



ปีการศึกษา 2537

เทคนิคการวัดค่าคาปาซิแตนซ์และแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกในฉนวน

TECHNICS OF C-TAN δ MEASURING IN DIELECTRIC



โดย
นายกำพล ทรวงบรมกุล
นายทวีศักดิ์ ศรีวงศ์ทอง
นายนพดล นิมพัชรารุช
นายปรีชา โทการกุล

วัน เดือน ปี 18 ธ.ค. ๒๕๓๗
เลขทะเบียน.....๐๖4๗๑๕
เลขเรียกหนังสือ... ๒3๗0๑๕ ก.๖

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2537


ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เทคนิคการวัดค่าคาปาซิแตนซ์และแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียในฉนวน

ผู้จัดทำ

- 
1. นายกำพล ทรวงบูรณกุล
 2. นายทวีศักดิ์ ศรีวงศ์ทอง
 3. นายนพดล นิมพัชรารุช
 4. นายปรีชา โทการกุล

 อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ. ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคการวัดค่าคาปาซิแตนซ์และแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียในฉนวนไดอิเล็กตริกในฉนวน

นายกำพล ทรวงบูรณกุล

นายทวีศักดิ์ ศรีวงศ์ทอง

นายพนพล นิมพัชราวุธ

นายปรีชา โทการกุล

ผศ.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2537

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการศึกษาวิเคราะห์พลังงานสูญเสียในฉนวน และผลกระทบต่อองค์ประกอบที่สำคัญของพลังงานสูญเสีย ได้แก่ ค่าคาปาซิแตนซ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก โดยมุ่งเน้นทางด้านเทคนิคและกระบวนการวัดค่าคาปาซิแตนซ์ และ ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก โดยใช้เครื่องมือวัดของ TETTEX รุ่น 2805 ซึ่งค่าคาปาซิแตนซ์และแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียที่วัดได้นี้สามารถนำไปใช้คำนวณหาค่าพลังงานสูญเสียในฉนวนได้ต่อไป

TECHNICS OF C-TAN δ MEASURING IN DIELECTRIC

Kumpon Suangburanakul

Taweesak Sriwongthong

Noppadol Nimpacharavuth

Preecha Tokarnkul

Assit.Prof. Siriwat Pothivejkul Advisor

1994

ABSTRACT

This thesis is the study of dielectric loss and effect to important component of dielectric loss such as capacitance and dissipation factor ($\tan\delta$) . This project focus on measuring technique and measuring process of capacitance and dissipation factor by using TETTEX type 2805 instrument and then these measuring values can apply to calculate dielectric loss.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	IV
สารบัญตาราง	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 คุณสมบัติของไดโอดีเลคตริก	3
2.1 ความต้านทานของฉนวน	3
2.2 เพอร์มิตติวิตี	4
2.3 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดโอดีเลคตริก	8
2.4 แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดโอดีเลคตริก	9
บทที่ 3 พลังงานสูญเสียในไดโอดีเลคตริก	10
3.1 ความหมายและการคำนวณ	10
3.2 ปัจจัยต่างๆที่มีผลกระทบต่อค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสีย	14
บทที่ 4 หลักการทำงานของเครื่องมือวัด Tettex รุ่น 2805	23
4.1 หลักการทำงานของเครื่อง	23
4.2 รายละเอียดต่างๆบนเครื่อง	26
บทที่ 5 การทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดโอดีเลคตริก	29
บทที่ 6 สรุปผลและวิจารณ์	38
ภาคผนวก	38
กิตติกรรมประกาศ	66
เอกสารอ้างอิง	67

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 วงจรวัดเปอร์มิตติวิตีและคาปาซิแตนซ์	5
รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลย์ของไดอิเล็กตริก	6
รูปที่ 2.3 ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ϵ_r ของฉนวนต่างๆขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ T	8
รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมเฟสเซอร์ของกระแสและเฟสเซอร์ของโวลเตจ	10
รูปที่ 3.2 ปริมาตรเล็กๆของไดอิเล็กตริก	11
รูปที่ 3.3 วงจรเสมือนแบบขนาน	13
รูปที่ 3.4 วงจรเสมือนแบบอนุกรม	13
รูปที่ 3.5 กราฟแสดงค่า $\tan\delta$ ของนอนโพลาร์ไดอิเล็กตริกและความถี่	16
รูปที่ 3.6 กราฟแสดงค่า $\tan\delta$ ของโพลีเมทิลเมตะครายเลตและความถี่ ที่อุณหภูมิ 20 °c	16
รูปที่ 3.7 กราฟแสดงค่า ϵ และ $\epsilon \tan\delta$ กับความถี่ของโพลีบิวทิลเมตะครายเลต	16
รูปที่ 3.8 กราฟแสดงค่า $\tan\delta$ กับความถี่ของไนลอน	17
รูปที่ 3.9 กราฟแสดงค่า $\tan\delta$ ของ $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ และ $2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$ ที่ความถี่ 1 MHz กับอุณหภูมิ	17
รูปที่ 3.10 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า $\tan\delta$ กับอุณหภูมิของโพลาร์ โพลีเมอร์ที่ 50 Hz	18
รูปที่ 3.11 กราฟแสดงค่า $\tan\delta$ ของกระดาษที่ชุ่มด้วยน้ำมันผสมโคลโลไฟน์กับ อุณหภูมิที่ 50 Hz	18
รูปที่ 3.12 กราฟแสดงค่า $\tan\delta$ ของโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลตกับอุณหภูมิที่ 1 Mhz	18
รูปที่ 3.13 กราฟแสดงค่า $\tan\delta$ ของไดรคลอโรไดฟีนิล [ชุดของเส้นโค้ง (a)] และ เพนตะคลอโรไดฟีนิล (b) กับอุณหภูมิและความถี่	19
รูปที่ 3.14 กราฟแสดงค่า $\tan\delta$ ของกระดาษกับความชื้นในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ปริมาตร ที่ความถี่ 1 MHz	20
รูปที่ 3.15 กราฟแสดงเส้นโค้งไอออไนเซชัน	20
รูปที่ 3.16 กราฟแสดงค่า $\tan\delta$ ของเซรามิกคาปาซิเตอร์กับความเข้มของสนาม ไฟฟ้าในไดอิเล็กตริก ที่ความถี่ 1 MHz	21

รูปที่ 3.17 กราฟแสดงค่า $\tan\delta$ ของอัลคาลายฟริกกลาสแฟบรีคและเมสซีสกลาส ของส่วนประกอบที่เหมือนกันของอนุหภูมิ	21
รูปที่ 4.1 วงจรการทำงาน	24
รูปที่ 4.2 รูปด้านหน้าเครื่อง Tettex รุ่น 2805	25
รูปที่ 4.3 แสดงคาปาซิเตอร์มาตรฐานของ Tettex AG รุ่น 3370	28
รูปที่ 5.1 วงจรการทดลอง	30
รูปที่ 5.2 ผลการวัดค่าคาปาซิเตอร์และแฟคเตอร์พลังงานสูญเสีย ไดอิเล็กตริกของลูกแก้วเหนียวลูกที่หนึ่ง	32
รูปที่ 5.3 ผลการวัดค่าคาปาซิเตอร์และแฟคเตอร์พลังงานสูญเสีย ไดอิเล็กตริกของลูกแก้วเหนียวลูกที่สอง	32
รูปที่ 5.4 ผลการวัดค่าคาปาซิเตอร์และแฟคเตอร์พลังงานสูญเสีย ไดอิเล็กตริกของลูกด้วยแวนเปอร์ชเลนสีน้ำตาล	33
รูปที่ 5.5 ผลการวัดค่าคาปาซิเตอร์และแฟคเตอร์พลังงานสูญเสีย ไดอิเล็กตริกของลูกด้วยแวนเปอร์ชเลนสีขาว	33
รูปที่ 5.6 กราฟเปรียบเทียบผลการวัดค่าคาปาซิเตอร์ของลูกด้วยแบบต่างๆ	34
รูปที่ 5.7 ผลเปรียบเทียบการวัดค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก	34
รูปที่ 5.8 กราฟเปรียบเทียบผลของค่าคาปาซิเตอร์คุณกับแฟคเตอร์พลังงาน สูญเสียไดอิเล็กตริกของลูกด้วยแบบต่างๆ	35
รูปที่ ผ.1 ลูกด้วยแบบ 52-1	41
รูปที่ ผ.2 ลูกด้วยแบบ 52-2	42
รูปที่ ผ.3 ลูกด้วยแบบ 52-3	43
รูปที่ ผ.4 ลูกด้วยแบบ 52-4	44
รูปที่ ผ.5 ลูกด้วยแบบ 52-5	45
รูปที่ ผ.6 ลูกด้วยแบบ 52-8	46
รูปที่ ผ.7 ลูกด้วยแบบ ก (แบบ 52-1)	49
รูปที่ ผ.8 ลูกด้วยแบบ ข (แบบ 52-2)	50
รูปที่ ผ.9 ลูกด้วยแบบ ค (แบบ 52-3)	51

รูปที่ ผ.10 ลูกถ้วยแบบ ง (แบบ 52-4)	52
รูปที่ ผ.11 ลูกถ้วยแบบ จ (แบบ 52-8)	53
รูปที่ ผ.12 รูปการทดลองวัดค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสีย คริกของลูกถ้วยฉนวนที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	55
รูปที่ ผ.13 รูปการทดลองวัดค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสีย เปล่าไดอิเล็กตริกของลูกถ้วยฉนวนที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรง สูงสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	60



VII

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ ผ-1 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ (Cx) และค่าแฟคเตอร์ พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก (tanδ) ของลูกถ้วยแขวน แก้วเหนียว ลูกที่หนึ่ง	56
ตารางที่ ผ-2 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ (Cx) และค่าแฟคเตอร์ พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก (tanδ) ของลูกถ้วยแขวน สารปอร์ซเลนแข็ง สีขาว	56
ตารางที่ ผ-3 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ (Cx) และค่าแฟคเตอร์ พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก (tanδ) ของลูกถ้วยแขวน สารปอร์ซเลนแข็ง สีน้ำตาล	57
ตารางที่ ผ-4 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ (Cx) และค่าแฟคเตอร์ พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก (tanδ) ของลูกถ้วยแขวน สารเรซิน สีเหลือง	57
ตารางที่ ผ-5 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ (Cx) และค่าแฟคเตอร์ พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก (tanδ) ของลูกถ้วยแขวน สารเรซิน สีขาว	58
ตารางที่ ผ-6 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ (Cx) และค่าแฟคเตอร์ พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก (tanδ) ของลูกถ้วยแขวน สารปอร์ซเลนแข็ง สีน้ำตาลลูกเล็ก	58
ตารางที่ ผ-7 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ (Cx) และค่าแฟคเตอร์ พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก (tanδ) ของลูกถ้วยแขวน แก้วเหนียว ลูกที่หนึ่ง	61
ตารางที่ ผ-8 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ (Cx) และค่าแฟคเตอร์พลังงาน สูญเสียไดอิเล็กตริก (tanδ) ของลูกถ้วยแขวนแก้วเหนียว ลูกที่สอง	61

ตารางที่ ผ-9 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ (Cx) และค่าแฟคเตอร์ พลังงานสูญเสียค่าไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) ของลูกถ้วยแขวน ปอร์ซเลนสีน้ำตาล	62
ตารางที่ ผ-10 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ (Cx) และค่าแฟคเตอร์ พลังงานสูญเสียค่าไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) ของลูกถ้วยแขวน สารผสมปอร์เลนแข็ง สีขาว	62
ตารางที่ ผ-11 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ (Cx) และค่าแฟคเตอร์ พลังงานสูญเสียค่าไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) ของลูกถ้วยแขวน สารเรซิน สีเหลือง	63
ตารางที่ ผ-12 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ (Cx) และค่าแฟคเตอร์ พลังงานสูญเสียค่าไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) ของลูกถ้วยแขวน สารเรซิน สีขาว	63
ตารางที่ ผ-13 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ (Cx) และค่าแฟคเตอร์ พลังงานสูญเสียค่าไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) ของลูกถ้วยแขวน สารปอร์ซเลนแข็งสีน้ำตาลลูกเล็ก	63
ตารางที่ ผ-14 คุณสมบัติของฉนวนชนิดต่างๆ	64-65

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันได้มีการทดสอบวัดค่าทางไฟฟ้าต่างๆ ทั่วไป โดยเฉพาะอุปกรณ์ด้านไฟฟ้าแรงสูง เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องจักรกลไฟฟ้า สายส่งไฟฟ้าแรงสูง และสายเคเบิลใต้ดิน เป็นต้น

ข้อมูลไดอิเล็กตริกของระบบฉนวนนี้ได้ให้ความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้า อายุ และการประกอบของอุปกรณ์ต่างๆ การทราบข้อมูลทางไดอิเล็กตริกสามารถควบคุมระบบการฉนวนให้มีความน่าเชื่อถือ และหลีกเลี่ยงผลเสียรวมทั้งค่าใช้จ่ายที่เกิดจากความสูญเสียทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น และเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

ค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) เป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลทางไดอิเล็กตริกของระบบฉนวน เมื่อเราทราบค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก เราจะสามารถนำค่าทั้งสองนี้ไปคำนวณหาค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก (dielectric loss) ได้ ซึ่งค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกนี้ยังเป็นคุณสมบัติสำคัญที่จะนำไปใช้ในการพิจารณาเลือกสารที่ใช้ทำฉนวน ตลอดจนตรวจสอบคุณภาพของฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้พัฒนาการฉนวนต่างๆ ให้ดีขึ้นได้ในอนาคต

แต่เดิมนั้นการหาค่าคาปาซิแตนซ์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ที่ไม่มีรูปทรงทางเรขาคณิตจะใช้วิธีการป้อนแรงดันอิมพัลส์ให้แก่อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการทราบค่าโดยอาศัยข้อมูลของกราฟเวลาช่วงหน้าคลื่น และเวลาช่วงหางคลื่น ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้มีความยุ่งยากมาก อีกทั้งผลที่ได้นั้นก็ยังมีค่าไม่แน่นอน ปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนารูปแบบการหาค่าคาปาซิแตนซ์ใหม่ๆ ขึ้น โดยการอาศัยรูปแบบของวงจรบริดจ์ (bridge) โดยที่เครื่องมือหาค่าคาปาซิแตนซ์ของ Tettex AG รุ่น 2805 จะสามารถหาค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกได้พร้อมกัน โดยที่จะมีดิฟเฟอเรนเชียลทรานสฟอร์มเมอร์ (differential transformer) แทนบริดจ์อาร์มรีซิสเตอร์ (bridge arm resistors) ซึ่งเครื่องมือดังกล่าวจะมีขนาดกะทัดรัด แข็งแรง และง่ายต่อการนำมาใช้งาน และสามารถหาค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกได้อย่างต่อเนื่องที่ค่าความถี่ 50 Hz และ 60 Hz ในเวลาเดียวกัน

สำหรับโครงการนี้จะเน้นทางด้านเทคนิคการใช้เครื่องมือวัดค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟกเตอร์
พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของ Tettex AG รุ่น 2805 กับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ เพื่อทำการหาค่าพลัง
งานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของระบบจนวนของอุปกรณ์เหล่านั้น โดยใช้อุปกรณ์ทดสอบที่หาตัวอย่าง
ได้ง่ายและสะดวกต่อการทดสอบที่สุด คือ ลูกถ้วยจนวนไฟฟ้า พร้อมกับจะนำมาเปรียบเทียบกับ
ทฤษฎีขั้นพื้นฐานของพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกว่ามีความถูกต้องเพียงใด เพื่อเป็นการยืนยันถึง
ความสามารถของเครื่องมือวัดของ Tettex AG รุ่น 2805 และปัจจัยต่างๆ ที่อาจมีผลกระทบต่อการหา
ค่าคาปาซิแตนซ์และแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

คุณสมบัติของไดอิเล็กตริก

ไดอิเล็กตริก ก็คือ ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้ทำหน้าที่คั่นระหว่างอิเล็กโทรด เพื่อกั้นหรือให้ทนแรงดันได้สูงขึ้นกว่าก๊าซรวมทั้งอากาศด้วย เช่น คั่นระหว่างแผ่นโลหะของคาปาซิเตอร์ คั่นระหว่างตัวนำในกับตัวนำนอกของเคเบิล คั่นระหว่างขดลวดกับแกนเหล็กในหม้อแปลง เป็นต้น

ลักษณะสำคัญที่เป็นตัวชี้บอกถึงคุณสมบัติและคุณภาพของไดอิเล็กตริกมี 4 ประการ คือ

1. ความต้านทาน
2. เฟอร์มิตติวิตีหรือค่าคงตัวไดอิเล็กตริก
3. ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก
4. แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก

2.1 ความต้านทานของฉนวน (resistance)

ไดอิเล็กตริกหรือฉนวนไฟฟ้าที่สมบูรณ์แล้วจะต้องไม่นำกระแสเลยทั้งสิ้นถ้าหากได้รับแรงดันกระแสตรง นั่นคือจะไม่มีสภาพนำไฟฟ้าอยู่เลย หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ สารฉนวนนั้นมีค่าความต้านทานสูงเป็นอนันต์ แต่ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในทางปฏิบัตินั้นมักจะนำกระแสแต่มีค่าน้อยมากเมื่อป้อนแรงดันกระแสตรง นั่นแสดงว่าสารฉนวนไฟฟ้ามีค่าความต้านทานไม่สูงเป็นอนันต์ หากแต่มีค่าสูงที่วัดได้ ค่าความต้านทานยิ่งสูงก็แสดงว่าฉนวนนี้มีคุณภาพการฉนวนยิ่งดี

เมื่อนำฉนวนไปคั่นระหว่างอิเล็กโทรดที่ป้อนแรงดันกระแสตรงเป็นเวลานานจนกระทั่งอยู่ตัวจะมีกระแสไหลผ่านฉนวนนั้นแต่น้อย เรียกว่า กระแสรั่ว หรือ กระแสค้ำ กระแสรั่วที่ไหลผ่านฉนวนนี้แบ่งออกเป็นสองทาง คือ ทางหนึ่งไหลผ่านเนื้อฉนวนใน เนื่องจากฉนวนมีสภาพนำอยู่บ้างดังกล่าวแล้ว ส่วนอีกทางหนึ่งไหลผ่านตามผิวฉนวนเนื่องจากผิวมีสภาพนำ เนื่องจากมีสิ่งประอะเปื้อนและความชื้นที่ผิว ด้วยเหตุนี้เองการวัดความต้านทานของฉนวนจึงแยกเป็นความต้านทานเชิงปริมาตร (volume resistance) และความต้านทานเชิงผิว (surface resistance)

ค่าความต้านทานของไดอิเล็กตริกอาจคำนวณหรือวัดได้เช่นเดียวกับความต้านทานของตัวนำ ถ้าทราบความต้านทานจำเพาะ ρ ความหนา d พื้นที่ภาคตัด A ของไดอิเล็กตริก เช่นในกรณีแผ่นไดอิเล็กตริกระหว่างแผ่นระนาบคาปาซิเตอร์ ความต้านทานของฉนวนจะหาได้จาก

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

ส่วนในกรณีของไดอิเล็กตริกของคาปาซิเตอร์แบบทรงกระบอกซ้อน ความต้านทานของฉนวนหาได้จาก

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

เมื่อ x คือ รัศมีใดๆ วัดจากแกน และ dx คือ ความหนาส่วนย่อยของฉนวน r_2 และ r_1 เป็น รัศมีของตัวในและตัวน่านอกตามลำดับ l เป็น ความยาว

2.2 เปรอ์มิตติวิตี (permittivity)

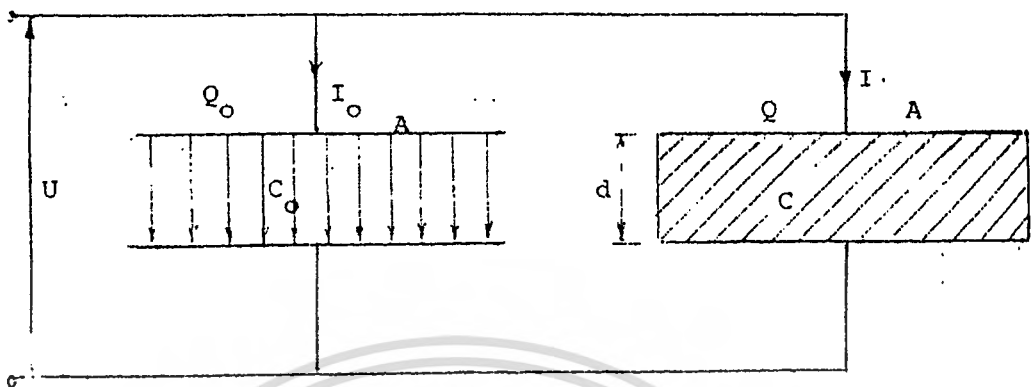
เปรอ์มิตติวิตีบางทีก็เรียกว่า ค่าคงตัวของไดอิเล็กตริก (dielectric constant) ϵ เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญประการหนึ่ง ไม่มีมิติและเป็นตัวบ่งบอกลักษณะของไดอิเล็กตริกหรือสารฉนวนไฟฟ้า เป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดความสามารถของการสร้างคาปาซิแตนซ์ หรือกล่าวง่ายๆ ϵ ก็คือค่าตัวเลขที่บอกให้ทราบว่าคาปาซิแตนซ์จะเพิ่มขึ้นกี่เท่าของคาปาซิแตนซ์สุญญากาศ เมื่อใส่ไดอิเล็กตริกที่มีเปรอ์มิตติวิตี ϵ เข้าไปแทนที่ นั่นคือ

$$C = \epsilon C_0$$

ปกติเปรอ์มิตติวิตี ϵ จะแสดงเป็นค่าสัมพัทธ์ ϵ_r เทียบกับค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของสุญญากาศหรือความว่างเปล่า ϵ_0 คือ

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$$

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



รูปที่ 2.1 วงจรวัดเปอร์มิตติวิตีและคาปาซิแตนซ์

และจากความสัมพันธ์ของคาปาซิแตนซ์ $c = \frac{Q}{U}$ จะได้ค่าคาปาซิแตนซ์ของสูญญากาศ

$$c_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

ถ้าใส่ไดอิเล็กตริกที่เป็นสารอื่น (ฉนวนเหลว ฉนวนแข็ง หรือก๊าซ) เข้าไปแทนที่สูญญากาศระหว่างแผ่น อิเล็กโตรด จะพบว่าถึงแม้ว่าแรงดันที่ป้อนมีค่าคงที่ก็ตาม แต่กระแสในวงจร I (รูปที่ 2.1) จะมากขึ้น ซึ่งแสดงว่าค่า คาปาซิแตนซ์เพิ่มสูงขึ้น ความหนาแน่นของประจุบนอิเล็กโตรดเพิ่มขึ้น และอาจเนื่องจากจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนไหลผ่านไดอิเล็กตริกมากขึ้น

