฉนวนยิ่งดี

เมื่อนำฉนวนไปคั่นระหว่างอิเล็กโตรดที่ป้อนแรงดันกระแสตรงเป็นเวลานานจนกระทั่ง  
อยู่ตัว จะมีกระแสไหลผ่านฉนวนนั้นแต่น้อยเรียกว่า กระแสรั่วหรือกระแสค้าง กระแสรั่วที่ไหล  
ผ่านฉนวนนี้แบ่งออกเป็น 2 ทาง คือ ทางหนึ่งไหลผ่านเนื้อฉนวนใน เนื่องจากฉนวนมีสภาพ  
นำอยู่บ้างดังกล่าวแล้ว ส่วนอีกทางหนึ่งไหลผ่านตามผิวฉนวน เนื่องจากผิวมีสภาพนำ เนื่องจาก  
มีสิ่งเปราะระเหินและความชื้นที่ผิว ด้วยเหตุนี้เองการวัดค่าความต้านทานของฉนวนจึงแยกเป็น  
ความต้านทานเชิงปริมาตร (volume resistance) และความต้านทานเชิงผิว (surface  
resistance)

ค่าความต้านทานของไดอิเล็กตริกอาจคำนวณหรือวัดได้เช่นเดียวกับความต้านทานของ

ตัวนำ ถ้าทราบความต้านทานจำเพาะ ( $\rho$ ) ความหนา ( $a$ ) พื้นที่ภาคตัด ( $A$ ) ของไดอิเล็กตริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
เช่น ในกรณีแผ่นไดอิเล็กตริกระหว่างแผ่นระบายความร้อน ความต้านทานของฉนวนจะหาได้จาก  
ไม่ว่าที่เริ่มต้นที่ทางสน อีกที่ห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R = \frac{(\rho)d}{A}$$

## 2.2 เพอร์มิตติวิตี (PERMITTIVITY)

เพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์มีสัญลักษณ์เป็น  $\epsilon_r$  ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างพลังงานสะสมในวัสดุไดอิเล็กตริกต่อพลังงานสะสมในอากาศ ดังตารางที่ 2.1 แสดงค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของวัสดุไดอิเล็กตริก

ตารางที่ 2.1 ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ใช้เป็นไดอิเล็กตริกของระบบแบริเตอร์

วัสดุ	ค่าคงตัวของไดอิเล็กตริก
อากาศ	1.00
เซรามิก	3.000.00
กระดาษที่ชุบด้วยสาร PCB	6.50
แก้ว	7.00
น้ำมันแร่	2.13
ไมกา	5.60
พลาสติกโพลีโพรพิลีน	2.20

ถ้าให้เพอร์มิตติวิตีของอากาศเท่ากับ 1 ค่าเพอร์มิตติวิตีของวัสดุอื่นๆที่ใช้เป็นไดอิเล็กตริกก็สามารถหาได้ แต่ในการคำนวณต้องเทียบกลับไปสู่สุญญากาศ ค่าเพอร์มิตติวิตีที่สุญญากาศ (permittivity of freespace) มีสัญลักษณ์เป็น  $\epsilon_0$  คำนี้อาจสามารถคำนวณได้จาก ทฤษฎีสถาน (field theory) ดังนี้

$$\begin{aligned} \epsilon_0 &= \frac{10^{-9}}{36} \\ &= 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นคุณสมบัติของสารไดอิเล็กตริกสามารถแสดงในเทอมของเพอร์มิตทิวิตี้สัมบูรณ์  
(absolute permittivity) ได้ดังนี้

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

โดยที่

$\epsilon$  = เพอร์มิตทิวิตี้สัมบูรณ์

$\epsilon_0$  = เพอร์มิตทิวิตี้ของสูญญากาศ

$\epsilon_r$  = เพอร์มิตทิวิตี้สัมพัทธ์

### 2.3 แพลเตอร์พลังงานสูญเปล่าไดอิเล็กตริก

พลังงานสูญเปล่าในไดอิเล็กตริกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ พลังงานสูญเปล่าเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าของไดอิเล็กตริกที่มีค่าความต้านทานไม่ถึงอนันต์ และอีกส่วนหนึ่งเป็นพลังงานสูญเปล่าเนื่องจากโพลาริเซชันของไดอิเล็กตริก จัดเป็นพลังงานสูญเปล่าทางกลไฟฟ้า เพราะโมเมนต์ของไดอิเล็กตริกต้องกลับขั้วไปมาตามการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า เช่น แรงดันกระแสสลับ

ถ้าป้อนแรงดันคลื่นรูปไซน์ให้กับคะแพซิเตอร์ที่สมบูรณ์ กระแสที่ไหลผ่านคะแพซิเตอร์ จะมีเฟสหน้าหน้าแรงดันเป็นมุม 90 องศา

ถ้าให้  $U = U_m \sin \omega t$

$$i = i_m \cos \omega t$$

$$I_{\text{eff}} = I_m \cos \phi$$

เมื่อ  $U = U_m \sin \omega t$  เป็นค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันที่ป้อน

ในทางปฏิบัติกระแสที่ไหลในคะแพซิเตอร์ จะนำหน้าแรงดันน้อยกว่า 90 องศา ดัง

รูป 2.1  $\phi$  เป็นมุมเฟสของคะแพซิเตอร์ ดังนั้นเพาเวอร์แฟคเตอร์ =  $\cos \phi$  หรืออีกทางหนึ่ง  
=  $\sin \phi$

คือ  $UI \cos \phi$

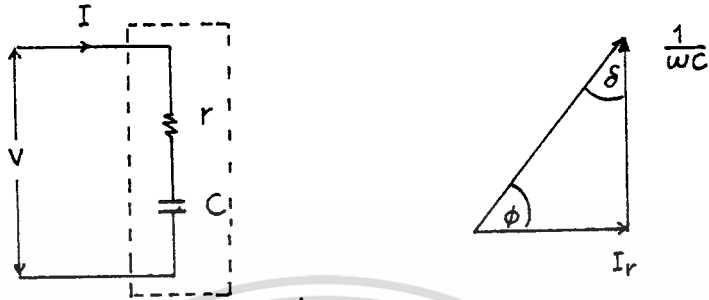
$$UI \sin \phi$$

แต่  $\delta = 90^\circ - \phi$



$\delta$  = มุมพลังงานสูญเสียในไดอิเล็กตริก

$\tan \delta$  = แฟคเตอร์พลังงานสูญเสียในไดอิเล็กตริก



รูปที่ 2.1

### 2.4 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก (DIELECTRIC STRESS)

เมื่อป้อนแรงดันคร่อมวัสดุฉนวนที่มีความหนาค่าหนึ่ง จะมีแรงดันหนึ่งซึ่งวัสดุฉนวนทนไม่ได้ คือ กระแสปริมาณมากสามารถไหลผ่านวัสดุฉนวนนี้ได้ (เกิดเบรคดาวน์) ค่าแรงดันนี้เรียกว่า ความคงทนไดอิเล็กตริก (dielectric strength)

คำว่า ความเข้มสนามไฟฟ้า (electric field intensity) หรือความเครียดของไดอิเล็กตริก (dielectric stress) หรือเกรเดียนตักย์ (potential gradian) มีความหมายเหมือนกัน และสามารถหาได้ดังนี้

$$\text{Dielectric stress} = \frac{v}{d}$$

โดยที่  $v$  = แรงดันคร่อมไดอิเล็กตริก

$d$  = ความหนาของไดอิเล็กตริก

ค่าความคงทนของไดอิเล็กตริกสำคัญมากในการออกแบบเคเบิ้ลไฮโวลต์ ค่านี้ในหน่วย SI จะเป็น เมกะโวลต์/เมตร ซึ่งเท่ากับ โวลต์/ไมโครเมตร ( $V/\mu m$ )

ตารางที่ 2.2 แสดงความเครียดของไดอิเล็กตริกของวัสดุไดอิเล็กตริก

วัสดุ	ค่าความเครียดใช้งาน (Mv/ม.) V.M.S.	ค่าความเครียดของไดอิเล็กตริก (Mv/m) d.c.
อากาศ	2 - 3	4 - 9
เซรามิก	0.35	9.4
กระดาษที่ชุบด้วยสาร PCB	16 - 18	200 - 220
น้ำมันแร่	16 - 18	76.50
ไมกา	80 - 100	150.00
พลาสติกโพลีโพรพิลีน	48 - 52	650.00

### 2.5 ฉนวนเหลว

ของเหลวใดๆ สามารถนำมาใช้เป็นฉนวนได้ทั้งนั้น ถ้าหากว่าของเหลวนั้นมีความต้านทานสูงมากพอ และไม่เปลี่ยนแปลงสภาพทางฟิสิกส์ ในช่วงเวลาที่นานพอสมควร แต่การที่จะให้มีความมั่นใจในของเหลวที่จะนำไปใช้ในระบบแรงดันสูงได้อย่างปลอดภัย ไม่เกิดความผิดพลาด มีอายุการใช้งานได้นานและถูกหลักการประหยัด จึงมีความจำเป็นและสำคัญอย่างยิ่ง ที่จะต้องรู้ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของของเหลวนั้นก่อนนำไปใช้งาน

ฉนวนเหลวที่นำมาใช้ เป็นฉนวนในระบบและอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ส่วนใหญ่จะเป็นประเภทไฮโดรคาร์บอน เช่น น้ำมันปิโตรเลียม (น้ำมันหม้อแปลง) ซึ่งรู้จักและใช้กันมาเป็นเวลานาน นอกจากนั้นยังมีฉนวนเหลวสังเคราะห์ เช่น อีเนอร์ทีน ซิลิโคน กลอรีเนท ซึ่งเหมาะสมสำหรับใช้เป็นฉนวนเฉพาะกรณี ลักษณะสมบัติที่ต้องการของฉนวนเหลว สำหรับฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าโดยทั่วไป สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

1. คุณสมบัติต้านฟิสิกส์
2. คุณสมบัติต้านเคมี
3. คุณสมบัติต้านไฟฟ้า

ซึ่งขอบเขตและข้อจำกัดลักษณะสมบัติของฉนวนเหลว ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยประการใดๆ ที่จะนำไปใช้ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า เซอร์คิตเบรคเกอร์ เคเบิล คะแปซิเตอร์ กระดาษชุบน้ำมัน ไม่ว่ากรณีนี้: ฟังสน อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยหลักการแล้ว ของเหลวควรจะทำหน้าที่การฉนวนได้ดีกว่าฉนวนก๊าซ และฉนวนแข็ง ที่จัดว่าดีกว่าก๊าซเพราะมีความหนาแน่นกว่าก๊าซ ย่อมมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่า ก๊าซ ที่จัดว่าดีกว่าฉนวนแข็งเพราะว่าฉนวนเหลวสามารถกลับคืนสู่สภาพการเป็นฉนวนเองได้ หลังจากทีติสซาร์จ (discharge) ผ่านพ้นไปแล้ว ข้อดีอีกประการหนึ่งของฉนวนเหลวก็คือ สามารถถ่ายเทระบายความร้อนได้ดี อย่างไรก็ตามแม้ว่าฉนวนของเหลวจะมีข้อดีหลายประการดังกล่าวก็ตาม จะพบว่า ฉนวนเหลวมีการใช้กันน้อยกว่าฉนวนก๊าซ และฉนวนแข็ง เพราะฉนวนเหลวที่ใช้กันอยู่ในเชิงการค้าซึ่งมักจะไม่บริสุทธิ์แท้ ทำให้มีค่าแรงดันเบรคดาวน์ต่ำ

ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของ CALTEX TRANSFORMER OIL

คุณสมบัติ	น้ำมันหม้อแปลง CALTEX TRANSFORMER OIL
Corrosive Sulfur ,ASTMD 1275	Pass
ความถ่วงจำเพาะ ,Kg/litre ,15°C	0.884
จุดติดไฟ (flash point), °C	147
Interfacial Tension Dynos/cm ,25 °C	40
จุดแข็งตัว (pour point), °C	-42
ความหนืด (viscosity) cSt , 0 °C	58.6
cSt , 0 °C	8.68
Water Content , ASTMD 1533 mg/Kg	25

ตารางที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ CALTEX TRANSFORMER OIL

คุณสมบัติ	น้ำมันหม้อแปลง CALTEX TRANSFORMER OIL
<p>ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า , Kv</p> <p>Disk Electrodes (ASTM D877)</p> <p>VDE Electrodes (ASTM D1816)</p> <p>1.02 mm gap</p> <p>2.04 mm gap</p> <p>ตัวประกอบกำลัง</p> <p>ที่ 25 °c</p> <p>ที่ 100 °c</p>	<p>30 min</p> <p>28 min</p> <p>56 min</p> <p>0.05 max</p> <p>0.03 max</p>

คุณลักษณะและส่วนประกอบของกะแปซิเตอร์แรงสูง

กะแปซิเตอร์มีใช้กันมาหลายสิบปีแล้ว โดยในช่วงแรกส่วนมากจะใช้ในวงจรไฟฟ้าสื่อสาร โทรศัพท โทรเลข ซึ่งเป็นระบบไฟฟ้าที่มีแรงดันต่ำและความถี่สูง กะแปซิเตอร์แบบนี้ใช้แผ่นดีบุก(tin foil)เป็นอิเล็กโตรด และมีกระดาษเป็นไดอิเล็กตริกซุบ(impregrated)ขี้ผึ้งแล้ววางซ้อนสลับกัน เมื่อมีการนำกะแปซิเตอร์แบบนี้มาใช้กับระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งมีแรงดันสูงและความถี่ต่ำปรากฏว่ากะแปซิเตอร์จะเกิดระเบิดขึ้นบ่อยๆ ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการไออินซูลันที่ซอซีว่างช่องขี้ผึ้ง จึงได้มีการนำน้ำมันแร่(mineral oil) มาใช้เป็นสารซุบแทนขี้ผึ้ง ต่อมาก็มีการนำเอาแผ่นอะลูมิเนียม(alluminium foil) ซึ่งมีความบางมาก(ความหนาเป็นไมโครเมตร) มาใช้เป็นอิเล็กโตรด และกระดาษที่ใช้ก็ทำให้มีคุณภาพดีขึ้น ในการผลิตแทนที่จะเป็นแบบสลับกันก็เปลี่ยนมาใช้แบบขดทรงกระบอก(cylindrical winding) แทน ซึ่งทำให้การผลิตทำได้สะดวกขึ้น

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1920 ถึง ค.ศ. 1940 ได้มีการพัฒนาวัสดุและขบวนการผลิตกะแปซิเตอร์อย่างมาก กะแปซิเตอร์แบบtank type ซึ่งมีcylindrical element จุ่มอยู่ในน้ำมัน ได้กลายเป็นมาตรฐาน ตอนแรกก็ใช้ในระบบไฟฟ้าดันแรงต่ำ ต่อมาได้มีการใช้series - parallel group ทำให้สามารถผลิตชนิดที่ใช้กับแรงดันสูงขึ้นเป็น 6.6 kv . 11 kv และ 33 kv ได้

ปี ค.ศ. 1950 ได้มีการนำสารสังเคราะห์ชนิดหนึ่ง คือ polychlorinated biphenyl (PCB) มาใช้เป็นอิมเพกแนนต์(impregnant) สาร PCB นี้ มีข้อดี คือไม่ติดไฟ มีค่าเพอร์มิตติวิตีและความเครียดไดอิเล็กตริกสูง ทำให้กะแปซิเตอร์ที่ทำด้วยกระดาษซุบสาร PCB จึงได้รับความนิยมใช้เป็นอิมเพกแนนต์อย่างกว้างขวาง และเป็นผลให้มีการใช้กะแปซิเตอร์แบบนี้แทนกะแปซิเตอร์แบบที่ใช้น้ำมันเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

จนถึงปี ค.ศ. 1975 กะแปซิเตอร์เกือบทั้งหมดที่ทำการผลิตขึ้นใช้ เป็นแบบที่ซุบด้วยสาร PCB แต่ในระหว่างนี้เองได้มีเสียงคัดค้านการใช้สาร PCB เนื่องจากมันเป็นสารที่ไม่สลายตัวโดยธรรมชาติ เป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ในปี ค.ศ. 1978 การผลิตกะแปซิเตอร์เนื่องจากมีเสียงคัดค้านมากขึ้นทุกที ดังนั้นในปี ค.ศ. 1978 การผลิตกะแปซิเตอร์ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบที่ใช้สาร PCB เป็นอิมเพกแนนต์ จึงได้ยุติลงในหลายประเทศ เช่น อังกฤษ อเมริกาและญี่ปุ่น เมื่อมีการยกเลิกการใช้สาร PCB ผู้ผลิตจึงต้องแสวงหาอิมเพกแนนต์อื่นที่จะนำมาใช้แทนสาร PCB ของเหลวใหม่นี้เรียกว่า พวกร NON-PCB ซึ่งมันไม่เป็นอันตรายต่อธรรมชาติและมนุษย์

### 3.1 คะแปซิเตอร์แรงสูง (High voltage capacitor)

กะแปซิเตอร์แรงสูงในปัจจุบันมีหลายชนิด แตกต่างกันไปตามสารไดอิเล็กตริกที่ใช้สร้าง ซึ่งสารไดอิเล็กตริกได้พัฒนาตามเทคโนโลยี ทำให้มีค่าเพอร์มิตติวิตีและค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นเรื่อยๆ

กะแปซิเตอร์แรงสูงที่ใช้กันทั่วไป แบ่งได้เป็น

1. คะแปซิเตอร์แบบกระดาษ
2. คะแปซิเตอร์แบบก๊าซอัดความดัน
3. คะแปซิเตอร์แบบน้ำมันหม้อแปลง

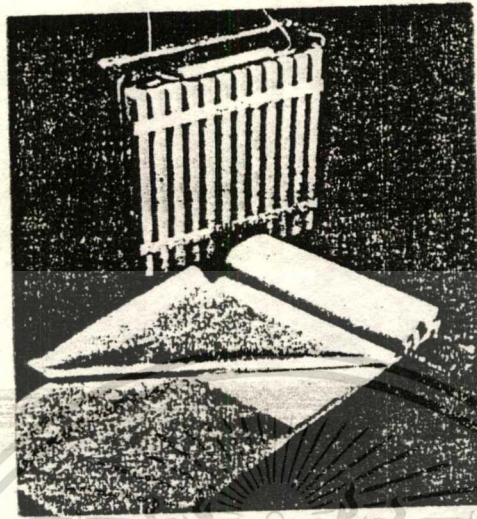
#### 1. คะแปซิเตอร์แบบกระดาษ

เป็นกะแปซิเตอร์ที่สร้างขึ้น โดยใช้กระดาษเป็นสารไดอิเล็กตริก และใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า คะแปซิเตอร์แบบกระดาษจะใช้ในช่วงกะแปซิแตนซ์ 0.0001-315 F และใช้ในระดับแรงดันไฟฟ้าสลับตั้งแต่ 100 โวลต์ ถึง 100 กิโลโวลต์ และระดับไฟฟ้าตรง 110 โวลต์ ถึง 13.8 กิโลโวลต์

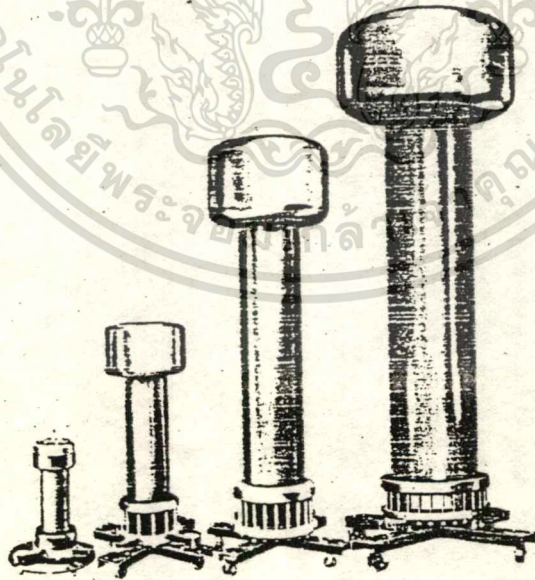
กะแปซิเตอร์แบบกระดาษสามารถใช้ในระดับแรงดันที่สูงกว่านี้ ได้โดยการใช้ร่วมกับสารไดอิเล็กตริกชนิดเหลวหรือสารไดอิเล็กตริกชนิดแข็ง เช่น การใช้กระดาษชุบน้ำมัน จะทำให้ได้ค่ากะแปซิแตนซ์ที่สูงขึ้น และแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 100 กิโลโวลต์

#### 2. คะแปซิเตอร์แบบก๊าซอัดความดัน (Compressed gas capacitor)

กะแปซิเตอร์แรงสูงแบบก๊าซอัดความดันนี้ ได้จากสนามไฟฟ้าของอิลโคโตรดแบบช้อมแกนร่วม (Coaxial cylinder configuration) เพื่อให้มีขนาดเล็ก แต่สามารถทนแรงดันได้สูงๆ จึงจำเป็นต้องมีการฉนวนด้วยก๊าซอัดความดันสูง ก๊าซที่ใช้กันได้แก่  $N_2$ ,  $CO_2$  ที่ความดัน 10-20 bars หรือ  $SF_6$  ที่ความดัน 1-3 bars



รูปที่ 3.1 คละแปซิเตอร์แบบกระดาษ



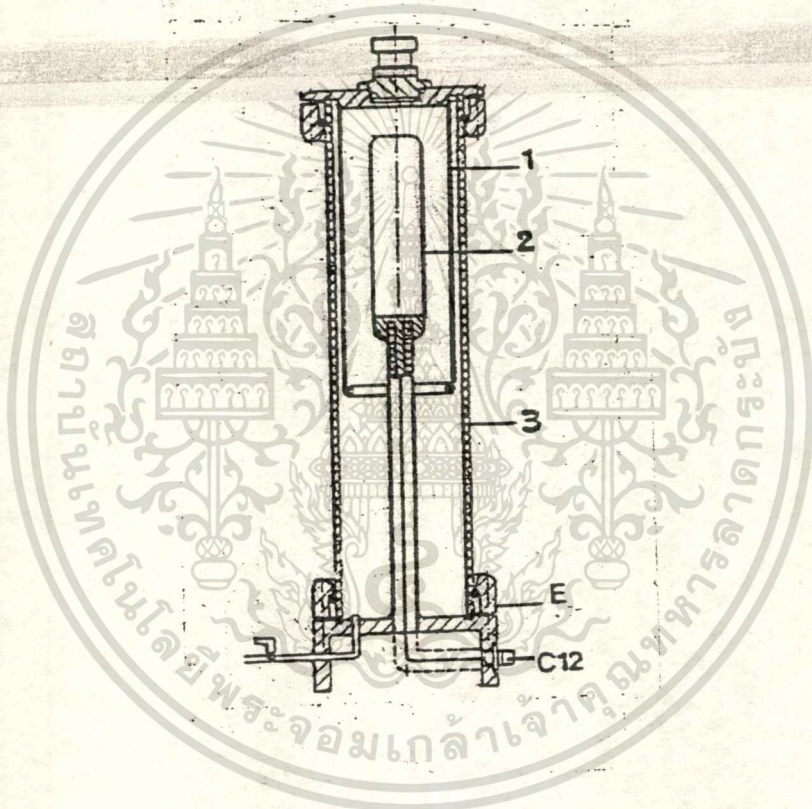
รูปที่ 3.2

คละแปซิเตอร์แบบกาชอัดความดันนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. กะแปซิเตอร์แบบน้ำมันหม้อแปลง

กะแปซิเตอร์แบบนี้เหมือนกับกะแปซิเตอร์แบบกาซอัดความดัน ต่างกันที่สารไดอิเล็กตริกที่ใช้ คือ น้ำมันหม้อแปลง กะแปซิเตอร์แบบนี้จะมีค่ากะแปซิแตนซ์มากกว่ากาซ เพราะมีค่าเพอร์มิตติวิตีมากกว่าในขนาดอิเล็กโตรดแบบเดียวกัน



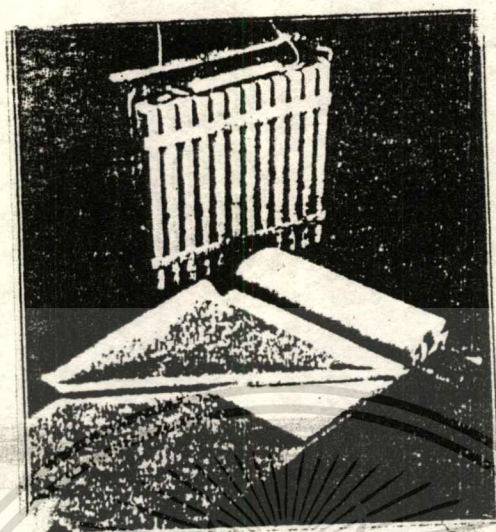
รูปที่ 3.3 กะแปซิเตอร์แบบน้ำมันหม้อแปลง

### 3.2 โครงสร้างของกะแปซิเตอร์

#### 3.2.1 อิเล็กโตรด (electrode)

ในระยะแรกมีการนำเอาแผ่นดีบุก หรือตะกั่วมาใช้เป็นอิเล็กโตรด แต่ต่อมามีการใช้แผ่นอลูมิเนียมซึ่งมีความบางกว่า และสามารถฉนวนเป็นพับได้ ทำให้สามารถลดขนาดของกะแปซิเตอร์ลงได้ แผ่นอลูมิเนียมนี้มีความบางถึง 0.00025-0.00035 นิ้ว และข้อได้เปรียบอีกข้อหนึ่งของแผ่นอลูมิเนียม คือ จะไม่ทำปฏิกิริยากับสารอิมเพรกแนนต์ ที่บรรจุอยู่ในตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้เพื่อการค้า  
 กะแปซิเตอร์ ดังนั้น กะแปซิเตอร์แรงสูงส่วนใหญ่จะใช้แผ่นอลูมิเนียมเป็นแผ่นอิเล็กโตรด  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงถึงแผ่นอิเล็กโทรดและการประกอบ

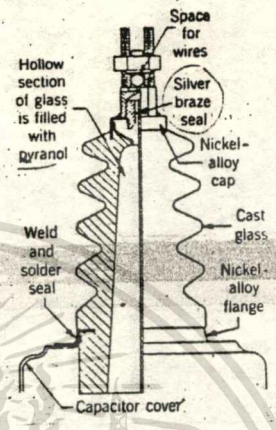
### 3.2.2 บุชชิ่ง (BUSHING)

บุชชิ่งที่นิยมใช้กันทั่วไป จะเป็นบุชชิ่งที่ทำมาจากกระเบื้อง และจะมีฐานที่เป็นโลหะเพื่อที่จะทำการบัดกรีให้ติดกับตัวถังได้ ตัวบุชชิ่งที่เป็นกระเบื้องนี้ จะทาสีเคลือบไว้ และจะทาสารละลายที่มีส่วนผสมของพลาตินัม และโลหะอื่นๆ หลังจากนั้นก็จะนำไปอบในเตาอบ เสร็จแล้วก็จะทาสีที่มีส่วนผสมของดีบุกอีกทีหนึ่ง เพื่อเตรียมที่จะเชื่อมเข้ากับฐานและปลายด้านบนที่เป็นโลหะ

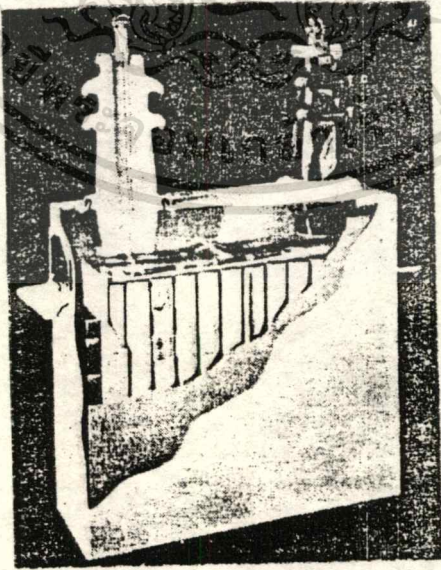
ในทางการค้าแล้ว ค่ะแปซิเตอร์ที่มีขนาดใหญ่จะใช้ประกบเป็นตัวกันรั่วของการใส่บุชชิ่ง แต่ก็ยังมีโอกาสที่จะรั่วได้ เนื่องจากอุณหภูมิภายนอกและการขนย้าย ส่วนแบบที่ใช้การบัดกรีเชื่อมติดกับตัวถังนั้นจะสามารถแก้ปัญหานี้ได้

### 3.2.3 DISCHARGE RESISTORS

discharge resistors จะต่ออยู่อย่างถาวรระหว่างตัวคะแปซิเตอร์ย่อยๆ ทั้งนี้เพื่อจะถ่ายเทประจุออกตัวคะแปซิเตอร์ ในขณะที่ไม่ได้ต่ออยู่กับแหล่งจ่ายพลังงาน ตัว discharge resistors นี้จะถูกสร้างขึ้นเป็นพิเศษ สำหรับการประยุกต์ใช้งานกับตัวคะแปซิเตอร์



รูปที่ 3.5 แสดงถึงบushing และภาพตัดแสดงรายละเอียด

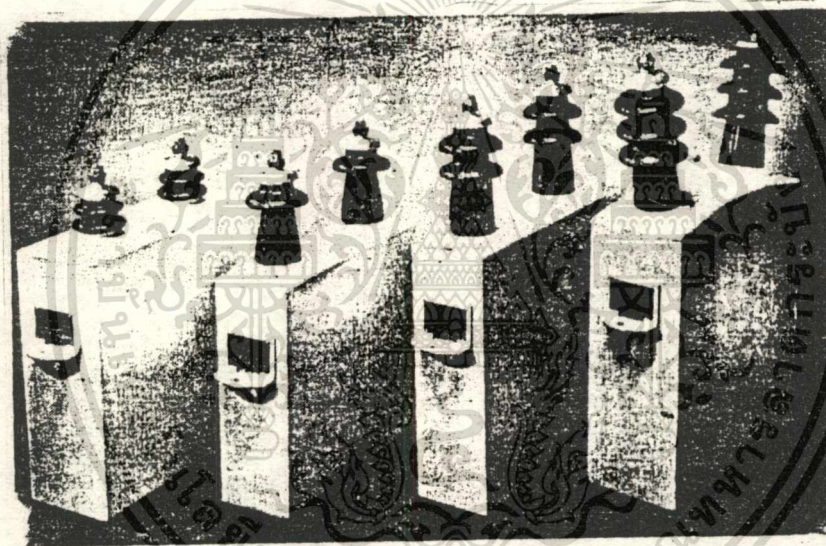


รูปที่ 3.6 แสดงถึงส่วนประกอบภายในของตัวคะแพซิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.4 ตัวถัง (CASE )