ในคาปาซิเตอร์สูญญากาศที่มีคาปาซิแตนซ์ c_0 กระแสที่ไหลผ่านจะเป็น

$$i(t) = c \frac{du(t)}{dt} \quad \text{หรือ} \quad \bar{I} = j\omega c_0 \bar{U}$$

เครื่องหมาย j แสดงให้เห็นเด่นชัดว่ากระแสนำหน้าแรงดันเป็นมุม 90 องศา ส่วนคาปาซิเตอร์ที่มีสารไดอิเล็กตริก ค่าคาปาซิแตนซ์ c จะไม่เท่ากับ c_0 และยิ่งกว่านั้นจะสังเกตเห็นว่าในทางปฏิบัติเฟสเซอร์ระหว่างแรงดันกับกระแสมีมุมน้อยกว่า 90 องศา เพราะมีพลังงานสูญเสียในลักษณะความต้านทาน นั่นแสดงว่าคาปาซิแตนซ์เป็นจำนวนเชิงซ้อน คือ มีค่าจริงและค่าจินตภาพ ซึ่งรวมอยู่ในรูปของเปอร์มิตติวิตี คือ

$$\bar{c} = \bar{\epsilon} c_0$$

โดยที่

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

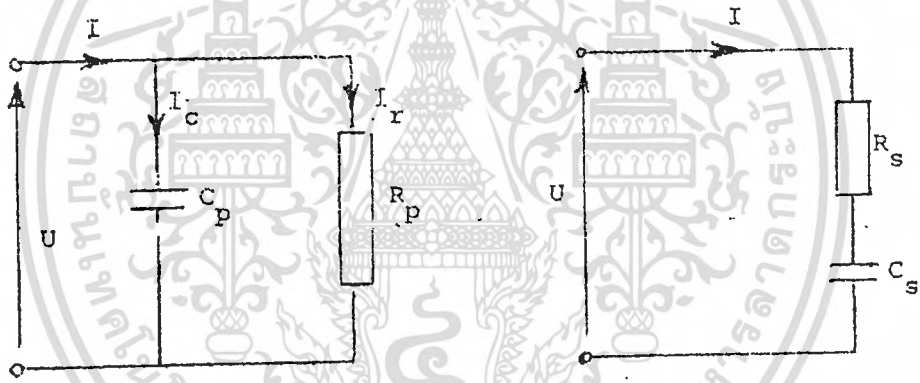
ฉะนั้นกระแสที่ไหลผ่านคาปาซิเตอร์คือ

$$\begin{aligned}\bar{I} &= j\omega\bar{C}\bar{U} \\ &= j\omega(\epsilon' - j\epsilon'')\epsilon_0\bar{U} \\ &= j\omega\epsilon'\epsilon_0\bar{U} + \omega\epsilon''\epsilon_0\bar{U}\end{aligned}$$

เทอมแรกขวามือของสมการ \bar{I} ก็คือ กระแสคาปาซิแตนซ์ I_C และเทอมหลังคือ กระแสพลังงานสูญเสียเปล่า I_r คือ

$$\bar{I} = I_C + I_r$$

ไดอิเล็กตริกมีพลังงานสูญเสียเปล่า และสามารถเก็บประจุไว้ในคาปาซิเตอร์ จึงอาจเขียนแทนด้วยวงจรสมมูลย์ คือ ดังรูปที่ 2.2 รูป ก เป็นวงจรขนาน รูป ข เป็นวงจรรอนุกรม



ก

ข

รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลย์ของไดอิเล็กตริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรขนาน :

$$C_p = \epsilon' c_0$$

$$R_p = \frac{1}{(\omega \epsilon'' c_0)}$$

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega R_p C_p} = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$$

วงจรรอนุกรม :

$$C_s = \frac{|\bar{\epsilon}_r|^2}{\epsilon'} C_0 = \epsilon' \{1 + (\tan \delta)^2\} C_0$$

$$R_s = \frac{\epsilon''}{\omega |\bar{\epsilon}_r|^2 C_0}$$

$$\tan \delta = \omega R_s C_s = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$$

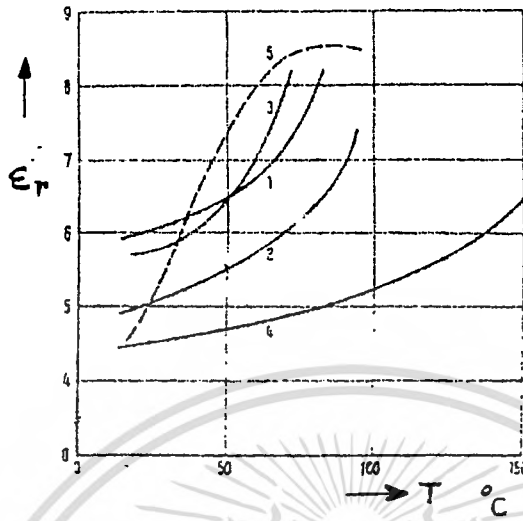
มุม δ นี้เรียกว่า มุมพลังงานสูญเสีย (loss angle)

จากสมการ C_p และ C_s จะเห็นได้ว่า ค่าคาปาซิแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ที่มีสารไดอิเล็กตริกขึ้นอยู่กับการสมมูลย์ ในกรณีที่พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกมีค่าต่ำ คือ $\epsilon'' \ll \epsilon'$ หรือ $\tan \delta \ll 1$ ค่าคาปาซิแตนซ์ทั้งสองจะเท่ากัน คือ $C_p = C_s$ และจะได้

$$\bar{\epsilon}_r \rightarrow \epsilon = \epsilon'$$

นั่นก็คือ ϵ' จะเป็นค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (relative dielectric constant) ϵ ที่ใช้กัน

ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ ϵ นี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยทั่วไปฉนวนที่มีใช้ ถ้าอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ϵ จะเพิ่มสูงขึ้นตามดังรูปที่ 2.3



- 1 พอร์ชเลน
- 2 กระดาษอัดแข็ง
- 3 อิฟ็อกซี
- 4 พีวีซี

รูปที่ 2.3 ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ϵ ของฉนวนต่างๆ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ T

2.3 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก (dielectric strength)

ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า หมายถึง ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field stress) สูงสุดที่ฉนวนนั้นสามารถทนอยู่ได้ โดยไม่เกิดความเสียหายหรือเกิดเบรคดาวน์ หรือทำให้การฉนวนเสื่อมสภาพ ซึ่งมีหน่วยเป็น V/cm หรือ kV/cm คือ มีหน่วยเป็นค่าแรงดันต่อหน่วยความหนาของฉนวนหรือระยะห่างของอิเล็กโทรด หากได้โดยป้อนแรงดันเพิ่มขึ้นจนเกิดเบรคดาวน์ ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่มีโครงสร้างทางเคมีและทางฟิสิกส์ต่างกัน สารประเภทมีโครงสร้างเป็นผลึกจะเกิดเบรคดาวน์ตามแนวที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมน้อยที่สุด ซึ่งมักจะสังเกตเห็นว่าร่องรอยของการเกิดเบรคดาวน์ในฉนวนจะไม่เป็นแนวเส้นตรง โดยปกติไดอิเล็กตริกแข็งจะทนต่อแรงดันเบรคดาวน์ได้สูงกว่าไดอิเล็กตริกเหลว เบรคดาวน์ในฉนวนเหลวสภาพการฉนวนจะกลับสู่สภาพปกติได้หลังจากเบรคดาวน์ผ่านไปแล้ว แต่ในฉนวนแข็งเกิดเบรคดาวน์แล้วสภาพการฉนวนจะเสียไป ใช้งานเพื่อการฉนวนอีกไม่ได้ อย่างไรก็ตามฉนวนเหลวหรือฉนวนแข็งก็อาจมีค่าแรงดันเบรคดาวน์ต่ำถ้าหากมีสิ่งเจือปน



2.4 แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$)

เนื้อหาเรื่องแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกจะกล่าวถึงในบทที่ 3 ต่อไป

การคำนวณหาค่าคาปาซิแตนซ์แบบต่างๆ

1. คาปาซิแตนซ์แบบระนาบ

$$c = \frac{\epsilon s}{h} \quad (F)$$

2. คาปาซิแตนซ์แบบทรงกลมซ้อนกัน

$$c = \frac{4\pi\epsilon r_1 r_2}{r_2 - r_1} \quad (F)$$

3. คาปาซิแตนซ์แบบทรงกระบอกซ้อนกัน

$$c = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (F)$$

โดยที่ s : พื้นที่เพลท (m^2)

h : ความหนาของไดอิเล็กตริก (m)

r_2 : รัศมีทรงกลมหรือทรงกระบอกด้านนอก (m)

r_1 : รัศมีทรงกลมหรือทรงกระบอกด้านใน (m)

- บทที่ 3

พลังงานสูญเสียในไดอิเล็กตริก

3.1 ความหมายและการคำนวณ

เป็นที่ทราบกันว่า ถ้าตัวนำโลหะที่ป้อนด้วยโวลเตจกระแสตรงและโวลเตจกระแสสลับ โดยที่โวลเตจมีค่าเท่ากัน พลังงานสูญเสีย P (วัตต์) ในตัวนำในกรณีทั้ง 2 จะมีค่าเท่ากัน คือ

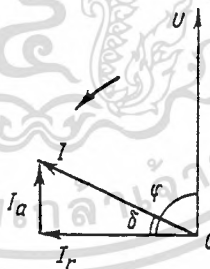
$$P = \frac{U^2}{R} \quad (3:1)$$

เมื่อ U คือ โวลเตจ (V)

R คือ ความต้านทานของตัวนำ (Ω)

เมื่อป้อนโวลเตจให้กับ ไดอิเล็กตริกจะเกิดพลังงานสูญเสียซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ของโวลเตจที่ป้อน พลังงานสูญเสียเมื่อป้อนด้วยโวลเตจกระแสสลับจะมีค่ามากกว่าเมื่อป้อนด้วยโวลเตจกระแสตรง และจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความถี่, โวลเตจ และคาปาซิแตนซ์ และขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุของ ไดอิเล็กตริก

ค่าพลังงานที่สูญเสียในไดอิเล็กตริกภายใต้การป้อนโวลเตจ เรียกว่า พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก (dielectric loss)



รูปที่ 3.1 ไคอะแกรมเฟสเซอร์ของกระแสและเฟสเซอร์ของโวลเตจ

มุมพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก (dielectric loss angle ; δ) คือ มุมที่รวมกับมุมเฟสของไดอิเล็กตริก (φ) ได้ 90 องศา มุม φ คือ มุมต่างกันระหว่างเฟสเซอร์ของโวลเตจและเฟสเซอร์ของกระแส เมื่อป้อนโวลเตจกระแสสลับแก่วงจรคาปาซิทีฟ ในอุดมคติแล้ว วงจรคาปาซิทีฟจะมีเฟส

เซอร์ของกระแสหน้าเฟสเซอร์ของโวลเตจอยู่ 90 องศา และ $\delta = 0$ แต่ในความเป็นจริงแล้ว กระแส I (ดูรูปที่ 3.1) จะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ กระแสแอกทีฟ I_a และกระแสรีแอกทีฟ I_r และจะได้

$$\delta = 90 - \phi$$

แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$) คือ ค่าแทนเจนต์ของมุม δ เป็นอัตราส่วนระหว่างกระแสแอกทีฟและกระแสรีแอกทีฟ

$$\tan \delta = \frac{I_a}{I_r}$$

หรือ เป็นอัตราส่วนระหว่างแอกทีฟเพาเวอร์ P และรีแอกทีฟเพาเวอร์ Q

$$\tan \delta = \frac{P}{Q}$$

พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก (P) ในฉนวนที่มีค่าคาปาซิแตนซ์ C จะหาได้จาก

$$P = UI_a = UI_r \tan \delta$$

$$I_r = U\omega C$$

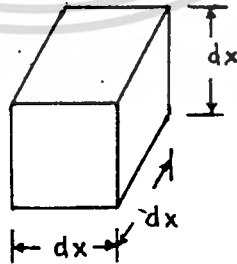
เมื่อ $\omega = 2\pi f$ คือ ความถี่เชิงมุม และจะได้

$$P = U^2 \omega C \tan \delta \tag{3.2}$$

เมื่อ $C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{h}$ จะได้

$$P = U^2 \omega \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{h} \tan \delta \tag{3.3}$$

พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกสามารถคำนวณในรูปพลังงานสูญเสียต่อหน่วยปริมาตรได้ ซึ่งเรียกว่า พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกจำเพาะ (specific dielectric loss ; p) มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร การหาค่าพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกจำเพาะ สามารถหาได้โดยการแบ่งไดอิเล็กตริกออกเป็นปริมาตรเล็กๆ ดังรูป 3.2



รูปที่ 3.2 ปริมาตรเล็กๆ ของไดอิเล็กตริก

โดยที่

$$s = (dx)^2 \quad m^2$$

$$h = dx \quad m$$

$$U = E \cdot dx \quad V$$

จากสมการ (3.3) จะได้

$$\begin{aligned} dP &= E^2 (dx)^2 \omega \epsilon_r \epsilon_0 \frac{(dx)^2}{dx} \tan \delta \\ &= E^2 \omega \epsilon_r \epsilon_0 \tan \delta (dx)^3 \end{aligned}$$

ดังนั้นพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกจำเพาะ คือ

$$\begin{aligned} p &= dP/d\text{volume} \\ &= dP/(dx)^3 \\ &= E^2 \omega \epsilon_r \epsilon_0 \tan \delta \quad (\text{w/m}^3) \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad p = E^2 f \frac{\epsilon_r \tan \delta}{1.8 \times 10^{10}} \quad (\text{w/m}^3)$$

ดัชนีพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก (dielectric loss index) : $\epsilon_r \tan \delta$

ในระบบกระแสสลับ สมการพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกจำเพาะอาจเขียนได้เป็น

$$p_{ac} = E^2 \gamma_a \quad (\text{w/m}^3)$$

เมื่อ γ_a : ค่าความนำไฟฟ้าของปริมาตรแอคทีฟ (active volume conductivity)

$$\gamma_a = \omega \epsilon_0 \epsilon_r \tan \delta = f \frac{\epsilon_r \tan \delta}{1.8 \times 10^{10}} \quad (\text{mho/m})$$

ในระบบกระแสตรง สมการพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกจำเพาะอาจเขียนได้เป็น

$$p_{dc} = \frac{E^2}{\rho} = E^2 \gamma \quad (\text{w/m}^3)$$

เมื่อ γ : ค่าความนำไฟฟ้าของปริมาตรของวัสดุ (volume conductivity of the material)

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad (\text{mho/m})$$

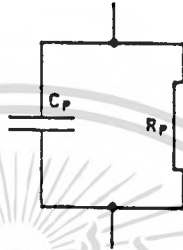
ถ้าที่ E เดียวกัน แล้ว $p_{ac} \geq p_{dc}$ นั่นคือ $\gamma_a \geq \gamma$ ดังนั้น

$$f \epsilon_r \rho \tan \delta \geq 1.8 \times 10^{10} \quad (3.4)$$

วงจรเสมือนของไดอิเล็กตริกที่มีพลังงานสูญเสีย (Equivalent diagrams of a lossy dielectric)

วงจรสมมูลที่ใช้ศึกษาไดอิเล็กตริกที่มีพลังงานสูญเสียภายใต้การป้อนไฟกระแสสลับ จะมีอยู่ 2 ชนิด คือ

1. วงจรเสมือนแบบขนาน (parallel equivalent circuit) วงจรสมมูลจะเป็นแบบขนาน R,C ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรเสมือนแบบขนาน

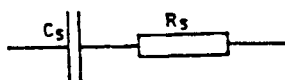
จากรูปที่ 3.3 จะได้ว่า

$$I_r = U\omega C_p ; I_a = \frac{U}{R_p}$$

$$\tan \delta = \frac{I_a}{I_r} = \frac{1}{\omega C_p R_p}$$

$$P = U^2 \omega C_p \tan \delta = \frac{U^2}{R_p}$$

2. วงจรเสมือนแบบอนุกรม (series equivalent circuit) วงจรสมมูลจะเป็นแบบอนุกรม R,C ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจรเสมือนแบบอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.4 จะได้ว่า

$$U_R = IR_s ; U_C = \frac{I}{\omega C_s}$$

$$\tan \delta = \frac{U_R}{U_C} = \omega C_s R_s$$

$$P = U_R I = U_R \frac{U_C}{X_C} = U \sin \delta \frac{U \cos \delta}{X_C}$$

$$P = U^2 \omega C_s \sin \delta \cos \delta$$

$$= \frac{1}{2} U^2 C_s \sin 2\delta$$

$$= U^2 \omega C_s \frac{\tan \delta}{1 + \tan^2 \delta}$$

ถ้า δ มีค่าน้อยมาก ดังนั้น $\tan^2 \delta \approx 0$ จะได้

$$P = U^2 \omega C_s \tan \delta = U^2 \omega^2 C_s^2 R_s = I^2 R_s$$

จากสมการข้างต้นเราจะได้

$$C_s = C_p (1 + \tan^2 \delta) \quad (3.5)$$

และจะได้

$$R_s = \frac{R_p}{1 + \frac{1}{\tan^2 \delta}} \quad (3.6)$$

จากสมการ (3.5) และ (3.6) ทำให้ทราบว่า ถ้าค่า δ มีค่าน้อยมาก $\tan^2 \delta \approx 0$ จะได้

$$C_s \approx C_p \quad \text{และ} \quad R_s \approx R_p \tan^2 \delta$$

และถ้า δ มีค่ามาก จะได้

$$C_s > C_p ; R_s < R_p ; R_p = R_s \tan^2 \delta$$

นั่นคือ ค่า $\tan \delta$ ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงวงจรเสมือนได้ และจากการศึกษาจะพบว่าวงจรเสมือนของไดอิเล็กตริกที่มีค่าความสูญเสีย จะเป็น parallel R,C และ $\tan \delta$ จะแปรผันตาม ความถี่ , อุณหภูมิ , ความชื้น , โวลเตจ

3.2 ปัจจัยต่างๆที่มีผลกระทบต่อค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสีย

ค่า $\tan \delta$ เป็นค่าพารามิเตอร์ของไดอิเล็กตริกอย่างหนึ่งที่ช่วยบอกคุณสมบัติของสาร และเป็นค่าที่ไม่คงที่ แต่ขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอกหลายชนิด

ค่า $\tan \delta$ กับ ความถี่

พิจารณาค่า $\tan \delta$ กับความถี่ของไดอิเล็กตริกที่ป้อนโวลเตจกระแสสลับ ปัญหานี้สามารถวิเคราะห์ได้จากสมการ

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega RC}$$

จากสมการนี้ จะได้

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

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

ความหมายทางฟิสิกส์ของค่าลิมิตจะเป็นดังนี้ คือ ทั้ง $\omega = 0$ และ $\omega = \infty$ ตามสมการ (3.2) จะเป็นการจำกัดค่าของ P ; เมื่อ $\omega = 0$ สมการ (3.2) จะแปลงมาจากสมการ (3.1)

ถ้าพิจารณาในกรณีที่พลังงานสูญเสียเกิดขึ้นเนื่องจากการนำไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว พลังงานสูญเสียดังสมการ (3.1) คือ ค่า P จะไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ ในกรณีนี้ $\gamma_e = \gamma$ และสมการ (3.4) จะกลายเป็น

$$f_{ep} \tan \delta = 1.8 \cdot 10^{10}$$

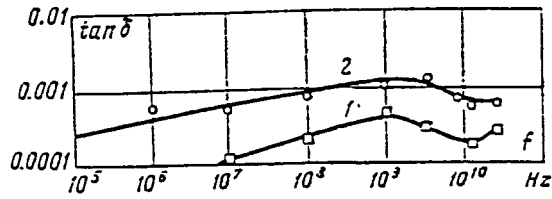
ซึ่งเราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $\tan \delta$ กับความถี่ ดังนี้

$$\tan \delta = \frac{1.8 \cdot 10^{10}}{f_{ep}} \quad (3.7)$$

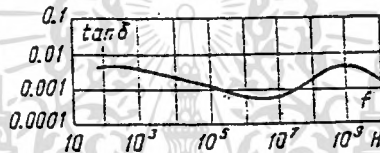
ค่า $\tan \delta$ จะเป็นสัดส่วนผกผันกับความถี่ ตัวอย่างของไดอิเล็กตริกที่มีลักษณะเป็นไปตามสมการ (3.7) คือ น้ำมันฉนวน (a thoroughly purified insulating petroleum oil)

แต่สมการ (3.7) ก็ไม่สามารถใช้ได้กับ โพลีเอธิลีน, โพลีเตตระฟลูออโรเอธิลีน และไดอิเล็กตริกแข็งชนิดนอนโพลาร์ได้ (ดูรูปที่ 3.5) อย่างไรก็ตาม ก็ยังไม่สามารถสรุปได้ เมื่อค่า $\tan \delta$ ในวัสดุเหล่านี้มีค่าน้อยมากจนไม่สามารถวัดได้อย่างละเอียด จากรูปที่ 3.5 ถ้าสารนอนโพลาร์โพลีเมอร์มีสารเจือปนชนิดโพลาร์ เช่น สเตบิลไลเซอร์ (stabilizers) หรือ ตัวช่วยทำปฏิกิริยา (catalysts) ของโพลีเมอร์ไรเซชัน ทำให้กราฟระหว่าง $\tan \delta$ กับความถี่ไม่เป็นไปตามสมการ (3.7)

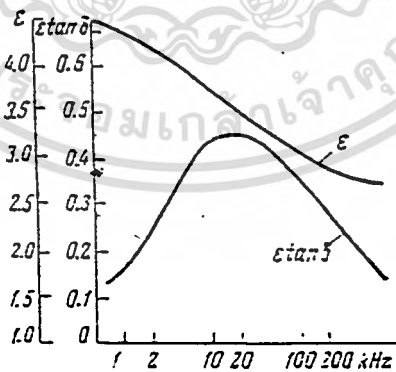
เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่า $\tan \delta$ หรือ $\epsilon \tan \delta$ ของวัสดุฉนวนไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ ก็จะสังเกตเห็นว่ามีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันในช่วงความถี่ที่เปลี่ยนไป คือ จะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงที่ความถี่ที่สูงขึ้น ตัวอย่างวัสดุต่างๆ แสดงในรูปที่ 3.5 ถึง 3.8