ตัวถังของคะแพซิเตอร์ จะเป็นตัวถังที่ปิดสนิท ป้องกันน้ำและอากาศรวม ทั้งสิ่งแปลกปลอมจากภายนอก และความชื้น ซึ่งแบบต่างๆ ของตัวถังขึ้นอยู่กับการผลิต แต่พอ จะแบ่งออกได้เป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ แบบที่ใช้ไนรุ่ม และเป็นแบบโวลท์เตจต่ำ ตัวถังจะ ประกอบด้วย แผ่นเหล็กบางที่บัดกรีด้วยตะเข็บคู่ ในขณะที่แบบใช้ภายนอกอาคาร รวมทั้งพวกที่มี โวลท์เตจสูง ตัวถังจะถูกสร้างจากเหล็กสองส่วน แล้วหลอมต่อเข้าด้วยกันด้วยตะเข็บนูน ซึ่งแบบ นี้จะมีความแข็งแรงมาก สะดวกในการเคลื่อนย้าย และติดตั้ง



รูปที่ 3.7 แสดงถึงลักษณะของตัวถังของคะแพซิเตอร์แรงสูง

### 3.2.5 วัสดุฉนวนตัวถัง (CASE INSULATION )

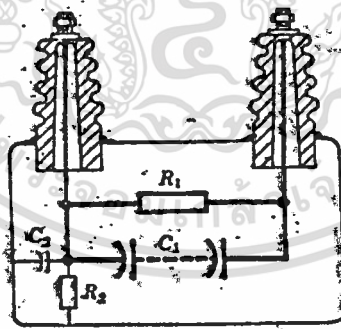
วัสดุที่ใช้เป็นฉนวนระหว่างม้วนของตัวคะแพซิเตอร์กับด้านข้างของตัวถัง จะเป็นวัสดุที่มีลักษณะคล้ายกับวัสดุที่ใช้เป็นสารไดอิเล็กตริก ซึ่งชุบด้วยสารอิมเพรกแนนต์ เพื่อที่จะ เพิ่มค่าความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวน

### 3.3 คุณสมบัติของคะแพซิเตอร์แรงดันสูง

#### ค่าการสูญเสีย (Losses)

ค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นในตัวคะแพซิเตอร์ จะมีส่วนเกี่ยวข้องกับโวลต์-เดจและอุณหภูมิ ถึงแม้ว่าค่าการสูญเสียที่คิดเป็นวัตต์ออกมาจะมีค่าน้อยมาก แต่จะมีผลถึงอายุการใช้งานของคะแพซิเตอร์ ด้วยเหตุผล 3 ประการ คือ

1. ในการใช้งานที่โวลต์เดจสูงๆ จะเกิดความเครียดทางไฟฟ้าต่อวัสดุที่ใช้เป็นสารไดอิเล็กตริก ซึ่งจะก่อให้เกิดความร้อนขึ้น และจะเป็นผลเสียต่อวัสดุไดอิเล็กตริก
  2. โดยปกติคะแพซิเตอร์จะทำงานโดยรับภาระเต็มที่อยู่ตลอดเวลา จึงทำให้เกิดค่าความสูญเสียขึ้นโดยตลอดเวลาเช่นเดียวกัน
  3. โครงสร้างตัวถังของคะแพซิเตอร์นั้น จะเป็นโครงสร้างที่เปิดโดยมิดชิด จึงทำให้การระบายความร้อนเป็นไปได้โดยลำบาก จึงทำให้อุณหภูมิภายในตัวถังสูงตลอดเวลา
- พิจารณาจากรูปที่ 3.8 สามารถที่จะแยกค่าความสูญเสียออกเป็นส่วนๆ ได้ ดังนี้



รูปที่ 3.8

1. ค่าความสูญเสียที่เกิดจาก dielectric loss
2. ค่าความสูญเสียที่เกิดจาก  $I^2R$  ในตัว discharge resistor ( $R_1$ )
3. ค่าความสูญเสียที่เกิดจากกระแสที่ไหลผ่านตัวนำ และวัสดุ

แต่โดยประมาณแล้ว 97% ของค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้น จะเป็นค่าความสูญเสียที่เกิดจาก dielectric loss



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและสร้างคะแพซิเตอร์

4.1 การออกแบบคะแพซิเตอร์

การออกแบบคะแพซิเตอร์ที่ใช้กระดาษเป็นสารไดอิเล็กตริก และซ้อนทับกับแผ่นอิเล็กโตรด ม้วนเข้าด้วยกันนั้น จะใช้หลักการและการคำนวณของคะแพซิเตอร์ ที่เป็นแผ่นระนาบ ส่วนเหตุผลที่นำมาม้วนซ้อนเข้าด้วยกันนั้น ก็เพื่อที่จะลดขนาดของคะแพซิเตอร์ลง เพื่อให้ได้พื้นที่มากที่สุดได้ในขนาดที่เล็กนั่นเอง

ดังนั้นจึงใช้การคำนวณของคะแพซิเตอร์ที่เป็นแผ่นระนาบ มาประมาณใช้ได้ และเพื่อความสะดวกต่อการออกแบบ รวมถึงการลงมือสร้างด้วย จากสมการแสดงความสัมพันธ์ ของตัวแปรต่างๆ ของคะแพซิเตอร์แบบแผ่นระนาบนี้ จะได้

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r (A/d)$$

โดยที่  $\epsilon_0$  เป็นค่าเพอร์มิตติวิตีของอากาศ =  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m  
 $\epsilon_r$  เป็นค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์  
 $A$  เป็นพื้นที่ของแผ่นอิเล็กโตรด  
 $d$  เป็นความหนาของสารไดอิเล็กตริก

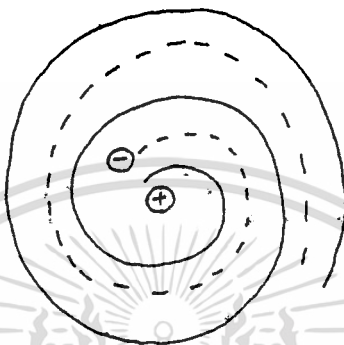
และสมการ

$$E = v/d$$

โดยที่  $E$  เป็นค่าความคงทนทางไฟฟ้าของสารไดอิเล็กตริก  
 $v$  เป็นค่าศักยคงที่คกคร่อมตัวคะแพซิเตอร์  
 $d$  เป็นความคงทนของสารไดอิเล็กตริก

#### 4.2 การคำนวณ

ในการออกแบบกะแปซิเตอร์ ต้องการกะแปซิเตอร์ที่มีค่าความจุ  $0.1 \mu\text{F}$  ทนแรงดันได้  $20 \text{ Kv}$  และใช้หลักการคำนวณของกะแปซิเตอร์แบบแผ่นระนาบ



รูปที่ 4.1

จากรูปแสดงถึงลักษณะการพันแผ่นอิเล็กโทรดและสารไดอิเล็กทริก เข้าด้วยกัน จะเสมือนกับว่า จะได้ค่าความจุไฟฟ้าเป็น 2 เท่า หรือเสมือนกับว่ามีกะแปซิเตอร์ 2 ตัวขนานกันอยู่

จากสมการ  $E = v/d$

จากทฤษฎี จะได้ค่า  $E$  ของกระดาษที่ขุ่นน้ำมันหม้อแปลง คือ  $40 \text{ Kv/mm}$

$$V = 20 \text{ Kv}$$

เพราะฉะนั้นจะได้  $40 \text{ Kv/mm} = \frac{20 \text{ Kv}}{d}$

$$d = 0.5 \text{ mm}$$

แต่ในการทดสอบกระดาษไมลา จะได้ค่า  $E$  เฉลี่ย  $45.3 \text{ Kv/mm}$  ซึ่งสามารถที่จะทนแรงดันใช้งานได้

จากสมการ  $C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$

$$C = 0.1 \mu\text{F}$$

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

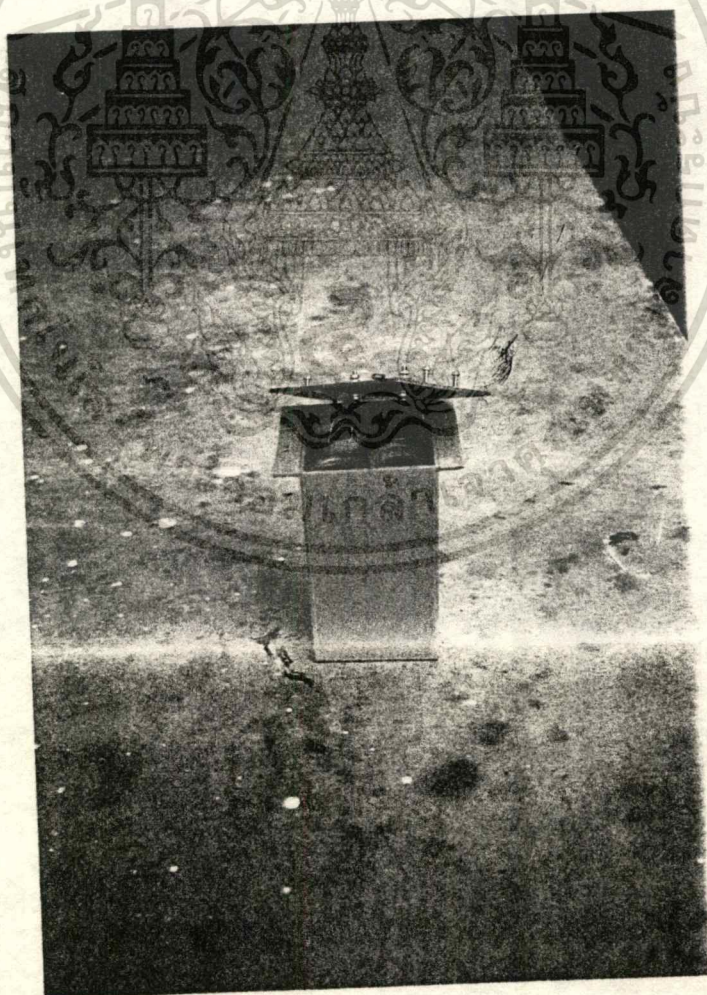
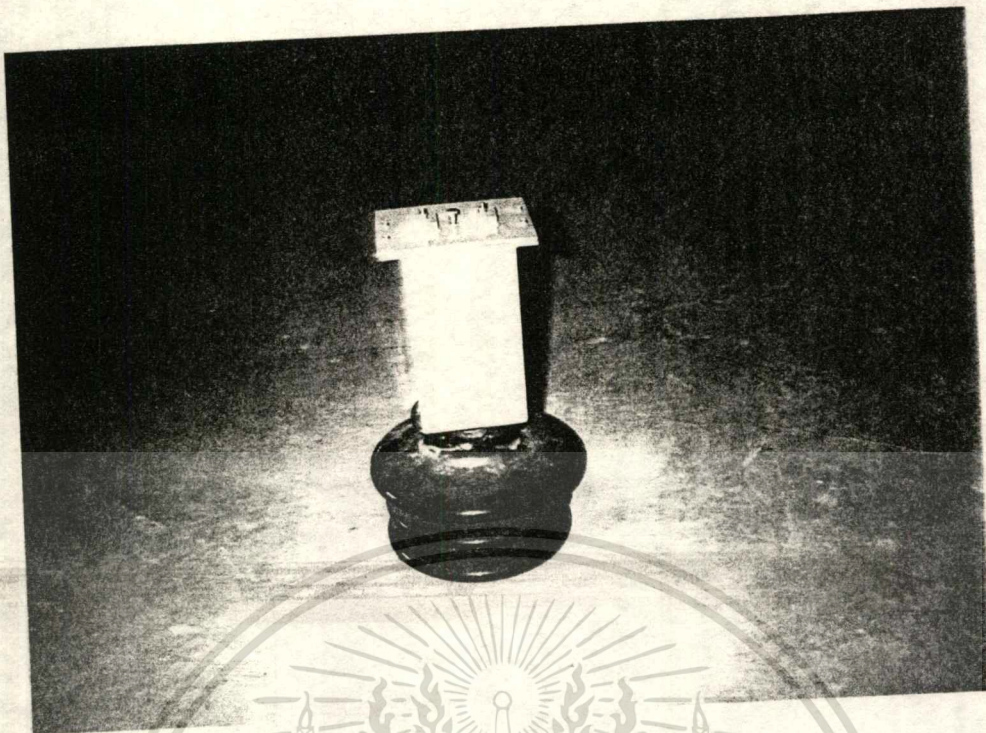
$$\epsilon_r = 3 \quad (\text{กระดาษชุบน้ำมันหม้อแปลง})$$

$$d = 0.125 \text{ mm. (ความหนาของกระดาษไมลา)}$$

$$0.1 \mu\text{F} = \frac{8.854 \times 10^{-12} \times 3 \times A}{0.125 \text{ mm}}$$

$$A = 0.47 \text{ m}^2$$

ซึ่งพื้นที่ A ที่คำนวณได้นี้ จะเป็นพื้นที่ของแผ่นอิเล็กโทรดที่ใช้และสามารถที่จะประมาณได้ว่าเป็นพื้นที่ของสารไดอิเล็กตริกที่ใช้ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ **รูปที่ 4.2** แสดงถึงตัวอะไหล่ที่สร้างขึ้น เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบและการประเมินผล

5.1 บทนำ

การหาลักษณะสมบัติของคเคแปซิเตอร์ โดยการพิจารณาในทางทฤษฎีนั้น มีประโยชน์ในการทำนายคุณสมบัติ และลักษณะของคเคแปซิเตอร์ และสามารถนำมาทำการวิเคราะห์ และแก้ไขปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ แต่จะทำให้ถูกต้องนั้นจะต้องมีคุณสมบัติฐานและข้อมูลต่างๆที่แน่นอน และถูกต้องเพียงพอ

ในทางปฏิบัตินั้น เป็นการยากที่จะทราบค่าต่างๆ เหล่านั้นได้ จึงจำเป็นต้องตรวจสอบลักษณะสมบัติของคเคแปซิเตอร์ โดยการทดสอบ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญมาก เพราะจะช่วยให้ทราบว่าคเคแปซิเตอร์ที่สร้างขึ้นนี้ มีลักษณะและคุณสมบัติเหมาะสมที่จะใช้ในงาน ตามที่ออกแบบไว้หรือไม่

สำหรับการทดสอบ จะมีการทดสอบตามลำดับขั้น ดังต่อไปนี้ คือ

1. การทดสอบความทนต่อแรงดันไฟฟ้าตามกำหนดของการฉนวน
2. การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า
3. การทดสอบการใช้งาน
4. การทดสอบหาค่าคเคแปซิแตนซ์

5.2 การทดสอบความ คงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตามกำหนดของการฉนวน

เมื่อได้ทำการออกแบบและสร้างตัวถัง ที่จะใช้บรรจุตัวคเคแปซิเตอร์และ ฉนวนน้ำมันลงไป ควรจะทำการทดสอบดูก่อนเพื่อความแน่ใจว่า โครงสร้างของคเคแปซิเตอร์ สามารถทนความเครียดทางไฟฟ้าเนื่องจากแรงดันที่กำหนดได้ โดยไม่เกิดวาทไฟตามผิวหรือดิสชาร์จ ทำลาย ซึ่งวิธีการที่จะใช้ทดสอบนี้ ใช้วิธีการเดียวกับการทดสอบ การทนต่อแรงดันของอุปกรณ์ ไฟฟ้าแรงสูงต่างๆ ตามมาตรฐานสากล IEC เล่มที่ 60-1973 ตอน 1 ผลการทดสอบจะต้อง ไม่มีการวาทไฟเกิดขึ้นเลย จึงจะแน่ใจได้ว่า การฉนวนของโครงสร้างคเคแปซิเตอร์ที่ออกแบบไว้