รูปที่ 3.5 กราฟแสดงค่า $\tan \delta$ ของนอนโพลาไรไดอิเล็กตริกและความถี่

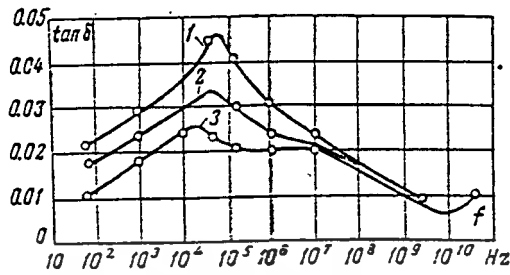


รูปที่ 3.6 กราฟแสดงค่า $\tan \delta$ ของโพลีเมทิลเมเตครายเลดและความถี่ ที่อุณหภูมิ 20°C
(แกนตั้งและแกนนอนเป็นลอการิทึม)



รูปที่ 3.7 กราฟแสดงค่า ϵ และ $\epsilon \tan \delta$ กับความถี่ของโพลีบิวทิลเมเตครายเลด
(แกนนอนเป็นลอการิทึม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

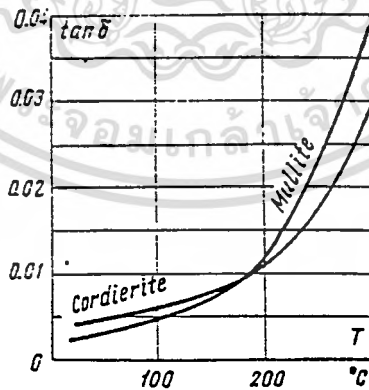


รูปที่ 3.8 กราฟแสดงค่า $\tan \delta$ กับความถี่ของไนลอน
(1-ไนลอนมีความชื้น 1% ; 2-ไนลอนมีความชื้น 0.6% ; 3-ไนลอนแห้ง และแกนนอนเป็น
ลอลการิทึม)

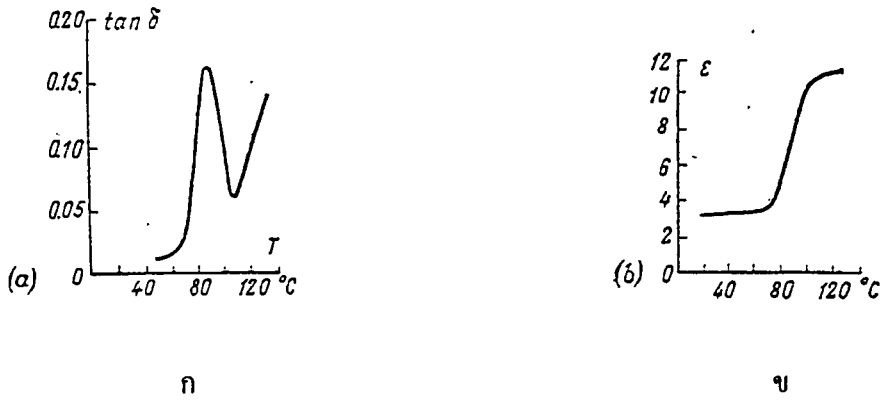
ค่า $\tan \delta$ กับ อุณหภูมิ

ค่า $\tan \delta$ จะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (ดูรูปที่ 3.9)

ในสาร โพลาร์หรือสารผสมของมันกับสารที่เป็นกลาง พลังงานสูญเสียจะเกิดขึ้นเนื่องจากการนำไฟฟ้า ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และจะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดที่อุณหภูมิกำหนดหนึ่ง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไป จะทำให้ค่า $\tan \delta$ ลดลง (ดูรูปที่ 3.10)

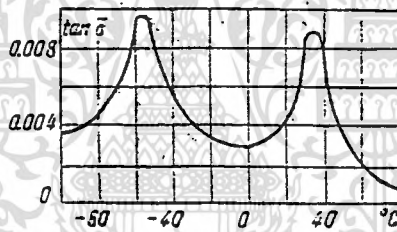


รูปที่ 3.9 กราฟแสดงค่า $\tan \delta$ ของ $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ และ $2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$ ที่ความถี่ 1 MHz
กับอุณหภูมิ

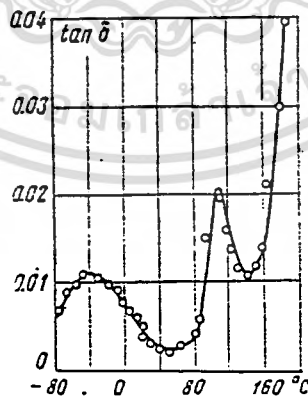


รูปที่ 3.10 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า $\tan \delta$ กับอุณหภูมิของโพลีไอโซบิวเทอไรด์ (โพลีไอโซบิวเทอไรด์) ที่ 50 Hz

ถ้าไดอิเล็กตริกเป็นสารผสมของสารโพลีเอทิลีน ก็จะเกิดค่าสูงสุดได้หลายค่า ซึ่งเกิดจากผลของส่วนประกอบในสารผสม เช่น ดังรูปที่ 3.11 ซึ่งค่าสูงสุดค่าแรก (ที่ -55°C) เกิดขึ้นเนื่องจากพลังงานสูญเสียในกระดาษ (cellulose) เอง ค่าสูงสุดที่สอง (ที่ 35°C) เกิดขึ้นโดยพลังงานสูญเสียในสารประกอบที่ชุ่ม (impregnating compound คือ oil-colophony composition)



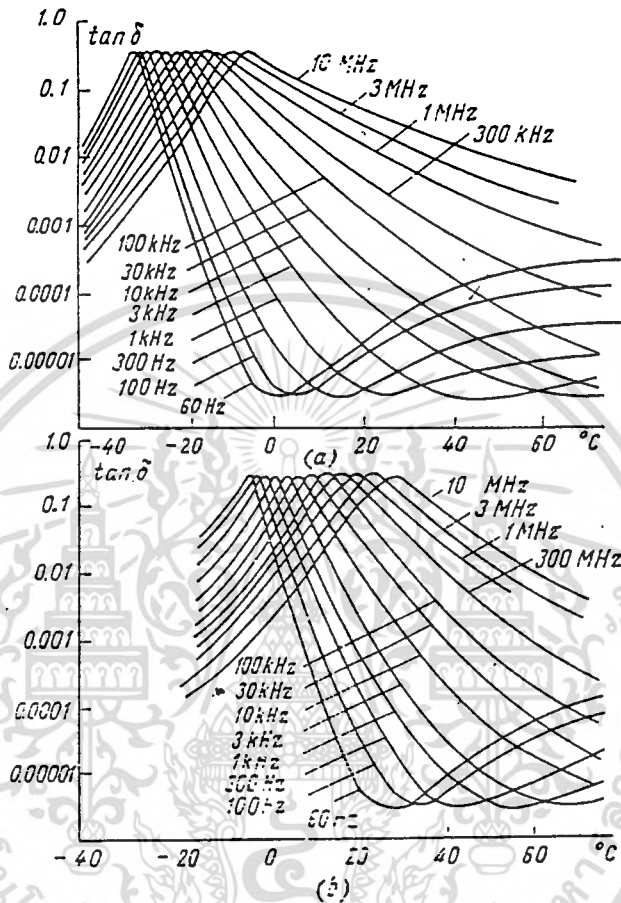
รูปที่ 3.11 กราฟแสดงค่า $\tan \delta$ ของกระดาษที่ชุ่มด้วยน้ำมันผสมโคลอโฟนี กับอุณหภูมิ ที่ 50 Hz



รูปที่ 3.12 กราฟแสดงค่า $\tan \delta$ ของโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต กับอุณหภูมิ ที่ 1 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนแปลงของค่า $\tan \delta$ จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความถี่พร้อมกันของสาร โพลีเมอร์ เมื่ออุณหภูมิเพิ่ม ค่าสูงสุดของ $\tan \delta$ บนชุดเส้นโค้งที่ขึ้นกับความถี่จะเลื่อนไปข้างหน้าเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น



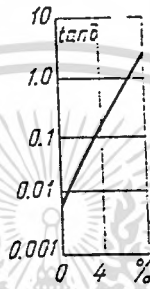
รูปที่ 3.13 กราฟแสดงค่า $\tan \delta$ ของ ไตรคลอโรโรไดฟีนิล [ชุดของเส้นโค้ง (a)] และเพนตะคลอโรไดฟีนิล (b) กับอุณหภูมิและความถี่ (แกนตั้งเป็นลอการิทึม)

ค่า $\tan \delta$ กับ ความชื้น

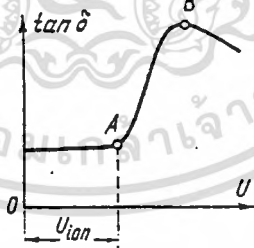
ค่า $\tan \delta$ ของสารไดอิเล็กตริก จะเพิ่มขึ้นตามความชื้น ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.14 และรูปที่ 3.8 ซึ่งจากกราฟที่แสดง ทำให้ทราบว่าค่าความชื้นที่สูงๆ มีผลทำลายคุณสมบัติของการฉนวนไฟฟ้า

ค่า $\tan\delta$ กับ โวลเตจ

เมื่อคุณภาพของฉนวน (โดยเฉพาะในเคเบิลแรงสูง , อุปกรณ์ต่างๆ และเครื่องจักรกลไฟฟ้า) ถูกคาดคะเนขึ้น โดยส่วนที่สำคัญ จะเกี่ยวข้องกับ การเปลี่ยนแปลงของ $\tan\delta$ ซึ่ง $\tan\delta$ ขึ้นกับค่าโวลเตจ U ที่ป้อนให้ (หรือความเข้มสนามไฟฟ้า E)



รูปที่ 3.14 กราฟแสดงค่า $\tan\delta$ ของกระดาษกับความชื้นในรูปเปอร์เซ็นต์ปริมาตร ที่ความถี่ 1 MHz (แกนตั้งเป็นลอการิทึม)

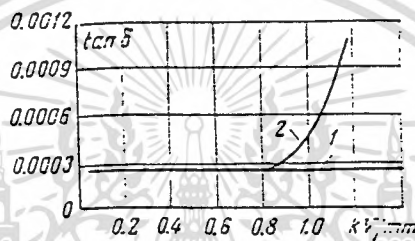


รูปที่ 3.15 กราฟแสดงเส้นโค้งไอออไนเซชัน

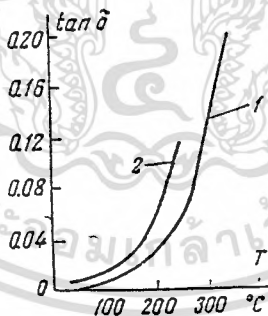
ในหลายๆ กรณี ค่า $\tan\delta$ จะไม่ขึ้นอยู่กับโวลเตจ เมื่อให้เงื่อนไขอื่นๆ เท่ากัน ค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของโวลเตจที่ป้อนให้ฉนวน คูสมการ (3.2)

อย่างไรก็ตาม ค่า $\tan\delta$ ที่ขึ้นกับโวลเตจ บางครั้งสามารถอธิบายได้โดยกราฟที่แสดงในรูปที่ 3.15 โดยค่า $\tan\delta$ นี้เกือบจะคงที่ในบางค่ากับโวลเตจ แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก เมื่อโวลเตจเกินค่า U_{ion} กราฟที่แสดงในรูปที่ 3.15 นี้ เรียกว่า เส้นโค้งไอออไนเซชัน(ionization curve)

จุด A บนเส้นโค้ง เรียกว่า จุดไอออไนเซชัน และจะเป็นไปตามการเกิดไอออไนเซชัน (การเกิดของโคโรนาหรือชนิดอื่นๆ ของ พาร์เซิลดิสชาร์จ) ในอากาศหรือก๊าซอื่นๆ ในฉนวน ตัวอย่างเช่น อากาศและก๊าซในฉนวนในเส้นใยที่มีความหนาแน่นน้อยและฉนวนที่ได้รับแรงกดดัน(pressed) ซึ่งไม่ได้ทำการอบแห้ง(deep vacuum drying)



รูปที่ 3.16 กราฟแสดงค่า $\tan\delta$ ของเซรามิกคาปาซิเตอร์กับความเข้มของสนามไฟฟ้าในไดอิเล็กตริก ที่ความถี่ 1 MHz



รูปที่ 3.17 กราฟแสดงค่า $\tan\delta$ ของอัลคาลายฟรี้กลาสแฟบริค(alkali-free glass fabric ;เส้นโค้งที่ 1) และแมสซีสกลาสของส่วนประกอบที่เหมือนกัน ;เส้นโค้งที่ 2 กับอุณหภูมิ หลังจากผ่านจุดสูงสุด (จุด B) กราฟจะลาดลงเล็กน้อย เพราะเป็นส่วนประกอบของอากาศมีค่าความนำสูงและ โวลเตจตกคร่อมสารนั้นมีค่าน้อยลง

การไอออไนเซชันของอากาศจะเกี่ยวข้องกับเงื่อนไขที่สำคัญ 2 ประการ คือ

- 1) พิจารณาการดูดซับของพลังงาน คือ การเพิ่มอย่างมากของพลังงานสูญเสียและ $\tan\delta$
- 2) ขบวนการทางเคมีเมื่อจุดเดือดต่ำลง บางส่วนของ O_2 ในอากาศจะเปลี่ยนเป็นโอโซน O_3 และไนโตรเจนออกไซด์ สารเหล่านี้(โดยเฉพาะเมื่อเกิดความชื้นในปริมาณที่น้อย)จะทำให้เนื้อฉนวนถูกทำลาย

ตามหลักการแล้ว โวลเตจที่ใช้ควรมีค่าต่ำกว่าไอออไนเซชันโวลเตจ U_{ion} ซึ่งสอดคล้องกับจุด A (รูปที่ 3.15) คุณสมบัติที่ดีขึ้นจะเกิดกับฉนวนซึ่ง U_{ion} สูงขึ้น และการเพิ่มขึ้นของกราฟไอออไนเซชัน หลังจากจุด A จะมีความชันเพิ่มขึ้น บางครั้งคุณสมบัติของการเป็นฉนวนที่โวลเตจแรงสูงสามารถประเมินได้โดยการกำหนดค่าที่เพิ่มขึ้นของ $\Delta\tan\delta$ (loss tangent) เมื่อโวลเตจเพิ่มขึ้นจากขนาดที่กำหนด

รูปที่ 3.16 แสดงถึงค่า $\tan\delta$ ที่ขึ้นกับความเข้มสนามไฟฟ้า E สำหรับคาปาซิเตอร์ที่เหมือนกัน 2 ตัว โดยตัวหนึ่งทำจากเซรามิกที่มีความหนาแน่นมาก และอีกตัวทำจากเซรามิกที่มีองค์ประกอบทางเคมีเหมือนกัน แต่มีรูพรุนมากกว่า ซึ่งกรณีนี้ ค่ากราฟของ $\tan\delta$ จะเป็นดังเส้นกราฟที่ 2 เนื่องจากการเกิดพาร์เซิลลิสซาร์จในรู (pores) ของสารไดอิเล็กตริกภายใต้โวลเตจที่เพิ่มขึ้น

ในไม่กี่ปีที่ผ่านมา ได้มีผู้ให้ความสนใจมากในการศึกษาเกี่ยวกับพาร์เซิลลิสซาร์จในฉนวนกึ่งแข็งและฉนวนของแข็ง เนื่องจากการเกิดขึ้นของพาร์เซิลลิสซาร์จเหล่านี้จะลดความน่าเชื่อถือในการทำงานของฉนวนลง โดยเฉพาะวิธีที่ถูกปรับปรุงขึ้นได้ถูกนำมาใช้กับการประมาณค่าเชิงตัวเลขของความเข้มของพาร์เซิลลิสซาร์จ

มีจุดที่แสดงให้เห็นว่า เมื่อความเข้มสนามไฟฟ้า E น้อยกว่าความเข้มเริ่มต้นที่สังเกตของพาร์เซิลลิสซาร์จ ค่า $\tan\delta$ ของฉนวนที่มีรูพรุนนี้จะมีค่าน้อยกว่าฉนวนแข็งที่ทำจากวัสดุแข็งเหมือนกัน (รูปที่ 3.17)

บทที่ 4

หลักการทํางานของเครื่องมือวัด Tettex รุ่น 2805

4.1 หลักการทํางานของเครื่องมือวัด Tettex รุ่น 2805

เครื่องวัด Tettex รุ่น 2805 เป็น หม้อแปลงวัดค่าความแตกต่าง (differential transformer) แบบเทอร์รอยด์ (toroid) ทำจากวัสดุที่มีค่าเปอร์มีตีวิตีสูง ประกอบด้วยขดลวด 3 ชุดคือ w_1 , w_2 และ w_3 มีнулอินดิเคเตอร์ (null indicator) ต่ออยู่กับขดลวด w_3 วัตถุประสงค์คือ C_x และ คาปาซิเตอร์มาตรฐาน (standard capacitor) คือ C_N

การต่อของขดลวด w_1 และ w_2 จะต้องต่อกราวด์เสมอ วัตถุประสงค์คือ C_x และ คาปาซิเตอร์มาตรฐาน C_N จะถูกต่อใช้ในการวัดโวลเตจ กระแส i_1 , i_2 จะไหลผ่านขดลวด w_1 และ w_2

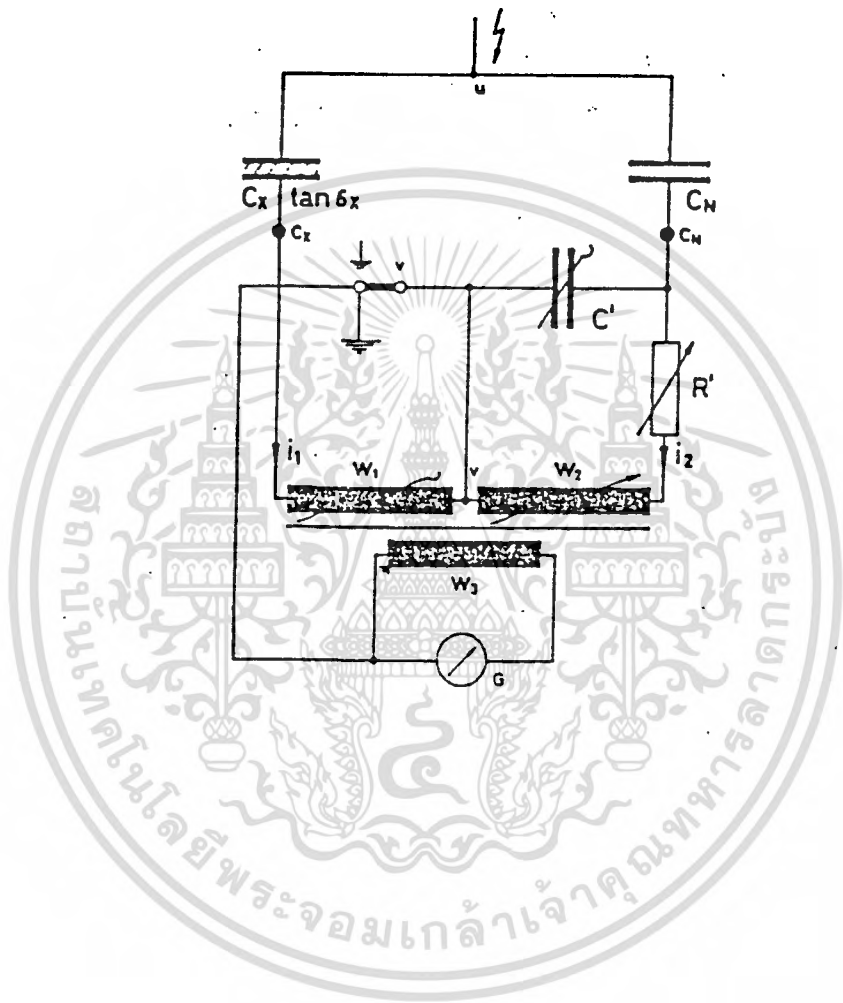
ถ้าผลของ $w_1 \cdot i_1$ และ $w_2 \cdot i_2$ ไม่เท่ากัน จะเกิดการอินดิวส์โวลเตจ (induce voltage) ในขดลวด w_3

ผลของบริดจ์บาลานซ์ (bridge balance) จากการปรับจำนวนรอบของขดลวด w_2 และที่ ส่วนของวงจรมอดูลของตัวค่าความต้านทานกับตัวค่าคาปาซิเตอร์ (series-connected RC section) ด้วยค่าความต้านทาน (R') และค่าคาปาซิเตอร์ (C') จนกระทั่งผล $w_1 \cdot i_1 = w_2 \cdot i_2$ และจนกระทั่ง ไม่มีการอินดิวส์โวลเตจใน w_3

จากผลข้างต้น

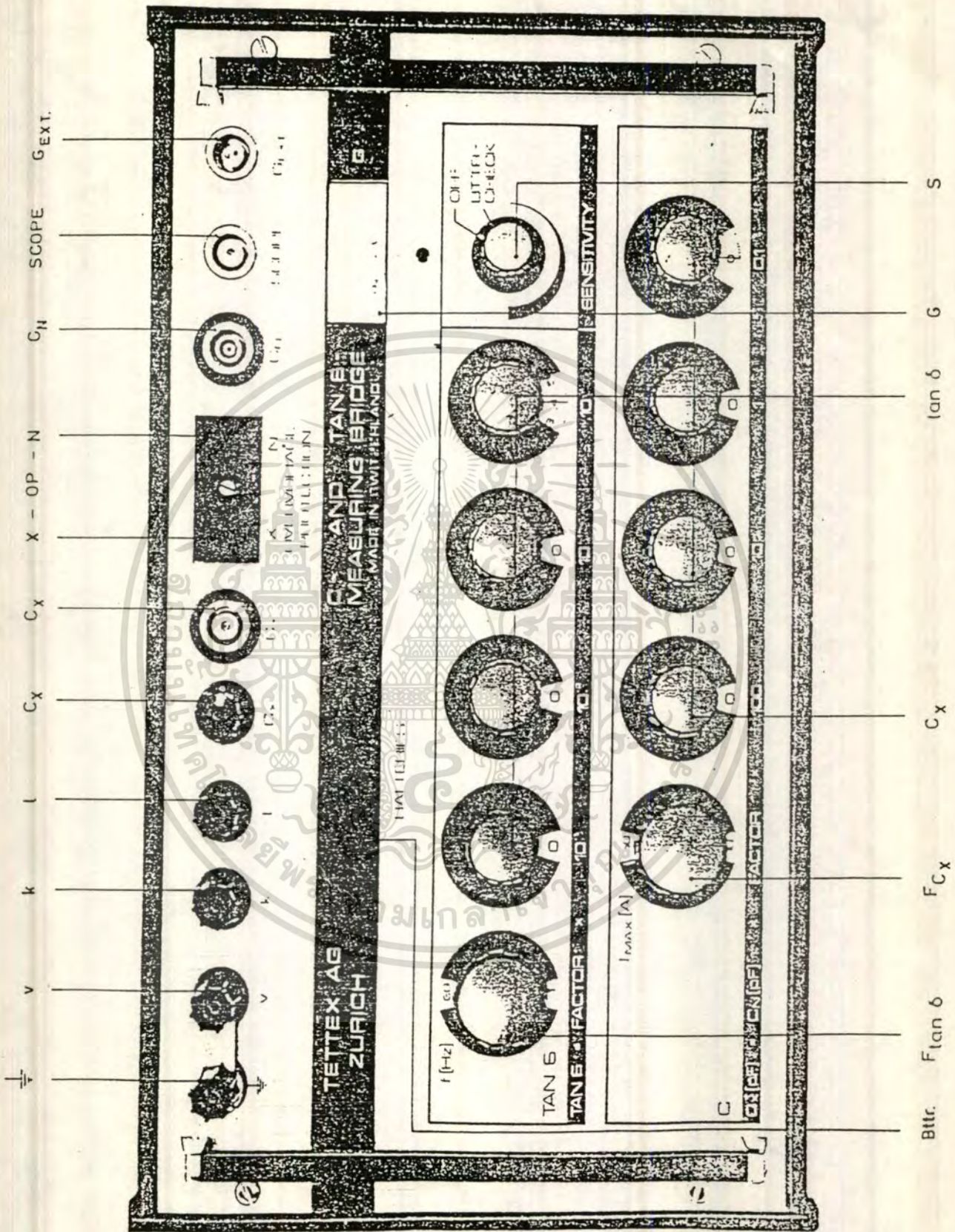
$$C_x = C_N \cdot w_2/w_1$$

ค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก คือ $\tan \delta = R' C' \omega$