ได้โดยไม่มีการวาวไฟเลย และไม่เกิดโคโรนา (corona) ให้สังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า จึงสรุปได้ว่าการฉนวนของโครงสร้างของค้ำแปซิเตอร์คงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 20 กิโลโวลท์ก็ได้ ตามต้องการ

### 5.3 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

การทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้านี้ เป็นการทดสอบหาค่าความ

คงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของวัสดุที่ใช้เป็นสารไดอิเล็กตริก ในตัวค้ำแปซิเตอร์ ซึ่งสารไดอิเล็กตริกที่ใช้มีเป็นกระดาษไมลาชุบน้ำมันหม้อแปลง ดังนั้นจึงใช้หลักทวิในการทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่เป็นฉนวนแข็ง และฉนวนเหลว นำมาประยุกต์เข้าด้วยกัน เพื่อที่จะได้วิธีการในการทดสอบที่เหมาะสมที่สุด

ในการศึกษา หาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวเพียงอย่างเดียว นั้น จะหาจากการใช้แรงดันคงตัวหรือแรงดันอิมพัลส์ โดยใช้โอเลคโตรดที่มีผิวเรียบสะอาดเป็นส่วนโค้งทรงกลม แต่ในการทดสอบครั้งนี้เป็นการทดสอบกระดาษไมลาชุบน้ำมันหม้อแปลง จึงใช้อิเล็กโตรดที่เป็นแบบปลายแหลม และแบบแผ่นระนาบ ในทางปฏิบัติจะพบว่า การที่จะทำให้ผิวของอิเล็กโตรดเรียบและสะอาดอยู่เสมอ นั้นทำได้ยาก เพราะการเกิดเบรคดาวน์ จะทำให้ผิวอิเล็กโตรดเสียหาย รวมทั้งฉนวนเหลวด้วย ปัญหานี้อาจแก้ไขได้ถ้าใช้แรงดันคงตัว เช่น แรงดันกระแสตรง หรือแรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำ จะต้องใช้อิเล็กทรอนิกส์สวิตซ์ ทำหน้าที่เบี่ยงเบนพลังงานดีสชาร์จ มิให้ผ่านอิเล็กโตรดในช่วงที่สั้นที่สุด คือ น้อยกว่า 1  $\mu\text{sec}$  เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นแก่อิเล็กโตรดให้น้อยที่สุด จำนวนครั้งที่วัดการเบรคดาวน์ใหม่ควมามากนัก คือไม่ควรให้มีเขม่าเกาะหรือเกิดรอยขรุขระที่ผิวอิเล็กโตรด ถึงจะใช้วิธีในการหาค่าความคงทนอย่างปราณีตอย่างไรก็ตาม ผลที่ได้ก็ยังคงจัดกระจายถึง 5-10%

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าแรงดันเบรกคาวน์ของกระดาษไม่ลาซุบด้วยน้ำมันหม้อแปลง โดยใช้โอเลคโตรดที่เป็นแผ่นระนาบกับแผ่นระนาบ และใช้แรงดันไฟฟ้าตรง

วัสดุ	แรงดันเบรกคาวน์ (กิโลโวลท์)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	เฉลี่ย
กระดาษไม่ลาซุบน้ำมันหม้อแปลง	44	43	46	46	45	47	47	46	44	45	45.3



รูปที่ 5.1 แสดงถึงการทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5.4 การทดสอบการใช้งาน

จากการออกแบบนั้น ได้ทำการออกแบบให้ตะแบริเตอร์ทำงานที่พิกัดแรงดัน 20 กิโลโวลต์ ( RATED VOLTAGE ) โดยใช้กระดาษไมลาชุบน้ำมันหม้อแปลง เป็นสารไดอิเล็กตริก เมื่อทำการทดสอบโดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าตรง 20 กิโลโวลต์ต่อเนื่องกันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลการทดสอบปรากฏว่าตะแบริเตอร์สามารถใช้งานที่ 20 กิโลโวลต์ ได้โดยไม่เกิดการเบรคความเนื่องจากความร้อนที่เพิ่มขึ้น และไม่มีโคโรน่าเกิดขึ้น

ในการออกแบบและใช้งานตัวตะแบริเตอร์นั้น จะต้องหาค่า safety factor เพื่อใช้งานให้ได้ตามกำหนดและมีความปลอดภัย นำเช็ดถือนในการใช้งาน ซึ่ง

$$s.f. = U_b / U_{op}$$

โดยที่  $U_b$  = แรงดันเบรคความของฉนวน (breakdown voltage )

$U_{op}$  = แรงดันใช้งาน (operating voltage)

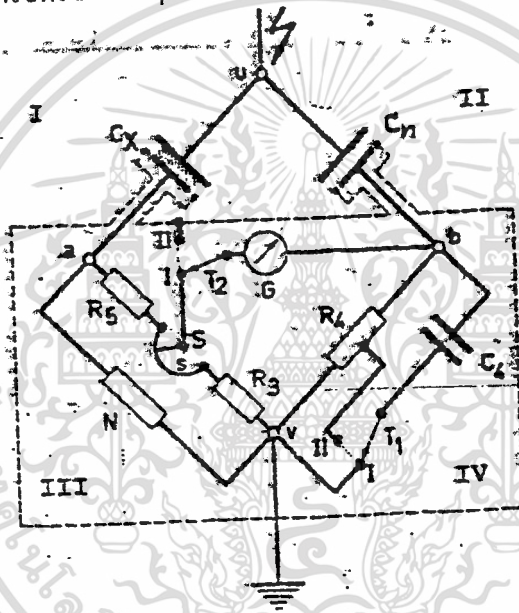
s.f. = safety factor ของความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน

เมื่อทำการทดสอบโดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าตรง 30 กิโลโวลต์ ต่อเนื่องกันเป็นเวลา 30 นาที ผลการทดสอบปรากฏว่า ตะแบริเตอร์สามารถใช้งานที่ 30 กิโลโวลต์ได้โดยไม่เกิดการเบรคความของสารฉนวน และไม่มีโคโรน่าเกิดขึ้น จึงหาค่า safety factor เท่ากับ

1.5

5.5 การทดสอบหาค่าคะแพซิแตนซ์

สามารถใช้งานจริงในการหาค่าคะแพซิเตอร์ได้ โดยวิธีที่ใช้กันโดยทั่วไป คือ SCHERING BRIDGE ที่ใช้กับความถี่พลังงานตั้งแต่ 50 Hz ถึง 100 KHz SCHERING BRIDGE วัดคะแพซิแตนซ์และมุมพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ของคะแพซิเตอร์โดยการเปรียบเทียบกับคะแพซิเตอร์มาตรฐาน ซึ่งเป็นแบบอากาศอัดหรือก๊าซอัด ( COMPRESSED GAS STANDARD CAPACITOR ) มีพลังงานสูญเสียต่ำที่ความถี่พลังงาน หรือความถี่อื่นๆ วงจรของ schering bridge ดังแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แสดงวงจร

- Cx คือ คะแพซิเตอร์ของวัสดุทดสอบ หรือที่ต้องการวัด
- Rx คือ ความต้านทานสมมูลกับกำลังสูญเสียในไดอิเล็กตริก
- Cn คือ คะแพซิแตนซ์มาตรฐาน
- R<sub>3</sub> คือ ความต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำและปรับค่าได้
- R<sub>4</sub> คือ ความต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ
- C<sub>4</sub> คือ คะแพซิแตนซ์ปรับค่าได้
- G คือ กัลวานมิเตอร์ความไวสูง

การปรับบริดจ์ให้สมดุลทำได้โดยการปรับค่า R<sub>3</sub> และ R<sub>4</sub> จนกระทั่งเข็มของ

กัลวานมิเตอร์ชี้ศูนย์ เมื่อปรับบริดจ์สมดุลแล้วเขียนสมการได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไปว่ากรณีใดก็ตาม ล้วนขึ้นอยู่กับข้อตกลงฉบับก่อน และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการแก้ไข



จากรูปที่ 5.3 เมื่อ  $C_x$  และ  $R_x$  ต่อกันแบบขนาน

$$\cos \delta = \frac{wC_x R_x}{\sqrt{1+(wC_x R_x)^2}}$$

$$\cos^2 \delta = \frac{(wC_x R_x)^2}{1+(wC_x R_x)^2}$$

แทนค่าในสมการ 5.1 จะได้

$$C_x = \frac{C_4 \cos^2 \delta}{w^2 C_x^4 R_x^3} \quad (5.2)$$

จากรูปที่ 5.3

$$\tan \delta = \frac{wC_x}{1/R_4}$$

จากรูปที่ 5.3

$$\tan \delta = \frac{1/R_4}{wC_x} = \frac{1}{wC_x R_x}$$

$$\therefore wC_4 R_4 = \frac{1}{wC_x R_x} = \frac{1}{w^2 C_x^4 R_4}$$

แทนค่า  $\frac{1}{C_x R_x}$  ในสมการ 5.2 จะได้

$$C_x = \frac{C_4 R_4 \cos^2 \delta}{R_3}$$

นั่นคือ

$$C_x = \frac{C_4 R_4}{R_3} \quad \text{โดยประมาณ}$$

และ

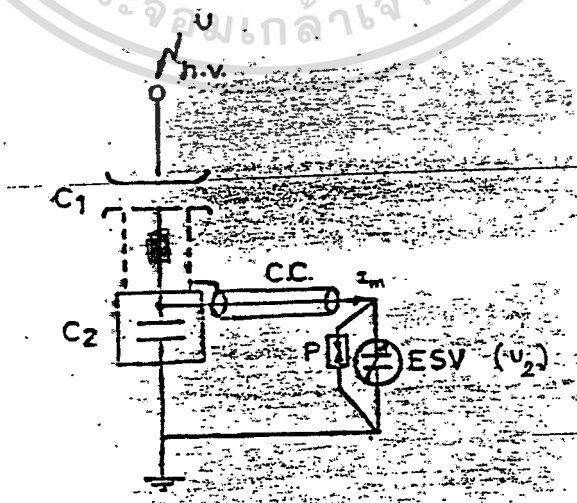
$$\tan \delta = wC_4 R_4$$

ในทางปฏิบัติ  $R_4$  มักจัดไว้เป็นค่าคงตัวเฉพาะที่มีสวิตช์เลือกให้เปลี่ยนได้หลายค่า เพื่อให้สามารถวัดได้ละเอียดถูกต้องในช่วงกว้างของค่า  $C$  ส่วน  $R_3$  นั้นเป็นความต้านทานที่ปรับได้เป็นเด็คเคทซ์ที่มีค่าสูงสุดไม่เกิน 10,000 โอห์ม ทั้งนี้เพื่อขจัดค่าสเตรเคแปซิแตนซ์ให้น้อยที่สุด ส่วน  $C_4$  นั้นเป็นคะแปซิแตนซ์ที่ปรับได้เป็นเด็คเคทซ์เช่นกัน และมีค่าสัมพันธ์โดยตรงกับค่าแฟลคเตอร์พลังงานสูญเสีย  $\tan \delta$

เพื่อจัดการรบกวนจากภาคแรงสูงที่มีผลต่อวงจรภาคแรงต่ำ ซึ่งอาจจะคับปลิง (coupling) ผ่านสเตรเคแปซิแตนซ์ (stray capacitance) ฉะนั้นตั้งแต่ภาคแรงต่ำของคะแปซิเตอร์มาตรฐาน และวัสดุทดสอบมาถึงอิมพีแดนซ์ของวงจร III, IV และ V กัลวานมิเตอร์จะมีเกราะป้องกันแบบ 2 ชั้น (double screen shielding) และป้องกันมิให้บริดจ์เสียหายจากแรงดันเกินเนื่องจากภาคแรงสูงเกิดบัพพร้อมขึ้นใน I หรือ II จึงใส่กับดักแรงดันเกินหรือสปาร์คแกปไว้ในวงจรภาคแรงต่ำ

เนื่องจากห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ยังขาดอุปกรณ์ที่เพียงพอในการวัดค่าคะแปซิแตนซ์ และค่าพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ( $\tan \delta$ ) จึงไม่สามารถวัดค่าคะแปซิแตนซ์โดยวิธีบริดจ์ได้ ฉะนั้นในการทดสอบจึงหาค่าคะแปซิแตนซ์โดยใช้วงจรโวลเตจดีไวเดอร์แบบคะแปซิเตอร์ โวลเตจดีไวเดอร์แบบคะแปซิเตอร์ แสดงดังรูปที่ 5.4 ประกอบด้วย

- $C_1$  คะแปซิเตอร์ภาคแรงสูง
- $C_2$  คะแปซิเตอร์ภาคแรงต่ำ



รูปที่ 5.4 วงจรโวลเตจดีไวเดอร์แบบคะแปซิเตอร์

โดยหลักการแล้วกระแสที่ไหลเข้าเครื่องวัด  $I_m$  นั้นต้องมีค่าน้อยมากๆ เกือบศูนย์  
นั่นคือ กระแสที่ไหลผ่านกระแสแปรชัเตอร์ภาคแรงสูงและกระแสแปรชัเตอร์ภาคแรงต่ำ จะต้องเท่ากัน คือ

$$I = w C_t U$$

$$= w \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} U$$

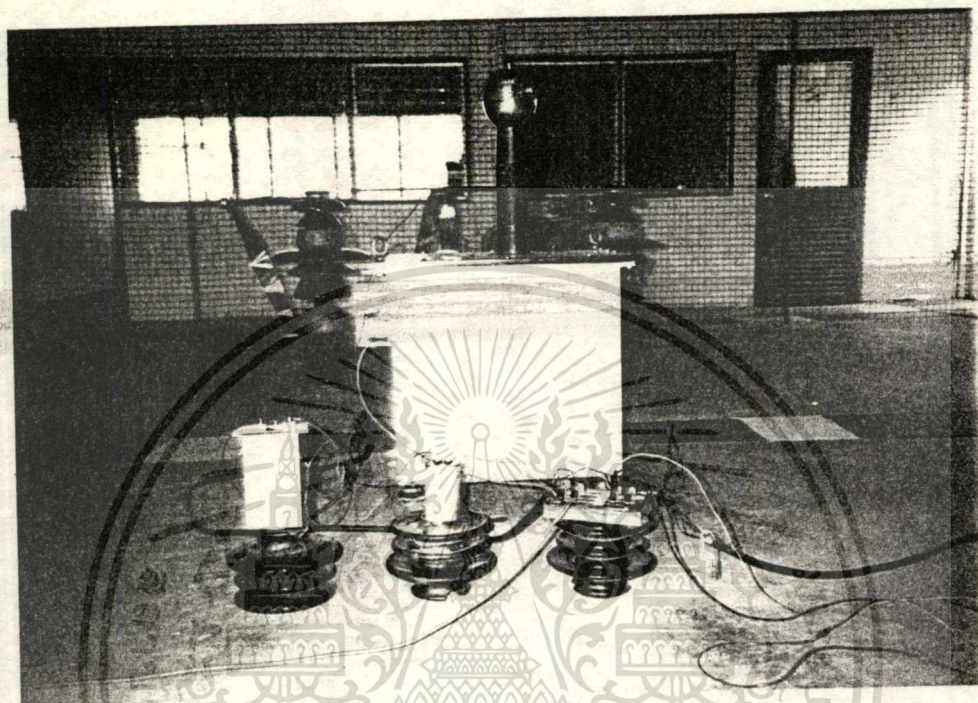
$$I_2 = w C_2 U_2 = I \quad (I_m \approx 0)$$

$$U = \frac{C_1 + C_2}{C_1} U_2$$

$$C_1 = \frac{U_2}{(U - U_2)} C_2$$

จากวงจรโวลต์จีโอเดติโวลต์เตอร์แบบกระแสแปรชัเตอร์สามารถประยุกต์มาใช้งานได้ คือ ป้อน  
โวลต์จีโอเดติโวลต์เตอร์แบบกระแสแปรชัเตอร์ที่แน่นอน ( $v$ ) และ  $v_2$  คือแรงดันไฟฟ้าสลับที่สามารถอ่านได้จากโวลต์มิเตอร์  $C_2$   
คือ กระแสแปรชัเตอร์ที่ทราบค่ากระแสแปรชัเตอร์ ในที่นี้ใช้หลายค่าเพื่อความแน่นอนในการวัดค่า  
กระแสแปรชัเตอร์ ถ้ามิเตอร์ถูกต่อผ่านเคเบิลที่ยาว ก็จะทำให้เกิดค่ากระแสแปรชัเตอร์ซึ่งจะต้องถูกนำ  
ไปคิดด้วย ปกติ  $C_1$  จะใช้กระแสแปรชัเตอร์มาตรฐานอัดอากาศหรือก๊าซ และ  $C_2$  จะต้องเป็น  
กระแสแปรชัเตอร์ที่มีค่ากระแสแปรชัเตอร์สูง  $C_1$  จะเป็นกระแสแปรชัเตอร์แบบขั้วไฟฟ้าสามขั้ว และถูกเก็บไว้ใน  
กล่องเพื่อไม่ให้เกิดสเตรสแปรชัเตอร์เช่นเดียวกัน

แต่ในการออกแบบค่า  $C_1$  ที่สร้างขึ้นนั้นต้องมีค่าในหน่วยของไมโครฟารัด ซึ่งมีค่าสูง  
เกินย่านของค่ากระแสแปรชัเตอร์ที่จะใช้วัดโดยวงจรโวลต์จีโอเดติโวลต์เตอร์ จึงไม่สามารถที่จะทำการทดสอบ  
ได้



รูปที่ 5.5 แสดงถึงการทดสอบหาค่าเคแปซิแตนซ์

บทที่ 6

สรุป วิจารณ์และข้อเสนอแนะ

จากการวิเคราะห์ในการออกแบบสร้างคะแปซิเตอร์แรงดันสูงที่ใช้กระดาษชุบน้ำมัน หม้อแปลงเป็นสารไดอิเล็กตริก มีข้อดี คือ กระดาษชุบน้ำมันมีค่าเพอร์มิตติวิตีสูง และทนแรงดันเบรคดาวน์ได้ดี ทำให้สามารถสร้างคะแปซิเตอร์ที่มีขนาดเล็ก มีความสะดวกและเหมาะสมต่อ

การใช้งาน

ในการดำเนินงานสร้างคะแปซิเตอร์นั้น จะต้องใช้ความระมัดระวังเป็นพิเศษเพราะ อาจจะทำให้สารไดอิเล็กตริกเกิดการเบรคดาวน์ได้ง่าย ยกตัวอย่างเช่น การพันกระดาษไม่ลากับแผ่นอลูมิเนียมเข้าด้วยกัน จะต้องทำการพันให้แน่น และแผ่นอลูมิเนียมที่จะใช้พันควรจะมีผิวเรียบไม่ขรุขระ ซึ่งอาจจะทำให้เกิดความเครียดไฟฟ้าที่จุดๆ นั้นสูง สำหรับการเติมน้ำมันหม้อแปลงลงไปเพื่อใช้เป็นสารฉนวนนั้น ต้องระมัดระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศขึ้น ซึ่งในตอนนี้เป็นไปได้ยากที่จะทำเช่นนั้น จึงใช้วิธีนำตัวคะแปซิเตอร์ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้วไปทำการ vacuum นำเอาอากาศออก เพื่อไม่ให้เกิดฟองอากาศหลงเหลืออยู่ระหว่างสารไดอิเล็กตริกกับแผ่นอิเล็กโตรด

สำหรับการทดสอบอุปกรณ์ที่นำมาใช้ทำตัวคะแปซิเตอร์นั้น ได้ทำการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของกระดาษไม่ลา ซึ่งได้ทำการทดสอบในกรณีที่อยู่ลอคโตรดเป็นแผ่นระนาบกับแผ่นระนาบ แต่เมื่อนำเอาวัสดุเหล่านี้มาทำการสร้างเป็นตัวคะแปซิเตอร์ขึ้นแล้ว ทำการทดสอบใหม่ปรากฏว่าได้ค่าแรงดันเบรคดาวน์ที่ต่ำกว่าเดิม ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องมาจาก มีสิ่งสกปรกหรือฝุ่นละอองจับอยู่ที่ผิวของกระดาษไม่ลา หรือแผ่นอลูมิเนียม ซึ่งมีผลให้เกิดการเบรคดาวน์ได้ง่ายขึ้น

เมื่อนำข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นในครั้งแรก มาวิเคราะห์แล้วทำการออกแบบสร้างตัวคะแปซิเตอร์ใหม่ ทำให้ตัวคะแปซิเตอร์สามารถทนแรงดันได้สูงกว่าเดิม และเมื่อทำการทดสอบการใช้งานที่แรงดัน 20 กิโลโวลท์ ปรากฏว่าสามารถทนแรงดันที่ใช้งานได้

สำหรับ project นี้เป็น project ที่ได้รับเริ่มทำขึ้นใหม่ ซึ่งยังอาจจะมีส่วนที่

บกพร่องอยู่มาก คงจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งที่จะมีการพัฒนา project นี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้นต่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไปอีก  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณเป็นอย่างสูงต่อท่านอาจารย์นิทัศน์ กฤษณจินดา และท่านอาจารย์สมเจตน์ เทียมเมือง ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ และเป็นพี่ปรึกษาเป็นอย่างดี จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณ คุณคงศักดิ์ ตลยานุกุล และบริษัทคงศักดิ์เอกซเรย์การแพทย์ อุตสาหกรรมจำกัด ที่ได้ให้ความร่วมมือและความช่วยเหลือในด้านการทำงานเป็นอย่างดี



เอกสารอ้างอิง

1. ดร.สำรวย สังข์สะอาด. "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง". ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2527.
2. CAPACITORS FOR INDUSTRY, by W.C. Bloomquist, C.R. Craig, R.M. Partington and R.C. Wilson, New York, Wiley, 1953.
3. CAPACITORS 1985/86 / RIFA-Stöckholm : RIFA, [198-].
4. "POWER CAPACITORS" IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. EI-21 No. 6 , December 1986.
5. ผศ. ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์. "การปรับปรุงตัวประกอบกำลัง" ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2529.
6. JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD, "Testing Methods for Electric Strength of Solid Insulating Materials", JIS C 2110-1975.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
แม้ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# CALTEX

# PRODUCT BULLETIN

## TRANSFORMER OIL

ELECTRICAL  
INSULATING OILS

### DESCRIPTION

Caltex Transformer Oil is a high quality electrical insulating oil that is specially refined and processed to meet the requirements of major US electrical equipment manufacturers. Careful processing and handling ensure that the oil is stable and free of water and other contaminants, and remains free of contaminants until it reaches the user.

Caltex Transformer Oil meets the Westinghouse specification for WEMCO Oil, the General Electric specification for GE 10 C Oil and ASTM D 3487, Type I.

Caltex Transformer Oil does not contain polychlorinated biphenyls (PCBs).

### APPLICATION

Caltex Transformer Oil is recommended for use as an electrical insulating oil in applications such as transformers and oil immersed switchgear where an oil meeting the GE, Westinghouse, ASTM or other comparable specification is required by the equipment manufacturer or user. It should not, of course, be used where safety considerations require the use of a nonflammable insulating oil.

### PERFORMANCE QUALITIES

Good insulating properties, indicated by high dielectric strength and low power factor (dielectric loss), are the result of careful control in manufacture and handling. High dielectric strength ensures good insulation of electrical conductors and prevention of arcing between electrodes under the voltage stresses encountered in normal insulating oil service. Low loss tangent minimizes energy loss due to the changing polarity of the alternating current.

Good heat transfer and fluid flow characteristics as a result of low controlled viscosity and low pour point. This assures effective cooling of transformer windings, and freedom of movement of circuit breakers, pumps, regulators, load

Excellent oxidation stability minimizes development of sludge and acidity in storage and service. Sludge and acidity can have an adverse effect on the electrical properties and cooling ability of the oil, and shorten service life.

### ELECTRICAL CHARACTERISTICS

The dielectric breakdown strength of an insulating material is a measure of its resistance to electrical breakdown when an electric potential is applied across it. The actual value obtained in a test is a function of both the insulating ability of the material under test, and the test conditions. Electrical insulating oils are tested by immersing two electrodes in a sample of the oil, then applying an AC voltage across the electrodes. The voltage is then increased in a specified manner until electrical breakdown occurs. The various tests used differ in electrode shape and spacing, and rate of increase of voltage, and thus give different breakdown values for the same oil. The important consideration however, is that oils meeting the minimum dielectric breakdown strength specified in any of the current specifications, regardless of the test method specified, have adequate insulating ability for a normal applications for which they are recommended.

The dielectric strength of an insulating oil is reduced if there is water or solid particles in the oil. Oxidation products resulting from oil deterioration in service also lower the dielectric strength. As a result, periodic checks of the dielectric strength of an oil can be a useful method of determining if contamination or deterioration of the oil has occurred.

Any two adjacent conductors form a capacitor. In a theoretically perfect capacitor, the phase difference between an applied AC voltage and the current is  $90^\circ$  and the power dissipated is zero. If the dielectric between the conductors is less than perfect, the phase difference will be less than  $90^\circ$  and some power dissipation will occur. In order to keep the loss low, it is desirable to have the dielectric as perfect as is practical. For insulating oils the loss for this characteristic that is reported

power factor, or loss tangent, expressed either percent or as a decimal at a specified temperature. These values are determined experimentally and represent trigonometric functions of the angle of phase difference. With the particular conditions used, a value of zero would represent a phase difference and the ideal condition, so low values are desirable.

Contamination and contamination of an oil can cause power factor or loss tangent of an oil to rise, so determination of this property may provide useful information about a used electrical insulating oil. These values vary with temperature, comparisons must always be made at the same temperature.

The resistivity of an electrical insulating oil is a measure of the resistance to DC current flow between opposite faces of a centimeter cube of the oil. The resistivity of mineral insulating oil is naturally high but, as with loss tangent, is very sensitive to the presence of even minute amounts of suspended matter, free ions or ion-forming materials such as acidic oxidation products or polar contaminants. In addition, measurement of the resistivity of a used insulating oil may provide useful information as to whether or not the oil is suitable for further service.

#### LIMITING ELECTRICAL PROPERTIES CALTEX TRANSFORMER OIL

Dielectric Strength (Breakdown), kV	
Disk Electrodes (ASTM D877)	30 min
DE Electrodes (ASTM D1816)	
1.02 mm gap	28 min*
2.04 mm gap	56 min*
Power Factor, %	
at 25°C	0.05 max
at 100°C	0.30 max

These limits apply only to new oil which has been filtered, dehydrated and degassed.

#### SERVICE CONSIDERATIONS

The sensitivity of the electrical properties of electrical insulating oils to contaminants such as water and solid particles makes it extremely important to handle and store these products so that the risk of contamination is minimized. As a general rule, all

shipments of electrical insulating oils should be tested for dielectric strength before being placed in service. If the dielectric breakdown strength is low, the oil should be reconditioned by filtration and/or dehydration.

Drums of electrical insulating oils should be stored indoors if at all possible. If drums must be stored outside, they should be placed on their sides on racks that will keep them clear of any ground water. The bungs should be horizontal so the weight of the oil in the drum will be against the bungs to prevent breathing of moisture. The drums should be covered with a waterproof cover to keep off rain, and to protect the drum markings from being obliterated.

Electrical insulating oils should be checked in service at periodic intervals to determine if they are suitable for continued service. Proper sampling and inspection of the equipment are important to obtain maximum benefits from this checking. Information on proper sampling techniques are contained in ASTM Standard D923, IP Standard 51, and Caltex Technical Bulletin 90.

#### OTHER SPECIFICATIONS

Although not routinely tested for compliance, experience has shown that most production batches of Caltex Transformer Oil will meet the requirements of the following specifications:

- Canadian Standard C50
- British Standard BS 148:1959 (non-current)
- British Standard BS 148:1972
- IEC 296, Class 1
- Australian Standard 1767
- Japanese Industrial Standard C2320

Where confirmation of the foregoing is desired by a potential user, further information and test data can be furnished on request.

#### TYPICAL TESTS

The physical and chemical properties shown in the table are average values based on recent production. They are not limiting values. Minor variations which do not affect product performance are to be expected in normal manufacture.

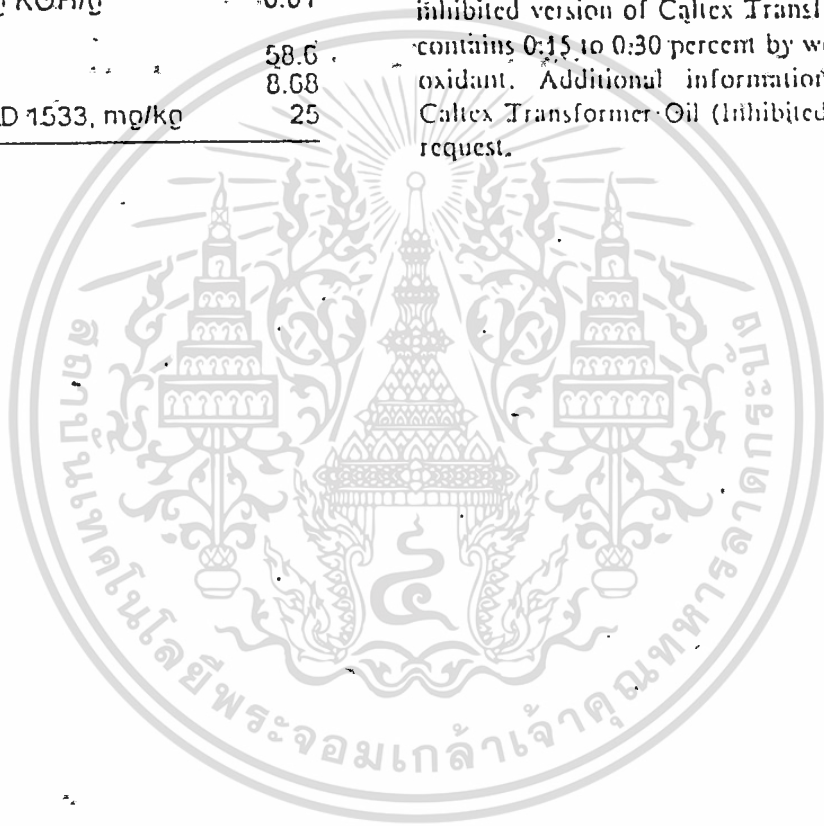
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**CALTEX TRANSFORMER OIL**

Resistive Sulfur, ASTM D1275	Pass
Density, Kg/litre @ 15°C	0.884
Flash Point, COC, °C	147
Interfacial Tension Dynes/cm @ 25°C	40
Oxidation Stability ASTM D2440	
Total Acid Number, mg KOH/g	0.27
Sludge, Mass %	0.08
Westinghouse MTS-80171, Hours	200
Cloud Point, °C	-42
Total Acid Number, mg KOH/g	0.01
Viscosity, Kinematic	
cSt @ 0°C	58.6
cSt @ 40°C	8.68
Water Content, ASTM D 1533, mg/kg	25

**INHIBITED TRANSFORMER OIL**

An oxidation inhibited product such as Caltex Transformer Oil (Inhibited) may be desired for transformers designed to operate at elevated temperature or in distribution transformers operated for long periods without maintenance. Caltex Transformer Oil (Inhibited) is an oxidation inhibited version of Caltex Transformer Oil which contains 0.15 to 0.30 percent by weight of the anti-oxidant. Additional information and data on Caltex Transformer Oil (Inhibited) is available on request.