รูปที่ 4.1 วงจรการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจาก Tettex AB Zurich

รูปที่ 4.2 รูปด้านหน้าเครื่อง Tettex รุ่น 2805

4.2 รายละเอียดต่างๆ บนเครื่อง

ส่วนควบคุมทั้งหมด ทั้งสวิทช์ต่างๆ , นูลอินดิเคเตอร์ , จุดต่อสาย (terminals) จะอยู่ที่แผงด้านหน้าของเครื่อง และเครื่องนี้ยังมีหูหิ้วสำหรับถือเคลื่อนย้ายได้

สัญลักษณ์ต่างๆ บนเครื่อง

 : จุดต่อสายกราวนด์

V : จักรัณฑ์ (Junction V)

k-1 : จุดต่อสาย สำหรับ หม้อแปลงกระแส รุ่น 4732

C_X : จุดต่อสาย สำหรับวัสดุทดสอบ C_X

C_N : จุดต่อสาย สำหรับคาปาซิเตอร์ที่เพิ่มขึ้น (C_{add.ext}) และ คาปาซิเตอร์มาตรฐาน

SCOPE : จุดต่อสาย สำหรับคาโทดเรย์ออสซิลโลกราฟ (Cathode ray oscillograph)

OVER VOLTAGE : โอเวอร์โวลเตจฟิวส์ สำหรับป้องกันบริดจ์อาร์ม (bridge arm) C_X-V

PROTECTION-X

OVER VOLTAGE : โอเวอร์โวลเตจฟิวส์ สำหรับป้องกันบริดจ์อาร์ม (bridge arm) C_N-V

PROTECTION-N

Bttr : ที่เก็บแบตเตอรี่ขนาด 9 โวลต์ 4 ก้อน

G : นูลอินดิเคเตอร์

S : สวิทช์ปรับความไวสำหรับนูลอินดิเคเตอร์ และ สวิทช์สำหรับเช็คแบตเตอรี่ และ สวิทช์สำหรับปิดนูลอินดิเคเตอร์

G_{EXT} : จุดต่อสายสำหรับต่อนูลอินดิเคเตอร์ภายนอก

tanδ : สวิทช์ปรับค่าเฟกเตอร์พลังงานสูญเปล่าไดอิเล็กตริก, สวิทช์ปรับค่าเป็นสเติร์จากค่าศูนย์ถึงสิบ 3 ตัว และสวิทช์ปรับค่าละเอียดที่เคลื่อนที่ไปมาอย่างสมดุลย์และต่อเนื่อง จากค่าศูนย์ถึงสิบเอ็ด 1 ตัว

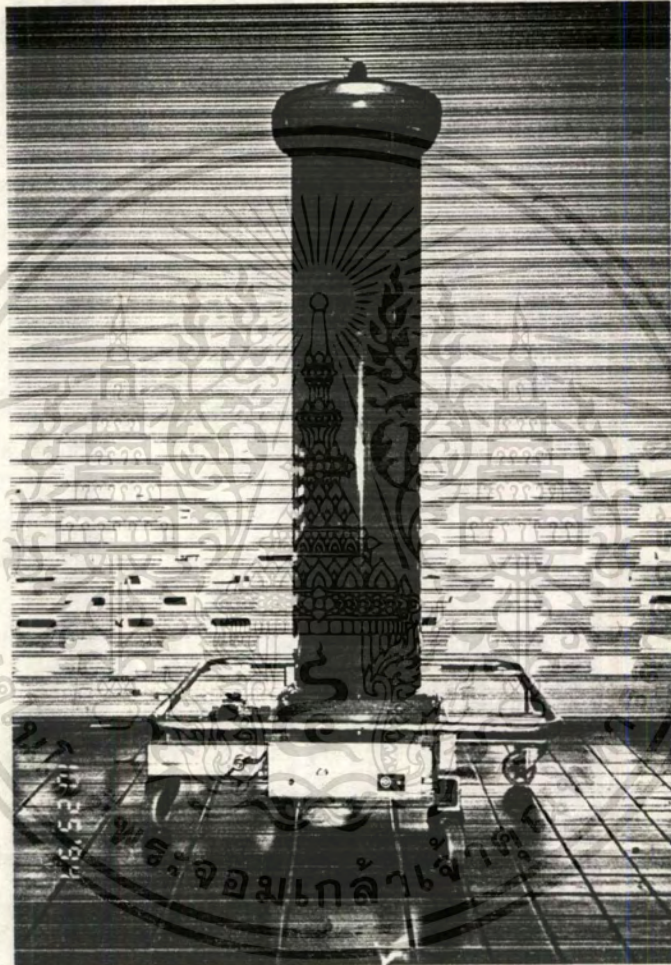
อธิบายได้ดังนี้ $0...10 \times (10^{-1} + 10^{-2} + 10^{-3}) + 0...11 \times 10^{-4}$ (ดูรายละเอียดจากเครื่อง)

C_x : สวิตช์ปรับค่าคาปาซิแตนซ์ของวัสดุทดสอบ ,สวิตช์ปรับค่าเป็นสลับจากค่าศูนย์ถึงสิบ 3
ตัวและสวิตช์ปรับค่าละเอียดที่เคลื่อนที่ไปมาอย่างสมดุลและต่อเนื่องจากค่าศูนย์ถึงสิบ
1 ตัว

$F_{\tan\delta}$: สวิตช์ปรับค่าแฟกเตอร์ตัวคูณค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกและตัวเลือก
ความถี่ 50/60 Hz

F_{C_x} : สวิตช์ปรับค่าแฟกเตอร์ตัวคูณค่าคาปาซิแตนซ์ของวัสดุทดสอบที่อ่านค่าได้





รูปที่ 4.3 แสดงภาพซีเตอร์มาตรฐานของ TETTEX AG รุ่น 3370

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียของฉนวนไฟฟ้า

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบการใช้งานของเครื่องวัดค่าคาปาซิแตนซ์และค่าพลังงานสูญเสียของฉนวนไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ โดยจะเน้นเฉพาะการทดสอบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า ซึ่งมีความสะดวกที่สุดในการทดสอบ โดยที่เครื่องวัดค่าคาปาซิแตนซ์และค่าพลังงานสูญเสียของฉนวนไฟฟ้าของ Tettex รุ่น 2805 สามารถวัดค่าคาปาซิแตนซ์และค่าพลังงานสูญเสียของฉนวนไฟฟ้าได้สะดวกกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวัดแบบอื่นและค่าคาปาซิแตนซ์และค่าพลังงานสูญเสียของฉนวนไฟฟ้าที่วัดได้นี้สามารถนำไปกำหนดค่าพลังงานสูญเสียในฉนวนได้อีกทั้งนำไปใช้เป็นเกณฑ์ในการเลือกใช้ฉนวนหรือพัฒนาฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ให้ดีขึ้นต่อไปในอนาคต

การทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียของฉนวนไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนแบบต่างๆ

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

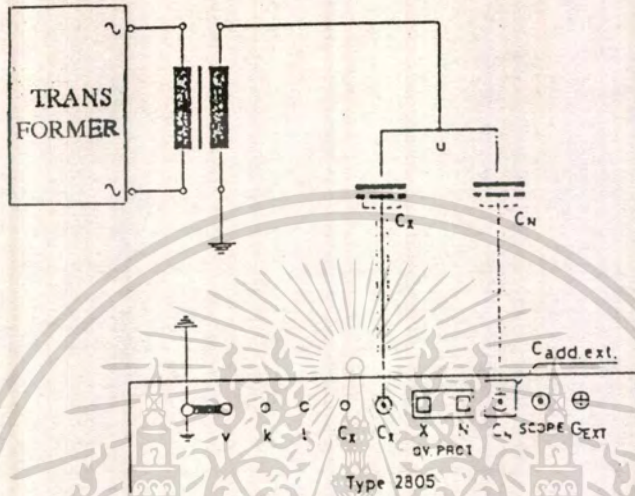
1. เครื่องมือวัดค่าคาปาซิแตนซ์และค่าพลังงานสูญเสียของฉนวนไฟฟ้าของ Tettex รุ่น 2805
2. หม้อแปลงกระแสสลับ 50 Hz 100 kV
3. ชุดควบคุมระดับแรงดันทดสอบซึ่งมีอัตราส่วนเทิร์นเรโอะระหว่างหม้อแปลง 235V/100 kV
4. คาปาซิเตอร์มาตรฐานของ Tettex รุ่น 3370 ชนิดอ็อกไซด์ฟิล์มเฟอร์โรเซรามิกฟลูออไรด์ ขนาด 99.91 pF 200/240 kV
5. สายเคเบิล FV-FB รุ่น 10D-FB
6. อะแดปเตอร์บ็อกซ์ (Adaptor box) ที่บรรจุคาปาซิเตอร์ภายนอกที่ต่อเพิ่ม
7. ลูกถ้วยฉนวนชนิดต่างๆ

วิธีและขั้นตอนการทดสอบ

1. ตรวจสอบไฟเลี้ยงเครื่องมือวัดค่าคาปาซิแตนซ์และค่าพลังงานสูญเสียของฉนวนไฟฟ้าของ Tettex รุ่น 2805 ว่ามีหรือไม่โดยปรับไปที่สวิตช์ปรับค่าความแม่นยำการวัด (Sensitivity switch) โดยหมุนไปที่ตำแหน่งเซ็กเมนต์แรก ถ้ามีไฟเลี้ยงเพียงพอ เข็มบนหน้าปัดมิลลิแอมป์จะเคลื่อนไปที่ค่า 100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ตัวอย่างจรรยาบรรณ



รูปที่ 5.1 วงจรการทดสอบ

3. ปรับสวิตช์ค่าแฟกเตอร์ผลคูณของค่าคาปาซิแตนซ์ของวัตถุทดสอบให้อยู่ที่ค่า $I_{max} = 50$ A (ค่ากระแสสูงสุดที่เครื่องมือวัดสามารถทนได้โดยไม่ทำความเสียหายแก่เครื่องมือวัด)
4. ปรับสวิตช์ปรับค่าความแม่นยำการวัดให้อยู่ที่สแต็ปแรกซึ่งมีระดับความแม่นยำต่ำสุด (สวิตช์ปรับค่าความแม่นยำมี 7 สแต็ป)
5. ป้อนโวลเตจเข้าวงจรทดสอบที่ค่า 0.5 kV
6. ปรับสวิตช์แฟกเตอร์ตัวคูณค่าคาปาซิแตนซ์ของวัสดุทดสอบและสวิตช์ปรับค่าคาปาซิแตนซ์ของวัสดุทดสอบ รวมทั้งปรับสวิตช์แฟกเตอร์ตัวคูณของแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก และสวิตช์ปรับค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก โดยปรับให้เข็มบนนูลอินดิเคเตอร์ชี้ที่ 0
7. เพิ่มระดับค่าความแม่นยำในการวัดไปยังสแต็ปที่ 2 และปรับค่าคาปาซิแตนซ์และแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกตามข้อ 6 จนถึงระดับค่าความแม่นยำในการวัดสแต็ปสุดท้าย (สแต็ปที่ 7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. บันทึกค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกที่อ่านได้จากผลการปรับ จากข้อ 7 ไปคำนวณหาค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของวัตถุ ทดสอบ
9. ป้อนโวลเตจเข้าวงจรทดสอบที่ค่า 1 , 1.5 , 2 , 2.5 , 3 , 4 , 5 kV แล้วทำตามขั้นตอนข้อ 6-8

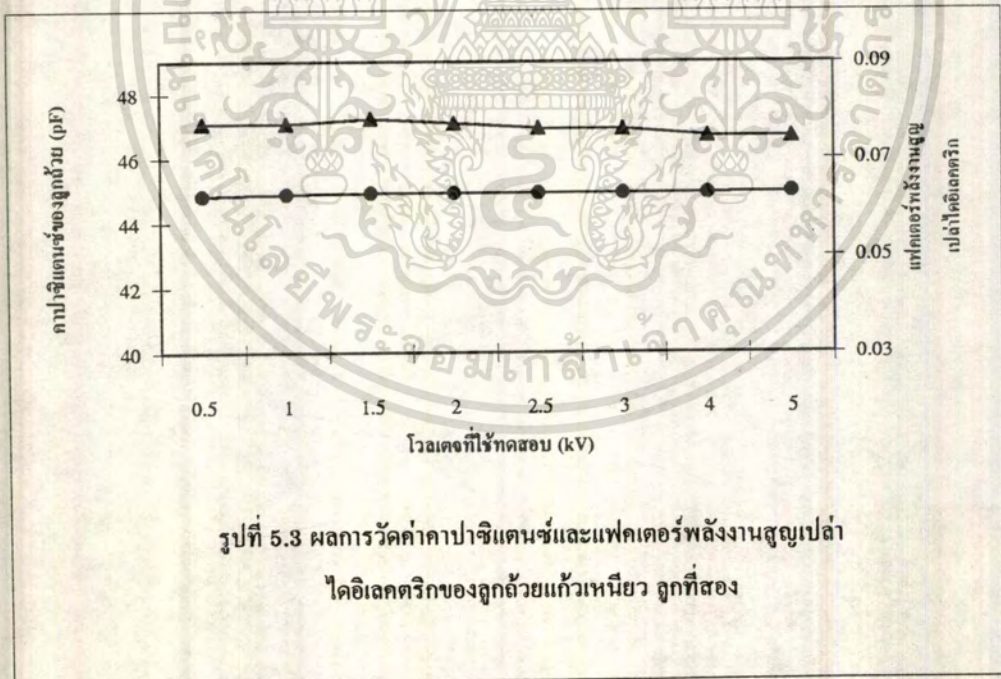
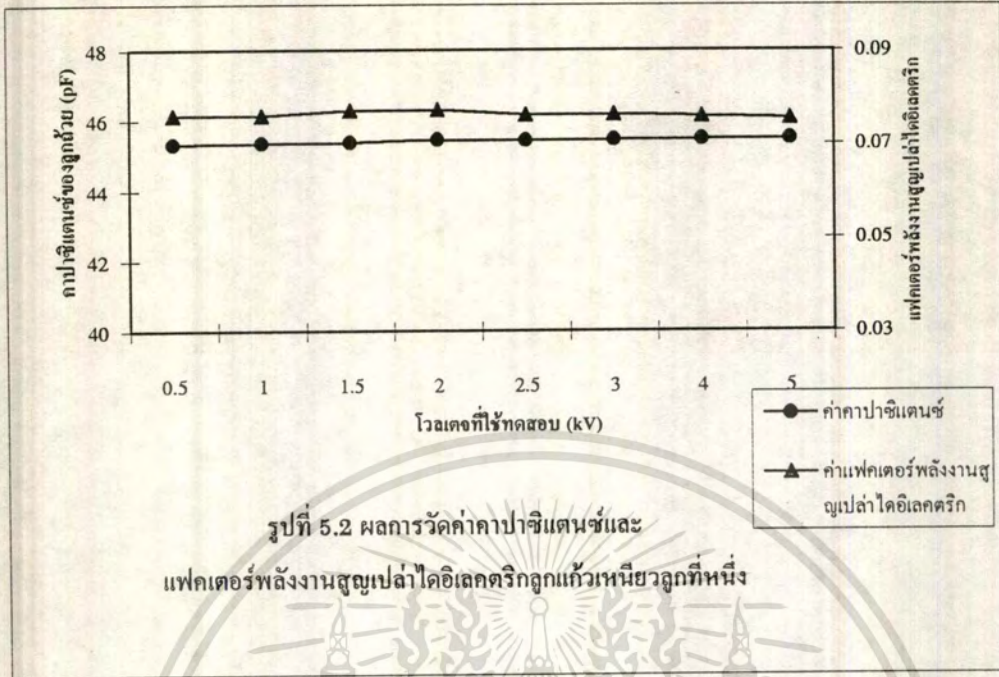
ผลการทดลอง

ค่าคาปาซิแตนซ์ของวัตถุทดสอบ = ค่าคาปาซิแตนซ์มาตรฐาน x ค่าที่อ่านได้จากการปรับ

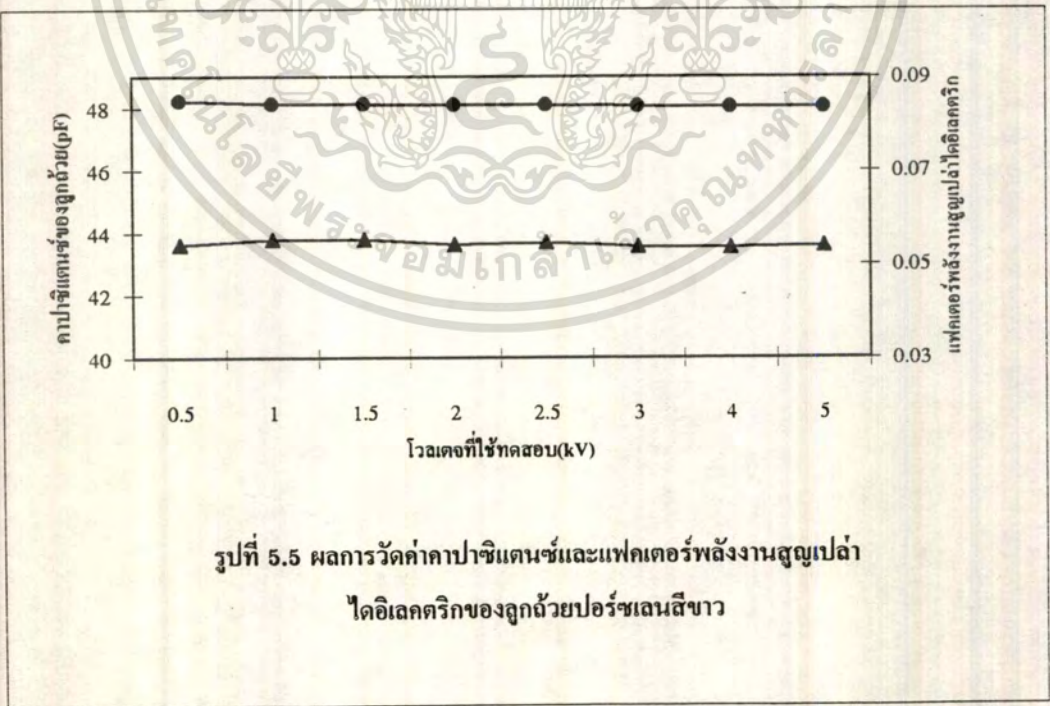
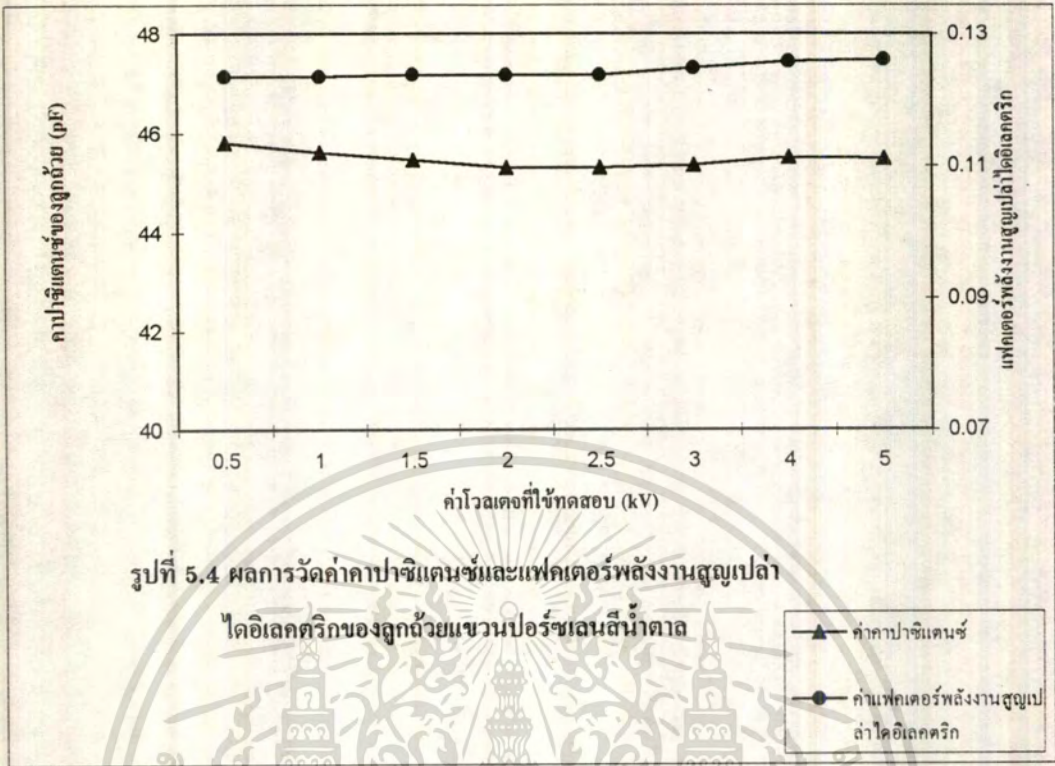
$$C_x = C_N \cdot F_{cx} \cdot C_x \text{ (ที่อ่านได้จากการปรับ)}$$