## 1. Scope

This Japanese Industrial Standard specifies testing methods for electric strength of solid insulating materials with commercial frequency and voltage, hereinafter referred to as the "insulating materials".

## 2. Definition

For the purposes of this standard, the following definitions shall apply.

- (1) Electric Strength General term representing the ability of insulating material to withstand an applied electric voltage, including dielectric breakdown voltage, dielectric breakdown strength, withstand voltage, etc.
- (2) Dielectric Breakdown Voltage The minimum value of voltage (effective value) at which breakdown occurs when voltage is applied to insulating material under the prescribed method. The test to measure the dielectric breakdown voltage is called a dielectric breakdown test.
- (3) Withstand Voltage Specified voltage which the insulating material can withstand without breakdown, when applied for the specified period. This test is called the withstand voltage test.
- (4) Dielectric Breakdown Strength Minimum voltage gradient obtained when dielectric breakdown occurs, expressed by breakdown voltage (effective value) of insulating material divided by the distance apart of the two electrodes (thickness of test piece).

## 3. Classes of Tests

The classes of the tests shall conform to as follows.

- (1) Dielectric Breakdown Test
  - (a) Short-time breakdown test
  - (b) Step-by-step breakdown test
- (2) Withstand Voltage Test

### Applicable Standards:

JIS B 7502-External Micrometers

JIS C 2320-Electrical Insulating Oil

JIS Z 8703-Standard Atmospheric Conditions for Testing

#### 4. Pretreatment of Test Specimen

The pretreatment of the test specimens shall be conducted by one of the following methods, and the period of the pretreatment shall be selected from Table 1.

Table 1. Periods of Pretreatment

Hour	1	2	4	6	8	16	24	48	96
Week	1	2	4	-	8	16	-	-	-

(1) Treatment in Air In treatment in air, a thermo-hygrostatic box shall be used, and the temperature and humidity shall comply, as a rule, with the standard temperature-humidity conditions Group 3 (temperature  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , humidity  $65 \pm 5\%$ ) specified in JIS Z 8703.

(2) Treatment Immersed in Water In treatment in immersed in water, a thermostatic water bath equipped with a water-circulating stirrer shall be used, and the test specimen shall be immersed in distilled water or desalted water (purified with ion-exchange resin) kept, as a rule, at the standard temperature condition Grade 2 (temperature  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ) of JIS Z 8703).

#### 5. Testing Conditions

The test shall be conducted, as a rule, in the ambient medium, same as the medium in which the insulating material is actually used. In case this is difficult, however, the test may be conducted in an ambient medium having higher electric strength. The test shall comply with the following, when conducted in air or in oil.

(1) When Conducted in Air When conducted in air, the test shall comply with as follows.

(a) In Case of Normal Condition A thermo-hygrostatic box or chamber shall be used, and the temperature and humidity shall comply, as a rule, with the standard temperature-humidity condition Group 3 of JIS Z 8703.

(b) In Case of Air at High Temperature A thermostatic box shall be used, and the temperature and humidity shall comply, as a rule, with Table 2.

Table 2. Temperature and Humidity Conditions for Tests in Air at High Temperature

Temperature $^\circ\text{C}$	Relative humidity %	Temperature $^\circ\text{C}$	Relative humidity %
50	Under 20	200	Under 20
70	Under 20	250	Under 20
90	Under 20	320	Under 20
105	Under 20	400	Under 20
120	Under 20	500	Under 20
130	Under 20	630	Under 20
155	Under 20	800	Under 20
		1000	Under 20

(2) When Conducted in Oil When conducted in oil, the test shall comply with as follows.

Moreover, the oil used in this test shall be insulating oil No. 2 specified in JIS C 2320.

(a) In Case of Normal Condition The temperature of the oil shall comply, as a rule, with Grade 2 of JIS Z 8703.

(b) In Case of Oil at High Temperature The temperature of the oil shall comply, as a rule, with Table 3. For the test in oil at a high temperature exceeding 90°C, silicone oil shall be used as the ambient medium.

Table 3. Temperature Conditions for Tests in Oil at High Temperature

Temperature	50	70	90	105	120	130	155	180
	±2°C	±2°C	±2°C	±2°C	±2°C	±2°C	±2°C	±2°C

## 6. Testing Apparatus

6.1 Transformer The transformer, combined with the voltage regulating equipment, shall be capable of maintaining the crest factor (ratio of crest value to effective value) within the range of 1.34 to 1.48, in case of applying 1/2 of the probable breakdown voltage to the test specimen and varying the voltage thereabout.

For the test specimen with small capacitance and leakage current, a testing transformer, rated about 500 VA or a potential transformer with the rated load of 100 VA or more may be used.

For the test specimens with large capacitance or leakage current, a transformer rated several kVA shall be used.

The measurement of the crest factor shall be made by the combination of a sphere gap or a crest voltmeter and an effective value voltmeter, or by means of an oscillograph. In case, however, it is not easy to obtain the crest factor, a transformer rated 2kVA or more shall be used for the test voltage below 50 kV and one rated 5 kVA or more for the test voltage 50 kV or more.

6.2 Circuit Breaker The circuit breaker shall be capable of operating automatically and quickly in response with the dielectric breakdown of the test specimen, so as to protect the transformer and electrodes from the current produced by the dielectric breakdown.

6.3 Protective Resistance When a protective resistance is used in series with the test specimen in order to protect the transformer from the current or voltage surge accompanying the dielectric breakdown of the test specimen, the value of the resistance shall not exceed 100 kΩ.

6.4 Voltage Regulating Equipment The voltage regulating equipment shall be capable of raising the voltage at nearly uniform rate<sup>(1)</sup>, and a variable ratio autotransformer or an induction regulator is used. The field regulation of an AC generator or a resistance type potential divider may also be used.

เอกสารนี้เป็น Note (1) To obtain a uniform voltage-raising ratio, motor drive with variable speed control is preferred to manual control.

7. Electrodes and Test Specimens

7.1 Electrodes The electrodes<sup>(2)</sup> shall comply with one of the following pairs, as a rule, according to the test specimen.

Note (2) The material of the electrode shall be brass, stainless steel or the like.

(1) In Case of Board, Sheet, Paper, Fabric or Film The upper and lower electrodes shall comply with one of Fig. 1 to Fig. 3, and the compressive force between the electrodes shall be the own weight of the upper electrode in case of Fig. 1 and approx. 500 g in case of Fig. 2 and Fig. 3.

Moreover, in case of boards and sheets exceeding 3 mm, the test specimen shall be adjusted to the thickness of 2 mm or 3 mm.

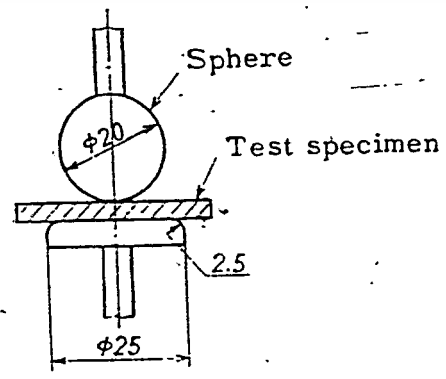
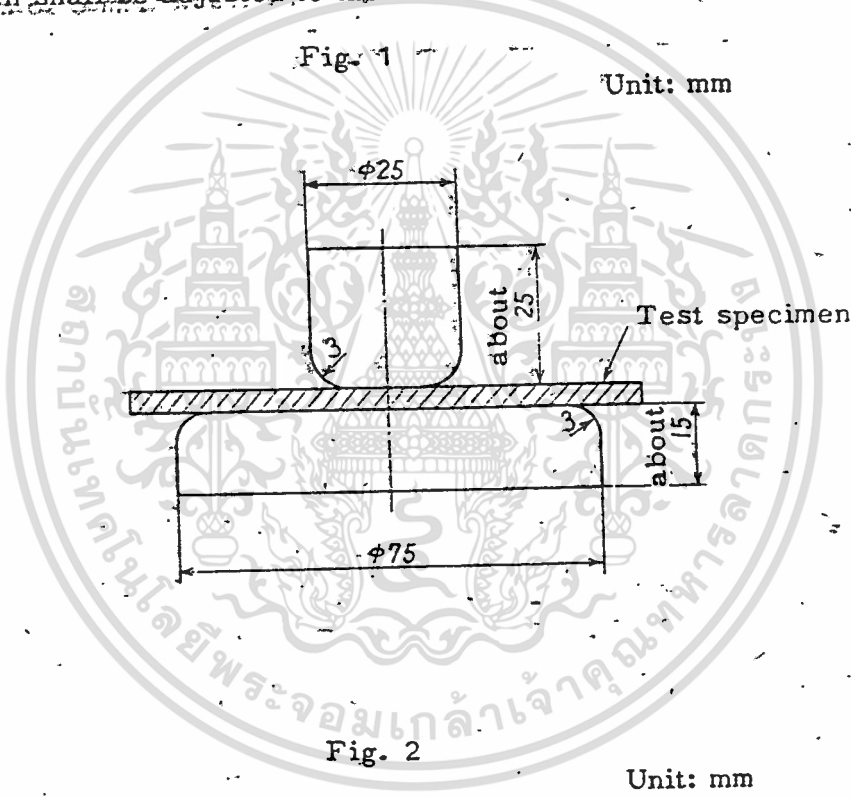
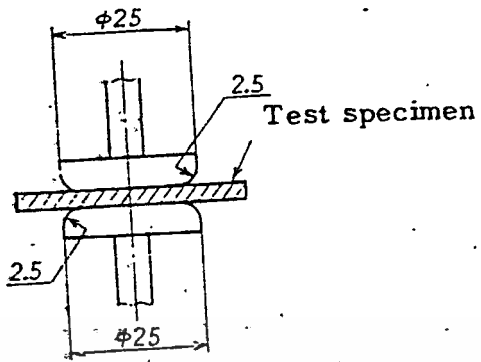


Fig. 3

Unit: mm



- (2) Narrow Test Specimen and Narrow Materials Such as Tapes etc.  
 The electrodes shall comply with either Fig. 4 or Fig. 5, and the compressive force between the electrodes shall be approx. 20g or 50 in case of Fig. 4 and approx. 500 g in case of Fig. 5.

Fig. 4

Unit: mm

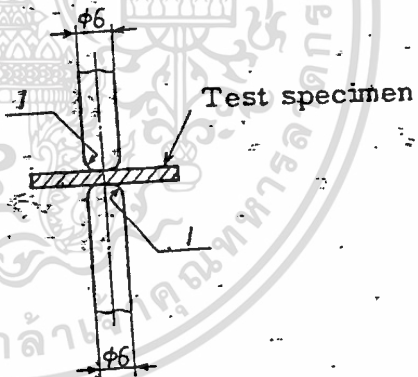
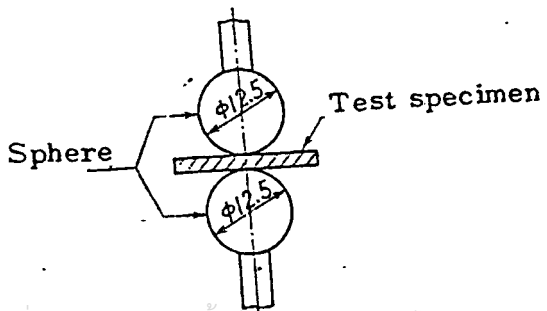


Fig. 5

Unit: mm

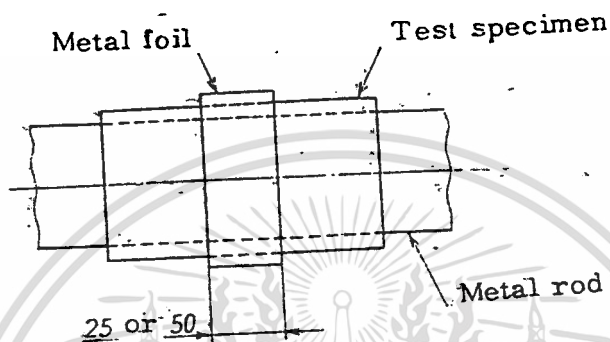


(3) Flexible Tubing and Sleeving

- (a) The inner electrode for the test specimen with an inside diameter 25 mm or less shall be, as shown in Fig. 6, a straight metal rod snugly fitting the inside diameter of the tubing or sleeving, and the outer electrode shall be a band of metal foil with a width of 25 mm or 50 mm and thickness not exceeding 0.025 mm.

Fig. 6

Unit: mm

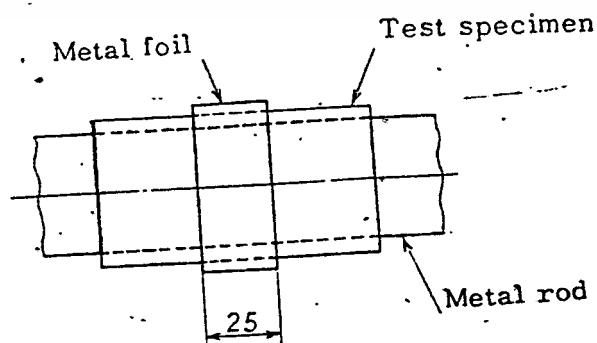


- (b) Tubing with an inside diameter exceeding 25 mm shall be cut longitudinally, and the inner and outer electrodes as shown in Fig. 4 shall be used.
- (4) Rigid Cylinder

- (a) The inner electrode for the specimen with an inside diameter 100 mm or less shall be, as shown in Fig. 7, a straight metal rod snugly fitting the inside diameter of the cylinder, and the outer electrode shall be a band of metal foil with a width of 25 mm and a thickness not exceeding 0.025 mm.

Fig. 7

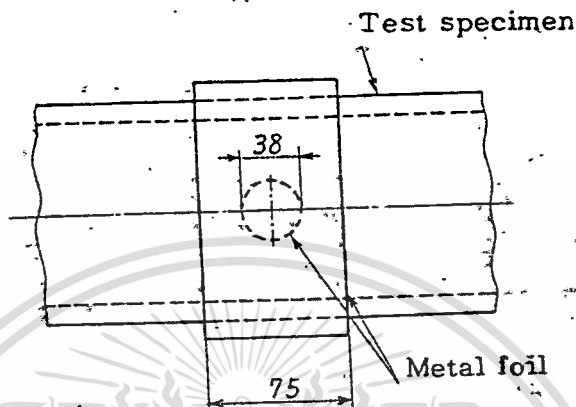
Unit: mm



- (b) The inner electrode for the specimen with an inside diameter exceeding 100 mm shall be, as shown in Fig. 8, a disc of metal foil with a diameter of 38 mm and a thickness not exceeding 0.025 mm, and the outer electrode shall be a band of metal foil with a width of 75 mm and a thickness not exceeding 0.025 mm.

Fig. 8

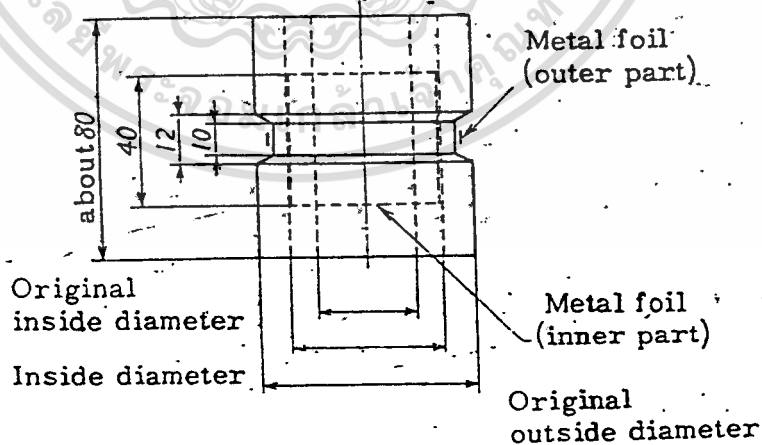
Unit: mm



- (c) The inner electrode for a test specimen of heavy thickness shall be, as shown in Fig. 9, a band of metal foil with a width of 40 mm and a thickness not exceeding 0.025 mm (or mercury or graphite) and the outer electrode shall be a band of metal foil with a width of 10 mm and a thickness not exceeding 0.025 mm.

Fig. 9

Unit: mm



- (5) Moulded Material and Compression Moulded Material The electrodes shall comply with one of Fig. 1 to Fig. 3 of (1).

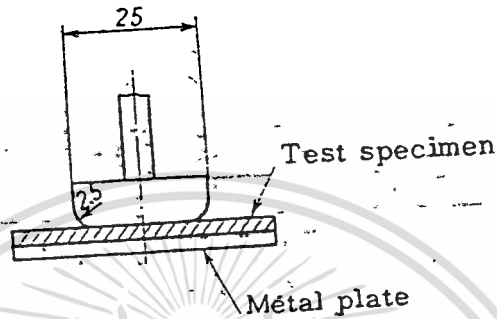
Moreover, the test specimens shall be adjusted to a thickness of 2 mm or 3 mm.

- (6) Varnish Film The electrodes of Fig. 1 of (1) or those shown in Fig. 10 shall be used.

Moreover, in Fig. 1, when the varnish film is coated on a metal plate, the plate shall be taken as the lower electrode. Also, in Fig. 10, the compressive force between the electrodes shall be approx. 500 g.

Fig. 10

Unit: mm



7.2 Preparation of Test Specimen Both surfaces of the test specimen coming in contact with the electrodes shall be parallel to each other and finished as smooth as possible. The specimen shall be of sufficient size so as to prevent flashover in test.

7.3 Adjustment of Electrode The electrodes shall be mounted coaxially, correctly facing each other, and in case of the plane electrodes, their surfaces shall be arranged to be parallel mutually.

Further, the electrode surface shall be smoothly polished and free from flaws, pittings or other defects.

## 8. Method of Voltage Application

8.1 Short-Time Breakdown Test In this method of test, the applied voltage, as a rule, shall be raised from zero with uniform rate such that breakdown occurs, on an average, in 10 to 20 seconds.

8.2 Step-by-Step Breakdown Test In this method of test, unless otherwise specified, a voltage nearest to 40 % of the probable short-time breakdown voltage shall be selected from Table 4, and applied to the test specimen for 20 seconds. If breakdown does not occur, the voltage of the next higher and subsequent steps in Table 4 shall be successively applied each for 20 seconds, until breakdown will occur.

The voltage increase from each step to the next higher step shall be made as quickly as possible, and the time required in raising the voltage shall be included in the period of 20 seconds for the higher step.

The voltage of the highest step, applied for 20 seconds without breakdown, shall be taken as the dielectric breakdown voltage.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 4. Step-Voltages  
 (Effective value kV)

0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95					
1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9					
2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0	4.2	4.4	4.6	4.8
5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5					
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19					
20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48
50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100				
110	120	130	140	150	160	170	180	190	200					

8.3. Withstand Voltage Test In this method of test, the voltage applied shall be raised as quickly as possible, accurately to the specified voltage, however, so as not to cause momentary overvoltage, and shall be kept at this voltage for the specified period.

9. Method of Voltage Measurement

The measurement of the voltage shall be conducted by the following methods, and the overall error in measurement shall not exceed 5%.

(1) In case the wave form of the test voltage is admitted to be of approximately true sine wave, measurements may be made by (a) the method of connecting a voltmeter on the low voltage side of the potential transformer, by (b) method of using a static voltmeter on the high voltage side, by (c) the method of utilizing the tertiary winding of the testing transformer, by (d) the method of calculating from the voltage of the low voltage side<sup>(3)</sup> or by (e) the method of using a capacitor-type potential transformer.

~~(2) In case the wave form of the test voltage is not admitted to be of approximately true sine wave, the crest value of the test voltage shall be measured, and this value divided by  $\sqrt{2}$  shall be taken as the effective value.~~

In case an effective value voltmeter is used, it may be corrected, in advance, by the measured value as above.

Note (3) In the method of converting the low-voltage side voltage to high-voltage side voltage of the testing transformer, it happens often that the terminal voltage on the high-voltage side is raised above the induced voltage by the combined effect of the charging current flowing to the test specimen and the leakage inductance of the high voltage winding. In this method, therefore, it is necessary to confirm, in advance, the relation between the capacitance of the test specimen and the voltage transformation ratio.

In the method of utilizing the tertiary winding, it is also necessary to confirm the relation between the high voltage side voltage and tertiary voltage, due to the similar effect as above.

## 10. Method of Thickness Measurement

The measurement of thickness shall be made with an external micrometer having a spindle of 6.35 mm diameter specified in JIS B 7502, under the measuring pressure of  $500 \pm 50 \text{ gf} \{ 4.9 \pm 0.49 \text{ N} \}$  \* at the testing position before the breakdown test of the test specimen.

The measurement shall be made as follows; turn the micrometer spindle so as to advance at the speed of approx. 0.05 mm/sec, until, after the measuring surface has come in contact lightly in parallel with the surface of the specimen, the ratchet has clicked 3 times, and then the thickness shall be read by means of the graduation.

The number of measurements of thickness, unless otherwise specified, shall be at least equal to the number of breakdown.

Note \* In this standard, the particulars in { } are in accordance with the International System of Units (SI) and given for reference only.

## 11. Number of Tests

The tests shall be conducted, unless otherwise specified, 5 times, and the mean value shall be obtained. In case, however, any one of the individual test values differs from the mean value by 15% or more, 5 more tests shall be conducted. Here the dielectric breakdown strength shall be taken as the mean of 10 test values.

## 12. Records

Unless otherwise specified, the following items shall be kept recorded.

- (1) Thickness of test specimen
- (2) Kind of ambient medium used in test
- (3) Pretreatment condition
- (4) Ambient condition
  - (i) Test in air Test temperature and relative humidity
  - (ii) Test in oil Test temperature, and room temperature and relative humidity
- (5) Electrode material, dimensions, shape and compressive force
- (6) Dielectric breakdown voltage at each breakdown
- (7) Dielectric breakdown strength at each breakdown
- (8) Mean value of dielectric breakdown strength and measuring frequency
- (9) Method of voltage application
- (10) Initial applied voltage in step-by-step breakdown test
- (11) Applied voltage and voltage application period in withstand voltage test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมวด ก.

ข้อกำหนดคุณลักษณะของฉนวนน้ำมันชนิดใหม่  
สำหรับใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้าและสวิตช์เกียร์

SPECIFICATION FOR NEW INSULATING OILS FOR  
TRANSFORMERS AND SWITCHGEAR

SECTION ONE — GENERAL

1. Introduction

Many countries have specifications for insulating oils for transformers and switchgear. A comparison of specified characteristics enables an international Recommendation for these oils to be put forward.

2. Scope

The following Recommendation applies to mineral oil used in transformers and switchgear.

For the purpose of this Recommendation, oils are classified into two types:

- uninhibited oils free from anti-oxidant additives;
- inhibited oils containing anti-oxidant additives.

This Recommendation does not apply to synthetic dielectric liquids.

Until further notice, the clause on oxidation stability applies only to uninhibited oils.

3. Identification

Packages and samples should bear the following information:

- a) supplier's designation;
- b) "uninhibited" or "inhibited"; if the oil contains an additive, its general nature shall be indicated;
- c) Grade of oil: state whether "Class I" or "Class II".

Classes I and II are defined by the following characteristics:

- Viscosity cSt at 20 °C and at -15 °C or -30 °C.
- Flash point (closed cup).
- Pour point.

Note. — In some applications and particularly for special climatic conditions, oils with other characteristics may be used. Such oils may not comply with some of the clauses in this Recommendation.

4. Characteristics

4.1 Appearance

The oil shall be limpid and free from suspended matter or sediment.

4.2 Density

Shall not be greater than 0.895 g/cm<sup>3</sup> at 20 °C.

4.3 *Kinematic viscosity*

Depending on the class of the oil, the kinematic viscosity shall not exceed the following limits:

	Class I	Class II
est at 20 °C	40	25
15 °C	300	---
30 °C	---	1500

4.4 *Flash point (closed cup)*

Minimum flash point shall be:

- a) 140 °C for Class I oil;
- b) 130 °C for Class II oil.

4.5 *Pour point*

Maximum pour point shall be:

- a) -30 °C for Class I oil;
- b) -45 °C for Class II oil.

4.6 *Neutralization value*

Shall not be more than 0.03 mg KOH/g.

4.7 *Corrosive sulphur*

The classification of the copper strip must not be above 2.

4.8 *Electric strength*

On new untreated oil, the breakdown voltage shall be at least 30 kV.

If this value is not attained, the oil shall be treated.

After treatment, the breakdown voltage shall be at least 50 kV.

4.9 *Dielectric dissipation factor (tan δ) \**

Measured at 90 °C on a dried and filtered sample, at a stress between 500 V/mm and 1 000 V/mm and a frequency between 40 Hz and 62 Hz, the loss tangent shall be 0.005 max.

4.10 *Oxidation stability*

4.10.1 *Uninhibited oil*

After oxidation the oil shall have:

- Neutralization value: 0.40 mg KOH/g maximum.
- Total sludge: 0.10% weight maximum.

\* In some countries, the term loss tangent is often used instead of dielectric dissipation factor.

#### 4.10.2 Inhibited oil

A test method is under consideration.

#### 4.11 Presence of oxidation inhibitor

Uninhibited oils must not contain anti-oxidant additives. In the case of inhibited insulating oils, the presence of the additive used can be confirmed, see Clause 16.

#### 5. Sampling

The oil should be sampled where it is presumed to be most contaminated, e.g. at the lowest point of the vessel in which it is contained; however, contaminants at the surface and in the body of the oil must not be overlooked.

Sampling shall, for the time being, be according to ASTM D 923-65.

A method more specifically adapted to new insulating oils will be drafted later.

## SECTION TWO — TEST METHODS

### General note

For the determination of physical characteristics (density and viscosity), any recognized method may be used.

In case of dispute, the specified ASTM method shall be used.

For the determination of other characteristics, the indicated IEC and ASTM methods, as mentioned in the present Recommendation, shall be used.

#### ⑥ Appearance

A representative sample of the oil shall be examined in a 10 cm thick layer, at ambient temperature.

#### ⑦ Density

This shall be measured at 20 °C (or converted to 20 °C) (correction:  $0.00065 \text{ g} \times \text{cm}^{-3} \times \text{deg C}^{-1}$ ).

Any recognized method may be used.

Specified method in case of dispute: ASTM D 941-55.

#### ⑧ Kinematic viscosity

Any recognized method may be used.

Specified method in case of dispute: ASTM D 445-65.

#### ⑨ Flash point (closed cup)

Specified method: ASTM D 93-66.

#### 10. Pour point

Specified method: ASTM D 97-66.

## 11. Neutralization value

### 11.1 Reagents

- indicator: solution of 2 g alkali-blue 6 B in 100 ml ethanol;
- 0.1 N aqueous HCl;
- 0.1 N alcoholic KOH;
- toluene, pure, sulphur free;
- azeotropic ethanol (boiling point: 78.2 °C/760 mm; about 5% water).

### 11.2 Method

To 400 ml of a mixture of 3:2 toluene:ethanol, add 1-3 ml of indicator solution followed by one drop of 0.1 N HCl solution to sensitize the indicator. Neutralize the above solution with 0.1 N KOH to a red colour comparable with that of a solution of 10% cobalt nitrate  $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (the coloration should persist for 15 s).

Add this solution to a  $20 \pm 0.1$  g sample of the oil to be tested.

Titrate with 0.1 N KOH solution at a temperature not above 25 °C.

The neutralization value (NV) is calculated from the expression:

$$NV = \frac{n \cdot N \cdot 56.1}{P}$$

where:

- $n$  = number of millilitres KOH used in the titration
- $N$  = normality of the alcoholic KOH solution
- $P$  = weight of oil, in grams

## 12. Corrosive sulphur

Specified method: ASTM D 130-65.

Test duration shall be 3 h. at 100 °C.

## 13. Electric strength

Specified method: see IEC Publication 156, Method for the Determination of the Electric Strength of Insulating Oils.

### 13.1 Treatment of the oil (see Sub-clause 4.8)

Purpose: To eliminate solid particles and water present in the oil, this is treated as follows before test.

Method: The oil is brought to approximately 90 °C, then filtered hot under vacuum (ca. 20 torrs \*). The filter should be of sintered glass, porosity 4.

The filtrate is cooled in a desiccator and used immediately to measure electric strength and dielectric dissipation factor.

Note. — Filtration can be done equally well at ambient temperature but under higher vacuum (5 torrs \*).

\* 1 torr = 1 mm Hg = 133.322 N/m<sup>2</sup>.

14. Dielectric-dissipation factor

Specified method: IEC Publication 250, Recommended Methods for the Determination of the Permittivity and Dielectric Dissipation Factor of Electrical Materials at Power and Radio Frequencies including Metre Wavelengths.

Treatment of oil: see Clause 13.

15. Oxidation stability

15.1 Uninhibited oil

Specified method: IEC Publication 74, Method for Assessing the Oxidation Stability of Insulating Oils.

15.2 Inhibited oil

Specified method: under consideration.

16. Presence of oxidation inhibitor

Any approved analytical technique may be used either to establish the absence of inhibitor or to confirm its presence and nature.

The method must be specific for the type of inhibitor used and have sufficient sensitivity.

The objects of these determinations are:

- 1) to check that the mineral oil, presumed uninhibited, does not contain anti-oxidation additives;
- 2) to confirm the presence and nature of the anti-oxidant additive in inhibited oils.

The following colorimetric procedures have been found to apply to most types of phenol and amine inhibitors.

16.1 Procedure

16.2 Reagents (all reagents to be of analytical quality)

- Glacial acetic acid.
- Ammonia, aqueous solution, about 50% (minimum 25%).
- Ethanol, 95% pure.
- Alcoholic solution 5% phosphomolybdic acid.

16.3 Test method

16.3.1 To detect phenol type inhibitor

Pour 2 ml ethanol into test tube.

Add 2 ml of test oil and shake the mixture well (30 s).

Add 1 ml of alcoholic phosphomolybdic acid solution and shake (30 s).

Add 1 ml ammonia, shake and allow to settle until phases separate.

If phenol inhibitor is present there will be a blue or blue-purple coloration.

16.3.2 *To detect amine type inhibitor*

Pour 2 ml glacial acetic acid into test tube.

Add 2 ml of test oil and shake the mixture well (30 s).

Add 1 ml of alcoholic phosphomolybdic acid solution, shake and allow to settle.