ค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของวัตถุทดสอบ = ค่าที่อ่านได้จากการปรับ

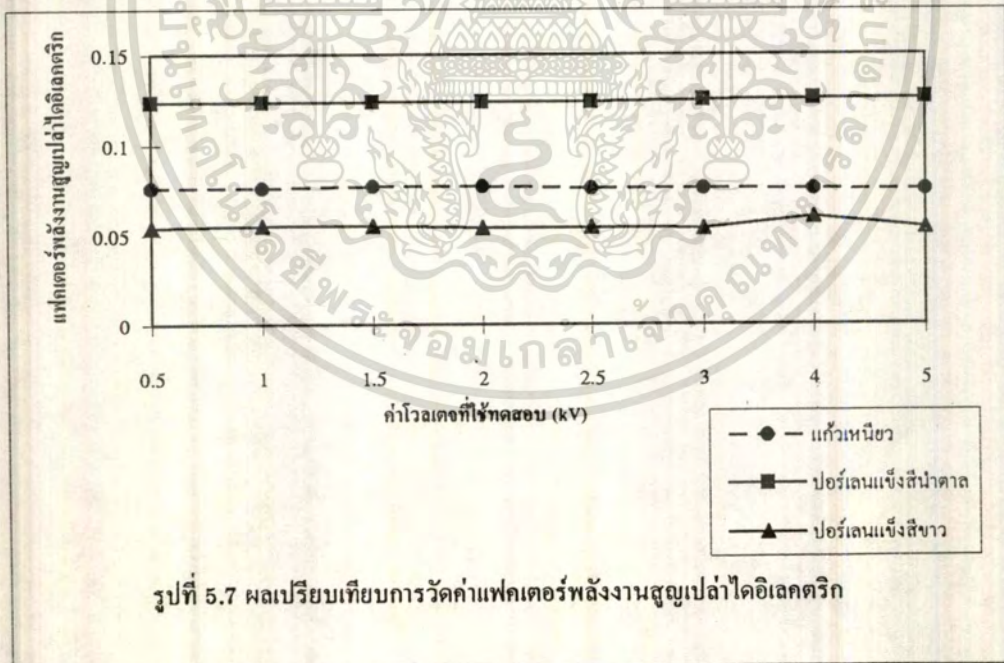
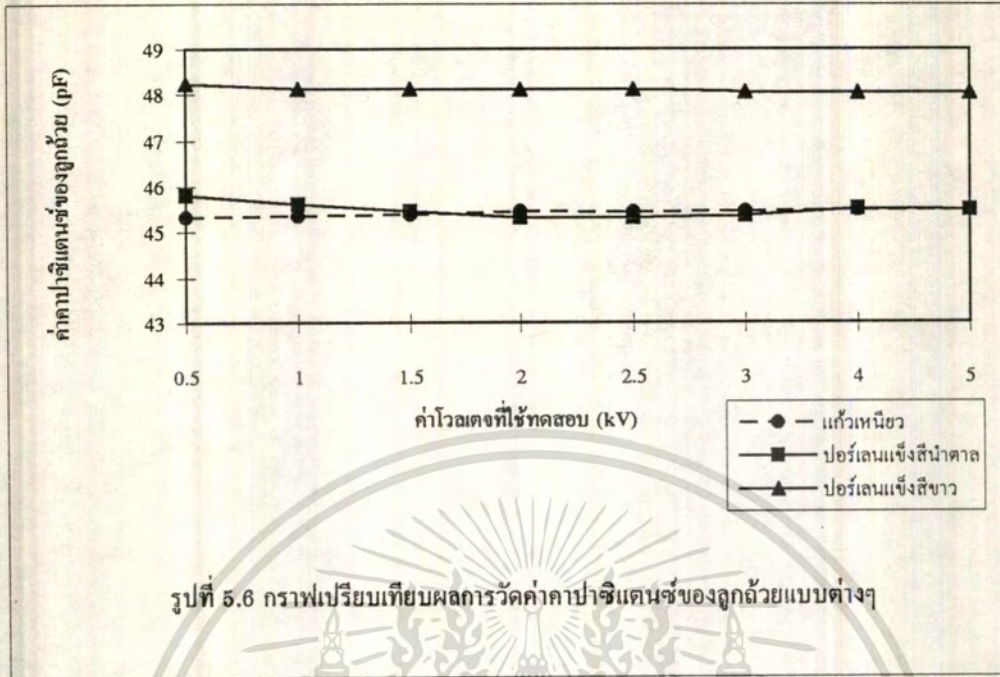
$$\tan \delta = F_{\tan \delta} \cdot \tan \delta \text{ (ที่อ่านได้จากการปรับ)}$$



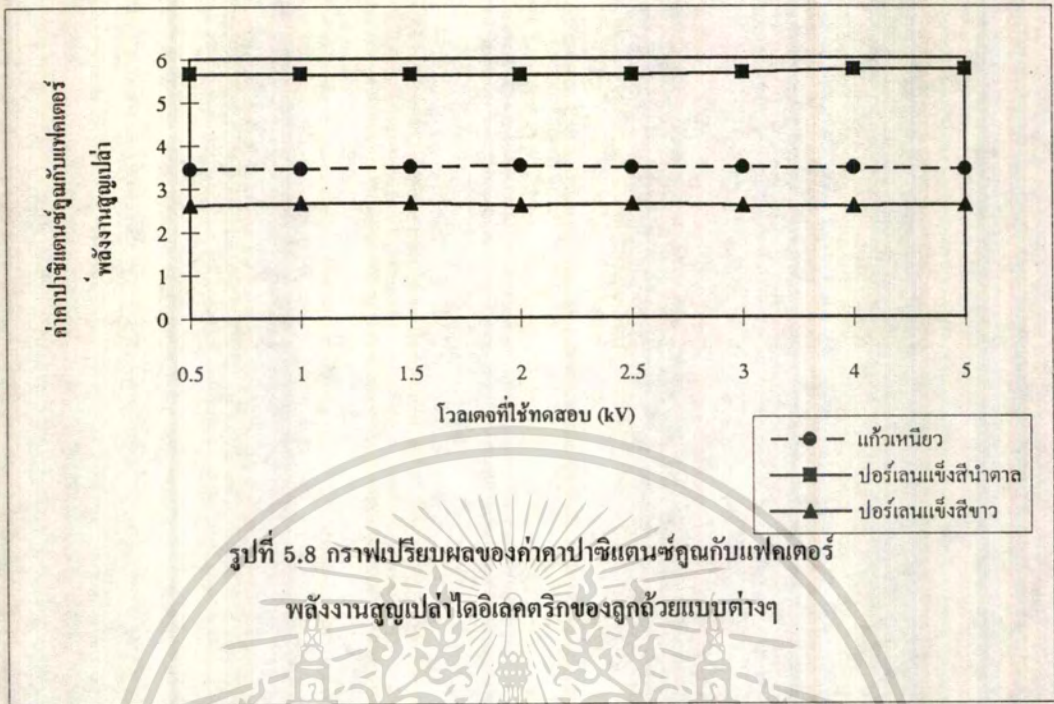
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่วารณิต่างๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ก. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของลูกถ้วยแขวน

ก.1 ลูกถ้วยแขวนแก้วเหนียว

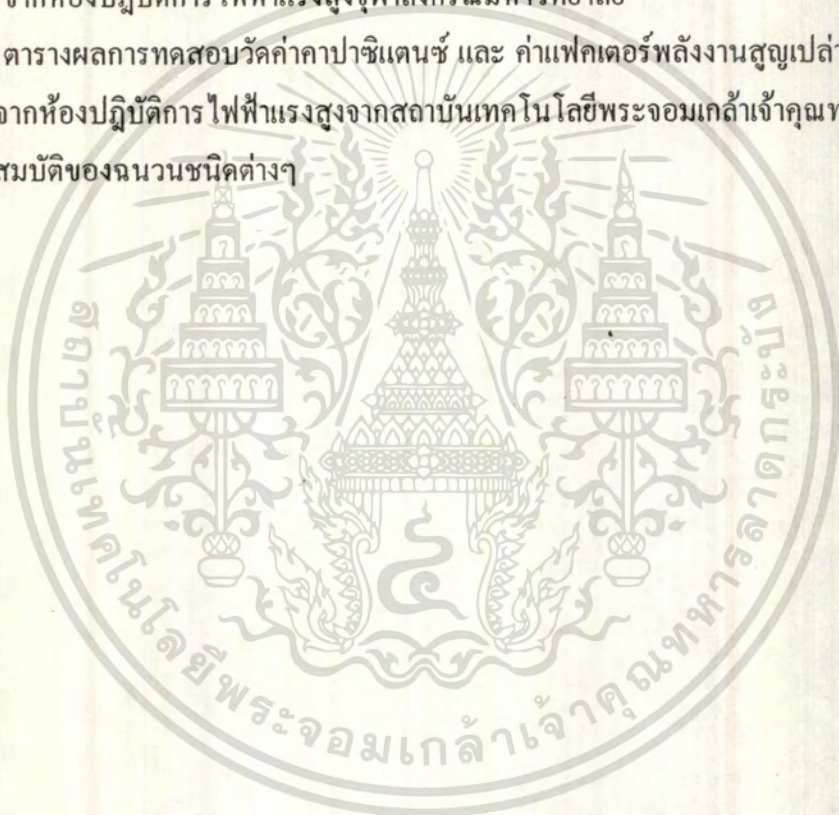
ก.2 ลูกถ้วยแขวนปอร์ซเลน

ข. ตารางผลการทดสอบ

ข.1 ตารางผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ และ ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียต่อไอเล็กตริก จากห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูงจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข.2 ตารางผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ และ ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียต่อไอเล็กตริก จากห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูงจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ค. คุณสมบัติของฉนวนชนิดต่างๆ



บทที่ 6

สรุปผลและวิจารณ์

จากการศึกษาหลักการทำงาน และวิธีการใช้เครื่องมือวัดค่าคาปาซิแตนซ์และแฟลคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของ Tettex AG รุ่น 2805 รวมทั้งการทดสอบลูกถ้วยฉนวนชนิดต่างๆ เพื่อหาค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟลคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก จากผลการทดสอบทำให้ทราบว่าค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนมีค่าค่อนข้างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระดับแรงดัน ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี แต่ในกรณีของค่าแฟลคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกควรมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระดับแรงดัน ความผิดพลาดที่พบนี้อาจเป็นผลมาจากอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรทดสอบไม่ได้มาตรฐาน เช่น สายเคเบิลที่ต่อระหว่างเครื่องมือวัดกับฉนวนทดสอบ และ สายเคเบิลที่ต่อระหว่างเครื่องมือวัดกับคาปาซิเตอร์มาตรฐาน , หัวต่อสายเคเบิลหรือหัวเลโม (LEMO) , หม้อแปลงแรงดันที่ปราศจากฮาร์โมนิกส์ เป็นต้น ซึ่งอาจมีผลต่อค่าที่ทดสอบได้ ส่วนในกรณีปัจจัยอื่นๆ เช่น อุณหภูมิ , ความชื้น ที่อาจมีผลต่อค่าแฟลคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกนั้น ในการทดสอบนี้ไม่สามารถควบคุมปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ได้ จึงไม่สามารถใช้เปรียบเทียบอ้างอิงกับทฤษฎีพื้นฐานของแฟลคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกได้ แต่จากผลการทดสอบของลูกถ้วยฉนวนแก้วทั้งสองลูกนั้น พอจะสรุปได้ว่าค่าแฟลคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของไดอิเล็กตริกชนิดเดียวกันควรมีค่าใกล้เคียงกันที่ระดับแรงดันทดสอบเดียวกัน

จากการนำข้อมูลผลที่ได้จากการวัดค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟลคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกจากการทดสอบนี้ ไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ทดสอบจากห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่มีอุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่เป็นมาตรฐานและครบถ้วน พบว่าผลที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าความผิดพลาดประมาณ 10 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์

จากโครงการนี้จะแสดงให้เห็นถึงความสามารถของเครื่องมือวัดของ Tettex AG รุ่น 2805 นี้ว่าสามารถทำการทดสอบหาค่าคาปาซิแตนซ์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ไม่มีรูปทรงทางเรขาคณิตได้อย่างสะดวกและถูกต้อง อีกทั้งยังสามารถวัดค่าแฟลคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกได้อีกด้วย โดยเฉพาะฉนวนที่มีสารผสมมากกว่า 1 ชนิด ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่านี้ทำการวัดได้ยาก และเมื่อทราบค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟลคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก จะสามารถนำค่าทั้งสองนี้ไปวิเคราะห์หาค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของอุปกรณ์ฉนวนไฟฟ้าต่างๆ โดยที่อาจจะนำผลที่วิเคราะห์ได้ไป

ก. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมลูกถ้วยแขวน

ก.1 ลูกถ้วยแขวนแก้วเหนียว

1. ขอบข่าย

1.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้กำหนด แบบ รูปร่าง มิติ และพิถีพิถัน ส่วนประกอบและการทำ คุณลักษณะที่ต้องการ การบรรจุ เครื่องหมายและฉลาก การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน และการทดสอบลูกถ้วยแขวนแก้วเหนียว ที่ใช้กับสายส่งกำลังไฟฟ้า ซึ่งต่อไปในมาตรฐานนี้จะเรียกว่า ลูกถ้วย

2. บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ มีดังต่อไปนี้

2.1 ลูกถ้วย (insulator) หมายถึง ฉนวนที่ใช้ยึดตัวนำไฟฟ้า

2.2 ลูกถ้วยแขวน (suspension insulator) หมายถึง ลูกถ้วยซึ่งมีส่วนโลหะต่อกันแบบที่ทำให้ลูกถ้วยที่มีตัวนำไฟฟ้าแขวนอยู่แกว่งไกวได้

2.3 ระยะรั้ว (leakage distance) หมายถึง ผลรวมของระยะที่สั้นที่สุดที่วัดไปตามผิวฉนวนระหว่างส่วนที่นำไฟฟ้าของลูกถ้วยที่ใช้ในการทดสอบการวาบไฟตามผิวแห้ง

2.4 ความถี่ต่ำ หมายถึง ความถี่ตั้งแต่ 15 ถึง 100 เฮิร์ตซ์

2.5 แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวความถี่ต่ำ (low frequency flashover voltage) หมายถึง ค่ารูตมีนสแควร์ (root-mean-square value) ของแรงดันไฟฟ้าความถี่ต่ำซึ่งในภาวะที่กำหนดจะเกิดการปล่อยประจุทำลายผ่านตัวกลางที่ล้อมรอบ

2.6 คลื่นอิมพัลส์ (impulse wave) หมายถึง เสรีจ (surge) ทิศทางเดียวซึ่งเกิดจากการปล่อยพลังงานไฟฟ้าผ่านวงจรอิมพีแดนซ์

2.7 แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวอิมพัลส์ (impulse flashover voltage) หมายถึง ค่าสูงสุดของคลื่นอิมพัลส์ ซึ่งในภาวะที่กำหนดทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวผ่านตัวกลางที่ล้อมรอบ

2.8 แรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุ (radio-influence voltage) หมายถึง แรงดันไฟฟ้าความถี่วิทยุที่เกิดขึ้นจากการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ความถี่ 50 ± 2.5 เฮิร์ตซ์ ในภาวะที่กำหนด

2.9 แรงดันไฟฟ้าเจาะผ่าน (puncture voltage) หมายถึง ค่ารูตมีนสแควร์ของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งในภาวะที่กำหนดจะเกิดการปล่อยประจุทำลายทะลุผ่านลูกถ้วย

2.10 ความแข็งแรงร่วมทางกลและทางไฟฟ้า (combined mechanical and electrical strength) หมายถึง โหลดทางกลที่ทำให้ลุดด้วยไม่สามารถใช้งานทางกลหรือทางไฟฟ้าได้ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าและความเค้นทางกลเข้าพร้อมๆ กัน

2.11 ความแข็งแรงต่อการกระทบทางกล (mechanical impact strength) หมายถึง แรงกระแทกในภาวะที่กำหนดซึ่งลุดด้วยสามารถทนได้โดยไม่เสียหาย

2.12 ความแข็งแรงต่อโหลดเวลา (time-load withstand strength) หมายถึง โหลดทางกลในภาวะที่กำหนด สามารถป้อนเข้าอย่างต่อเนื่อง โดยไม่ทำให้ลุดด้วยเสียหายทางกลหรือทางไฟฟ้า

3. แบบ รูปร่าง มิติ และพิถีค

3.1 ลุดด้วยแขวนมี 6 แบบ คือ

3.1.1 แบบ 52-1

3.1.2 แบบ 52-2

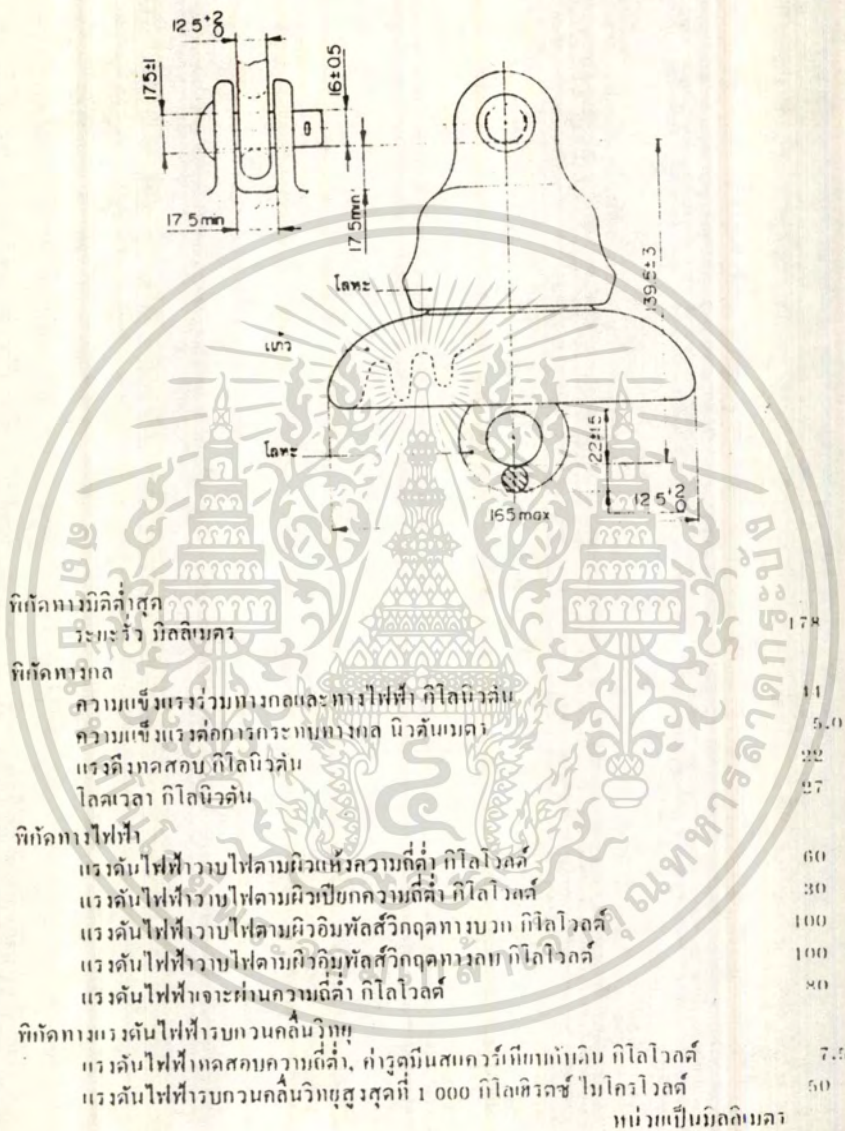
3.1.3 แบบ 52-3

3.1.4 แบบ 52-4

3.1.5 แบบ 52-5

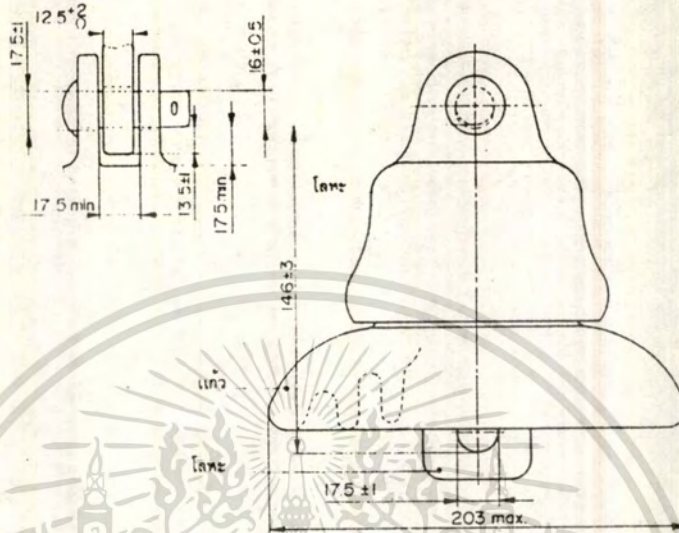
3.1.6 แบบ 52-8

3.2 รูปร่าง มิติ และพิถีคทั้ง 6 แบบ ให้เป็นไปตามรูปที่ ผ.1 ถึงรูปที่ ผ.6 ตามลำดับ



รูปที่ ผ.1 ลูกถ้วยแบบ S2-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

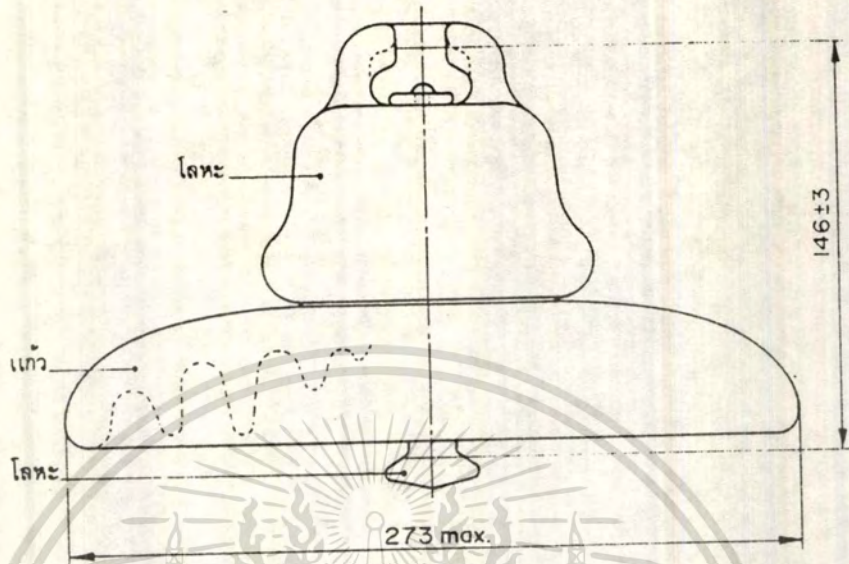


พิกัดหามิตติค่าสุด	210
ระยะรั้ว มิถิลลิเมตร	
พิกัดหามิตติ	
ความเข้มแรงแรร่วมทางกลและ ขาวไฟฟ้า กิโลวัตต์	67
ความเข้มแรงแค่อการระรุมทางกล นิวตันเมตร	5.5
แรงแค่อการระรุมทางกล กิโลวัตต์	33.5
โกลเวลา มิถิลลิเมตร	44
พิกัดหามิตติ	
แรงแค่อการระรุมทางกลและ ขาวไฟฟ้า กิโลวัตต์	65
แรงแค่อการระรุมทางกลและ ขาวไฟฟ้า กิโลวัตต์	35
แรงแค่อการระรุมทางกลและ ขาวไฟฟ้า กิโลวัตต์	115
แรงแค่อการระรุมทางกลและ ขาวไฟฟ้า กิโลวัตต์	115
แรงแค่อการระรุมทางกลและ ขาวไฟฟ้า กิโลวัตต์	90
พิกัดหามิตติ	
แรงแค่อการระรุมทางกลและ ขาวไฟฟ้า กิโลวัตต์	7.5
แรงแค่อการระรุมทางกลและ ขาวไฟฟ้า กิโลวัตต์	50

หน่วยเป็นมิลลิเมตร

รูปที่ ผ.2 ลูกถ้วยแบบ 52-2

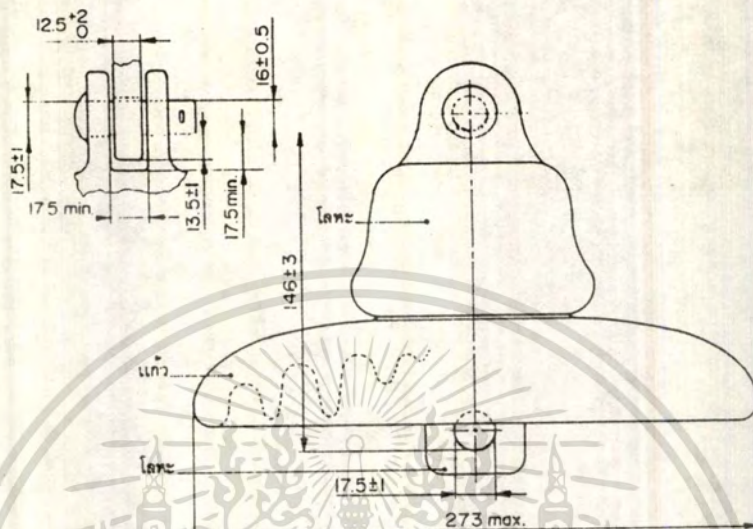
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



พิกัดทางมิติสูงสุด	292
ระยะรั้ว มิลลิเมตร	
พิกัดทางกล	
ความเข้มแรงรวมทางกลและทางไฟฟ้า กิโลวัตต์	67
ความเข้มแรงต่อการกระทบทางกล นิวตันเมตร	6.0
แรงดึงทดสอบ กิโลนิวตัน	33.5
โหลดเวลา กิโลนิวตัน	41
พิกัดทางไฟฟ้า	
แรงดันไฟฟ้าวาบไฟลมผิวแห้งความถี่ต่ำ กิโลโวลต์	80
แรงดันไฟฟ้าวาบไฟลมผิวเปียกความถี่ต่ำ กิโลโวลต์	50
แรงดันไฟฟ้าวาบไฟลมผิวอิมพัลส์วิกฤตทางบวก กิโลโวลต์	125
แรงดันไฟฟ้าวาบไฟลมผิวอิมพัลส์วิกฤตทางลบ กิโลโวลต์	130
แรงดันไฟฟ้าเจาะผ่านความถี่ต่ำ กิโลโวลต์	110
พิกัดทางแรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุ	
แรงดันไฟฟ้าทดสอบความถี่ต่ำ ค่ารูตมีนสแควร์เทียบกับดิน กิโลโวลต์	10
แรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุสูงสุดที่ 1 000 กิโลเฮิรตซ์ ไมโครโวลต์	50
หน่วยเป็นมิลลิเมตร	

รูปที่ ผ.3 ลูกถ้วยแบบ 52-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

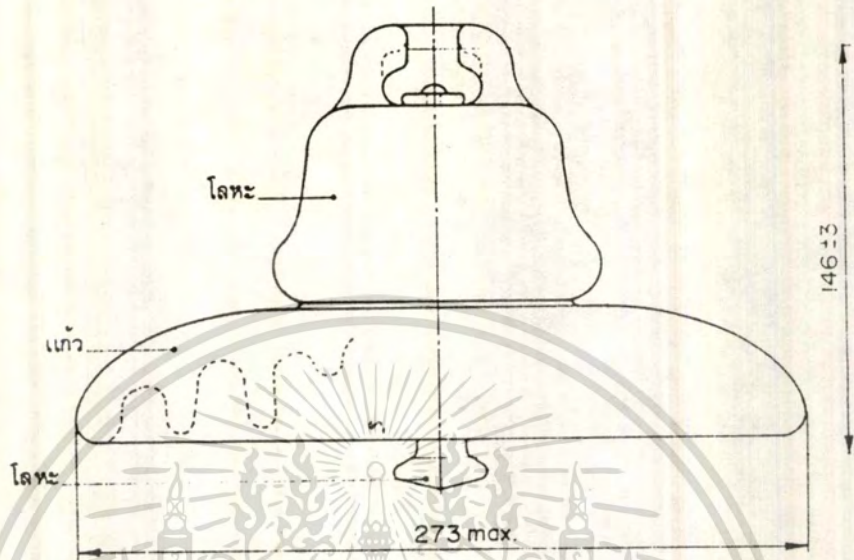


ชนิดทางมีค่าสุด	292
ระบะ จิว มิลลิเมตร	
ที่นิยมบงก	
ความแข็งแรงรวมทั้งมวลและ ทางไฟฟ้า กิโลวัตตัน	67
ความแข็งแรงต่อกราะ ทนทรงกล นิวตันเมตร	6.0
แรงดึงทดสอบ กิโลวัตตัน	33.5
โวลเวลา กิโลวัตตัน	44
พิถัตนงไฟฟ้า	
แรงดันไฟฟ้าวบไฟตามทิวแบ่งความดีค่า กิโลโวลต์	80
แรงดันไฟฟ้าวบไฟตามทิวเปกความดีค่า กิโลโวลต์	50
แรงดันไฟฟ้าวบไฟตามทิวอิมพัลส์วักตุตทางบวก กิโลโวลต์	125
แรงดันไฟฟ้าวบไฟตามทิวอิมพัลส์วักตุตทางลบ กิโลโวลต์	130
แรงดันไฟฟ้าเงระผ่านความดีค่า กิโลโวลต์	110
พิถัตทงแรงดันไฟฟ้ารบกวนกลันวัญ	
แรงดันไฟฟ้าทดสอบความดีค่า ค่าวคมีนสแควร์เทียบกับดิน กิโลโวลต์	10
แรงดันไฟฟ้ารบกวนกลันวัญสูงสุดที่ 1.000 กิโลโวลต์รช ไมโครโวลต์	50

หน่วยเป็นมิลลิเมตร

รูปที่ ผ.4 ลูกถ้วยแบบ 52-4

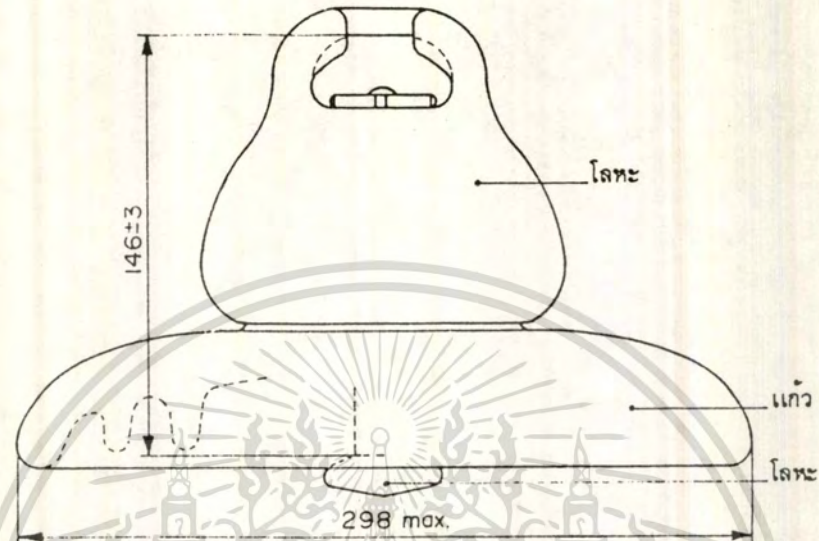
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



พิกัดทางมิติสูงสุด	279
ระยะรั้ว มิติเมตร	
พิกัดทางมิติ	
ความแข็งแรงร่วมทางกลและทางไฟฟ้า กิโลวัตต์	111
ความแข็งแรงต่อการกระทบทางกล นิวตันเมตร	7.0
แรงดึงทดสอบ กิโลนิวตัน	55.5
โศกเวลา กิโลนิวตัน	67
พิกัดทางไฟฟ้า	
แรงดันไฟฟ้าวามไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำ กิโลโวลต์	80
แรงดันไฟฟ้าวามไฟตามผิวเปียกความถี่ต่ำ กิโลโวลต์	50
แรงดันไฟฟ้าวามไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตทางบวก กิโลโวลต์	125
แรงดันไฟฟ้าวามไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตทางลบ กิโลโวลต์	130
แรงดันไฟฟ้าเจาะผ่านความถี่ต่ำ กิโลโวลต์	110
พิกัดทางแรงดันไฟฟ้าบริเวณคลื่นวิทยุ	
แรงดันไฟฟ้าทดสอบความถี่ต่ำ, ค่าจุดมีนสแควร์เบียมกับดิน กิโลโวลต์	10
แรงดันไฟฟ้าบริเวณคลื่นวิทยุสูงสุดที่ 1000 กิโลวัตต์ ไซเบอร์โวลต์	50
หน่วยเป็นมิลลิเมตร	

รูปที่ ผ.5 ลูกถ้วย 52-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



พื้นที่ทางมิติตำสุด	279
ระยะรั้ว มิลลิเมตร	
พื้นที่บนยอด	180
ความเข้มแรงร่วมทางลมและทางไฟฟ้า กิโลวัตต์	10
ความเข้มแรงต่อการกะพริบหมงกล นิวตันเมตร	80
แรงดึงทดสอบ กิโลวัตต์	107
โลกเวลา กิโลวัตต์	
พื้นที่แผงไฟฟ้า	
แรงดันไฟฟ้าราบไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำ กิโลวัตต์	80
แรงดันไฟฟ้าราบไฟตามผิวเปียกความถี่ต่ำ กิโลวัตต์	50
แรงดันไฟฟ้าราบไฟตามผิวอิมพัลส์สวิตชิ่งทุกทางบวก กิโลวัตต์	125
แรงดันไฟฟ้าราบไฟตามผิวอิมพัลส์สวิตชิ่งทุกทางลบ กิโลวัตต์	130
แรงดันไฟฟ้าเจาะผ่านความถี่ต่ำ กิโลวัตต์	110
พื้นที่กำหนดแรงดันไฟฟ้ารวมกวนคลื่นวิทยุ	
แรงดันไฟฟ้าทดสอบความถี่ต่ำ, ค่ารูคมีนัสแควร์เทียบกับดิน กิโลวัตต์	10
แรงดันไฟฟ้ารวมกวนคลื่นวิทยุสูงที่มี 1 ๐๐๐ กิโลเฮิรตซ์ ไมโครวัตต์	50
หน่วยเป็นมิลลิเมตร	

รูปที่ ๕.6 ลูกถ้วยแบบ 52-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2 ลูกถ้วยแขวนปอร์ซเลน

1. ขอบข่าย

1.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้กำหนด แบบ รูปร่าง มิติและพิถีค ส่วนประกอบ และการทำ คุณสมบัติที่โครงการ การบรรจุ การทำเครื่องหมาย การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน และการทดสอบ

1.2 ลูกถ้วยตามมาตรฐานนี้ต้องเป็นลูกถ้วยเนื้อปอร์ซเลน (porcelain) ซึ่งใช้กับสายส่งกำลังเหนือดินไฟฟ้ากระแสสลับ และอาจปรับปรุง เพื่อนำไปใช้กับสายส่งกำลังเหนือดินไฟฟ้ากระแสตรงได้ด้วย

1.3 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ ควบคุมถึงลูกถ้วยแขวนซึ่งใช้งานเกี่ยวกับการจ่ายกำลังไฟฟ้าเท่านั้น

2. บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ มีดังต่อไปนี้

2.1 ลูกถ้วย (insulator) หมายถึง ฉนวนที่ใช้ยึดตัวนำไฟฟ้า

2.2 ลูกถ้วยแขวน (suspension insulator) หมายถึง ลูกถ้วยซึ่งมีส่วนโลหะ (hardware) ประกอบติดอยู่ต่อเพื่อให้การยึดตัวนำไฟฟ้าสามารถแกว่งตัวได้

2.3 ระยะรั้ว (leakage distance) หมายถึง ผลรวมของระยะที่สั้นที่สุดที่วัดไปตามผิวฉนวนระหว่างส่วนที่นำไฟฟ้าของลูกถ้วยที่ใช้ในการทดสอบการวาวไฟตามผิวแห้ง

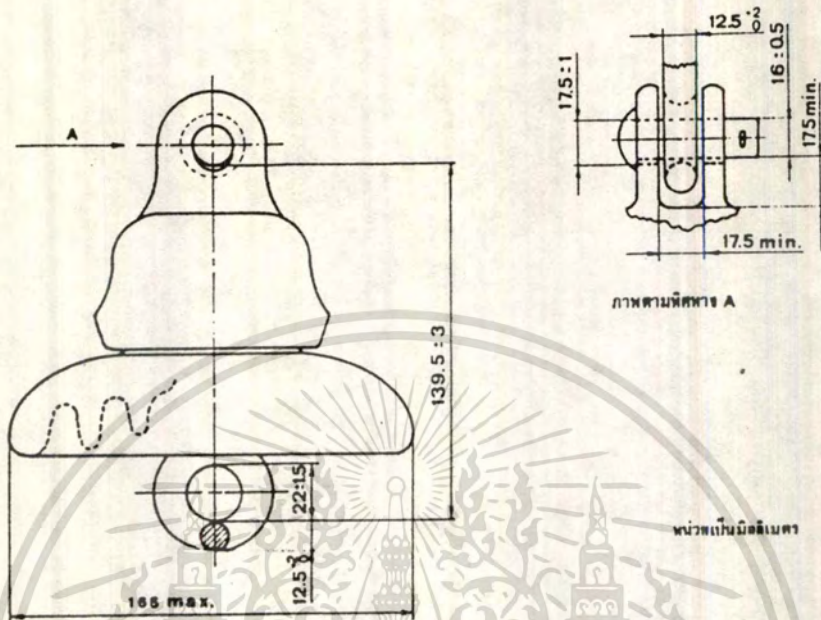
2.4 ความถี่ต่ำ หมายถึง ความถี่ตั้งแต่ 15 ถึง 100 เฮิร์ตซ์

2.5 แรงดันไฟฟ้าวาวไฟตามผิวความถี่ต่ำ (low frequency flashover voltage) หมายถึง ค่ารูตมีนสแควร์ (root-mean-square value) ของแรงดันไฟฟ้าความถี่ต่ำซึ่งในภาวะที่กำหนดจะเกิดการปล่อยประจุทำลายผ่านตัวกลางที่ล้อมรอบ

2.6 คลื่นอิมพัลส์ (impulse wave) หมายถึง เสรีจ (surge) ทิศทางเดียวซึ่งเกิดจากการปล่อยพลังงานไฟฟ้าผ่านวงจรมีพีแค็นซ์

2.7 แรงดันไฟฟ้าวาวไฟตามผิวอิมพัลส์ (impulse flashover voltage) หมายถึง ค่าสูงสุดของคลื่นอิมพัลส์ ซึ่งในภาวะที่กำหนดทำให้เกิดการวาวไฟตามผิวผ่านตัวกลางที่ล้อมรอบ

2.8 แรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุ (radio-influence voltage) หมายถึง แรงดันไฟฟ้าความถี่วิทยุที่เกิดขึ้นจากการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ความถี่ 50 ± 2.5 เฮิร์ตซ์ ในภาวะที่กำหนด

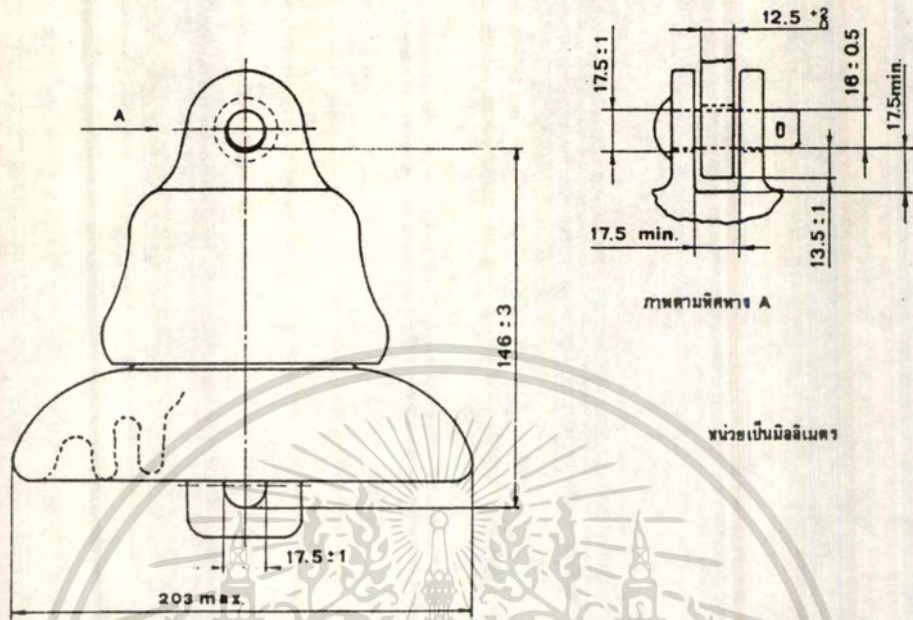


หน่วยเป็นมิลลิเมตร

ชนิดทางอิเล็กทรอนิกส์	178
ระยะวีว มิติเมตร	
ชนิดทางกล	
ความแข็งแรงรวมทั้งทางกลและทางไฟฟ้า กิโลวัตต์	44.48
ความแข็งแรงต่อการกระแทกทางกล เซนติเมตรวินาที	507.37
ความทนแรงดึง (tension proof) กิโลวัตต์	22.24
โลกเวลา กิโลวัตต์	26.69
ชนิดทางไฟฟ้า	
แรงดันไฟฟ้าวาวไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำ กิโลวัตต์	60
แรงดันไฟฟ้าวาวไฟตามผิวเปียกความถี่ต่ำ กิโลวัตต์	30
แรงดันไฟฟ้าวาวไฟตามผิวสัมผัสวัตถุทางบวก กิโลวัตต์	100
แรงดันไฟฟ้าวาวไฟตามผิวสัมผัสวัตถุทางลบ กิโลวัตต์	100
แรงดันไฟฟ้าเจาะผ่านความถี่ต่ำ กิโลวัตต์	80
ชนิดทางแรงดันไฟฟ้าบริเวณคลื่นวิทยุ	
แรงดันไฟฟ้าทดสอบความถี่ต่ำ, ค่าจุดเริ่มต้นเปรียบเทียบกับคืน กิโลวัตต์	7.5
แรงดันไฟฟ้าบริเวณคลื่นวิทยุสูงสุดที่ 1 000 กิโลเฮิรตซ์ ไมโครวัตต์	50

รูปที่ ผ.7 ลูกถ้วยแบบ ก (แบบ 52-1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

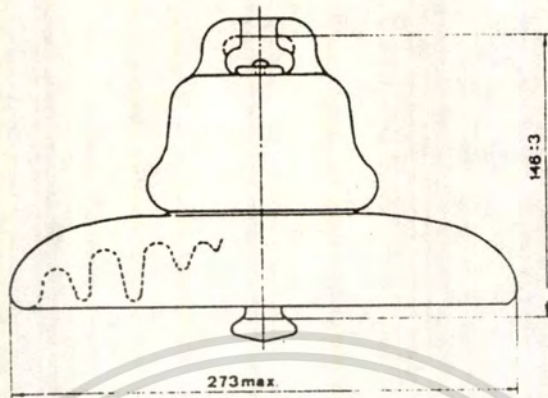


หน่วยเป็นมิลลิเมตร

สีกคทางมีสีดำสุด	209.5
ระยะหัว มีฉลิมเคา	
สีกคทางกลด	
ความแข็งแรงร่วมทางกลและทางไฟฟ้า กโโลนิวสัน	66.72
ความแข็งแรงต่อการกระทบทางกล เช่นเคมีเคานิวสัน	564.85
ความทนแรงคิง กโโลนิวสัน	33.36
โลคเวลา กโโลนิวสัน	44.48
สีกคทางไฟฟ้า	
แรงคั้นไฟฟ้าราบไฟตามผิวแห้งความดีค่า กโโลนิวสัน	65
แรงคั้นไฟฟ้าราบไฟตามผิวเปียกความดีค่า กโโลนิวสัน	35
แรงคั้นไฟฟ้าราบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตทางบวค กโโลนิวสัน	115
แรงคั้นไฟฟ้าราบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตทางลบ กโโลนิวสัน	115
แรงคั้นไฟฟ้าเจาะผ่านความดีค่า กโโลนิวสัน	90
• สีกคทางแรงคั้นไฟฟ้ารบกวนคณันวิหยุ	
แรงคั้นไฟฟ้าทดสอบความดีค่า,ค่ารูคมีนสแควร์เทียบกับคั้น กโโลนิวสัน	7.5
แรงคั้นไฟฟ้ารบกวนคณันวิหยุสูงคสุดที่ 1 000 กโโลแอรต์ซ ไมโครโวลค	50

รูปที่ ผ.8 ลูกถ้วยแขวนแบบ ข (แบบ 52-2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่มีการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