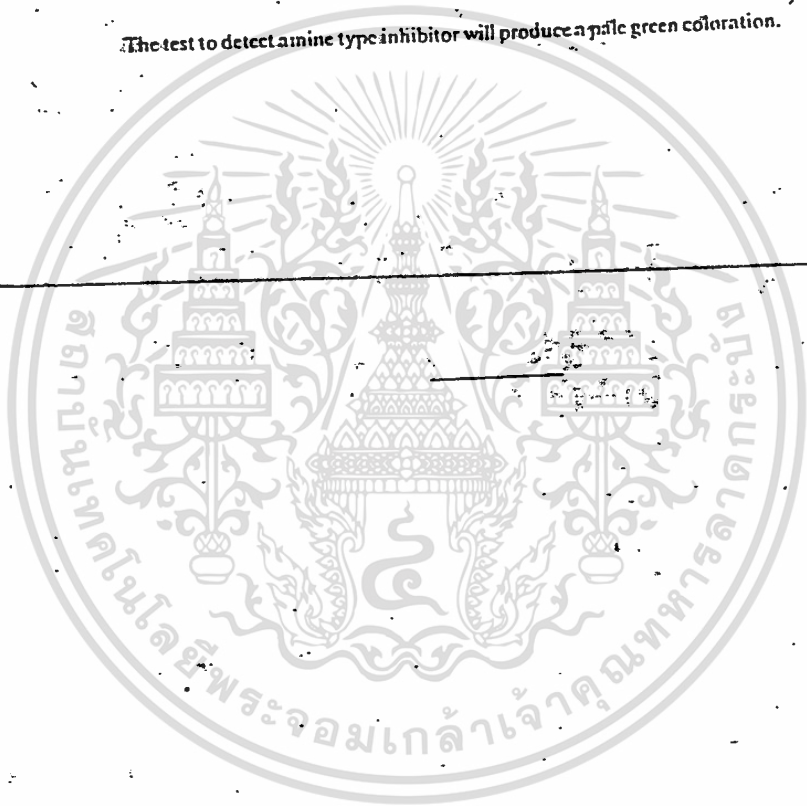
If amine inhibitor is present, there will be an intense blue or blue-green coloration.

16.4 *Blank test*

It is strongly recommended that a blank test be done using the above procedures with a known pure mineral oil.

The test to detect phenol type inhibitor will produce a slight blue tinge.

The test to detect amine type inhibitor will produce a pale green coloration.



## APPENDIX

### INTERFACIAL TENSION

#### 1. Characteristic

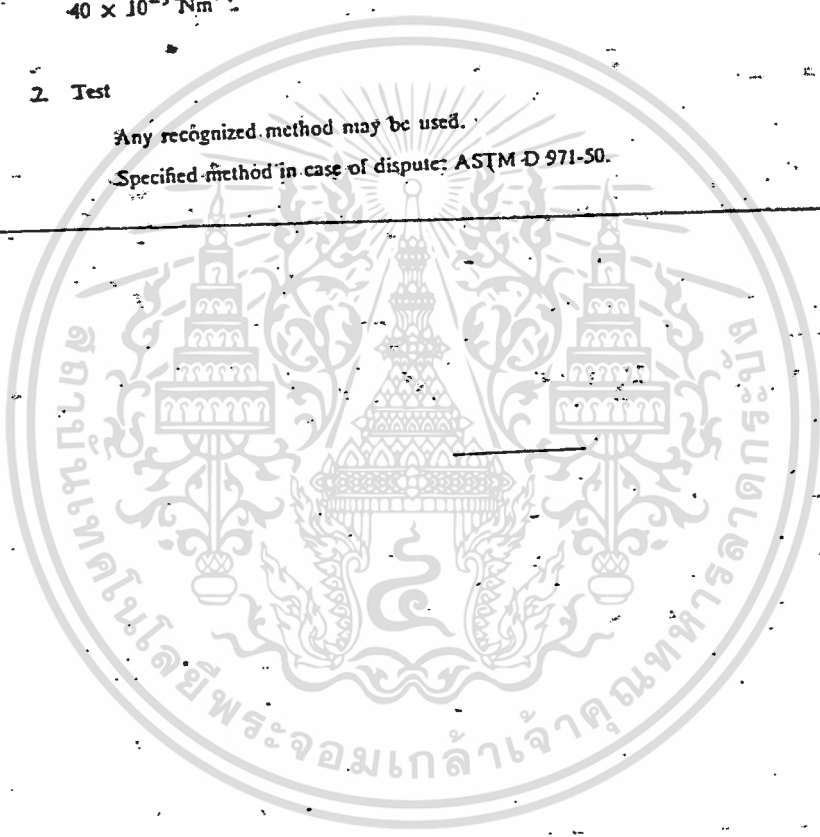
Interfacial tension is not required in the present Recommendation. It may be determined if specially requested.

In such a case, the interfacial tension of the oil, measured at 25 °C, should be greater than  $40 \times 10^{-3} \text{ Nm}^{-1}$ .

#### 2. Test

Any recognized method may be used.

Specified method in case of dispute: ASTM D 971-50.



AMENDMENTS TO IEC PUBLICATION 296

SPECIFICATION FOR NEW INSULATING OILS FOR TRANSFORMERS AND SWITCHGEAR

(First edition - 1969)

SECTION ONE — DETERMINATION OF THE DENSITY

Page 11

Clause 7. Density

Replace the existing clause by the following:

7. Density

This shall be measured at 20°C (or converted to 20°C by the correction factor  $0.00065 \text{ g cm}^{-3} \text{ deg}^{-1}$ ).

Any recognized test method may be used.

In case of dispute the density shall be determined by means of hydrometers complying with ISO Recommendation R 649 according to the following procedure.

*Note.* — Hydrometers of the series L 30 are preferable.

7.1 Test procedure

Adjust the temperature of the sample so that it is within 15°C to 27°C.

Transfer the sample to a clean cylinder made of glass or clear plastic having an inside diameter of at least 2.5 cm greater than the outside diameter of the hydrometer and a height so that when the hydrometer floats in the sample — the distance between the bottom of the hydrometer and the bottom of the cylinder is at least 2.5 cm.

Remove any air bubbles on the surface of the sample by touching them with clean filter paper.

Place the cylinder containing the sample in a vertical position in a location free from air current. The temperature of the sample should not vary appreciably during the time necessary to complete the test.

Insert the hydrometer gently into the sample. Avoid wetting the stem above the level which will be immersed in the liquid.

Insert a thermometer and continuously stir the sample until a steady reading is obtained. Read and note temperature to the nearest 0.2 °C and then remove the thermometer.

Depress the hydrometer about two scale divisions into the liquid and then release it, imparting a slight spin to assist in reaching a rest position.

nearest 0.0005 g/cm<sup>3</sup> density, the point on the scale at which the surface of the liquid cuts the scale.

Determine this point by placing the eyes slightly below the surface of the liquid and slowly raising them until the surface appears as a straight line cutting the hydrometer scale.

Immediately after recording the hydrometer reading, note again the temperature of the sample. Repeat the density determination if the temperature has varied more than 0.5 °C.

Apply any relevant correction to the hydrometer reading and convert it to 20 °C.

## SECTION TWO — DETERMINATION OF CORROSIVE SULPHUR

Page 9

*Sub-clause 4.7 Corrosive sulphur*

*Replace the existing sub-clause by the following:*

**4.7 Corrosive sulphur**

The oil shall be "non-corrosive"

Page 13

**Clause 12. Corrosive sulphur**

*Replace the first line by the following:*

Specified method: ASTM D 1275-67.

หมวด ข.

วิธีการวัดค่าความทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนน้ำมัน

COMMISSION ELECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

affiliée à l'Organisation internationale de Normalisation — ISO

RECOMMANDATION DE LA C.E.I.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

I.E.C. RECOMMENDATION

Publication 756

première édition — first edition

1963

Méthode pour la détermination de la rigidité électrique des huiles isolantes

Method for the determination of the electric strength of insulating oils



Droits de reproduction réservés — Copyright — all rights reserved

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale

1, rue de Varemé

Genève, Suisse

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

METHOD FOR THE DETERMINATION OF THE  
ELECTRIC STRENGTH OF INSULATING OILS

FOREWORD

- The formal decisions or agreements of the I.E.C. 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.
- They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- In order to promote this international unification, the I.E.C. expresses the wish that all National Committees having an interest in national rules, when preparing such rules, should use the I.E.C. recommendations as the fundamental basis for these rules in so far as national conditions will permit.
- The desirability is recognized of extending international agreement on these matters through an endeavour to harmonize national standardization rules with these recommendations in so far as national conditions will permit. The National Committees pledge their influence towards that end.

PREFACE

This recommendation was prepared by Technical Committee No. 30, Insulating Oils.

A first draft was circulated in 1961, and, as a result of the meeting held at Interlaken in June 1961, a proposal was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in January 1962.

The following countries voted explicitly in favour of publication:

Austria	Netherlands
Belgium	Norway
Bulgaria	Poland
Czechoslovakia	Portugal
Denmark	Romania
Finland	Sweden
France	Switzerland
Germany	Turkey
Hungary	Union of Soviet Socialist Republics
Israel	United States of America

# METHOD FOR THE DETERMINATION OF THE ELECTRIC STRENGTH OF INSULATING OILS

## 1. Introduction

Electric strength is not a criterion of insulating oil manufacturing quality, but a conventional test intended to reveal the extent of physical pollution by water and other suspended matter, and the advisability of carrying out drying and filtration treatment before the oils are introduced into the apparatus for which they are intended.

The measured value of the electric strength depends essentially on the apparatus and procedure used.

Although in principle the technical problem concerning the assessment of electric strength is the same for new oils, treated oils, and used oils, it would seem that this test should be standardized, which for the purpose of international transactions in new oils intended for electrotechnical uses, transactions in which a common denominator is desired. Each National Committee can standardize, in its own country, a special different method for the control of used oils.

The test described below consists in subjecting the oil contained in a specified apparatus, to an a.c. electric field with a continuously increasing rate of voltage rise, till the oil breaks down.

## 2. General

The test is, in principle, the same for all classes of oil (for transformers, for oil-filled cables, for circuit-breakers, for capacitors), whether new or used. It is mainly intended for the acceptance of new oils at the time of their delivery; its application is restricted to oils having a viscosity of not more than 50 centistokes at 20°C.

## 3. Sampling

As the electric strength is exceptionally sensitive to the slightest contamination of the sample, the importance of careful sampling, with special reference to possible absorption of humidity, cannot be too strongly emphasized. Samples of insulating oil for electric strength tests are only drawn by air under the immediate supervision of persons of judgement, skill and experience in the handling of insulating oils.

The oil is sampled at the place where it is considered to be most polluted, for example, at the lowest point of the receptacle holding it.

## 4. Condition of the oil

The test is carried out on the oil as received, without drying or degassing.

## 5. Test cell

The cell, made of glass or plastic, is transparent, with an effective volume between 300 and 500 ml. It is preferably closed.

Two types of cell are illustrated, see Figures 1 and 2 page 15.

## 6. Electrodes

The copper, brass, bronze or stainless steel polished electrodes are either spherical (12.5 mm to 13.0 mm diameter) as given in Figure 1 or spherical surfaced of the shape and dimensions given in Figure 2. The electrodes are mounted on a horizontal axis and are 2.5 mm apart.

The gap between them is set to an accuracy of  $\pm 0.1$  mm by means of thickness gauges. The axis of the electrodes is immersed to a depth of approximately 40 mm.

Electrodes are replaced as soon as pitting caused by discharges is observed.

## 7. Preparation of the cell

When it is not in use, it is recommended to store the apparatus full of dry oil in a clean dry place, protected from dust.

If it has not been used for some time, it is thoroughly cleaned: the electrodes are removed, cleaned and finally rinsed with dry clean new oil. Replacement of the electrodes is carried out with the greatest care, avoiding all direct contact with the fingers.

Immediately before use, the cell is cleaned by rinsing with the test oil (several times, if possible) before proceeding to the final filling under the conditions laid down in Clause 7.

## 8. Preparation of the sample

The vessel containing the test oil 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 oil without causing the formation of air bubbles.

Immediately after this, the sample is poured down into the test cell, slowly in order to avoid air bubbles forming (e.g. by means of a clean, dry glass rod). The operation is carried out in a dry place free from dust.

The oil temperature at the time of the test shall be the same as that of the ambient air, preferably in the neighbourhood of 20°C (15 to 25°C), and noted.

## 9. Test method

The test consists in applying to the electrodes an increasing a.c. voltage of frequency 40 to 62 Hz (50 Hz), the rate of increase of the voltage being regular and equal to 2 kV/s, starting from zero up to the value producing breakdown.

The circuit is opened manually if a transient spark (audible or visible) occurs between the electrodes or automatically if an established arc occurs.

In the latter case the automatic switch shall break the voltage within 0.02 s.

The breakdown voltage is the voltage reached during the test at the time the first spark occurs between electrodes, whether it be transient or established.

The test shall be carried out six times on the same cell filling.

The first application of the voltage is made as quickly as possible after the cell has been filled, provided there are no longer any air bubbles in the oil, and at the latest ten minutes after filling. After each breakdown, the oil is gently stirred between the electrodes by means of a clean, dry glass rod, avoiding as far as possible the production of air bubbles. For the five subsequent tests, the voltage is re-applied one minute after the disappearance of any air bubbles that may have been formed. If the observation of the disappearance of air bubbles is not possible, it is necessary to wait five minutes before a new breakdown test is started.

The electric strength is the arithmetic mean of the six results which have been obtained.

## 10. Electrical apparatus

The characteristics of the electrical apparatus shall comply with the following requirements:

### 10.1 Transformer

The test voltage may be obtained by using a step-up transformer supplied from an a.c. (40 to 62 Hz (c/s)) low-voltage source. The primary voltage is gradually increased, either manually or by an automatic control device.

The voltage applied to the electrodes of the oil-filled cell has an approximately sinusoidal waveform, such that the peak factor is within the following limits: 1.34 (i.e.  $\sqrt{2} - 5\%$ ) and 1.48 (i.e.  $\sqrt{2} + 5\%$ ).

The transformer and associated equipment are designed to produce a minimum short-circuit current of 20 mA for voltages higher than 15 kV.

### 10.2 Protective gear

The test is carried out so as to prevent high-frequency oscillations as far as possible.

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

The primary circuit of the high-voltage transformer is fitted with a circuit-breaker operated by the current flowing following the breakdown of the sample, and with a delay not more than 0.02 s. The circuit-breaker is fitted with a no-voltage release coil to protect the equipment.

### 10.3 Voltage regulation

Voltage regulation may be ensured by one of the following methods:

- Variable-ratio auto-transformer;
- Resistance type voltage divider;
- Generator-field regulation;
- Induction regulator.

Preference is given to an automatic system for increasing the voltage, because it is difficult to obtain manually a reasonably uniform rate of voltage rise as a function of time.

### 10.4 Measurement of test voltage

For the purpose of this document, 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 must be calibrated against a sphere-gap up to the full voltage which it is desired to measure.

The ratio of the voltage derived from the sphere-gap to the voltage indicated on the auxiliary instrument may be dependent upon the presence of the test cell or of the sphere-gap and it is important that the test cell (or an equivalent load) should be in the circuit during the calibration.

The sphere-gap may be disconnected during the actual test if its presence is known to have a negligible influence on the voltage ratio.

## 11. Results

The report shows, expressed in kilovolts, the breakdown voltages obtained during all the tests which have been carried out, and the average of the results.

The report shall mention the type of electrodes used, the frequency of the test voltage and the oil temperature.