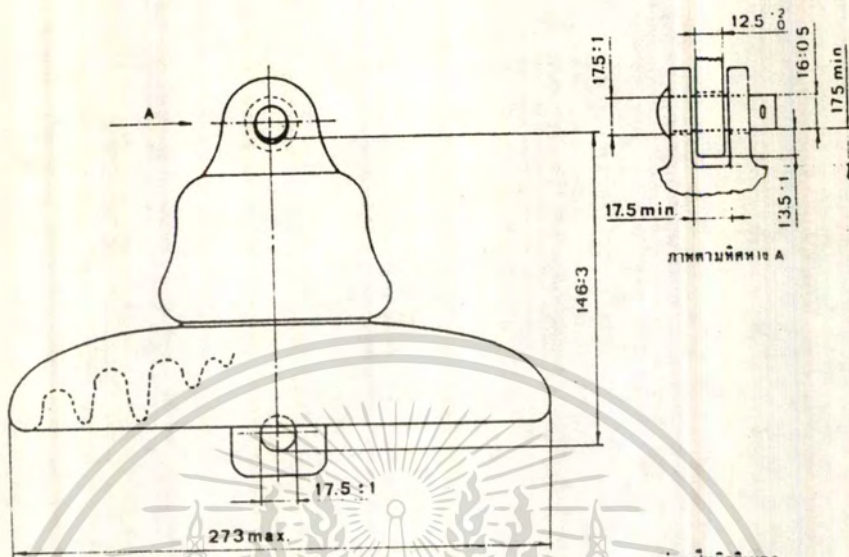


หน่วยเป็นมิลลิเมตร

ขีดทางมิติค่าสุด		
ระยะรั้ว มิลลิเมตร		292
ขีดทางกล		
ความแข็งแรงร่วมทางกลและทางไฟฟ้า กิโลนิวตัน		66.72
ความแข็งแรงต่อการกระทบทางกล เซนติเมตรนิวตัน		621.34
ความทนแรงดึง กิโลนิวตัน		33.36
โหลดเวลา กิโลนิวตัน		44.48
ขีดทางไฟฟ้า		
แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำ กิโลโวลต์		80
แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวเปียกความถี่ต่ำ กิโลโวลต์		50
แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตทางบวก กิโลโวลต์		125
แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตทางลบ กิโลโวลต์		130
แรงดันไฟฟ้าเจาะผ่านความถี่ต่ำ กิโลโวลต์		110
ขีดทางแรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุ		
แรงดันไฟฟ้าทดสอบความถี่ต่ำ, ค่าความถี่สแควร์เทียบกับดิน กิโลโวลต์		10
แรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุสูงสุดที่ 1 000 กิโลเฮิร์ตซ์ ไมโครโวลต์		50

รูปที่ ผ.9 ลูกถ้วยแขวนแบบ ค (แบบ 52-3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

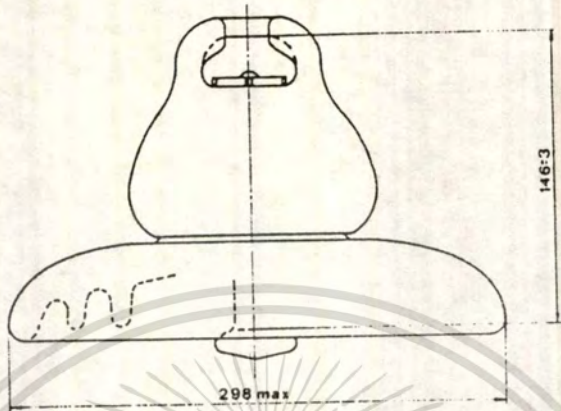


หน่วยเป็นมิลลิเมตร

ศักดิ์ทางมิติค่าสุด	292
ระยะรั้ว มิลลิเมตร	
ศักดิ์ทางกล	
ความแข็งแรงร่วมทางกลและทางไฟฟ้า กิโลวัตต์	66.72
ความแข็งแรงต่อการกระทบทางกล เช่นตี เมตรนิ้วตัน	621.34
ความทนแรงดึง กิโลวัตต์	33.36
โหลดเวลา กิโลวัตต์	44.48
ศักดิ์ทางไฟฟ้า	
แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำ กิโลวัตต์	80
แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวเปียกความถี่ต่ำ กิโลวัตต์	50
แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวสัมผัสวัตถุทางบวก กิโลวัตต์	125
แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวสัมผัสวัตถุทางลบ กิโลวัตต์	130
แรงดันไฟฟ้าเจาะผ่านความถี่ต่ำ กิโลวัตต์	110
ศักดิ์ทางแรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุ	
แรงดันไฟฟ้าทดสอบความถี่ต่ำ, ค่ารวมขึ้นแควร์เทียบกับตัน กิโลวัตต์	10
แรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุสูงสุดที่ 1 000 กิโลเฮิร์ตซ์ ไมโครวัตต์	50

รูปที่ ศ.10 ลูกถ้วยแขวนแบบ ง (แบบ 52-4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หน่วยเป็นมิลลิเมตร

ศักย์ทางมีศักย์สุด	279.5
ระยะยาว มิลลิเมตร	
ศักย์ทางกล	
ความแข็งแรงรวมทั้งทางกลและทางไฟฟ้า กิโลนิวตัน	160.13
ความแข็งแรงต่อการกระทบทางกล เซนติเมตรนิวตัน	1,016.73
ความทนแรงดึง กิโลนิวตัน	80.06
โลกเวลา กิโลนิวตัน	106.75
ศักย์ทางไฟฟ้า	
แรงดันไฟฟ้าวามไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำ กิโลโวลต์	80
แรงดันไฟฟ้าวามไฟตามผิวเปียกความถี่ต่ำ กิโลโวลต์	50
แรงดันไฟฟ้าวามไฟตามผิวสัมผัสวัตถุทางบวก กิโลโวลต์	125
แรงดันไฟฟ้าวามไฟตามผิวสัมผัสวัตถุทางลบ กิโลโวลต์	130
แรงดันไฟฟ้าเจาะผ่านความถี่ต่ำ กิโลโวลต์	110
ศักย์ทางแรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุ	
แรงดันไฟฟ้าทดสอบความถี่ต่ำ, ค่าวัดมีนสแควร์เทียบกับดิน กิโลโวลต์	10
แรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุสูงสุดที่ 1 000 กิโลเฮิร์ตซ์ ไมโครโวลต์	50

รูปที่ ผ.11 ลูกถ้วยแขวนแบบ จ (แบบ 52-8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข . ตารางผลการทดสอบ

ภาคผนวก ข.1

การทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์(C_x) และ ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก($\tan\delta$) ของ
ลูกถ้วยแขวน แบบต่างๆ ณ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

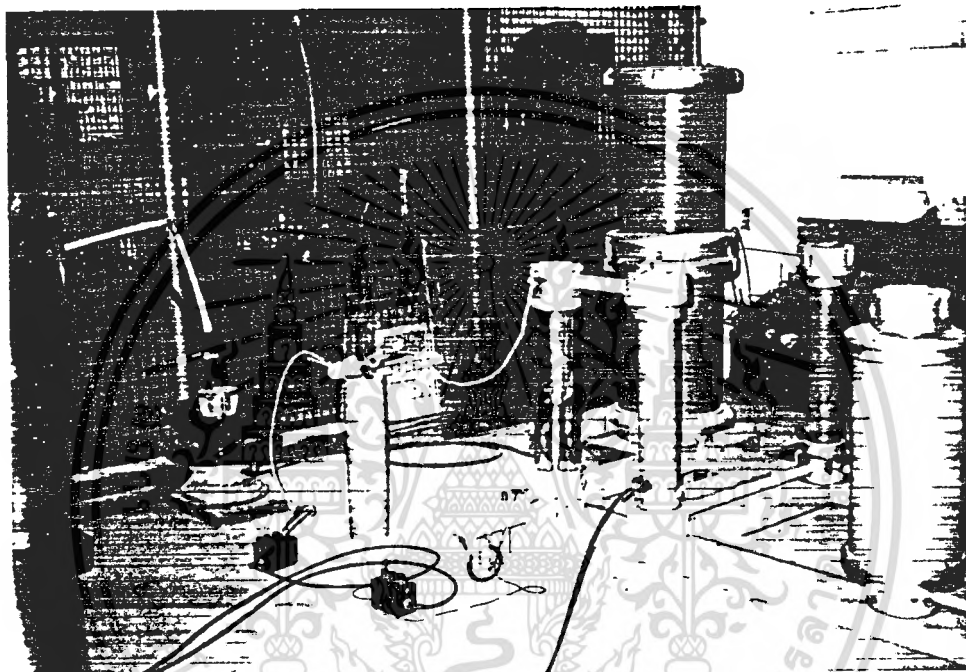
ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์(C_x) และ ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก($\tan\delta$)
ของลูกถ้วยแขวน แบบต่างๆ

หม้อแปลงที่ใช้ป้อนแรงดันทดสอบแก่ลูกถ้วยเป็นหม้อแปลงกระแสสลับ ความถี่ 50 Hz ขนาด 50 kV 20 kVA โวลเตจที่ใช้ป้อนแรงดันทดสอบแก่ลูกถ้วยจะถูกวัดด้วย คาปาซิเตอร์โวลเตจดิไวเดอร์ (capacitor voltage divider) ขนาด 100 pF 100 kV ค่าความแม่นยำ $\pm 1\%$ เครื่องมือวัดค่าคาปาซิแตนซ์(C_x) และ ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก($\tan\delta$) ของ Tettex รุ่น 2805 ค่าความแม่นยำ $\pm 1 - 2\%$ คาปาซิเตอร์มาตรฐานเป็นชนิดอัดก๊าซ ซัลเฟอร์ - เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6) ขนาด 36.8 pF 120/132 kV

สภาวะแวดล้อมที่ทดสอบ (Ambient conditions) :

ความดันอากาศ	762.0	mm.Hg
อุณหภูมิ	32.0	$^{\circ}C$
ความชื้นสัมพัทธ์	59	%

ลูกถ้วยที่ใช้ทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์(C_x) และ ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก($\tan\delta$) มี 6 แบบ ซึ่ง 3 แบบ คือ ลูกถ้วยแขวนแก้วเหนียว ลูกถ้วยแขวนสารปอร์ซเลนแข็ง สีขาว ลูกถ้วยแขวนสารปอร์ซเลนแข็ง สีน้ำตาลขนาดกลาง ค่าโวลเตจที่ป้อนให้แก่ลูกถ้วยที่ใช้ทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์(C_x) และ ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก($\tan\delta$) ป้อน 5 ค่า คือ 1, 2, 3, 4, 5 kV อีก 3 แบบที่เหลือคือ ลูกถ้วยแขวนสารเรซินสีขาว ลูกถ้วยแขวนสารเรซินสีเหลือง ลูกถ้วยแขวนสารปอร์ซเลนแข็ง สีน้ำตาลขนาดเล็ก ค่าโวลเตจที่ป้อนให้แก่ลูกถ้วยที่ใช้ทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์(C_x) และ ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก($\tan\delta$) ป้อน 3 ค่า คือ 1, 2, 3 kV



รูป ผ.12 รูปการทดลองวัดค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กทริกของ
 ลูกถ้วยฉนวนที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โวลเตจที่ใช้ทดสอบ (kV)	ค่าคาปาซิแตนซ์(C_x) : (pF)	ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสีย ไดอิเล็กตริก($\tan\delta$)
1	42.147	0.09078
2	42.228	0.08912
3	42.217	0.08892
4	42.217	0.08892
5	42.261	0.09105

ตารางที่ ผ-1 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์(C_x) และ ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) ของลูกถ้วยแขวนแก้วเหนียว ลูกที่หนึ่ง

โวลเตจที่ใช้ทดสอบ (kV)	ค่าคาปาซิแตนซ์(C_x) : (pF)	ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสีย ไดอิเล็กตริก($\tan\delta$)
1	43.737	0.05364
2	43.741	0.05451
3	43.722	0.05431
4	43.722	0.05480
5	43.733	0.05520

ตารางที่ ผ-2 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์(C_x) และ ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) ลูกถ้วยแขวนสารปอร์ซเลนแข็ง สีขาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โวลเตจที่ใช้ทดสอบ (kV)	ค่าคาปาซิแตนซ์(C_x) : (pF)	ค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก($\tan\delta$)
1	40.045	0.11092
2	39.989	0.11102
3	39.964	0.11133
4	40.056	0.11393
5	39.978	0.11258

ตารางที่ ผ-3 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์(C_x) และ ค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก($\tan\delta$) ของลูกถ้วยแขวนสายปอร์ซเลนแข็ง สีน้ำตาล

โวลเตจที่ใช้ทดสอบ (kV)	ค่าคาปาซิแตนซ์(C_x) : (pF)	ค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก($\tan\delta$)
1	13.061	0.03884
2	13.094	0.03747
3	13.131	0.04185

ตารางที่ ผ-4 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์(C_x) และ ค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก($\tan\delta$) ของลูกถ้วยแขวนสายเรซิน สีเหลือง

โวลเตจที่ใช้ทดสอบ (kV)	ค่าคาปาซิแตนซ์(C_x) : (pF)	ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสีย ไดอิเล็กตริก($\tan\delta$)
1	18.603	0.03585
2	18.632	0.03666
3	18.658	0.03759

ตารางที่ ผ-5 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์(C_x) และ ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก($\tan\delta$) ของลูกถ้วยแขวนสารเรซิน สีขาว

โวลเตจที่ใช้ทดสอบ (kV)	ค่าคาปาซิแตนซ์(C_x) : (pF)	ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสีย ไดอิเล็กตริก($\tan\delta$)
1	32.613	0.05268
2	32.624	0.05275
3	32.627	0.05305

ตารางที่ ผ-6 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์(C_x) และ ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก($\tan\delta$) ของลูกถ้วยแขวนสารปอร์ซเลนแข็ง สีน้ำตาลลูกเล็ก

ภาคผนวก ข.2

การทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์(C_x) และ ค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก($\tan\delta$) ของ ลูกถ้วยแขวน แบบต่างๆ ณ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

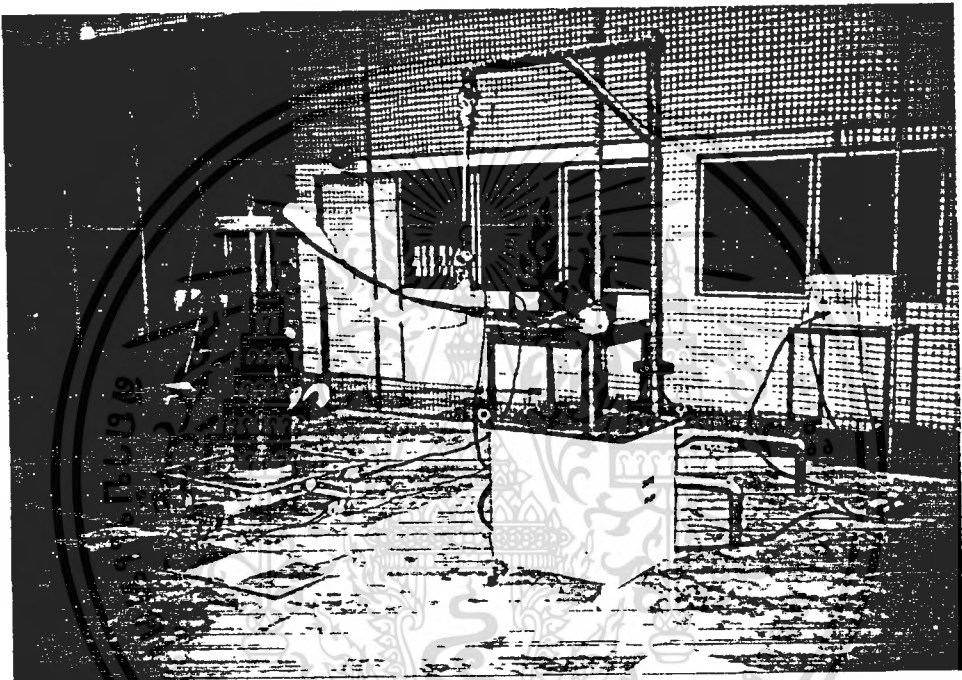
ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์(C_x) และ ค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก($\tan\delta$) ของลูกถ้วยแขวน แบบต่างๆ

หม้อแปลงที่ใช้ป้อนแรงดันทดสอบแก่ลูกถ้วยเป็นหม้อแปลงกระแสลับ ความถี่ 50 Hz ขนาด 100 kV โวลเตจที่ใช้ป้อนแรงดันทดสอบแก่ลูกถ้วยจะถูกวัดและควบคุมด้วยชุดควบคุมที่อัตราส่วนเทิร์นเรโซ (turn ratio) ระหว่างหม้อแปลง 235V/100 kV เครื่องมือวัดค่าคาปาซิแตนซ์(C_x) และ ค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก($\tan\delta$) ของ Tettex รุ่น 2805 ค่าความแม่นยำ $\pm 1 - 2 \%$ คาปาซิเตอร์มาตรฐานเป็นชนิดอ็อกทิก้าซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6) ขนาด 99.91 pF 200 / 240 kV สายเคเบิลที่ต่อจากลูกถ้วยไปยังเครื่องมือวัด และ สายเคเบิลที่ต่อจากคาปาซิเตอร์มาตรฐานไปยังเครื่องมือวัดเป็นสายที่ทำขึ้นเอง (เคเบิล FV-FB type 10 D-FB)

สภาวะแวดล้อมที่ทดสอบ (Ambient conditions) :

อุณหภูมิ	33.0	°C
ความชื้นสัมพัทธ์	57	%

ลูกถ้วยที่ใช้ทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์(C_x) และ ค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก($\tan\delta$) มี 6 แบบ ซึ่ง 3 แบบแรก คือ ลูกถ้วยแขวนแก้วเหนียว ลูกถ้วยแขวนสารปอร์ซเลนแข็ง สีขาว ลูกถ้วยแขวนสารปอร์ซเลนแข็ง สีน้ำตาล ค่าโวลเตจที่ป้อนให้แก่ลูกถ้วยที่ใช้ทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์(C_x) และ ค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก($\tan\delta$) ป้อน 8 ค่า คือ 0.5 , 1 , 1.5 , 2 , 2.5 , 3 , 4 , 5 kV อีก 3 แบบที่เหลือคือ ลูกถ้วยแขวนสารเรซินสีขาว ลูกถ้วยแขวนสารเรซินสีเหลือง ลูกถ้วยแขวนสารปอร์ซเลนแข็ง สีน้ำตาลขนาดเล็ก ค่าโวลเตจที่ป้อนให้แก่ลูกถ้วยที่ใช้ทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์(C_x) และ ค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก($\tan\delta$) ป้อน 3 ค่า คือ 1 , 2 , 3 kV



รูป ผ.13 รูปการทดลองวัดค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียของ
 ลูกถ้วยฉนวนที่ห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูงสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาด
 กระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โวลเตจที่ใช้ทดสอบ (kV)	ค่าคาปาซิแตนซ์(C_x) : (pF)	ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสีย ไดอิเล็กตริก($\tan\delta$)
0.5	44.83	0.07721
1	44.90	0.07721
1.5	44.93	0.07823
2	44.93	0.07729
2.5	44.93	0.07620
3	44.93	0.07608
4	44.94	0.07470
5	44.98	0.07460

ตารางที่ ผ-7 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์(C_x) และ ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก($\tan\delta$) ของลูกถ้วยแขวน แก้วเหนียว ลูกที่หนึ่ง

โวลเตจที่ใช้ทดสอบ (kV)	ค่าคาปาซิแตนซ์(C_x) : (pF)	ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสีย ไดอิเล็กตริก($\tan\delta$)
0.5	45.32	0.07605
1	45.35	0.07615
1.5	45.38	0.07700
2	45.45	0.07725
2.5	45.43	0.07616
3	45.45	0.07621
4	45.47	0.07588
5	45.48	0.07535

ตารางที่ ผ-8 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์(C_x) และ ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก($\tan\delta$) ของลูกถ้วยแขวน แก้วเหนียว ลูกที่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โวลเตจที่ใช้ทดสอบ (kV)	ค่าคาปาซิแตนซ์(C_x) : (pF)	ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสีย ไดอิเล็กตริก($\tan\delta$)
0.5	45.80	0.12305
1	45.61	0.12357
1.5	45.45	0.12384
2	45.30	0.12378
2.5	45.30	0.12378
3	45.34	0.12486
4	45.50	0.12577
5	45.47	0.12610

ตารางที่ ผ-9 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์(C_x) และ ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก($\tan\delta$) ของลูกถ้วยแขวน ปอร์ซเลนสีน้ำตาล

โวลเตจที่ใช้ทดสอบ (kV)	ค่าคาปาซิเตอร์(C_x) : (pF)	ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสีย ไดอิเล็กตริก($\tan\delta$)
0.5	48.23	0.05406
1	48.12	0.05510
1.5	48.12	0.05400
2	48.10	0.05400
2.5	48.10	0.05442
3	480.5	0.05362
4	48.04	0.05349
5	48.04	0.05388

ตารางที่ ผ-10 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิเตอร์(C_x) และ ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก($\tan\delta$) ของลูกถ้วยแขวนสารผสมปอร์ซเลนแข็ง สีขาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โวลเตจที่ใช้ทดสอบ (kV)	ค่าคาปาซิแตนซ์(C_x) : (pF)	ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสีย ไดอิเล็กตริก($\tan\delta$)
1	15.45	0.04850
2	15.42	0.04980
3	15.45	0.05326

ตารางที่ ผ-11 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิเตอร์(C_x) และ ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก($\tan\delta$) ของลูกถ้วยแขวนสารเรซินสีเหลือง

โวลเตจที่ใช้ทดสอบ (kV)	ค่าคาปาซิแตนซ์(C_x) : (pF)	ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสีย ไดอิเล็กตริก($\tan\delta$)
1	21.45	0.05429
2	21.45	0.05450
3	21.50	0.05540

ตารางที่ ผ-12 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิเตอร์(C_x) และ ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก($\tan\delta$) ของลูกถ้วยแขวนสารเรซินสีขาว

โวลเตจที่ใช้ทดสอบ (kV)	ค่าคาปาซิแตนซ์(C_x) : (pF)	ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสีย ไดอิเล็กตริก($\tan\delta$)
1	36.35	0.0701
2	36.35	0.0725
3	36.40	0.0738

ตารางที่ ผ-13 ผลการทดสอบวัดค่าคาปาซิเตอร์(C_x) และ ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก($\tan\delta$) ของลูกถ้วยแขวนสารพอร์ซเลนแข็งสีน้ำตาลลูกเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค. คุณสมบัติของฉนวนชนิดต่างๆ

PROPERTIES OF INSULATION AND JACKET MATERIALS
GENERAL COMPARISON DATA

Material	Designation	Chemical structure	Density	Hardness (Shore)	Max. Operating Temp.	Emergency Temp. Rating	Short Circuit Temp. Rating	Brittleness Temp.	Softening Temp.	Thermal Expansion	Thermal Conductivity	Specific Heat	Tensile Strength	Elongation	Abrasion Resistance	Voltage Breakdown	Volume Resistivity	Dielectric Constant	Dissipation Factor (Tan δ)	Weathering	Ozone Resistance	Flame Resistance	Track Resistance	Water Resistance	Acid Resistance	Alkali Resistance
Polyvinyl Chloride	PVC	$\text{-(CH}_2\text{-CH-)}_n\text{-Cl}$	1.3-1.5	D30-90	60	85	120	-40	120-140	$0.7-2.5 \times 10^{-4}$	$3.0-4.0 \times 10^{-4}$	0.3-0.5	1.5-2.5	200-400	Excellent	20-30	$10^{12}-10^{15}$	5-7	0.1-0.03	Good	Excellent	Self-Extinguish	Inferior	Fair	Excellent	Excellent
Low Density Polyethylene	PE	$\text{-(CH}_2\text{-CH}_2\text{)}_n\text{-}$	0.91-0.93	D45-60	75	90	150	<-70	100-115	$1.6-1.8 \times 10^{-4}$	8.0×10^{-4}	0.55	1.5-2.0	300-700	Good	30-50	$>10^{16}$	2.2-2.4	<0.0005	Inferior*	Excellent	Burns	Excellent	Good	Excellent	
Cross-linked Polyethylene	XLPE	$\text{-(CH}_2\text{-CH-CH}_2\text{-)}_n\text{-}$ $\text{-(CH}_2\text{-C(CH}_3\text{)=CH-CH}_2\text{-)}_n\text{-}$	0.91-0.93	D45-60	75	90	150	<-70	100-115	$1.6-1.8 \times 10^{-4}$	8.0×10^{-4}	0.55	1.5-2.0	300-700	Excellent	30-50	$>10^{16}$	2.2-2.4	<0.0005	Inferior*	Excellent	Burns	Excellent	Good	Excellent	
Polystyrene	NR	$\text{-(CH}_2\text{-C(CH}_3\text{)=CH-CH}_2\text{-)}_n\text{-}$	0.93-0.94	30-90	60	85	150	-55	-58	1.8×10^{-4}	5.1×10^{-4}	0.52	0.8-3.0	300-700	Good	16-32	10^{15}	3-5	0.3-0.5	Poor	Poor	Burn	Fair	Fair	Good	
Styrene Butadiene Copolymer	SBR	$\text{-(CH}_2\text{-CH=CH-CH}_2\text{-)}_n\text{-}$ $\text{-(CH}_2\text{-CH=CH-CH}_2\text{-)}_m\text{-}$	0.93-0.94	10-95	75	75	30-65	-30	-65	1.8×10^{-4}	5.8×10^{-4}	-	0.4-3.0	100-700	Good	16-30	$10^{14}-10^{15}$	3-5	2-5	Poor	Inferior	Burn	Fair	Fair	Fair	Good
Polychloroprene	CR	$\text{-(CH}_2\text{-C(CH}_2\text{)=CH-CH}_2\text{-)}_n\text{-}$	1.15-1.23	20-90	0	80	-30	-50	-	1.9×10^{-4}	5.6×10^{-4}	0.52	0.7-3.0	400-900	Good	15-25	$10^{10}-10^{12}$	7-10	1.7-4	Excellent	Good	Self-Extinguish	Inferior	Fair	Excellent	
Chlorosulphonated Polyethylene	CSM	$\text{-(CH}_2\text{-CH}_2\text{-)}_n\text{-}$ $\text{-(CH}_2\text{-CH}_2\text{-)}_m\text{-SO}_2\text{Cl}$	1.10	50-90	90	90	-20	-50	-	1.8×10^{-4}	6.3×10^{-4}	-	0.5-2.0	100-500	Good	16-32	$10^{13}-10^{14}$	-	-	Good	Good	Self-Extinguish	Good	Fair	Good	Excellent

ตารางที่ ผ-14 คุณสมบัติของฉนวนชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PROPERTIES OF INSULATION AND JACKET MATERIALS

GENERAL COMPARISON DATA (Continued)

Material	Hexafluoropropylene Vinylidene fluoride Copolymer	Ethylene Propylene Copolymer	EPDM	FPM	Q	Polyorganosiloxane	Polypropylene	Fluoroethylene	Polytetrafluoroethylene	Polychloro Torrifluoroethylene	Polyamide
Designation	EPM, EPDM						PP	PTFE	PCTFE	Nylon (12)	
Chemical Structure	CH_3 $\text{+CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH(CH}_3\text{)-CH}_2\text{-}$	CH_3 $\text{+CH}_2\text{-CH(CH}_3\text{)-CH}_2\text{-}$	CH_3 $\text{+CH}_2\text{-CH(CH}_3\text{)-CH}_2\text{-}$	CF_3 $\text{+CF}_2\text{-CH}_2\text{-CF}_2\text{-}$	CH_3 $\text{+Si(CH}_3\text{)-O-}$	$\text{+CH}_2\text{-CH(CH}_3\text{)-}$	$\text{+CF}_2\text{-CF}_2\text{-}$	$\text{+CF}_2\text{-CF}_2\text{-}$	$\text{+CF}_2\text{-CF}_2\text{-}$	$\text{+NH(CH}_2\text{)}_n\text{-C(=O)-}$	
Density	0.86-0.87	1.82-1.85	1.82-1.85	1.82-1.85	0.97-1.40	0.9-0.915	0.9-0.915	2.13-2.2	2.1	1.01-1.02	
Hardness (Shore)	40-85	60-90	200	180	50-85	80	80	D50-65	180	R100-110	
Max. Operating Temp.	90	200	200	180	180	80	80	280	180	90	
Emergency Temp. Rating								310	<-70	120	
Short Circuit Temp. Rating								<-70	<-70	-70	
Brittleness Temp.	-40--60	-44--60	-44--60	-44--60	70--100	70--100	70--100	<-70	210	170-180	
Softening Temp.								10×10^5	$4.5-7.0 \times 10^5$	12×10^5	
Thermal Expansion								6×10^{-4}	6×10^{-4}	$5.9-8.3 \times 10^{-4}$	
Thermal Conductivity								0.25	0.22	0.62	
Specific Heat								1.4-2.1	2.8-3.5	5.0-6.0	
Tensile Strength	0.5-1.5	1.5-2.5	1.5-2.5	1.5-2.5	0.3-1.0	2.0-4.0	2.0-4.0	200	10-100	180-285	
Elongation	300-700	200-600	200-600	200-600	50-300	200-700	200-700	Excellent	Excellent	Excellent	
Abrasion Resistance	Good	Good	Good	Good	Fair	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	
Voltage Breakdown	20-35	24	24	24	20-40	20-32	20-32	15-30	10-20	20-30	
Volume Resistivity	$10^{14}-10^{15}$	$10^{12}-10^{13}$	$10^{12}-10^{13}$	$10^{12}-10^{13}$	$10^{14}-10^{15}$	$10^{14}-10^{15}$	$10^{14}-10^{15}$	> 10^{18}	1.2×10^{18}	$10^{14}-10^{15}$	
Dielectric Constant	3-5	3-5	3-5	3-5	3-4	2.0-2.2	2.0-2.2	2.0	2.24-2.8	3.5-4.5	
Dissipation Factor (tan δ)	0.2-0.8	0.2-0.8	0.2-0.8	0.2-0.8	0.1-1.0	0.0002-0.0006	0.0002-0.0006	<0.0002	0.0012-0.0036	0.03-0.06	
Weathering	Excellent	Excellent	Excellent	Good	Good*	Inferior	Inferior	Excellent	Excellent	Inferior	
Ozone Resistance	Excellent	Excellent	Excellent	Good	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Good	
Flame Resistance	Excellent	Excellent	Excellent	Self-Extinguish	Excellent	Burn	Burn	No Burn	No Burn	Burn	
Track Resistance	Excellent	Excellent	Excellent	Fair	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Good	
Water Resistance	Good	Excellent	Excellent	Fair	Fair	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	
Acid Resistance	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Good	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Good	
Alkali Resistance	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Fair	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	
Oil Resistance	Inferior	Excellent	Excellent	Excellent	Fair	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	
Solvent Resistance	Poor	Excellent	Excellent	Excellent	Fair	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Good	

* Improved to "good" with mixture of carbon black.

ตารางที่ ๘-14 คุณสมบัติของฉนวนชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลอง

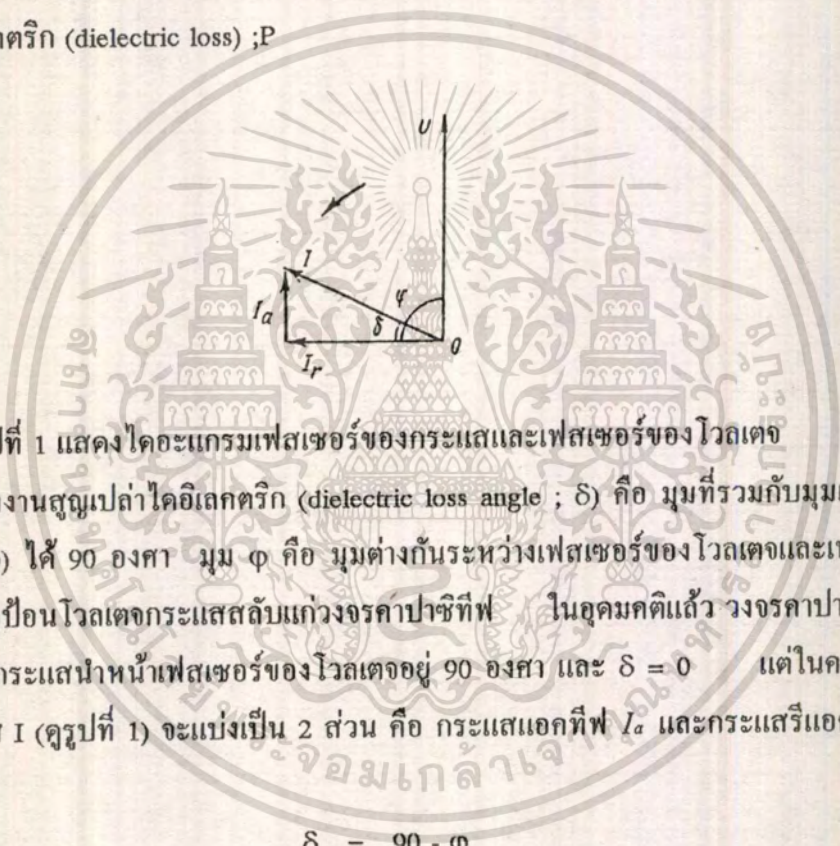
เรื่อง

ค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียในไดอิเล็กตริก

(C-tan δ in Dielectric Material)

ทฤษฎี

ค่าพลังงานที่สูญเสียในไดอิเล็กตริก (dielectric) ภายใต้การป้อนโวลเตจ เรียกว่า พลังงานสูญเสียในไดอิเล็กตริก (dielectric loss) ;P

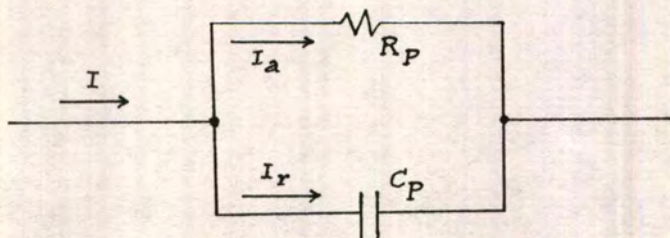


รูปที่ 1 แสดงไดอะแกรมเฟสเซอร์ของกระแสและเฟสเซอร์ของโวลเตจ

มุมพลังงานสูญเสียในไดอิเล็กตริก (dielectric loss angle ; δ) คือ มุมที่รวมกับมุมเฟสของไดอิเล็กตริก (ϕ) ได้ 90 องศา มุม ϕ คือ มุมต่างกันระหว่างเฟสเซอร์ของโวลเตจและเฟสเซอร์ของกระแส เมื่อป้อนโวลเตจกระแสล้าแก่จรรยาปาซิทีฟ ในอุดมคติแล้ว จรรยาปาซิทีฟจะมีเฟสเซอร์ของกระแสหน้าเฟสเซอร์ของโวลเตจอยู่ 90 องศา และ $\delta = 0$ แต่ในความเป็นจริงแล้ว กระแส I (ดูรูปที่ 1) จะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ กระแสแอคทีฟ I_a และกระแสรีแอคทีฟ I_r และจะได้

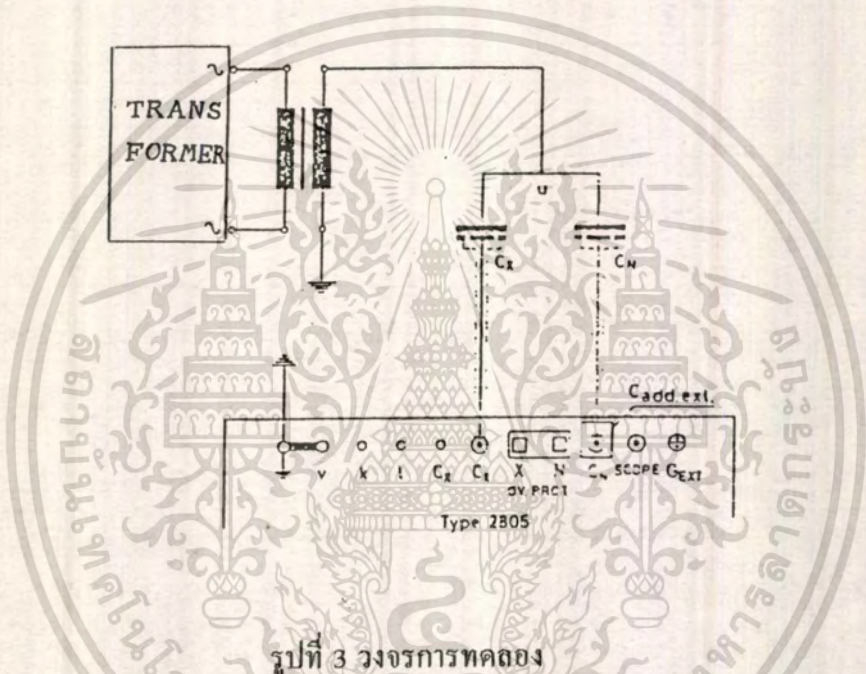
$$\delta = 90 - \phi$$

ไดอิเล็กตริกโดยทั่วไปเมื่อป้อนโวลเตจจะเป็นวงจรเสมือนแบบขนาน (parallel equivalent circuit) วงจรสมมูลจะเป็นแบบขนาน R,C ดังรูปที่ 2



วิธีและขั้นตอนการทดลอง

1. ตรวจสอบไฟเลี้ยงเครื่องมือวัดค่าคาปาซิแตนซ์และค่าพลังงานสูญเสียโคอิเลคตริกของ Tettec รุ่น 2805 ว่ามีหรือไม่โดยปรับไปที่สวิตช์ปรับค่าความแม่นยำการวัด (Sensitivity switch) โดยหมุนไปที่ตำแหน่งเช็คแบตเตอรี่ ถ้ามีไฟเลี้ยงเพียงพอ เข็มบนหน้าปัดอนุลอินดิเคเตอร์จะเคลื่อนไปที่ค่า 100
2. ต่อวงจรดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 วงจรการทดลอง

3. ปรับสวิตช์ค่าแฟกเตอร์ผลคูณของค่าคาปาซิแตนซ์ของวัตถุทดสอบให้อยู่ที่ค่า $I_{max} = 50$ A (ค่ากระแสสูงสุดที่เครื่องมือวัดสามารถทนได้โดยไม่ต้องทำความเสียหายแก่เครื่องมือวัด)
4. ปรับสวิตช์ปรับค่าความแม่นยำการวัดให้มาอยู่ที่สแต็ปแรกซึ่งมีระดับความแม่นยำต่ำสุด (สวิตช์ปรับค่าความแม่นยำมี 7 สแต็ป)
5. ป้อนโวลเตจเข้าวงจรทดสอบที่ค่า 0.5 kV
6. ปรับสวิตช์แฟกเตอร์ตัวคูณค่าคาปาซิแตนซ์ของวัตถุทดสอบและสวิตช์ปรับค่าคาปาซิแตนซ์ของวัสดุทดสอบ รวมทั้งปรับสวิตช์แฟกเตอร์ตัวคูณของแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียโคอิเลคตริกและสวิตช์ปรับค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียโคอิเลคตริกโดยปรับให้เข็มบนอนุลอินดิเคเตอร์ชี้ที่ 0
7. เพิ่มระดับค่าความแม่นยำในการวัดไปยังสแต็ปที่ 2 และปรับค่าคาปาซิแตนซ์และแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียโคอิเลคตริกตามข้อ 6 จนถึงระดับค่าความแม่นยำในการวัดสแต็ปสุดท้าย (สแต็ปที่ 7)
8. บันทึกค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียโคอิเลคตริกที่อ่านได้จากผลการปรับ

จากข้อ 7 ไปคำนวณหาค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียโคอิเลคตริกของวัตถุทดสอบทั้งสี่ อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2 จะได้ว่า

$$I_r = U\omega C_p ; I_a = \frac{U}{R_p}$$

$$\tan \delta = \frac{I_a}{I_r} = \frac{1}{\omega C_p R_p}$$

พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก (dielectric loss) คือ

$$P = U^2 \omega C_p \tan \delta \quad \text{Watt}$$

หรือ

$$P = \frac{U^2}{R_p} \quad \text{Watt}$$

แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$) คือ ค่าแทนเจนต์ของมุม δ เป็นอัตราส่วนระหว่างกระแสแอกทีฟและกระแสรีแอกทีฟ

การทดลอง

การทดลองนี้เป็นการใช้งานของเครื่องวัดค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ โดยจะเน้นเฉพาะการทดลองลูกด้วยฉนวนไฟฟ้า ซึ่งมีความสะดวกที่สุดในการทดลอง โดยที่เครื่องวัดค่าคาปาซิแตนซ์และค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของ Tettex รุ่น 2805 สามารถวัดค่าคาปาซิแตนซ์และค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกได้สะดวกกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวัดแบบอื่นและค่าคาปาซิแตนซ์และค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกที่วัดได้นี้ สามารถนำไปคำนวณหาค่าพลังงานสูญเสียเปล่าในฉนวนได้อีกทั้งนำไปใช้เป็นเกณฑ์ในการเลือกใช้ฉนวนหรือพัฒนาฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ให้ดีขึ้นต่อไปในอนาคต

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องมือวัดค่าคาปาซิแตนซ์และค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของ Tettex รุ่น 2805
2. หม้อแปลงกระแสสลับ 50 Hz 100 kV
3. ชุดควบคุมระดับแรงดันทดสอบซึ่งมีอัตราส่วนเทิร์นเรโซระหว่างหม้อแปลง 235V/100 kV
4. คาปาซิเตอร์มาตรฐานของ Tettex รุ่น 3370 ชนิดอัดก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ ขนาด 99.91 pF 200/240 kV
5. สายเคเบิล FV-FB รุ่น 10D-FB
6. อะแดปเตอร์บ็อกซ์ (Adaptor box) ที่บรรจุคาปาซิเตอร์ภายนอกที่ต่อเพิ่ม
7. ลูกถ้วยฉนวนชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ป้อนโวลเตจเข้าวงจรทดลองที่ค่า 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5 kV แล้วทำตามขั้นตอนข้อ 6-8

ค่าคาปาซิแตนซ์ของวัตถุทดสอบ = ค่าคาปาซิแตนซ์มาตรฐาน x ค่าที่อ่านได้จากการปรับ

$$C_x = C_N \cdot F_{Cx} \cdot C_x (\text{ที่อ่านได้จากการปรับ})$$

ค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของวัตถุทดสอบ = ค่าที่อ่านได้จากการปรับ

$$\tan\delta = F_{\tan\delta} \cdot \tan\delta (\text{ที่อ่านได้จากการปรับ})$$

ผลการทดลอง

ตารางบันทึกผลการทดลองของลูกถ้วยที่ 1

แรงดัน (kV)	ค่า C_x ที่อ่านได้	ค่า $\tan\delta$ ที่อ่านได้
1		
1.5		
2		
2.5		
3		
4		
5		

ตารางบันทึกผลการทดลองของลูกถ้วยที่ 2

แรงดัน (kV)	ค่า C_x ที่อ่านได้	ค่า $\tan\delta$ ที่อ่านได้
1		
1.5		
2		
2.5		
3		

ตารางบันทึกผลการทดลองของลูกถ้วยที่ 3

แรงดัน (kV)	ค่า C_x ที่อ่านได้	ค่า $\tan\delta$ ที่อ่านได้
1		
1.5		
2		
2.5		
3		
4		
5		

ตารางบันทึกผลการทดลองของลูกถ้วยที่ 4

แรงดัน (kV)	ค่า C_x ที่อ่านได้	ค่า $\tan\delta$ ที่อ่านได้
1		
1.5		
2		
2.5		
3		
4		
5		

คำถามท้ายการทดลอง

1. จงเขียนกราฟระหว่างค่า C , $\tan\delta$, $C\tan\delta$ กับ ค่าโวลเตจ (ให้ค่าโวลเตจเป็นแกนนอน)
2. จงคำนวณหาค่าเฉลี่ยของ $C\tan\delta$ ของลูกถ้วยแต่ละลูก
3. จงคำนวณหาค่า dielectric loss ของลูกถ้วยแต่ละลูก
4. จงสรุปและวิจารณ์ผลการทดลองที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดีตามวัตถุประสงค์เพราะได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ศิริวัฒน์ โทธิเวชกุล ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ และคำแนะนำที่มีประโยชน์อย่างมาก รวมทั้งอาจารย์ท่านอื่นๆ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเพื่อนๆ ที่มีส่วนช่วยเหลือให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง ไว้ ณ โอกาสนี้

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. B. Tareev “ Physics of dielectric materials “ , MIR Publishers , Moscow, p. 140-145 , 152-163 , 1975
2. ดร. สำรวย สังข์สะอาด “ วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง “ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , หน้าที่ 131-134 , 153-160 , 307-310 , 2528
3. คู่มือการใช้เครื่องมือวัดค่าคาปาซิแตนซ์ และ แพคเตอร์พลังงานสูญเสีย ไดอิเล็กตริกของ Tettex รุ่น 2805
4. Thai Yazaki technical data and specification for electric wires and cables. , p. 20-22 , 1991
5. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม , “ ลูกถ้วยแขวน : ปอร์ชเลน “ , มอก. 354-2523
6. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม , “ ลูกถ้วยแขวน : แก้วเหนียว “ , มอก. 563-2528

